

Modelo metodológico para el análisis de la dinámica de las estructuras del paisaje forestal en la cuenca endorreica de Pátzcuaro Michoacán (México), por medio de los datos multi espectrales de los satélites

Gonzalo GUZMÁN MATAS¹

10, rue Puccini

94400, Vitry sur Seine, Francia.

Tel. (00331) 46-78-41-12

e-mail: chalo@free.fr

Resumen

La presente comunicación tiene tres objetivos: Primero, presentar un modelo metodológico original para el estudio de la dinámica espacial y temporal de las estructuras que conforman el paisaje forestal de la cuenca endorréica de Patzcuaro (en el Estado mexicano de Michoacan de Ocampo) por medio de los datos multi-espectrales de los satélites Land-Sat y SPOT. Segundo, demostrar la pertinencia y la utilidad de éste tipo de datos, como fuente alternativa, en la obtención y la generación de informaciones cualitativas, para conocer, en tiempo y espacios reales, el estado de la diversidad de los recursos naturales de una región particular. Y tercero, esta comunicación muestra la capacidad de integración, de los resultados obtenidos por la técnicas de la teledetección, en las bases de datos relacionales de los diferentes SIGs.

Palabras clave: Paisaje forestal, teledetección, Patzcuaro, México

Abstract

This paper has three objectives. Firstly, to present an original methodological model that integrates multi-spectral remote sensing data of the Land-Sat and Spot satellites in order to analyse the time and space dynamics of the forest landscape structure of the Patzcuaro hydrologic bassin (in Michoacan State, Mexico). Secondly, to show the relevance and usefulness of such data as an alternative source for generating and obtaining qualitative information with a view to shedding light, in real time and space, on the state and diversity of the natural resources of a forest landscape. Thirdly, to show that the results of this remote sensing analysis can be

¹ **Gonzalo GUZMÁN MATAS:** Doctor en Geografía y Ordenamiento del Territorio de la Universidad de París - IV - Sorbona., exbecario del CONACyT y del SFERE (programa Franco – Mexicano), miembro desde 1992, de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, Capítulo México. Investigador asociado de la UMR 8505 del CNRS, en el Instituto de geografía de la Universidad de París IV Sorbona.

integrated into relational databases.

Keywords: Forest landscape, remote sensing, Patzcuaro, Mexico

Résumé

Cette communication a trois objectifs : Premièrement, présenter un modèle méthodologique original pour étudier la dynamique spatiale et temporaire des structures composant le paysage forestier du bassin endoréique de Patzcuaro (dans l'Etat mexicain de Michoacan d'Ocampo) par les données multispectrales des satellites Land-Sat et Spot. Deuxièmement, démontrer la pertinence et l'utilité de ce type de données, comme source alternative, pour l'obtention et la génération d'informations qualitatives, pour connaître, en temps et en espace réels, l'état et la diversité des ressources naturelles d'une région particulière. Et troisièmement, cette communication montre la capacité d'intégration dans des bases de données relationnelles des résultats obtenus par les techniques de la télédétection.

Mots-clés: Paysage forestier, télédétection, Patzcuaro, Mexique

Introducción

Los estudios del desarrollo forestal en particular, y los del medio ambiente en general, se encuentran al centro de una encrucijada metodológica, que los situa tanto, entre las técnicas de investigación de las ciencias sociales, como de las ciencias naturales. Lo cual explica, en cierta forma, los problemas metodológicos que enfrentamos los investigadores para abordar de manera global éste tipo de sujetos.

Es para colmar ésta deficiencia o ambigüedad metodológica, que desde finales de la década de los años setentas, se han publicado un gran número de investigaciones que tratan de conjugar las técnicas metodológicas de las ciencias sociales con aquellas de las ciencias naturales. Estos esfuerzos metodológicos dieron lugar a un debate epistemológico, con respecto a los enfoques y a los grupos de investigación llamados interdisciplinarios, multidisciplinarios, pluridisciplinarios o aun transdisciplinarios. Los que tenían como meta, encontrar los "puntos" de unión o de articulación, que permitieran abordar de manera global los problemas de la interface entre el hombre y la naturaleza, y que sirvieran como puente de enlace entre los enfoques de las ciencias sociales y los de las ciencias naturales.

De la misma manera, durante la década de los años setentas, el estudio del "paisaje" llamó la atención de espacialistas de diferentes disciplinas, y abrió la puerta a otro largo debate científico. Esta vez, se trataba de definir dicho "vocablo", - de uso común en el léxico de las sociedades occidentales -, con el fin de incorporarlo en tanto que "concepto", en el lenguaje científico y ubicarlo así, dentro de un campo disciplinario particular. Lo cual no ha resultado una tarea fácil. Así pues, podemos notar que, a pesar de que la palabra "paisaje" tiene un origen exterior a la geografía (ya que éste vocablo hace su aparición durante la época del renacimiento, en el lenguaje de los pintores, primero, y luego en el de los poetas), sus cualidades bio-geográficas [espaciales] y sociales [culturales] son indiscutibles.

El objetivo de ésta comunicación no es de entrar en ninguno de éstos debates,

sino de proponer un modelo metodológico, original, que permita abordar el estudio de la dinámica espacio - temporal de las estructuras y elementos que componen el "paisaje" forestal de la cuenca endorreica de Pátzcuaro (situada en el Estado mexicano de Michoacán de Ocampo), gracias a los datos proporcionados por los captadores multi espectrales de los satélites de observación de los recursos naturales (LandSat - MSS y TM -, y SPOT - XS). Esta comunicación pretende, igualmente, demostrar la pertinencia y la utilidad de dicho tipo de datos, como fuente alternativa de obtención y generación de información, tanto cualitativa (visual), como cuantitativa (espacial) para conocer el estado y la diversidad de los recursos forestales de una región geográfica particular, así como para entender la apropiación material y cultural del espacio físico y de dichos recursos, por parte de las sociedades que la ocupan. Por último el interés de esta comunicación es de mostrar la capacidad de integración de la información y de los resultados así obtenidos, en una base de datos relacional, que pueda ponerse a la disponibilidad de un gran público, a manera de constituir un banco de datos que pueda ser actualizado e interrogado por diferentes usuarios, en la planeación futura del desarrollo sustentable regional y del medio forestal. Que brinde un buen nivel de conocimientos de la diversidad de las estructuras y de los elementos del paisaje forestal regional, y de las relaciones que se entre tejen entre éstos recursos y los grupos sociales que los explotan.

El modelo de estudio propuesto en ésta comunicación, justifica la utilización del concepto paisaje, como un "utensilio" teórico y metodológico, capaz de integrar en sus procesos analíticos, los métodos de investigación propuestos por diferentes escuelas del pensamiento como son : la teoría estructuralista, la teoría de conjuntos y la teoría de la información. Dichos métodos son igualmente adecuados en el tratamiento y análisis de los datos digitales, proporcionados por los satélites de observación de los recursos naturales. Y se han revelado igualmente adecuados al empleo de la instrumentación logística de la geomática, y de los tratamientos estadísticos y matemáticos que son utilizados aquí.

Como lo expondremos más adelante, el carácter sistémico y polisémico del concepto "paisaje" permitirá abordar de manera global y dinámica, el estudio del desarrollo socio - económico y cultural, y la evolución espacial y temporal de una región geográfica particular, a travez de los datos digitales de los satélites. Por lo que el paisaje no será considerado únicamente como la envoltura del medio natural, sino como un sistema heredado, que traduce lo que éste medio ha sido y lo que es, y que tiene que ser planeado e instituido por y para los actores sociales que lo han generado. Ya que éste, está implicado en la vida cotidiana y es modelado y remodelado permanentemente por la particularidad de las relaciones sociales. Por lo que el paisaje es considerado aquí como una entidad "relativa" y "dinámica", en donde naturaleza y sociedad, percepción y medio ambiente, están en constante interacción [2].

En ésta comunicación, se considera al paisaje como ; "la imagen percibida" de un espacio geográfico delimitado en el tiempo y en el espacio. Como una imagen

2. **BERQUE A.** : Cinq propositions pour une théorie du paysage. p.p. 6 y 7. Ed. Champ Vallon, Col. Pays/Paysages. París, Francia. 1994.

percibida y vivida, que se manifiesta en forma de un “macrosistema”, es decir como un “conjunto complejo” e indissociable de sistemas dinámicos (geosistemas, ecosistemas y sociosistemas), que nos ofrece una percepción holística; en donde las dinámicas actuales se ejercen sobre dinámicas anteriores, tanto geográficas como culturales y no necesariamente iguales. Y según un sistema moral, estético, cultural y/o científico particular al observador, (que éste sea un individuo o un grupo social), lo cual da lugar a un sistema de "signos" que puede ser descodificado de manera diferente por el sujeto (individual o social) encargado de la percepción.[3]

El concepto de paisaje funge, entonces, como soporte teórico de análisis. Por lo que, a pesar de que en la actualidad aun no se cuenta con una "teoría formal" del paisaje, que permita inscribirse directamente en una metodología reconocida y aceptada, éste enfoque permite, por una parte, abordar de manera dinámica y global las estructuras física, biológicas y sociales de los diferentes sistemas, y por otra parte de identificar los sistemas relacionales (extrínsecos e intrínsecos) entre sus diferentes sistemas y subsistemas

I. Las bases teóricas del modelo

I.1.- El paisaje como sistema polisémico y complejo (teoría de conjuntos)

El paisaje, como concepto científico, ha sido definido por especialistas de diferentes disciplinas. Por lo que en razón de su origen disciplinario compartido, por sus características de exterioridad y de no exclusividad, y por el hecho de ser una noción al mismo tiempo percibida y vivida, es considerado por algunos autores como un concepto polisémico. [4]

A diferencia de la perspectiva semiológica del lenguaje que presenta una vocación evidente de comunicación, el concepto paisaje es representado como un modelo de "significado - significación", cuyo análisis permite establecer una comunicación. Por lo que, a pesar de que ésta noción no presenta una verdadera proclividad hacia la comunicación, y en discrepancia con el concepto "lenguaje" en donde se distinguen la "lengua" y la "locución", las que tienen una clara vocación de comunicación. En geografía, se considera al paisaje como una noción dotada de "significación", la cual nos envía a diferentes "significados", por lo que está provista de una verdadera capacidad de comunicación. Cada uno de éstos "significados" han sido llamados "semias" por M. Ronai, , quien las definió como "un sistema de significaciones que derivan indirectamente del lenguaje verbal en contraposición de la lengua, que se deriva estrictamente del lenguaje".[5]

Otra particularidad de éste concepto es su carácter sistémico. En efecto, el paisaje es considerado por diferentes autores [6], como "una porción del espacio", como "la

³ **GUZMÁN M. Gonzalo:** "Bases teóricas y metodológicas para una aproximación analítica y global del paisaje agrario, en la cuenca endorréica de Patzcuaro, Michoacán, México". **In** : Tesis doctoral, presentada en la Universidad de París IV, Sorbona. París, Francia. 2001

⁴ **FEL A. :** Paysages, géographie, sémiologie. Rev. L'Espace Géographique. N° 2 p. 149. París, Francia. 1974.

⁵ **RONAI M. :** Le paysage : Rev. Herodote, N° 1, 1976 ; pp. 125 -159. Prís, Francia. 1976.

⁶ **HOTYAT M. y PELISSIE du RAUSAS M-B. :** Approche multidimensionnelle et cartographique du paysage forestier. Tesis de doctorado de tercer ciclo, G.R.E.P. N° 6, París, Francia. 1976.

imagen percibida de un sistema complejo o macrosistema". Por lo que el "macrosistema" paisaje se constituye de sistemas y subsistemas de naturaleza diferente (ecosistema, geosistema, sociosistema, sistema de significaciones, sistema de signos, etc.).

La evolución científica en general, y en particular el desarrollo de la teoría de conjuntos en matemáticas y en física y la extrapolación de sus aplicaciones metodológicas hacia diferentes disciplinas científicas, particularmente en biología y en geografía, y más tarde en las ciencias humanas, permitió a los investigadores un notable avance en la comprensión y el análisis de diversos procesos naturales y sociales. Por lo que resulta evidente que en el estudio de las dinámicas del paisaje se recurra a los métodos y técnicas de investigación propuestos por ésta escuela del pensamiento.

I.2.- El paisaje un sistema global y relacional (teoría estructuralista gestaltista)

El carácter sistémico del paisaje conduce, de manera cuasi automática, a la utilización de la teoría estructuralista, como elemento principal de las bases teóricas de nuestro estudio. Ya que según ésta teoría, una estructura "representa un sistema de transformaciones (dinámico), y en tanto que sistema (totalidad), la estructura está regida por ciertas leyes, y se conserva o se enriquece por la acción misma de sus transformaciones (autorregulación), sin salir de sus límites, ni recurrir a elementos exteriores. Lo que pone de manifiesto las tres características principales de una estructura; totalidad, dinámica y autorregulación. [7]

La utilización en este estudio de la noción estructuralista de la "Gestalt" o de la "forma", permite formarse una visión analógica, entre el análisis del paisaje y la interpretación de las imágenes de los satélites. E identificar de forma conjunta las dimensiones global, dinámica, e histórica, que deseamos darle a nuestro trabajo, ya que cada estructura del paisaje y/o de la imagen, no puede comprenderse en su totalidad, si no se toman en cuenta el mayor número de elementos que lo conforman, así como sus transformaciones dinámicas. [8]

I.3.- del pixel a la unidad de paisaje (teoría de la información)

Si se considera la propuesta hecha por M. Phipps y V. Berdoulay de utilizar las "convergencias" metodológicas entre las técnicas llamadas naturalistas y las sociales, para el estudio del paisaje, en donde se da la prioridad a sus estructuras espaciales, en vez de privilegiar los procesos de producción. El análisis del paisaje puede situarse así, en el plano de la producción y de la utilización de los sistemas de signos. Es decir desde el ángulo de la producción de información y no desde el ángulo de la producción de energía. [9]

⁷ **PIAGET J.** : Le structuralisme , Col. Que sais je?, Ed. PUF. 10° Edición N° 1311. París, Francia. 1996.

⁸ **ANTROP M.** : Téledétection et analyse du paysage. pp. 125-137. **In** : Paysage et système : de l'organisation écologique à l'organisation visuelle. Bajo la dirección de BERDOULAY V. y PHIPPS M. ; Ediciones de la Universidad de Ottawa, Canadá. 1985.

⁹ **PHIPPS M.** y **BERDOULAY V.** : Paysage, système et organisation. **In** : "Paysage et système". Bajo la dirección de BERDOULAY V. y PHIPPS M. ; Ediciones de la Universidad de Ottawa, Canadá. 1985.

De ésta manera, el paisaje tendra que ser analizado como un sistema organizado en el tiempo y en el espacio. Donde sus estructuras no sean tomadas simplemente como unidades naturales, sino como "células", definidas de manera topológica, como unidades referenciadas (en el tiempo y en el espacio) de la información, las cuales tienen que ser interpretadas según diferentes filtros (sociales, culturales y/o científicos).

La correspondencia propuesta en 1985, por M. Phipps, entre el segundo principio de la termodinámica moderna (referente a l estudio de los sistemas físicos en su estado macroscópico) y la teoría de la información, permite, al igual que la utilización de la teoría estructuralista, de establecer una afinidad entre el estudio de las unidades espacio - temporales del paisaje y los datos multi espectrales y multi fechas de las imagenes de los satélites.

II. Las bases físicas del modelo

Puesto que para el análisis de la dinámica del paisaje forestal de la cuenca de Pátzcuaro, disponemos de tres imagenes proporcionanadas por tres captorees diferentes (por lo tanto resoluciones espectrales y espaciales diferentes), de fechas igualmente distintas (aún que de la misma estación anual), es evidente que el primer paso de ésta metodología corresponde a la homogeneización de dichos datos, con el propósito de que éstas puedan ser comparadas entre sí.

II.1.- Correcciones de los datos de los satélites

a) Correcciones radiométricas:

Con el fin de ajustar los valores radiométricos, de cada una de las tres imagenes, los valores originales de éstas (que son expresados en términos de luminosidad aparente [LA]) fueron transformados en luminosidad verdadera (LV) igualmente llamada corrección de equiparación de los captorees.

El método que se utilizó es el propuesto por Bildgen et al [10] según las fórmulas siguientes:

$$LV = L_{min} + (L_{max} - L_{min} / Q_{cal\ max}) * DN$$

(Para los captorees del satélite LandSat),

$$y ; LV = LA / K \text{ lo que es igual a } LV = DN / K$$

(Para los captorees multi espectrales del satélite SPOT).

b) Correcciones geométricas :

El tipo de correcciones geométricas que se aplicaron con el fin de poder comparar los datos de los diferentes satélites usados en éste trabajo, consistieron en primer lugar, en modificar la talla de los pixeles de los captorees MSS y TM del satélite LandSat, a la resolución espacial de los pixeles del captor multi espectral Sxi, del satélite Spot, con el fin de que todos los pixeles tuvieran la misma talla por

¹⁰ BILDGEN P, GILG J.P., y GEROYANNIS H. : "Utilisation des données spectrales M.S.S., T.M., et SPOT exprimées en valeurs de reflectance exo-atmosphérique pour l'étude diachronique de l'évolution des sols et du couvert végétal. Caractérisation des états de surface par télédétection. Publication de L'O.R.S.T.O.M., Paris, Francia. 1990.

pixel, (20 X 20 metros). En segundo lugar, se hicieron correcciones geométricas (georeferenciadas) para yuxtaponer las diferentes imagenes, necesarias luego del análisis de la dinámica paisajística, durante el período 1982 – 1992.

II.2.- Identificación de las diferentes estructuras del paisaje

En éste apartado se presentan las diferentes etapas para la identificación y el análisis de las estructuras forestales del paisaje, y de su dinámica en el tiempo y en el espacio, a partir de los datos digitales de los satélites de observación de los recursos naturales, respetando así los niveles taxonómicos del sistema y subsistemas. que conforman el paisaje forestal. Con éste propósito se empleó la nomenclatura propuesta en 1985 por M. Antrop [11]:

	DIVERSIDAD	COMPLEJIDAD
Dimensión Tipológica	Número de unidades diferentes, que constituyen un paisaje. Proporción del número de clases en una unidad de paisaje en relación al número total de clases tipológicas.	Número de elementos individuales (objeto – geotopo) contenidos en una determinada unidad de paisaje.
Dimensión Topológica	Forma y tamaño de las unidades del paisaje, las cuales pueden variar en el espacio, (lo que permite su medición).	Número de sub unidades del paisaje contenidas en una unidad de nivel jerárquico superior (medida de la fragmentación del espacio – masa).
Dimensión Perceptiva	Número de unidades diferentes observados en sitio dado, y con una dirección determinada.	Número de elementos individuales observados en un sitio dado y en una dirección determinada.

Así, éste modelo analítico comienza por la identificación de la diversidad de la tipología paisajística regional. Es decir, por el reconocimiento de las principales estructuras que conforman la “gestalt” de la imagen y en consecuencia del paisaje de la cuenca del lago de Pátzcuaro. A continuación, y gracias al conocimiento previo de la geografía regional, y del comportamiento espectral de los objetos detectados por los diferentes captadores. Y gracias también, a la aplicación de una serie de máscaras (por el método de fronteras o umbrales radiométricos), que se utilizó con el fin de aislar y analizar cada una de éstas unidades paisajísticas, de manera separada, para así poder determinar la complejidad tipológica del paisaje de cada una de las unidades identificadas. Lo cual, por otra parte, reduce el margen de error, luego de los cálculos matemáticos y estadísticos durante la segmentación de alto nivel (clasificación automática).

II.3.- El paisaje forestal de la cuenca de Pátzcuaro visto desde el espacio (Diversidad tipológica)

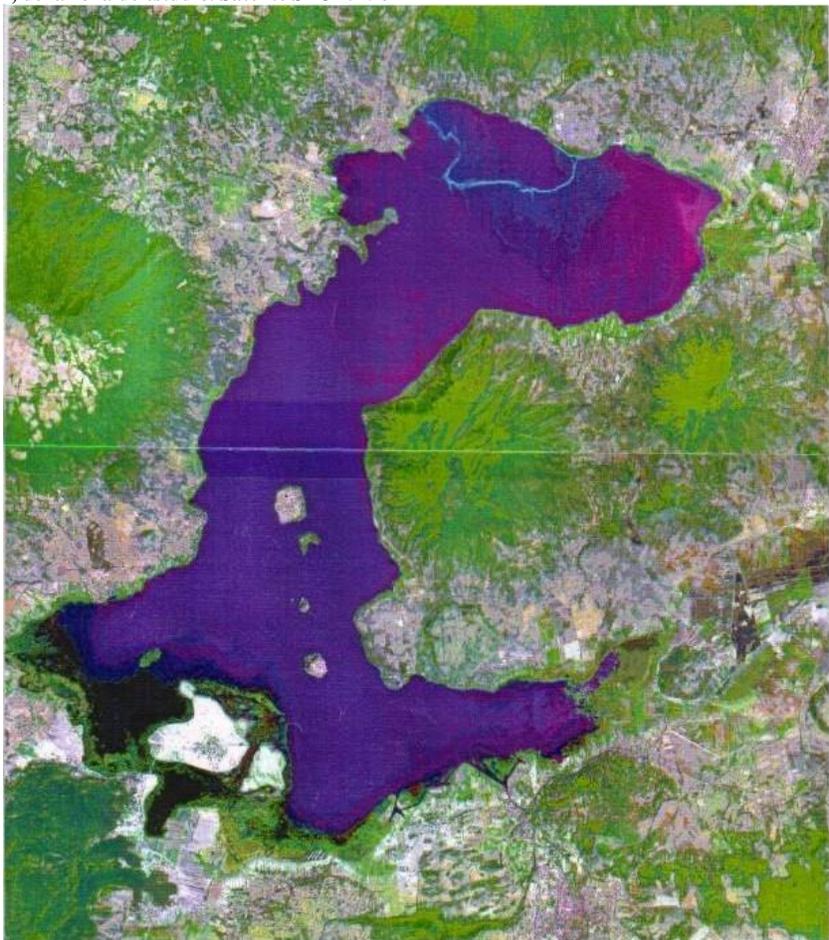
Para ilustrar ésta etapa del tratamiento, se eligió sólo una de las 3 imagenes, aun

¹¹ ANTROP M. : *Op cit.* Ottawa, Canadá, 1985.

cuando éste tratamiento se aplicó sobre el conjunto de los datos. Por lo que en la identificación de la diversidad tipológica de las estructuras del paisaje de Pátzcuaro se elaboró una composición en falso color, de los tres canales espectrales de la imagen del satélite Spot de 1987, transformada en luminocidad verdadera (LV). El orden de aplicación de los filtros para cada canal y la saturación de valores radiométricos es el siguiente:

	Filtro Azul	Filtro Verde	Filtro Rojo
Canal XS1	5 - 50		
Canal XS2			3 -60
Canal XS3		0 - 103	

Figura 1. Diversidad tipológica del paisaje en la cuenca de Patzcuaro 1987. Composición en falso color, de la zona de estudio. Satélite SPOT. 1987



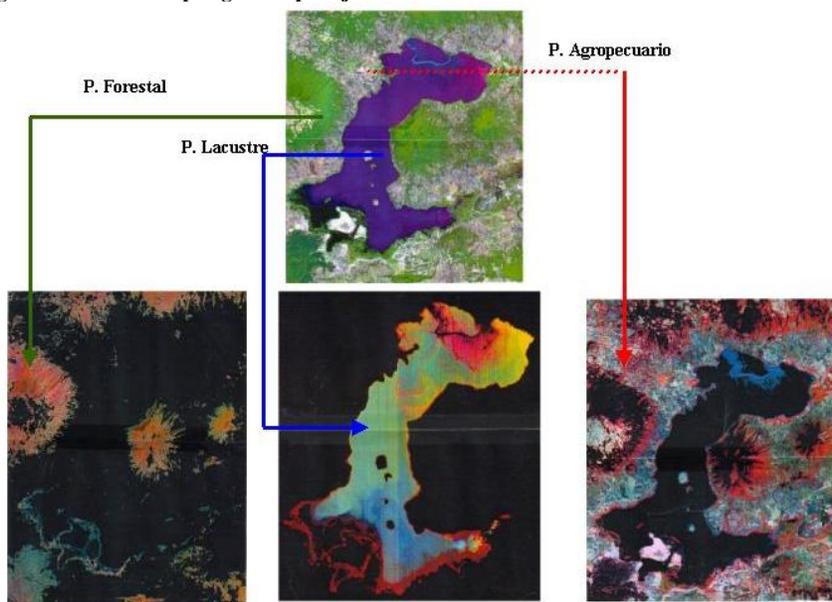
En ésta imagen es posible identificar las tres grandes estructuras de la gestalt paisajística en la cuenca endorreica de Pátzcuaro. La unidad lacustre presenta los tonos que van del negro al azul oscuro, en la unidad forestal se distinguen diferentes tonos que varían del verde hasta amarillo y café. Y finalmente la unidad agropecuaria y las zonas urbanas, aparecen con colores que van del blanco hasta el rojo.

II.4.- De la firma espectral, a la diferenciación de la complejidad tipológica del paisaje forestal de Pátzcuaro (aplicación de máscaras)

El conocimiento y reconocimiento de las firmas espectrales, de los diferentes objetos geográficos detectados por los captadores de los satélites, permite establecer un primer criterio de segmentación de las imágenes, por medio de la aplicación de máscaras, mediante la técnica llamada de umbrales o fronteras radiométricas. De ésta manera fué posible aislar las estructuras forestales del paisaje en la zona de estudio, del resto de las estructuras que componen el paisaje de la región de estudio, para la totalidad de nuestras imágenes. Una vez efectuada la aplicación de las máscaras, se procedió a la creación de composiciones en falso color de las estructuras forestales del paisaje de la cuenca de Pátzcuaro. (figura N°2).

A partir de las composiciones en falso color fué posible de establecer criterios más finos, en la diferenciación de la complejidad tipológica de las estructuras forestales del paisaje, como se expondrá a continuación.

Figura 2. Diversidad tipológica del paisaje en la cuenca de Pátzcuaro



En ésta imagen se pueden apreciar, de manera separada, las tres principales unidades tipológicas del paisaje (gestalt de la imagen) en la cuenca del lago de Pátzcuaro, obtenidas por el método de aplicación de máscaras, según la técnica

descrita anteriormente.

II.5.- De la diversidad tipológica del paisaje a la complejidad del paisaje forestal (clasificación de imágenes o segmentaciones de alto nivel)

En éste apartado se describen los tratamientos de alto nivel o tipología de las imágenes, los cuales se inscriben dentro del marco de la taxonomía y más específicamente de la taxonomía numérica. [12]

La clasificación de datos digitales, en teledetección, consiste en la aplicación de uno o varios métodos de partición teniendo como meta, en un primer tiempo, una estratificación tipológica de los ficheros numéricos, para luego efectuar la extracción de los componentes conexos de los píxeles, pertenecientes a una misma clase, por medio de métodos de segmentación llamados de alto nivel o tratamientos de alto nivel. [13]

En éste proceso, de partición de los valores, es necesario aplicar previamente algunos tratamientos de “bajo nivel” [14], con el fin de preparar las condiciones para la subsecuente segmentación de alto nivel. Los tratamientos de bajo nivel utilizados aquí, tienen como objetivo reagrupar los individuos (píxeles) de una imagen en un número limitado de clases más o menos homogéneas.

En oposición a los tratamientos de filtraje y de segmentación de bajo nivel (enfoque fronterizo), los tratamientos de alto nivel se establecen en base a criterios de semejanza de los píxeles.

Estos tratamientos pueden actuar sobre uno o más de los atributos de los individuos que conforman la imagen, como pueden ser por ejemplo, las firmas espectrales o los valores radiométricos de los píxeles, con el propósito de reunir los individuos dentro de clases, que contengan los objetos esperados. La información resultante, es generalmente de carácter cualitativo, puesto que ésta caracteriza la naturaleza del fenómeno en subconjuntos de píxeles (como por ejemplo bosques, potreros, cuerpos acuíferos, etc.) Pero puede ser igualmente a carácter cuantitativo si un parámetro de medida del estado del píxel es asociado a la firma espectral por una relación conocida, como por ejemplo la temperatura de superficie. [15]

En la presente comunicación se llevó a cabo la segmentación de alto nivel conocida como clasificación no supervisada o automática. Y los resultados obtenidos de dicho tratamiento son estrictamente de carácter cualitativo. Como se mencionó anteriormente, las clasificaciones se efectuaron a partir de las imágenes previamente enmascaradas, con el propósito de reducir el margen de error, luego de los cálculos estadísticos previos a la segmentación. Una vez efectuadas las diferentes

¹² **BOUROCHE J.M.** y **SAPORTA G.** : *L'analyse des données*. p. 48. Col. Que sais-je?. 6° Edición. Ed. P.U.F. París, Francia. 1994.

¹³ Los tratamientos llamados de alto nivel “son los tratamientos que actúan sobre las entidades de naturaleza simbólica, asociados a una representación y a la comprensión de la imagen y son expresados con las palabras del vocabulario de la aplicación o etiquetación”. *In* “Analyse d'images : filtrage et segmentation”. Publicación Coordinada por **COCQUEREZ J-P** y **PHILIPP S.** p. 2. Ed. Masson. París, Francia. 1995.

¹⁴ Los tratamientos llamados de bajo nivel “tienen como objetivo crear una partición de la imagen en subconjuntos de datos; éstos son definidos topológicamente como el interior [region] de una línea cerrada [entorno]. *In* “Analyse d'images : filtrage et segmentation”. *Op cit* París, Francia. 1995.

¹⁵ **VERGER F.** : *L'observation de la terre par les satellites*. p. 91. Col. Que sais-je?. N° 1989. Ed. P.U.F. París, Francia 1982.

clasificaciones de las tres imágenes, se procedió a la etiquetación de las diferentes clases obtenidas

De ésta manera se obtuvieron tres imágenes segmentada cada una en 5 clases (ver la figura N° 3 más adelante), en donde es posible distinguir las cuatro clases forestales, más una, para cada una de las tres fechas utilizadas en éste estudio. Los criterios utilizados para llevar a cabo ésta segmentación, son arbitrarios, y su nomenclatura fué establecida en base a los datos proporcionados por el mapa temático del uso del suelo, elaborados por el DETENAL - INEGI de México, (a escalas 1 a 250,000).

III. Modelización y análisis de la dinámica espacio temporal del paisaje forestal en la cuenca de Pátzcuaro.

El modelo metodológico para el análisis de la dinámica del paisaje forestal de Pátzcuaro, que exponemos a continuación, comienza en realidad, una vez que se han presentado las bases teóricas y los tratamientos previos de homogeneización de los datos digitales que fueron presentados anteriormente. Este modelo se lleva a cabo en dos tiempos; durante el primero, se realizó el análisis cualitativo (visual) de la dinámica espacio – temporal de las estructuras forestales (o diversidad tipológica del paisaje) y de sus sub-estructuras (o complejidad tipológica del paisaje forestal). El segundo tiempo, constituye el análisis cuantitativo (estadístico) de los datos, en donde se determinaron los cambios y/o permanencia de las estructuras del paisaje forestal sin tomar en cuenta su complejidad tipológica.

Este método fué aplicado sobre el conjunto de los datos digitales de tres satélites diferentes de fechas diferentes, a saber satélite Lad-Sat captor MSS, de 1982, satélite SPOT captor XSi de 1987 y los datos del satélite Lad-Sat captor TM de 1992.

III.1.- Análisis cualitativo de la dinámica espacio - temporal de las principales estructuras del paisaje forestal de Pátzcuaro.

En éste primer tiempo del modelo, el análisis del paisaje forestal es considerado a carácter cualitativo, ya que el criterio de interpretación empleado, es únicamente visual, y se llevó a cabo a partir de las imágenes resultantes de la clasificación automática (no supervisada) de cada una de las tres imágenes forestales de que disponemos.

La elaboración de las tres imágenes clasificadas, que son analizadas en éste apartado, se realizó de la manera siguiente:

A partir de las imágenes corregidas (radiométrica y geoméricamente) y segmentadas por el método de umbrales radiométricos (con el propósito de guardar únicamente, dentro de lo posible, los valores radiométricos correspondientes a las zonas forestales), se llevó a cabo la clasificación no supervisada, para las tres fechas de que disponemos, usando dos criterios para la determinación a priori del número de clases, a saber ; la composición en falso color de los tres canales del satélite SPOT de 1987 y el mapa temático de uso de suelo a escala 1:250.000 de Morelia (E 14 [1]) proporcionado por el INEGI de México. [16] (ver figura N°2, P. Forestal)

Los criterios de interpretación visual, que se siguieron en éste estudio, son los

¹⁶ Mapa temático del uso del suelo, DETENAL – INEGI, 1ª edición, México, 1984.

mismos utilizados en la interpretación de las fotografías aéreas, a saber :

- En la imagen se pueden observar cuatro **colores** dominantes diferentes ; el rojo, el rosa el anaranjado, y azul-verde. El color negro corresponde a los valores enmascarados.
- En cada uno de éstos colores se distingue un sólo tipo de **textura** que puede ser definido como textura aborregada.
- La **forma** de los objetos observados es más o menos circular e irregular.
- La **talla** de éstos objetos varía entre grande y mediana.
- Su **distribución espacial** se observa al rededor de la cubeta lacustre, por lo que presentan una distribución elipsoidal, discontinua y alargada en dirección noreste – suroeste.

Así pués, luego de la interpretación visual de la composición en falso color y después de haber consultado el mapa temático de uso del suelo del INEGI, se decidió de lanzar una clasificación no supervisada en cinco clases, según la secuencia que se describe a continuación :

- a) Establecimiento de un muestreo por mallas y aleatorio, de cada uno de los canales espectrales de cada imagen. Y de manera independiente para cada una de las tres imagenes estudiadas.
- b) Aplicación del algoritmo de partición (nubes dinámicas), en “N” clases, para cada uno de los ficheros del muestreo, por medio de una función linear discriminante.
- c) Aplicación de la clasificación propiamente dicha, ésto es, la asignación para cada pixel de la población de origen a una clase, (número de variables), es decir, la determinación para cada individuo, de su pertenencia en cada una de las clases preestablecidas por la función linear discriminante.
- d) Creación de una paleta de color adecuada a los resultados obtenidos, de las etiquetación de las clases obtenidas y la nominacion de cada una de dichas etiquetas.

Los resultados obtenidos para los individuos bien clasificados luego de las clasificaciones a priori de las tres imagenes fueron de : 99.67%, para los datos del captor MSS de fecha 1982 ; 94.05% correspondió a los datos del captor HRV1 de fecha 1987 ; y de 99.38% , para los datos del captor TM del satélite americano de fecha 1992.

Las matrices de afectación de los individuos bien clasificados por grupo de las poblaciones del muestreo aleatorio, se presentan en los cuadros siguientes:

		Grupo de afectación			
MSS 1982		1	2	3	4
Grupo de origen	1	3658	56	0	103
	2	169	4745	0	139
	3	61	0	1408	107
	4	112	0	22	3115

		Grupo de afectación			
HRV1 1987		1	2	3	4
Grupo de origen	1	3658	56	0	103
	2	169	4745	0	139
	3	61	0	1408	107
	4	112	0	22	3115

		Grupo de afectación			
TM 1992		1	2	3	4
Grupo de origen	1	3658	56	0	103
	2	169	4745	0	139
	3	61	0	1408	107
	4	112	0	22	3115

En el cuadro siguiente se presentan los porcentajes de individuos bien clasificados, por grupo a priori, de las poblaciones muestreadas, para cada captor:

	MSS 1982	HRV1 1987	TM 1992
Grupo 1	97.31	100	98.96
Grupo 2	97.42	98.46	99.81
Grupo 3	97.71	97.84	99.5
Grupo 4	97.67	100	100
Grupo 5	100	99.66	98.92

En éste cuadro se puede observar que los porcentajes de individuos bien clasificados son > 97%, y en ocasiones llegan a alcanzar el 100%. Esto se explica por el hecho de que la función lineal discriminante de la partición a priori se aplico sobre la población muestreada de las imagenes enmascaradas, lo que reduce la heterogeneidad entre los individuos.

Porcentaje de individuos bien clasificados por grupo

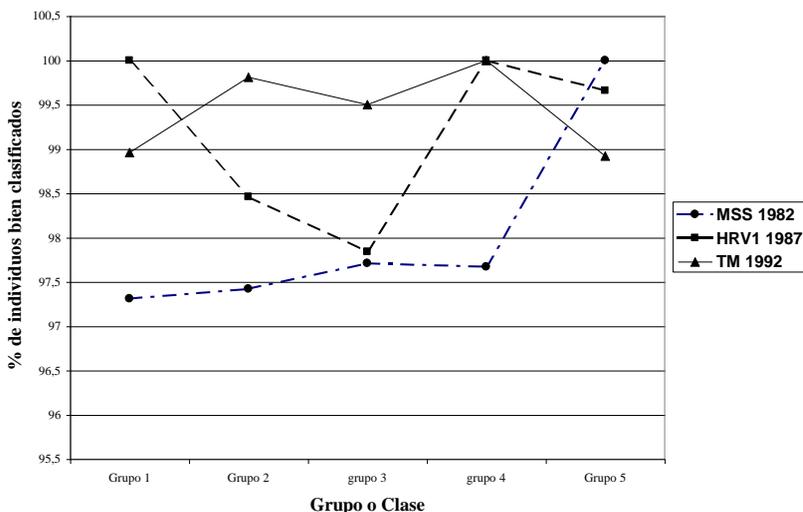
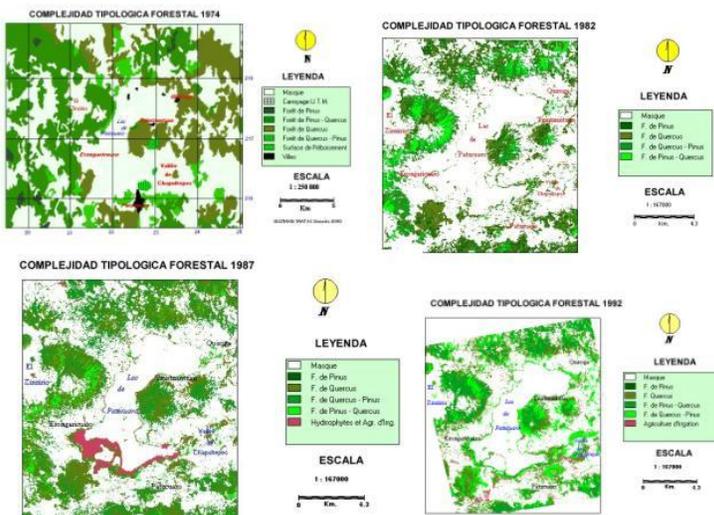


Figura 3. Análisis de la Dinámica de la Complejidad Tipológica del Paisaje Forestal en el Período 1982 – 1992



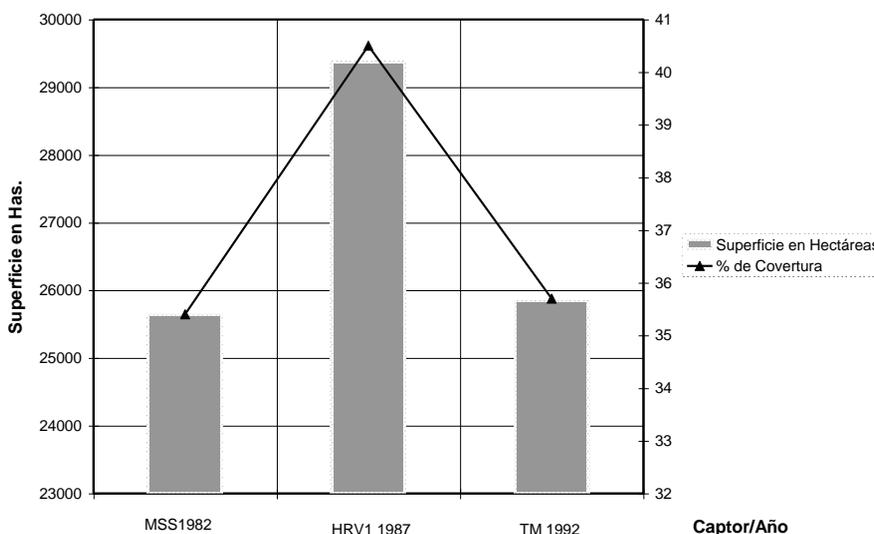
En la imagen clasificada de 1987 (HRV1 – 1987), se puede distinguir un grupo de pixeles que apesar de que su valor radiométrico es cercano al de la reflectancia de las zonas boscosas, no corresponde a ninguna clase forestal, sino a un proceso de eutrificación del agua en la zona Sur del lago.

En el cuadro a continuación se observa la frecuencia de individuos (pixeles) de la población real por clase y por tipo de captor, luego de la segmentación de alto nivel

en cinco clases forestales. En él han sido eliminados 40686 individuos pertenecientes a la segunda clase del captor HRV1, ya que éstos no corresponden a ninguna clase forestal.

Frecuencia/Clase	MSS 1982	HRV1 1987	TM 1992
Clase 1	125985	248178	130605
Clase 2	29302	0	160852
Clase 3	209370	63263	116401
Clase 4	193127	257542	161588
Clase 5	83087	165131	76797
Total de individuos	640871	734114	646243
Superficie en Hectáreas	25634.84	29364.56	25849.72
% de Covertura	35.4	40.5	35.7

Superficie de Covertura Forestal en el Período 1982 - 1992



En la gráfica es posible apreciar una notable progresión de la superficie forestal en la cuenca de Pátzcuaro, entre 1982 y 1987. Dicho crecimiento es la consecuencia de la campaña gubernamental de reforestación, la cual se llevó a cabo desde principios de la década de los ochentas, los resultados oficiales fueron obtenidos durante el censo agroforestal de 1990 y publicados por el I.N.E.G.I., en 1992. Dicho censo hace mención de un total de 280 hectáreas reforestadas, repartidas entre cuatro de los cinco municipios que conforman la cuenca de Pátzcuaro.

Durante el segundo período analizado (1987 y 1992), se puede observar una

nueva reducción de la superficie forestal. Se pudo constatar aquí que, los resultados obtenidos en 1992, gracias a la imagen del captor T.M. del satélite Land-Sat, 25849.72 hectáreas forestales, son cercanos a los publicados por los botanistas de terreno, para el mismo período y la misma zona, es decir, 27012 hectáreas. [17]

Sin embargo, a pesar de que dichos resultados, obtenidos por la aplicación de la metodología de teledetección que se presenta aquí, son alentadores, no se deben olvidar las restricciones propias al uso del tipo de datos proporcionados por los captos de los satélites de observación de la tierra, (como por ejemplo : la posición del satélite con respecto a la estrella solar y a la Tierra, luego de la toma de la image, o bien la estación anual y el estado fisiológico de la vegetación, el relieve particular de la zona de estudio, las resoluciones espaciales y espectrales de los diferentes captos, etc.) y que limitan la exactitud de los resultados. Por lo que si bien el modelo utilizado permite de hacer una estimación de la superficie forestal regional (en tiempo y espacios reales), éste método de análisis sigue siendo considerado a caracter cualitativo ya que éste requiere del apoyo de cifras de terreno, obtenidas por los métodos convencionales de monitoreo de campo, usados en geografía.

Luego del análisis visual de las imagenes clasificadas, que se presentan en la figura N° 2, se estableció la complejidad tipológica del paisaje forestal regional, los resultados se resumen en el cuadro siguiente:

Complejidad del Paisaje / Superficie de ocupación	Superficie forestal en 1982	Superficie forestal en 1987	Superficie forestal en 1992
Bosque de Pinos	5,224.2	No diferenciada	No diferenciada
Bosque de Encinos	11,090.12	16,532.36	7,725.08
Bosque de Pinos y Encinos	3,071.88	2,530.52	8,374.8
Bosque de Encinos y Pinos	6,463.52	10,301.68	8,362.88
Superficie Forestal en Has.	25,849.72	29,364.56	24,462.76

Este cuadro muestra la superficie de ocupación espacial para cada una de las subunidades forestales, para cada una de las tres fechas de las imagenes utilizadas. La determinación de la complejidad del paisaje forestal se estableció usando como modelo de “verdad de terreno” el mapa temático de uso de suelo (Morelia E14-1) de 1974.

III.2.- Análisis cuantitativo de la dinámica espacio temporal del paisaje forestal en la cuenca de Pátzcuaro

Esta etapa del analisis de la dinámica del paisaje forestal de la cuenca endorreica de Pátzcuaro, se inició a partir de la imagen enmascarada de los datos forestales (ver figura N° 2, P. forestal), aquí los valores radiométricos de los diferentes captos fueron recodificados en valores binarios (es decir 0 = zona no forestal ; 1 = zona forestal). Es evidente que en ésta etapa del analisis, la complejidad tipológica de las diferentes zonas forestales identificadas no se toma en cuenta, esto con el fin de poder llevar a cabo la clasificación cruzada y el análisis de los cuadros de

¹⁷ ZAMUDIO RUIZ S. : “La flora y vegetación de la cuenca del lago de Pátzcuaro” p. 11. *In Los recursos vegetales de Michoacán*. I Muestra. Memoria. Morelia, Michoacán, México. 1992.

contingencia entre las parejas de imágenes, según las diferentes fechas, de la manera siguiente : MSS 1982 & HRV1 1987 ; MSS 1982 & TM 1992 ; y HRV1 & TM 1992

Frecuencia de pixeles pertenecientes a cada una de las combinaciones

82\87	0	1	Total
0	903720	132959	1036679
1	261516	513284	774800
Total	1665236	646243	1811479
82\92	0	1	Total
0	947152	223456	1170608
1	218084	422787	640871
Total	1165236	646243	1811479
87\92	0	1	Total
0	889635	280973	1170608
1	147044	493827	640871
Total	1036679	774800	1811479

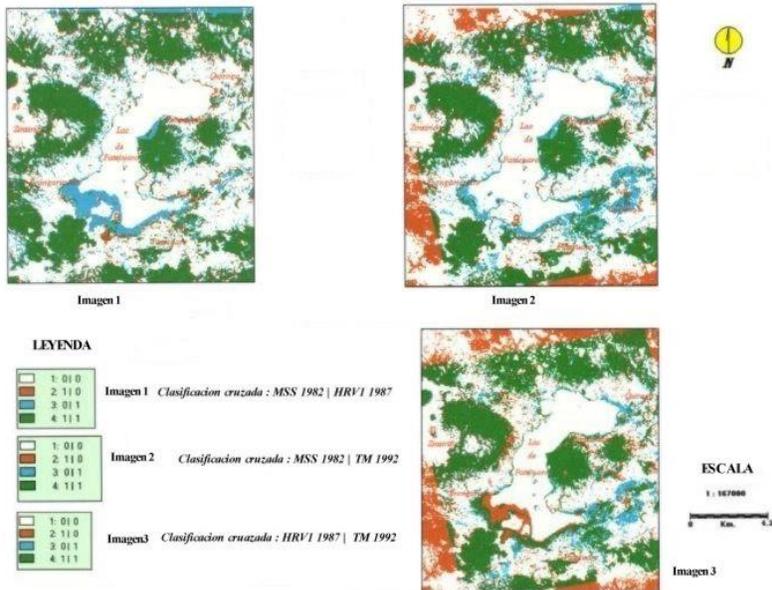
En éste cuadro de combinaciones cruzadas, se puede observar la frecuencia de los pixeles de las imágenes que fueron yuxtapuestas, luego del análisis de la dinámica de las superficies boscosas en la cuenca de Pátzcuaro. En donde los valores binarios (0 | 1) representan las zonas no forestales y las zonas boscosas respectivamente, sin entrar en el detalle de la complejidad tipológica del paisaje forestal regional. Los resultados obtenidos luego de la aplicación del análisis de la estadística de “Chi-cuadrado”, la estadística “V” de Cramer y el índice de agregación de “Kappa”, se muestran en el cuadro a continuación :

	Estadística de "Chi-cuadrado"	Estadística "V" de Cramer	Índice de agregación de "Kappa"
1982 1987	551435.4375	0.5517	0.5457
1982 1992	396656.25	0.4679	0.4679
1987 1992	476218.3438	0.5127	0.5066

En el análisis de la estadística de “V” de Cramer, el coeficiente de correlación varía de 0.0 a 1.0, en donde 0.0; muestra que no existe ninguna correlación y 1.0; indica una correlación perfecta, y de la misma manera para el índice de agregación de Kappa.

Las imágenes resultantes de las intersecciones se presentan en la figura N° 4, a continuación:

Figura 4. Clasificaciones cruzadas para las imágenes de 1982, 1987 y 1992



En las imágenes que se presentan en la figura N° 3, se puede observar que la clase 1 en blanco, corresponde a los datos no forestales sobre cada una de las tres fechas de observación (etiqueta de la clase 0 | 0) . En la primera imagen de ésta figura correspondiente a la combinación de las imágenes 1982 | 1987, la clase 2 en rojo corresponde a los valores forestales determinados en 1982, que no existen en la segunda imagen de 1987 y que han sido etiquetados 1 | 0 ; la clase 3, en azul muestra, a su vez, los valores radiométricos forestales y los no forestales (pero con valores radiométricos similares a los boscosos) presentes en 1987, con la etiqueta 0 | 1 ; finalmente la clase 4 en color verde y con la etiqueta 1 | 1 muestran la correlación perfecta entre los valores radiométricos forestales presentes en ambas fechas. En la segunda imagen de la figura 3, para las fechas 1982 | 1992, la lectura es la misma que la anterior, aquí se observa que los límites de la imagen de 1982 en rojo desbordan los límites de la imagen de 1992, en azul, ésto se debe a la diferencia de tallas de ambas imágenes luego de su yuxtaposición. En la tercera imagen es posible observar que el proceso de deforestación más significativo en éste período (1987 | 1992) se presentó en las partes bajas de las elevaciones volcánicas y en sus límites con las parcelas de agricultura temporal. También es posible observar en la secuencia de 1982, 1987 y 1992 la unión de las islas de Jarácuaro y la Pastora, situadas al sur del lago en la fosa Erongarícuaro, primero y luego con la tierra firme, perdiendo así su carácter insular y constituir una península. Así como una marcada reducción de la superficie lacustre en la porción Este de la fosa Ihuatzío.

Resultados y Conclusiones

Después de haber analizado las imágenes presentadas en las figuras 3 y 4, se pueden observar los resultados siguientes :

1.- Gracias al método empleado en ésta comunicación fué posible distinguir la diversidad del paisaje en la cuenca de Pátzcuaro y la complejidad tipológica del paisaje forestal regional, así como su dinámica en el tiempo y en espacio, durante el período de observación, dejando la puerta abierta para la actualización de los fenómenos observados. En efecto dichos resultados pueden ser actualizados si se respetan tanto el método empleado, como el intervalo de las observaciones, es decir, con dos imagenes más, una de 1998 y otra de 2002.

2.- Por otra parte el estudio de la dinámica forestal regional pone en evidencia los efectos nocivos (directos e indirectos) de la deforestación, sobre los sistemas agrícolas y lacustre. Dichos efectos repercuten necesariamente sobre la perenidad del desarrollo, social, cultural, económico y ecológico de la región.

3.- Los resultados obtenidos en ésta comunicación muestran que el uso de los nuevos instrumentos de obtención y análisis de datos no substituyen el uso de las técnicas convencionales de la geografía y de otras ciencias (monitoreo de campo), sino que son un adyuvante a la planeación del desarrollo sustentable y a la toma de decisiones de las acciones a seguir para conseguirlo.

Así pues, se concluye que, el empleo de una metodología sencilla y original, respaldada en bases teóricas y una instrumentación, adecuadas al análisis e interpretación de los resultados obtenidos, representan una herramienta indispensable para poner en obra un plan, para llevar a cabo el desarrollo global y sustentable del paisaje forestal. Y permiten la creación de un banco de datos alfa numéricos y gráficos, que pueden incluirse en un SIG, adecuado a la planeación y el seguimiento del desarrollo forestal. Y representan una herramienta dinámica e interactiva en la toma de decisiones.

Por último se puede concluir que a pesar de los límites que se mencionaron anteriormente, con respecto al tipo de información proporcionada por los captos radiométricos, embarcados en los satélites de observación de los recursos naturales y apesar igualmente del aparente precio elevado de éstos datos y de la necesidad aparente de un soporte logístico (material informático) sofisticado, actualmente éstos medios están al alcance de las instancias, tanto científicas como públicas y privadas, encargadas del desarrollo forestal.

Bibliografía citada

- ANTROP M. : Télédétection et analyse du paysage. : In Paysage et système : de l'organisation écologique à l'organisation visuelle. Bajo la dirección de BERDOULAY V. y PHIPPS M. ; Ediciones de la Universidad de Ottawa, Canadá. 1985.
- BERQUE A. : Cinq propositions pour une théorie du paysage. Ed. Champ Vallon, Col. Pays/Paysages. París, Francia. 1994.
- BILDGEN P, GILG J.P., y GERROYANNIS H. : "Utilisation des données spectrales M.S.S., T.M., et SPOT exprimées en valeurs de reflectance exo-atmosphérique pour l'étude diachronique de l'évolution des sols et du couvert végétal. Caractérisation des états de surface par télédétection. Publicación de L'O.R.S.T.O.M., París, Francia. 1990.
- BOUROCHE J.M. y SAPORTA G. : L'analyse des données. Col. Que sais-je?. 6° Edición. Ed. P.U.F. París, Francia. 1994.
- COCQUEREZ J-P y PHILIPP S : "Analyse d'images : filtrage et segmentation". Ed. Masson. París, Francia. 1995.
- DETENAL – INEGI : Mapa temático del uso del suelo, , I° edición, México, 1984

- FEL A. : Paysages, géographie, sémiologie. Rev. L'Espace Géographique. N° 2. París, Francia. 1974.
- GUZMÁN Matas. Gonzalo : "Le développement agropastoral et son impact sur le couvert forestier et le milieu dans le bassin hydrologique de Patzcuaro, Michoacan, Mexique: Utilisation des données satellitales et statistiques pour appréhender la dynamique du paysage". Tesis doctoral, presentada en la Universidad de París IV, Sorbona,. París, Francia. 2001.
- HOTYAT M. y PELISSIE du RAUSAS M-B. : Approche multidimensionnelle et cartographique du paysage forestier. Tésis de doctorado de tercer ciclo, G.R.E.P. N° 6, París, Francia. 1976.
- PIAGET J. : Le structuralisme , Col. Que sais je?, Ed. PUF. 10° Edición N° 1311. París, Francia. 1996.
- PHIPPS M. y BERDOULAY V. : Paysage, système et organisation. In "Paysage et système". Bajo la dirección de BERDOULAY V. y PHIPPS M. ; Ediciones de la Universidad de Ottawa, Canadá. 1985.
- RONAI M. : Le paysage : Rev. Herodote, N° 1, 1976 ; Prís, Francia. 1976.
- VERGER F. : L'observation de la terre par les satellites. Col. Que sais-je?. N° 1989. Ed. P.U.F. París, Francia 1982.
- ZAMUDIO RUIZ S. : "La flora y vegetación de la cuenca del lago de Pátzcuaro" In Los recursos vegetales de Michoacán. I Muestra. Memoria. Morelia, Michoacán, México. 1992.