



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

Estudio sobre la cobertura y cambios de uso de terreno
en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa
por medio de técnicas de percepción remota y SIG

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
G E O G R A F O
PRESENTA
VENTURA LEONARDO ALICIA



MÉXICO, D. F. 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mi familia por todo el apoyo y cariño que me han dado en todo momento, no me cansaría de decirles cuanto los amo.

A mi nueva familia mi esposo y mi hijo que son las personas más especiales en mi vida.

A mis amigos Mauricio, Max, Alejandra, Israel, Emanuel, Marbella, Blanca, Serbia, Minerva, Rodrigo, Rocío, Joanna, Karina, Juan Carlos, Jair, Nancy, David y muchos más; a todos ustedes les doy las gracias por todos los momentos compartidos.

A la UNAM

Me ha sido muy satisfactorio comprobar que todos mis profesores han sido los mejores que he tenido muy en especial el Dr. Jorge Caire que además de todo siempre me inspiro a seguir adelante. Y al Maestro Gilberto Núñez le doy gracias por apoyarme con su tiempo e ideas para el mejoramiento de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi director de tesis M. en C. Cesar Alejandro Berlanga Robles por sus valioso apoyo a mi trabajo de tesis.

Gracias a mis asesores de tesis Mtro. Reynaldo Mauricio Aceves García, Dr. Jorge Caire Lomeli, Lic. Sergio Chimal Monroy y al Mtro. Gilberto Nuñez Rodríguez por las aportaciones a este trabajo.

Agradezco a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del Proyecto de Investigación “Cambios de Usos de Suelo en la Cuenca Lechuquilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa: impactos sobre la estructura e hidrología del paisaje” (SEMARNAT-2002-C01-112) y por la beca otorgada.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Unidad Mazatlán por permitirme el uso de sus instalaciones y equipos.

INDICE

	PAGINA
INDICE DE FIGURAS.....	iv
INDICE DE CUADROS.....	v
1.0 RESUMEN.....	vi
2.0 INTRODUCCIÓN.	1
3.0 OBJETIVOS.....	5
4.0 HIPOTESIS.....	6
5.0 ANTECEDENTES.....	7
6.0 AREA DE ESTUDIO.....	14
7.0 MATERIAL Y METODOS.....	16
7.1 EDICION DE IMAGENES.....	18
7.2 DETECCION DE CAMBIO	
7.2.1 Índice Normalizado de Vegetación (NDVI).....	19
7.2.2 Análisis Multitemporal Post-clasificadorio.	20
7.3 GENERACION DE MAPAS TEMÁTICOS.....	20
7.4 EVALUACION DE EXACTITUD.....	23
7.5 MATRICES DE DETECCION DE CAMBIO.....	26
7.6 MODELACION DE CAMBIOS POR CADENAS DE MARKOV..	27
8.0 RESULTADOS.....	30
9.0 DISCUSIONES.....	42
10.0 CONCLUSIONES.....	50
11.0 VOCABULARIO.....	52
12.0 LITERATURA CONSULTADA.....	57
13.0 ANEXOS.....	60

INDICE DE FIGURAS

	PAGINA
Figura 1 Esquema de obtención de datos de la superficie terrestre mediante la percepción remota.....	7
Figura 2 Localización de la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa.....	15
Figura 3 Selección de campos de entrenamiento previo a la clasificación supervisada	21
Figura 4 Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) en la cuenca con imágenes Landsat MSS.....	30
Figura 5 Histogramas y polígonos de frecuencia para las diferencias del NDVI.....	32
Figura 6 Clasificación de coberturas y usos del terreno de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sin, a partir de la escena MSS de 1973, 1986 y escena ETM+ para 2000.	33

INDICE DE CUADROS

	PAGINA
CUADRO 1. Características y aplicaciones de imágenes Landsat (MSS y ETM+).....	9
CUADRO 2. Conceptualización de las clases utilizadas.....	22
CUADRO 3. Matriz de error.....	24
CUADRO 4. Datos estadísticos de los valores de brillantez para los diferentes campos de entrenamiento.....	34
CUADRO 5. Matriz de error para la clasificación supervisada de la imagen Landsat ETM+ de la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa. 2000.....	35
CUADRO 6. Extensión territorial de las coberturas y usos del terreno en el área de estudio	35
CUADRO 7. Matriz de detección de cambio de 1973 a 1986.....	36
CUADRO 8. Matriz de detección de cambio de 1986 a 2000.....	37
CUADRO 9. Matriz de detección de cambio de 1973 a 2000.....	38
CUADRO 10. Matriz de detección de cambio de 1973-200 con valores esperados bajo la hipótesis nula de independencia estadística.....	39
CUADRO 11. Probabilidades de transición de las coberturas y usos de terreno observadas de 1973-1986, 1986-2000 y 1973-2000 y esperadas de 1973-2000.....	40

RESUMEN

Con el objetivo de analizar los cambios en la cobertura y usos de terreno durante el periodo 1973-2000 en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa y estimar las tendencias de transformación, se han elaborado mapas temáticos del área de estudio derivados de escenas de satélite Landsat MSS y ETM+ que fueron procesados por clasificación supervisada. El límite geográfico se obtuvo de la digitalización de cartas topográficas de INEGI 1:25000 con clave G12-6 Huatampo y G12-9 Los Mochis, que incluyen una superficie territorial de 4038km² (6.83% superficie estatal). De los mapas se obtuvieron siete coberturas y usos de terreno clasificados en lagunas y esteros, marisma, manglar, selva, vegetación secundaria, agricultura, suelos desnudos; las clases referentes a poblados y granjas camaronícolas se anexaron a los mapas temáticos a través de la digitalización de los mismos. El mapa temático de coberturas y usos de terreno de 2000 fue validado mediante datos de campo obteniéndose una exactitud global de 80% con valor de coeficiente de Kappa de 0.78, lo cual establece una alta concordancia entre los datos obtenidos digitalmente y los obtenidos en campo, permitiendo caracterizar acertadamente el paisaje del área de estudio. A través del análisis multitemporal post-clasificadorio se concluye que el uso de terreno predominante es la agricultura en diferentes etapas de desarrollo registrando 45% del área cubierta, desplazando de esta manera coberturas naturales y contribuyendo al desarrollo de la vegetación secundaria. El cambio de paisaje a lo largo de 27 años ha sido de 33% en toda la región. A través del modelo de Markov se muestra una fuerte asociación dependiente entre las etapas 1973 a 1986 y 1986 a 2000. Con un 83.6% se determina el grado de asociación que muestra un comportamiento estocástico entre cada cobertura y uso de terreno del área de estudio.

INTRODUCCIÓN

La organización del espacio es producto de la acción de una gran diversidad de factores económicos, políticos, culturales e ideológicos sobre la naturaleza que actúan de manera eventual o constante. El estudio del uso del terreno en las “escalas de tiempo” permite no solo diagnosticar la configuración territorial, sino explicar su devenir histórico y mostrarlo como un producto social dinámico y nunca acabado (Barrera y Ortiz, 1992).

La diferenciación espacial permite descubrir la heterogeneidad y complejidad en el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales. Lo que a cierta escala se percibe como rasgos o patrones homogéneos en el uso de terreno; en otra más detallada, esta misma “realidad” se presenta como un complejo y diversificado aprovechamiento del espacio en cuestión (Barrera y Boege, 1990)

Los cambios en el uso de suelo están relacionados con el desarrollo económico, el cambio ambiental, el crecimiento de población y la tecnología (Houghton, 1994). Estos modifican las propiedades de los ecosistemas más rápido que los propios procesos naturales. En las áreas costeras las principales amenazas para la productividad y diversidad del medio marino provienen de las actividades realizadas en la parte terrestre de las costas y las tierras interiores, afectando tanto la fase terrestre como acuática, en sus funciones morfodinámicas y procesos ecológicos (Bartlett, 1993; UNEP, 1995).

Estimaciones realizadas a finales de los 60's, por ejemplo, señalan que la carga fluvial de sedimentos hacia la costa pasó de nueve a 24 billones de toneladas al año por la introducción de la agricultura (Neshyba, 1987). En la actualidad las fuentes terrestres representan el 70% de la contaminación marina (Agenda 21, 2002), siendo la eutrofización uno de los efectos más comunes sobre las aguas litorales (Nixon, 1995); con ello se establece que la existencia, alteración o desarrollo de los ambientes costeros dependen en su mayoría de lo

que ocurra en el ambiente terrestre (Agenda 21, 2002). La interacción adecuada de ambos ecosistemas debiera conllevar al desarrollo económico sustentable donde se pudiera establecer el aprovechamiento de los recursos terrestres sin perder porciones considerables de los recursos marinos, sin embargo esto no ocurre.

Asimismo, la existencia de ambientes como los humedales dependen de condiciones creadas y mantenidas por factores en una amplia escala espacial que incluyen entre otros a los patrones de cobertura del terreno. (Pearson, 1994; Roman *et al.*, 2000), ya que estos juegan un papel preponderante sobre el desarrollo hidrológico de los humedales costeros al influir en los patrones de almacenamiento y descarga del agua (Richardson y McCarthy, 1994), así como en sustentar la biodiversidad por el efecto que tienen en la conectividad y movilidad de los procesos ecológicos del paisaje (Pearson *et al.*, 1995).

Dada la interdependencia de los procesos costeros con las actividades terrestres se ha propuesto integrar la gestión para la conservación del área costera con la de las cuencas hidrográficas (Inedito, 2004), por lo que es importante incluir a las cuencas o subcuencas dentro del diagnóstico previo a la generación e implementación de planes de manejo costero.

El estudio de las coberturas y los cambios en el uso del terreno requiere del análisis de amplias extensiones de terreno, en ese sentido las técnicas de percepción remota ofrecen una buena ventaja por su habilidad para coleccionar, estructurar y analizar información espacial relevante para dar seguimiento a variables ambientales relacionadas con la dinámica y usos de las coberturas terrestres en diferentes intervalos de tiempo y espacio (Green *et al.*, 1996; O'Regan, 1999; Mumby y Edwards, 2000).

Los cambios en el uso de suelo en México muestran una dinámica cuya perspectiva tiene múltiples facetas, de manera que su análisis implica una serie de consideraciones en las que la productividad es frecuentemente la variable más

notable. Geográficamente, el uso de suelo acorde para explotación agrícola, constituye entidades delimitadas que no están distribuidas de manera uniforme y

INTRODUCCION

que se caracterizan por la especificidad de su ubicación y atributos naturales de su entorno, de sus componentes, de la complejidad de sus interacciones con otros recursos, y otros elementos del ambiente, incluido el ser humano; el uso del suelo para la agricultura comercial tiene como característica obtener siempre la tasa media de ganancia del sector productivo sin tomar en cuenta la vocación agrícola del suelo, lo que tiene como consecuencia la apertura de tierras de cultivo a costa de bosque templados y selvas tropicales, denotando, de esta manera, el predominio de criterios “economistas” sobre los “ambientalistas”. El trabajo en tierras sin vocación agrícola, con baja fertilidad o con alguna limitante, para ampliar la frontera agrícola, ha obligado a emplear cada vez mayor cantidad de fertilizantes químicos que frecuentemente contaminan mantos freáticos y escorrentías superficiales, degradando el suelo al disminuir la incorporación de materia orgánica en los horizontes superiores de su perfil. De esta manera los productores con tierras más fértiles obtienen mayores ganancias (Fuentes, 1992).

En las últimas décadas el estado de Sinaloa, localizado al noroeste de la Republica Mexicana, ha registrado una serie de cambios en el uso de terreno en toda la región; primordialmente, el crecimiento agrícola ha sido una de las causas principales para la modificación del espacio terrestre y el ambiente costero registrando de esta manera, sobreexplotación del suelo para aumentar la producción de comestibles agrícolas (tomates, papas, algodón, etc.) dirigidos al interior y exterior del país.

De esta manera, el estado se caracteriza por sus prácticas agrícolas altamente productivas y tecnificadas; de igual modo las características ambientales de la costa del estado han permitido el establecimiento de las denominadas granjas camaronícolas, localizándose al norte del estado la mayor densidad establecida (Trelles, 2002). Ambas actividades económicas han modificado el paisaje costero del estado, ya que su establecimiento genera

cambios en el área e intensidad de uso del terreno al desplazar usos originales por otros inducidos.

INTRODUCCION

Por otro lado, existe la interdependencia entre ambientes marinos y terrestres de tal manera que la alteración de uno repercute en el otro lo que conlleva a un análisis específico para demarcar el impacto que se pueda tener del cual resulta toda una serie de propuestas generales o particulares que se pudieran establecer en un futuro próximo a la evaluación del área de estudio considerando que para un desarrollo sustentable de los ambientes es necesario conocer las características y el comportamiento de cada uno de los factores (identificando para su análisis a los más relevantes) que se encuentran interrelacionados en dicho espacio.

Actualmente existen pocos estudios sobre los cambios en la cobertura y usos de terreno en la región (Trelles, 2002 y Martínez, 2003) los cuales no cubren la totalidad de la cuenca considerada para el presente estudio y su temporalidad no es suficiente para analizar adecuadamente las tendencias de cambio en los patrones y usos de terreno. Como parte del proyecto de Investigación “Cambios de Usos de Suelo en la Cuenca Lechuquilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa: impactos sobre la estructura e hidrología del paisaje” (SEMARNAT-2002-C01-112) se realiza el presente trabajo.

Una de las técnicas favorablemente empleadas desde principios de 1970 para llevar a cabo una serie de estudios que permiten caracterizar el terreno es el análisis visual y digital de las imágenes de satélite (Bocco, *et al.*, 1991) por lo que en el presente trabajo se ha recurrido al uso de las mismas con la finalidad de obtener resultados de mayor utilidad en su interpretación.

De tal manera que mediante un análisis digital de imágenes de satélite en escalas de tiempo se ha logrado caracterizar y analizar un espacio enmarcado por la cuenca hidrográfica Lechuquilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, en el contexto de cambios en coberturas y usos de terreno que se traducen en perspectivas de comportamiento a futuro.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar los cambios en la cobertura y usos del terreno durante el periodo 1973 – 2000 en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa a partir del análisis digital de una serie histórica de imágenes de satélite Landsat.

Objetivos Particulares

Generar mapas temáticos de las condiciones históricas y recientes de la vegetación y de las coberturas y usos de terreno de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa a través de la estimación de índices de vegetación y la clasificación supervisada de imágenes Landsat.

Evaluar las tendencias de cambio de la cobertura y usos de terreno en la cuenca a través de la diferenciación de imágenes de satélite, la generación de matrices de detección de cambio e indicadores a nivel de cobertura y paisajes.

Modelar los cambios de cobertura y usos del terreno por medio de cadenas de Markov durante el periodo 1973 – 2000.

HIPÓTESIS

La clasificación supervisada de imágenes digitales apoyada con trabajo de campo contribuye al análisis objetivo en el estudio de las coberturas y cambios en el uso del terreno y permite hacer una observación probabilística de las tendencias de cambio.

ANTECEDENTES

El bienestar económico y social de una nación o de una región depende directamente de los recursos naturales de que dispone y de la habilidad de los habitantes para utilizar estos recursos en su beneficio. El manejo inadecuado de los mismos tiene como consecuencia que sean sobre-explotados o incluso destruidos, antes de ser verdaderamente apreciados. Para obtener los beneficios de un recurso tiene que ser primero identificado y luego gestionado; para ello, el mapeo es un método eficiente donde se expone la información necesaria y fácilmente comprensible que permita el desarrollo de la planificación con base a propuestas de manejo y conservación de los ambientes y recursos. En términos generales los mapas son una representación de los rasgos terrestres de una porción de la superficie de la Tierra; su tamaño inferior al de la realidad, es el responsable de su convivencia como método para ilustrar el mundo (Buttler, *et al.*, 1990).

En la actualidad la generación de mapas es impensable sin recurrir a la percepción remota cuyo concepto más aceptado es el que la define como el grupo de técnicas para recolectar e interpretar información sobre la superficie terrestre sin tener que estar en contacto físico con ella; con apoyo de una fuente externa de iluminación (sol) (figura 1) y a través de un sensor es transformada en información digital (Campbell, 1996). La percepción remota puede ser una alternativa interesante a los métodos tradicionales de estudio del campo, por la capacidad de cubrir grandes áreas rápida y repetidamente (Sabins, 1996), ejemplo de ello es la confección del mapa de vegetación y uso de suelo de 1976 para la República Mexicana (Bocco, *et al.*, 1991).



FIGURA 1. Esquema de obtención de datos de la superficie terrestre mediante

Las distancias que separan al sensor de las superficies estudiadas pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros; un sensor dado puede detectar radiación electromagnética únicamente a través de un rango limitado de longitudes de onda, este rango es referido como la banda espectral. La amplitud de la banda espectral, esto es, el grado en el que el rango limitado de las longitudes de onda es detectado, es referido como la resolución espectral.

Algunos sensores están compuestos por cierto número de detectores, cada uno de ellos sensible a diferentes longitudes de onda. Estos son llamados sensores multiespectrales y el nivel de detalle espacial con que captan la información es referido como resolución espacial, descrita en términos de la unidad de área más pequeña que puede ser distinguida de sus vecinos. Los elementos individuales que componen una imagen son llamados píxeles y corresponde a la resolución espacial del sensor, esto es, el tamaño de la celda de resolución terrestre. Si el retraso de adquisición de información es pequeño, por ejemplo de algunas horas, los datos son llamados datos en tiempo real; cuando los datos han sido colectados con considerable anticipación a su análisis, estos son referidos como datos históricos o datos de archivo (Meaden y Kapetsky, 1992).

En términos generales, la percepción remota se basa en el análisis de información espectral contenida en formatos digitales, con características y escalas espacio temporales definidas (Trelles, 2002). Los sensores que miden la radiación reflejada o emitida por los objetos, proveniente de una fuente externa (sol), son llamados pasivos porque no poseen radiación propia, en esta categoría de sensores se encuentran entre otros el SPECTRON SE-590, el Mapeador Temático (TM) del Landsat, y el HRV (Aut. Resolution Visible) de SPOT (Système Proboitoire de Observation de la Terre), entre otros.

El sistema Landsat está compuesto hasta el momento por 5 satélites, que fueron desarrollados por la NASA (National Aeronautics and Space

Administration), inicialmente recibieron el nombre Earth Resources Technology Satellite-1 (ERST-1) y en enero de 1975 pasaron a ser llamados Landsat (Trelles,

2002). El MSS (Multispectral Scanner) es un sistema sensor Landsat que permite el registro continuo de líneas del terreno en una faja de 185Km, perpendicularmente a la órbita del satélite. TM (Thematic Mapper) es un sistema avanzado de barrido multiespectral Landsat, concebido para proporcionar una: resolución espacial más fina, mejor discriminación espectral entre objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mejor precisión radiométrica con relación al sensor MSS. Los sensores más utilizados para estudios de cobertura de terreno han sido los instalados en los satélites Landsat (MSS Landsat 1-5, con resolución de 80m; TM-Landsat 4-5, resolución de 30m; ETM-Landsat 7, resolución de 30m multiespectral (cuadro 1) (Meaden y Kapetsky, 1992).

CUADRO 1. Características y aplicaciones de imágenes Landsat MSS y ETM+

Banda	Resolución	Aplicación	Resolución
MSS	Espectral μm		M
4	0.50-0.60 verde	Enfatiza movimientos de masa de agua con alto contenido de sedimentos, estudios de aguas someras, bancos de arena y arrecifes.	80
5	0.60-0.70 rojo	Características culturales, como áreas urbanas y caminos, tonos de suelo árido.	80
6	0.70-0.80 infrarrojo cercano	Realza vegetación y relieves topográficos	80
7	0.80-1.10 infrarrojo cercano	Mejor penetración en la bruma y ponen de relieve la vegetación y los límites tierra-agua.	80
Banda	Resolución	Aplicación	Resolución
ETM+	Espectral μm		M
1	0.45-0.515 azul	Batimetría en aguas con escasa turbiedad, diferencias entresuelo y vegetación, vegetación deducida y coníferas, tipo de suelos.	30
2	0.525-0.605 verde	Indicación del ritmo de crecimiento / vigor de la vegetación, estimación de la concentración de sedimentos, batimetría en aguas turbias.	30
3	0.63-0.69 rojo	Diferenciación de la absorción de clorofila / especies, clasificación de cultivos, cobertura y densidad vegetal. Geología.	30
4	0.75-0.90 infrarrojo cercano	Delineación de masas de agua, variaciones de biomasa y estrés en vegetación.	30
5	1.55-1.75 infrarrojo medio	Humedad / estrés de la vegetación, minerales.	30
6	10.4-12.5 infrarrojo termal	Temperaturas aparentes de la superficie, separación de los usos de suelo y zonas urbanas. Diferenciación de zonas incendiadas y masas de agua.	30
7	2.09-2.35	Zonas con alteraciones hidrotérmicas, exploración de	30

	infrarrojo medio	minerales, discriminación de tipos de suelo.
Pan	0.52-0.90	Características culturales, como áreas urbanas y 15 caminos, tonos de suelo árido.

Adaptado de Meaden y Kapetsky, 1992.

ANTECEDENTES

La cobertura repetitiva o multitemporal es justificada en base a la necesidad de estudiar varios fenómenos dinámicos cuyos cambios pueden ser identificados a través del tiempo. Estos incluyen eventos de peligros naturales, patrones cambiantes en el uso de tierras y los aspectos hidrológicos y geológicos del área de estudio. El uso de imágenes Landsat MSS y TM en evaluaciones de recursos naturales y de peligros naturales se ve facilitada por el aspecto temporal de las imágenes disponibles (Bocco, *et al.*, 1991).

La información generada a partir del procesamiento manual y digital de imágenes de satélite requiere de un sistema eficaz de manejo e integración de datos que permita su manipulación, procesamiento y transformación en información útil. En éste sentido los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan el mecanismo más adecuado para utilizar la información que se genera por medio de sistemas de percepción remota (Bocco, *et al.*, 1991) ya que técnicamente es referido como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios definidos por el analista o interprete. Los SIG tiene que trabajar con información espacial y temática, es decir, tiene que trabajar con cartografía y con bases de datos a la vez, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográfica y facilitando de esta forma la evaluación del impacto medioambiental (Buttler, *et al.*, 1990).

La estructura, función y cambio son considerados las tres principales propiedades del paisaje, y su identificación y medida dependen de la escala espacial de observación (Meentemeyer y Box, 1987; Matteucci, 1998). La cuantificación de la estructura es considerada un prerrequisito para el análisis del

patrón espacial y de su relación con los procesos que se estudian. La cuantificación reduce la complejidad del paisaje a un conjunto de valores numéricos o índices (Turner y Gardner, 1991; Matteucci, 1998b). En este contexto la percepción remota se ha constituido en una herramienta importante para el

ANTECEDENTES

análisis, facilitando y ampliando la representación, interpretación y análisis de los datos espaciales (Coulson *et al.*, 1991; Texeira *et al.*, 1992). Su uso combinado con la tecnología SIG, ha permitido incrementar las posibilidades de tratar paisajes y regiones en forma integral, aportando en estas investigaciones una mejor planificación y manejo en su diagnóstico y transformación (Jonson, 1969; Quattrochi y Pelletier, 1991).

Las técnicas de percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG) permiten analizar indicadores ambientales en un nivel de paisaje, tales como los cambios en el tamaño y forma del hábitat y las coberturas vegetales que pudieran tener relación con la biodiversidad y condición de los ecosistemas. Los indicadores en el ámbito de paisaje son importantes conforme se pasa a mayores escalas espaciales, temporales y de organización con el fin de estudiar y comparar los efectos acumulados de la degradación de los ecosistemas sobre paisajes y regiones enteras (Klemas, 2001).

Diversos estudios basados en técnicas de Percepción Remota han contribuido al conocimiento de los procesos naturales e inducidos por el hombre, que ocurren en zonas continentales y en múltiples áreas del conocimiento dentro de los cuales se encuentra la evaluación de los impactos debido a actividades antropogénicas a través de los cambios de uso de terreno.

Desde sus inicios la percepción remota satelital ha tenido un amplio uso en el estudio de las coberturas y los cambios en el uso de suelo ya que tienen la facilidad de poner en una imagen grandes extensiones de terreno con una resolución lo suficientemente fina para hacer diferentes evaluaciones. Asimismo, permite la creación de mapas que muestran las diferentes coberturas y usos del terreno, a partir de los cuales se evalúa la extensión, distribución y tendencias de

cambio, permitiendo caracterizar la dinámica que estos procesos llevan en el espacio geográfico y las consecuencias que provocarían en diferentes lapsos de tiempo (López, 2000).

Un análisis del cambio de uso del terreno debe considerar la extensión, intensidad y frecuencia del cambio. Estas variables permiten evaluar las

ANTECEDENTES

condiciones abióticas del ecosistema afectado, la disponibilidad de recursos, así como las Interacciones que se llevan a cabo en dicho ecosistema. En la naturaleza los ecosistemas cuentan con elementos estructurales y funcionales que se encuentran en una constante interacción dinámica. Existe todo un gradiente de cambios de uso del terreno tanto por la frecuencia como por la extensión y tipo de cambio. Por otro lado estos cambios están relacionados con variables sociales, políticas, económicas, técnicas y culturales. La percepción remota también posibilita la generación de inventarios históricos que permiten supervisar los cambios en el paisaje de forma efectiva (Mas, 1999). La premisa básica en los estudios de detección del cambio con percepción remota radica en el hecho de que el cambio en los valores de brillantez como producto del cambio en la cobertura y uso de terreno deben ser mayores a los cambios producto de otros factores, tales como diferencias en las condiciones atmosféricas, ángulo de la luz solar, y diferencia en la humedad del suelo (Singh, 1989).

Existen estudios que se enfocan en analizar el deterioro de la vegetación mediante estudios multitemporales del uso de suelo e índices de vegetación con imágenes Landsat y SPOT como los ejecutados por Maracchi, *et al.*, (1996); Ricotta, *et al.*, (1996) y Grignetti, *et al.*, (1997). Además de la cuantificación del cambio de los usos del suelo, algunos estudios tratan de relacionar estos cambios con los procesos naturales. Por ejemplo Kuntschik (1995) cuantificó la pérdida de suelo por la erosión hídrica en la cuenca del Ribeirao das Aras en Brasil para integrar un sistema de información geográfica.

El uso de técnicas de SIG en México es reciente, siendo a fines del siglo pasado cuando se presentan los primeros resultados de la aplicación de éstas

técnicas. Los primeros reportes se enfocaron a análisis exploratorios con base en aspectos socioeconómicos, por ejemplo para Tabasco se desarrollaron SIG para ubicar sitios adecuados para el cultivo (Gutiérrez-García, 1995).

En el caso concreto y relacionado a la zona de estudio, Trelles (2002) y Martínez (2003) realizaron estudios multitemporales con imágenes Landsat MSS y TM para caracterizar y evaluar la extensión de las coberturas y usos de terreno

ANTECEDENTES

en el municipio de Ahome y las subcuencas hidrográficas Bahía Navachiste y río Sinaloa. Ambos autores establecieron como conclusión que la agricultura es la principal actividad económica responsable en gran medida del cambio en el uso de terreno resultando de ella ocupación de suelos desnudos y desarrollo de vegetación secundaria en sus áreas de estudio; además de que, a medida de que crecen los asentamientos humanos, también aumenta la actividad acuícola.

En ambos casos denotan la ventaja de llevar a cabo un estudio de este tipo por medio de la percepción remota y el análisis post-clasificadorio. De manera que teniendo estos antecedentes sobre parte del área de estudio se considera conveniente realizar el presente estudio con la finalidad de analizar las tendencias de cambio por cambio en la cobertura y uso del suelo de un área más extensa completando así la descripción de la dinámica del espacio.

AREA DE ESTUDIO.

El estado de Sinaloa se localiza al noroeste de México entre los 22°29' y 27°02' latitud norte y los 105°23' y 109°28' longitud oeste, en un área de 59 000km² equivalente al 3% del área total del país; colinda al Norte con Sonora y Chihuahua, al Este con Durango y Nayarit; al Sur con Nayarit y el Océano Pacífico y al Oeste con el Golfo de California; en el área de lagunas litorales se alojan 12 bahías y 15 esteros donde se desarrollan actividades económicas como la camaronicultura y la pesca ribereña cuyas principales especies sujetas a explotación son el camarón, sierra, jaiba, tiburón, mojarra y lisa (INEGI, 2000).

En particular la Cuenca Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste se localiza al norte del estado de Sinaloa frente a las aguas del Golfo de California, entre los 25°45' y 26°12' N y los 108°28' y 109°21'W, (Figura 2) cuenta con una extensión de 4038km² (6.83% de la superficie estatal). Pertenece a la región hidrológica Sinaloa No. 10; limita al noroeste-suroeste con la cuenca del río El Fuerte y al noreste-sureste con la cuenca del río Sinaloa, ambas de la misma región hidrológica. A la cuenca se encuentran asociados más de once sistemas estuarinos entre los que destacan El Esteron, La Piedra, Colorado, Albufera la Presa que asociados a bahías como Lechuguilla, Santa Maria, Topolobampo, Ohuira, San Ignacio y Navachiste conforman un sistema acuático de grandes dimensiones que contribuye al desarrollo de actividades económicas como la acuicultura, servicios portuarios y la pesca.

El 91% de la cuenca está dentro de la provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Pacifico (subprovincia Llanura Costera y Delta de los ríos Sonora y Sinaloa) y el resto en la subprovincia Pie de la Sierra que forma parte de la Sierra Madre Occidental. (INEGI 2000). El relieve de la cuenca, cerca de la costa, permite la presencia de valles, en su mayoría, para el uso agrícola y de pendientes relativamente bajas a 200m de altura snm. También se localizan elevaciones secundarias como la serranía de Navachiste que inicia en la bahía Ohuira y se prolonga hasta la bahía de Topolobampo.

De acuerdo a la clasificación climatológica de Köppen modificada por García, (1973) el clima va de seco muy cálido y cálido (BSh') en las zonas altas y de muy seco, muy cálido y cálido (BWh') en la región costera, con temperatura promedio anual de 24°C con los meses más calurosos de julio a octubre y los más fríos de noviembre a marzo; la precipitación anual promedio es de 330.136mm. Las principales asociaciones vegetales son el bosque espinoso, bosque tropical caducifolio, vegetación halófila e hidrófila y matorral xerófito.

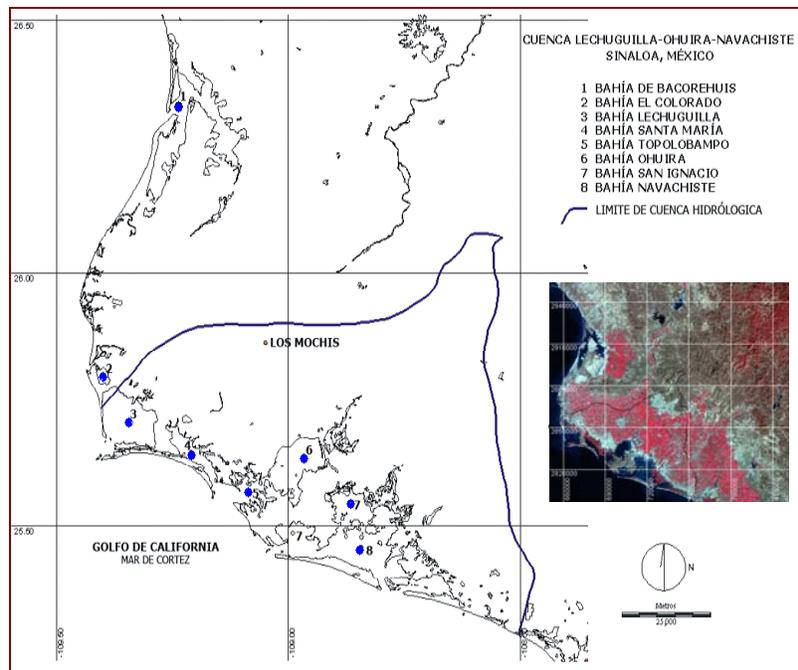
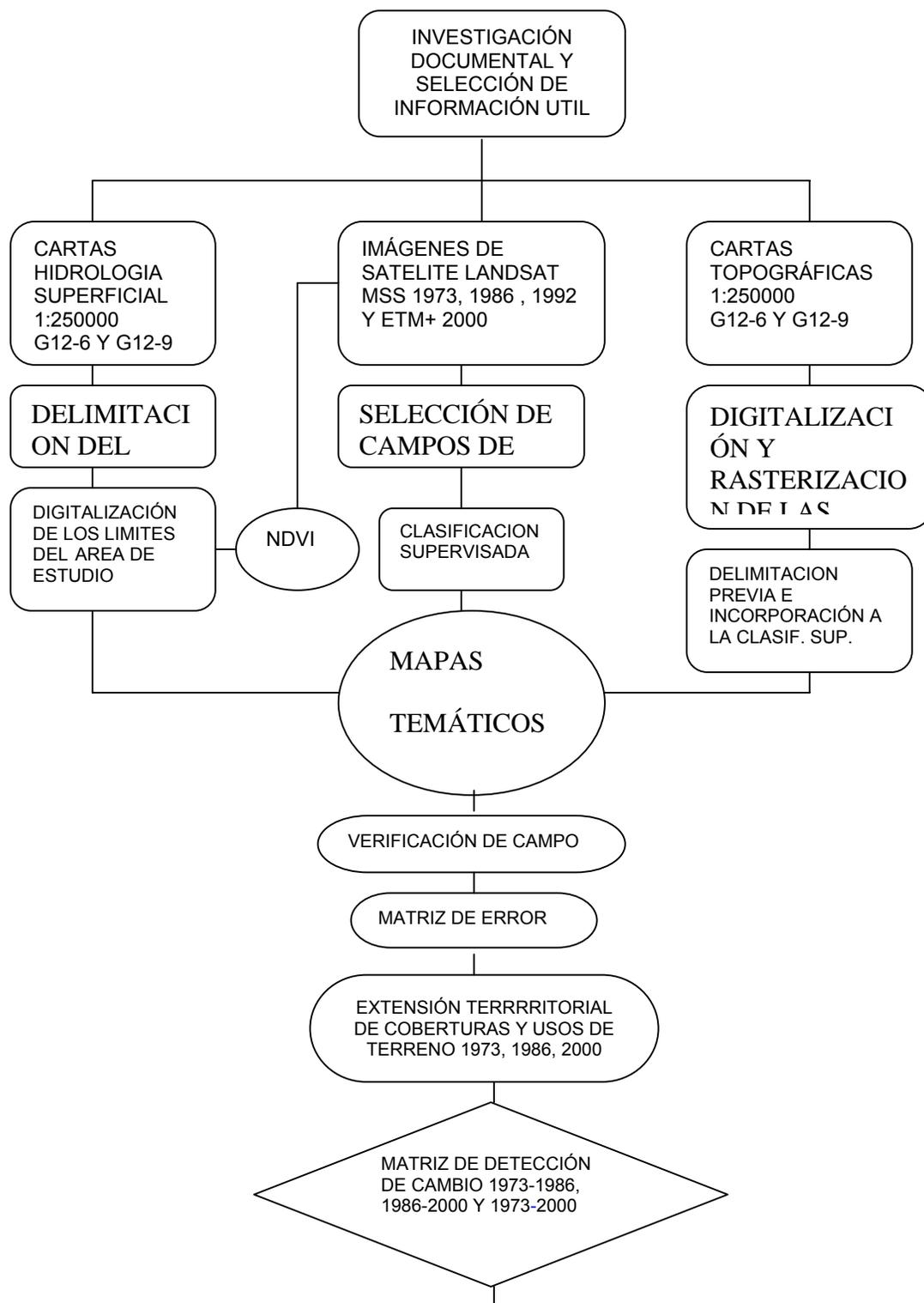


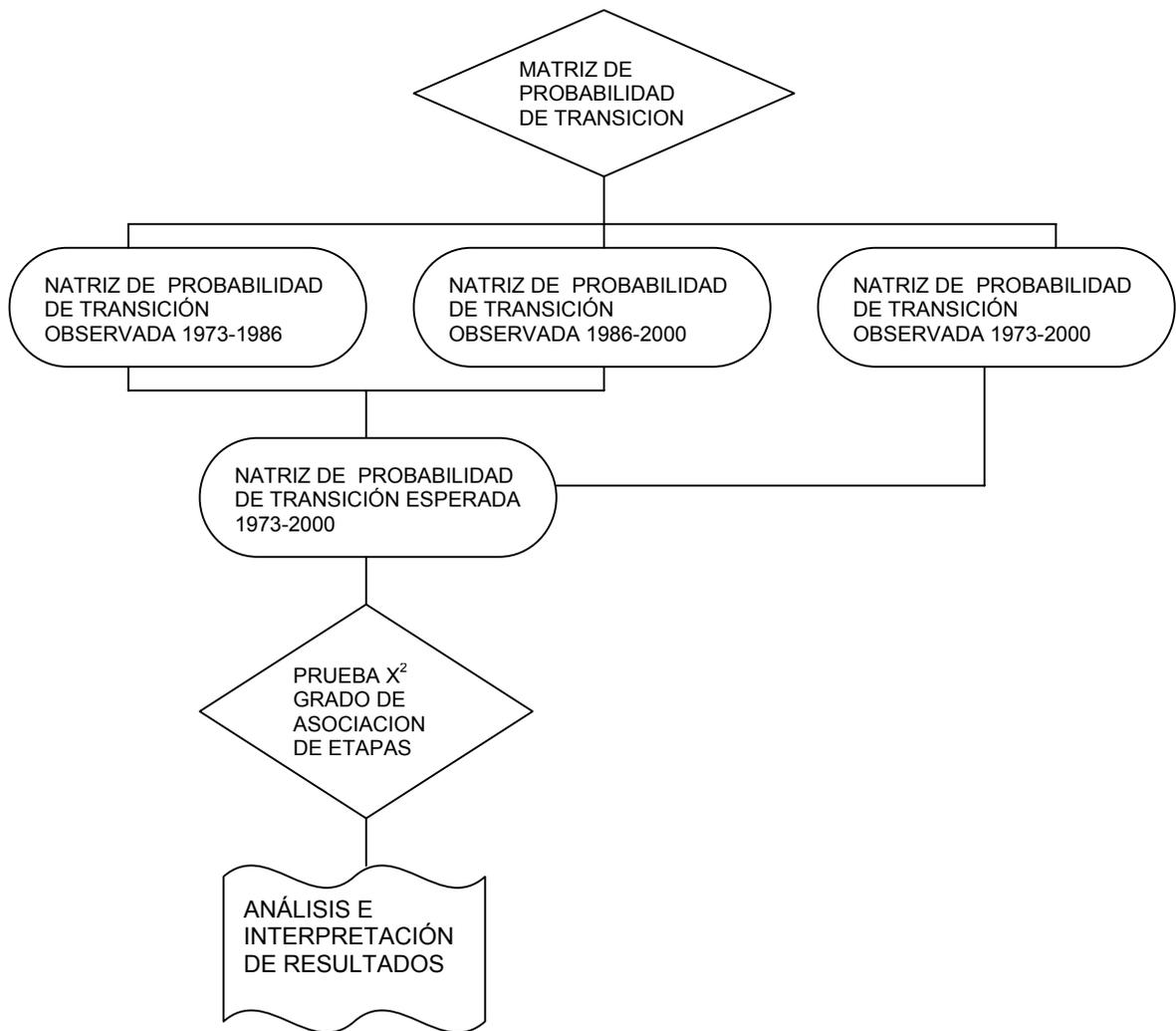
FIGURA 2. Localización de la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa. En el recuadro composición en falso color 432 de Landsat ETM+ del 2000 del área de estudio.

En la cuenca se localizan parte de los municipios Ahome y Guasave, con 359, 146 y 277 402 habitantes en el año 2000, respectivamente (INEGI 2002); sin embargo la única cabecera municipal dentro del área de estudio es Los Mochis, que en el 2000 contaba con 200 906 habitantes; otras ciudades importantes son General Juan José Ríos, Emiliano Zapata, Primero de Mayo. La principal actividad económica en la región es la agricultura de riego mecanizada, siendo los principales cultivos maíz, frijol, sorgo, trigo, cártamo, algodón (INEGI, 2000) con

una superficie cubierta de 80%. Con casi 90 granjas y 7500 has en operación, la acuicultura destaca en el cultivo del camarón blanco.

CUADRO DE METODOS SEGUIDOS PARA EL PRESENTE TRABAJO





MATERIAL Y METODOS

Se analizaron los cambios en los patrones de cobertura y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa durante el periodo 1973–2000 aplicando dos aproximaciones de detección de cambio a una serie histórica de imágenes Landsat.

7.1 Edición de imágenes multiespectrales del área de estudio.

A partir de imágenes Landsat MSS de 1973, 1986 y 1992 y ETM+ del 2000, de los path/row 33/42 y 34/42, se editaron escenas multiespectrales del área de estudio. Para cada año se formó un mosaico concatenando las imágenes de ambos path/row con el comando MOSAIC de IDRISI 32, que además de unir las imágenes con base a sus coordenadas geográficas, también balancea sus valores numéricos de brillantez (Eastman, 1999).

Las escenas fueron corregidas geográficamente a la zona 12 norte del sistema Universal Transversal de Mercator (UTM), utilizando el Datum NAD27 basado en la elipsoide de Clarke 1866, dentro de las coordenadas UTM X=653533, Y=2902345 y X=762373, Y=2797705 con una resolución espacial de 60 m para las imágenes MSS y de 30 m para las imágenes ETM+.

Posteriormente, las escenas fueron acotadas a los límites de la cuenca sobreponiéndoles una mascara con el polígono de la cuenca a través de la multiplicación de imágenes, de tal forma que los píxeles dentro del polígono conservaran su valor de brillantez (número digital) y el resto tomara un valor de cero conformando un fondo (background).

La máscara se generó digitalizando los límites de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste de las cartas de hidrología superficial escala 1: 250 000 G12-6 Huatabampo y G12-9 Los Mochis (INEGI, 1999) con el programa Autocad 2004 y una tableta digitalizadora CalComp modelo DrawingBoard III. El vector resultante se transformó a formato raster, con las mismas propiedades geométricas que las

escenas multiespectrales, asignando el valor de uno a los píxeles dentro del polígono de la cuenca y de cero a los píxeles fuera de este.

7.2 Análisis de Detección de Cambios.

Los cambios de cobertura y uso del terreno dentro de la cuenca se analizaron a través de la substracción de imágenes del índice normalizado de vegetación (Eastman y McKendry, 1995) y el análisis multitemporal postclasificadorio (Dobson, *et al.*, 1995; Mas, 1999; Ramsey III, *et al.*, 2000; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002).

7.2.1 Substracción de imágenes del índice normalizado de vegetación.

Se han desarrollado diversas técnicas para el estudio cualitativo y cuantitativo del estado de la vegetación a partir de medidas espectrales contenidas en imágenes de satélites. Entre estas se encuentra el índice normalizado de vegetación (NDVI por sus siglas en inglés), que es una variable que permite estimar el desarrollo de la vegetación con base a la medición, con sensores remotos, de la intensidad de la radiación electromagnética en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano que la vegetación absorbe o refleja. El NDVI está positivamente correlacionado con el dosel de vegetaciones homogéneas y en general es un buen indicador del estado de la densidad de la vegetación (Maracchi, *et al.*, 1996; Green, *et al.*, 1997; Green, *et al.*, 1998; Purevdorj, *et al.*, 1998).

La clorofila de las cubiertas vegetales, absorbe la radiación electromagnética en la longitud de onda del rojo (0.6-0.7 μm) y la refleja en la longitud de onda del infrarrojo cercano (0.7-1.3 μm), así el NDVI está definido como:

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})$$

Los valores de NDVI oscilan entre -1.0 y 1.0. De ellos, solo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el rojo que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve y agua, zona de suelos desnudos y rocas. El valor del NDVI, su distribución

MATERIAL Y METODOS

espacial así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo, puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona (INFOCARTO, 2004).

La primera aproximación a la detección del cambio fue por la substracción del NDVI estimado con las bandas dos (rojo) y cuatro (infrarrojo cercano) de las escenas Landsat MSS de 1973, 1986 y 1992. Una vez estimados los índices de vegetación de cada año se realizó la substracción de imágenes de par en par: 1973 vs 1986, 1986 vs 1992 y 1973 vs 1992, y se generó un histograma de las diferencias.

La media aritmética esperada de las distribuciones (histogramas) sería cero bajo la hipótesis nula (H_0) de un escenario sin cambios. Para establecer los umbrales de cambio se utilizaron los intervalos de confianza de la media al 95% (Eastman y McKendry, 1995):

$$\mu - 1.96\sigma \text{ (cambio)} \leq \text{no cambio} \leq \mu + 1.96\sigma \text{ (cambio); al 95\% de confianza.}$$

7.2.2 Análisis multitemporal post-clasificatorio

El análisis multitemporal post-clasificatorio consiste en la comparación, a través de una tabla de contingencia denominada matriz de detección de cambio, de mapas temáticos de fechas diferentes producidos de manera independiente por la clasificación de imágenes multiespectrales (Sigh, 1996; Mas, 1999; Ramsey III *et al.*, 2000; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002).

7.3 Generación de mapas temáticos de la cobertura y uso del terreno por clasificación supervisada de las escenas multiespectrales y digitalización de datos auxiliares.

La primer etapa del análisis multitemporal postclasificadorio consistió en la generación de mapas temáticos de la cobertura y usos del terreno en la cuenca a partir de la clasificación de las escenas multiespectrales de cada año (Campbell, 1996) y la digitalización de datos auxiliares (Ramsey III, *et al.*, 2001).

MATERIAL Y METODOS

Las escenas de cada año se clasificaron de manera independiente con métodos supervisados con los algoritmos de máxima verosimilitud y extracción y clasificación de objetos homogéneos (ECHO por sus siglas en inglés). El algoritmo de máxima verosimilitud se basa en la probabilidad de que un píxel, con una respuesta espectral específica, pertenezca a una clase determinada, cuya firma espectral está contenida en los campos de entrenamiento. El algoritmo usa los datos de entrenamiento para estimar la media y varianza de la brillantez de las clases en cada una de las bandas espectrales disponibles, las cuales son usadas para estimar las probabilidad de que un píxel n particular pertenezca a una de las clases definidas con anterioridad (Campbell, 1996).

Por su parte el algoritmo ECHO, es un procedimiento contextual que además de incorporar las variación espectral de las imágenes, también pondera las variaciones espaciales existentes entre los píxeles que componen la imagen en el proceso de clasificación. El procedimiento primero ordena la imagen en regiones espectrales estadísticamente homogéneas (objetos o campos homogéneos), que después son clasificadas con base al esquema de máxima verosimilitud (Kettig y Biehl, 1995).

Las clases utilizadas en el proceso de clasificación fueron 1) Lagunas y esteros, 2) Marismas, 3) Manglar, 4) Selva, 5) Vegetación secundaria, 6) Agricultura y 7) Suelos agrícolas (Cuadro 2). Agrupar diferentes subclases en una sola cobertura sin perder el concepto de las mismas, permite una síntesis

adecuada para la interpretación de tal manera que solo se obtuvieron 9 clases a utilizar. El proceso de clasificación supervisada comenzó con la digitalización de los campos de entrenamiento sobre compuestos en falso color de las escenas (Figura 3) y la extracción de la firma espectral de cada una de las clases definidas.



FIGURA 3. Selección de campos de entrenamiento para la clasificación supervisada

MATERIAL Y METODOS

A los mapas temáticos resultantes de la clasificación se añadieron como datos auxiliares los polígonos de las clases 8) Poblados y 9) Camaronicultura (Cuadro 2).

Cuadro 2. Conceptualización de las clases utilizadas para la generación de mapas temáticos.*

Clase	Descripción	ID	Imagen
Lagunas y Esteros	Sistemas estuarinos con comunicación permanente o intermitente con el mar: bahías, esteros y lagunas.	1	
Marismas	Áreas de suelos salinos sujetas a inundación temporal por acción de mareas con o sin cubierta vegetal.	2	
Manglar	Asociación vegetal conformada por una o más de especies de de mangle: mangle blanco, mangle rojo, mangle negro y mangle botoncillo.	3	
Selva	Bosque tropical caducifolio y bosque espinoso.	4	
Vegetación secundaria	Vegetación herbácea y/o arbustiva en alguna etapa temprana de sucesión.	5	

Agricultura	Terrenos agrícolas u otra actividad pecuaria	6	
Suelos agrícolas	Terrenos agrícolas abandonados sin vegetación al momento de tomar la imagen	7	
Poblados	Asentamientos humanos urbanos y rurales	8	
Granjas camaronícolas	Humedales artificiales construidos para el cultivo de camarón	9	

MATERIAL Y METODOS

La clase Poblados se digitalizó sobre compuestos en falso color y sobre las cartas topográficas escala 1:250,000 G-12-9 y G-12-6 editadas por el Instituto Nacional de Geografía e Informática de México (INEGI) en 1984 y 1999.

La clase Camaronicultura fue digitalizada en pantalla sobre el compuesto pancromático de Landsat ETM+ con una resolución espacial de 30 m. Las granjas camaronícolas solo aparecen en la clasificación del año 2000 ya que la primera granja de la región aparece en 1988.

La digitalización consiste en crear vectores en forma de polígonos que posteriormente se convierten en imágenes raster con los mismos parámetros espaciales del mapa temático resultante de la clasificación, al cual se transponen como máscaras, de tal manera que se muestran en el mapa temático final como una clase más.

7.4 Evaluación de la exactitud de la clasificación del 2000.

Particularmente la percepción remota requiere del registro de información en campo para su calibración y validación, especialmente cuando se generan clasificaciones de coberturas y usos del terreno. Para determinar la validez de los datos procedentes de percepción remota existen métodos que permiten estimar la

exactitud de las clasificaciones, con base en el análisis de una matriz de error. Este tipo de análisis permite conocer la exactitud en dos categorías: exactitud individual por categoría y exactitud global de la clasificación.

La matriz de error (Cuadro 3) es un arreglo que expresa el número de unidades de muestra asignados a una clase particular en una clasificación con relación al número de unidades de muestras asignadas a la misma categoría, pero en otra clasificación que es considerada como correcta (datos de referencia o prueba). Las columnas usualmente representan los datos de referencia, en tanto que los renglones indican la clasificación generada de datos de percepción remota (Richards y Jia, 1999).

La matriz de error es una forma de representar la exactitud de un mapa en el sentido de que la exactitud de cada categoría está descrita por medio de los

MATERIAL Y METODOS

errores de comisión y omisión. El error de comisión sucede cuando se incluye un área dentro de una clase a la cual no pertenece, en tanto que el error de omisión se presenta cuando se excluye un área de una clase cuando en realidad pertenece a ella. La exactitud del productor y del usuario son medidas individuales para cada categoría de la clasificación, la exactitud del productor resulta de dividir las unidades correctamente clasificadas en una categoría dada, entre el número de unidades de muestra para esa categoría dentro de los datos de referencia (sumatoria de la columna de la categoría); en tanto que la exactitud del usuario se obtiene dividiendo las unidades correctamente clasificadas entre el número de unidades en la clasificación generada con datos de percepción remota (sumatoria del renglón de la categoría).

Adicionalmente, la exactitud total de una clasificación puede ser evaluada a través del coeficiente de Kappa (K), una técnica discreta multivariada que determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra. El coeficiente es una medida de la agregación o exactitud basada en las diferencias entre los datos de la clasificación y de referencia, y la exactitud de una clasificación debida al azar (Congalton y Green, 1999; Richard y Jia, 1999).

CUADRO 3. Matriz de error

		J = columnas (datos de referencia)			Total de Renglones n _{i+}
		1	2	K	
i = renglones (clasificación)	1	n ₁₁	n ₁₂	n _{1k}	n ₁₊
	2	n ₂₁	n ₂₂	n _{2k}	n ₂₊
	K	n _{k1}	n _{k2}	n _{kk}	n _{k+}
	Total Columna	n ₊₁	n ₊₂	n _{+k}	N
n + j					

MATERIAL Y METODOS

Si N es el número total de unidades de muestreo (puntos o campos de prueba) de la matriz de error y si:

x_{ij} es el valor de la clase i en el renglón i y representan unidades de muestreo correctamente clasificadas,

$n_{i+} = \sum x_{ik}$ (sumatoria de todos los valores de las columnas en el renglón i), y

$n_{+j} = \sum x_{kj}$ (sumatoria de todos los valores de los renglones en la columna j),

entonces:

exactitud del productor = n_{ij} / n_{+j}

exactitud del usuario = n_{ij} / n_{i+}

exactitud total = $\sum x_{ij} / N$

y el estimador del coeficiente de Kappa (K') es definido por:

$$K' = \frac{N \sum n_{ii} - \sum n_{i+} n_{+j}}{N^2 - \sum n_{i+} n_{+j}}$$

K' toma valores en el intervalo de cero a uno. Cuando es significativamente diferente de cero el proceso de clasificación es mejor que el de una clasificación debida al azar (Mas, 1997).

Los datos de referencia para construir la matriz de error se obtuvieron de muestreos de campo asistidos con un sistema de posicionamiento global marca Magellan modelo SporTrak con resolución +/- 4 m. A partir de mapas temáticos del área de estudio se obtienen diferentes puntos de referencia que a su vez se localizan en la cartografía de INEGI de manera que se trazan las rutas probables a seguir. Por medio del GPS se cubren las rutas marcadas en laboratorio y se toman algunos puntos adicionales que por medio del programa GPS Utility son trasladados al mapa temático construyendo de esta manera la matriz de error.

7.5 Generación de matrices de detección de cambio

Para el análisis multitemporal postclasificadorio, el mapa temático del 2000 con resolución de 30 m se sometió a un proceso de corrección geométrica con el fin de ajustarlo a los parámetros espaciales de los mapas temáticos de los años anteriores con resolución de 60 m.

Los mapas temáticos de cada fecha fueron traslapados en forma de pares: 1973 vs 1986, 1986 vs 2000 y 1973 vs 2000 para generar las matrices de detección de cambio. Una matriz de detección de cambio permite calcular la conjunción lógica de todas las combinaciones posibles de las clases representadas en dos mapas. Es un arreglo similar a la matriz de error, pero comparando mapas de diferentes fechas, la diagonal superior de la matriz representa píxeles sin cambio (Eastman, *et al.*, 1995; Jensen, *et al.*, 1998). De la matriz de detección de cambio se pueden calcular el porcentaje del área de estudio sin cambio (equivalente a la exactitud total) y un estimador del coeficiente

de Kappa (K') que toma valores de -1.0 cuando hay un cambio total del paisaje, de cero que denota cambios del 50% y de 1.0 indicando que no hubo cambios en el paisaje (Eastman, *et al.*, 1995).

Para cada clase, con los valores de la matriz de detección de cambio, se estimaron las estabildades de localización y residencia definidas por Ramsey III et al. (2001) como:

$$\text{Est. Localización} = \frac{\text{cobertura en el año base} - \text{pérdida de cobertura en el año base}}{\text{cobertura en el año base}} \times 100$$

$$\text{Est. Residencia} = \frac{\text{cobertura en el año final} - \text{cobertura en el año base}}{\text{cobertura en el año base}} \times 100$$

La estabilidad de localización mide la proporción de pérdida de una clase con respecto a su cobertura inicial, cae en el intervalo de cero a 100. El límite inferior denota que la clase no presentó pérdida en tanto que el límite superior implicaría

MATERIAL Y METODOS

la pérdida total de esa clase dentro del paisaje. Por su parte, la estabilidad de residencia es una medida de la razón de cambio de las clases, que puede tomar valores negativos cuando la cobertura de una clase es menor en el año final que en el año base, toma valores positivos cuando la clase aumenta con respecto al año inicial y toma valores de cero cuando la clase no presenta cambios.

7.6 Modelación de los cambios en la cobertura y uso del terreno usando cadenas de Markov

Adicionalmente, los cambios en la cobertura y uso del terreno fueron modelados usando cadenas de Markov de primer orden siguiendo el procedimiento propuesto por (Weng, 2002). Uno de los supuestos básicos de las cadenas de Markov en relación a los cambios de cobertura y uso del terreno, es que se trata de un

proceso estocástico en el que las diferentes categorías (cobertura y usos del terreno) son los estados de una cadena.

En una cadena de Markov el valor del proceso en el tiempo t , X_t , depende únicamente de los valores en el tiempo $t-1$, X_{t-1} , y no de la secuencia de valores X_{t-2} , X_{t-3} ,..... X_0 por los que el proceso pasó hasta llegar a X_{t-1} :

$$P\{X_t = a_j | X_0 = a_0, X_1 = a_1, \dots, X_{t-1} = a_i\}$$

$$= P\{X_t = a_j | X_{t-1} = a_i\}$$

$P\{X_t = a_j | X_{t-1} = a_i\}$, conocida como la probabilidad de transición de un paso, da la probabilidad de que el proceso realice la transición del estado a_i al estado a_j en un periodo de tiempo.

$$P\{X_t = a_j | X_{t-1} = a_i\} = P_{ij}$$

P_{ij} puede ser estimada con los datos observados contenidos en las matrices de detección de cambio tabulando el número de veces de los datos observados del dato i a j , n_{ij} , y por sumar que el número de veces que el estado a_i ha ocurrido, n_i .

$$P_{ij} = n_{ij} / n_i$$

MATERIAL Y METODOS

En primera instancia se probó la hipótesis nula (H_0) de independencia estadística (los cambios de 1973 a 1986 son independientes de los cambios de 1986 al 2000) comparando los valores esperados, bajo H_0 , con los datos actuales con el estadístico χ^2 , en este caso denotado como K^2 . Si M es el número de clases de coberturas del terreno, los grados de libertad (ν) de la prueba son iguales a $(M-1)^2$, estableciéndose un nivel de significancia (α) de 0.05.

$$K^2 = \sum_i \sum_k (N_{ik} - N_{ik})^2 / N_{ik}$$

Con las matrices de cambio de 1973-1986 y 1986-2000 se calcularon las probabilidades de transición n_{ij} y n_{jk} , para un periodo de tiempo de 13 y 14 años,

respectivamente. Con la matriz de 1973-2000 se estimaron los números (área en hectáreas) de las transiciones observadas N_{ik} (datos actuales), en tanto que los valores esperados E_{ik} se estimaron a partir de la ecuación de Chapman-Kolmogorov. De acuerdo a la hipótesis de Markov la matriz con las probabilidades de transición que gobiernan el periodo 1973-2000 pueden estimarse multiplicando las matrices de 1973-1986 y 1986-2000. Estas probabilidades de transición pueden usarse para calcular el número esperado:

$$E_{ik} = \sum_j (N_{ij})(N_{jk}) / N_{.j}$$

donde: N_{ij} es el número (área en hectáreas) de transiciones de la categoría i a j de 1973 a 1986; N_{jk} es el número de transiciones de la categoría j a k de 1986 al 2000, y $N_{.j}$ son las hectáreas en la categoría j en 1986.

Para probar la dependencia “markoviana” de primer orden también se utilizó una prueba con χ^2 (Weng, 2002).

$$\chi^2 = \sum_i \sum_k (O_{ik} - E_{ik})^2 / E_{ik}$$

MATERIAL Y METODOS

donde: O_{ik} y E_{ik} son las probabilidades de transición observadas y esperadas, respectivamente. La distribución de E_{ik} es una distribución markoviana que se aproxima a una distribución χ^2 con $(m-p-1)^2$ grados de libertad, donde m es la dimensión de las matrices y p el número de parámetros estimados. La hipótesis nula (H_0) de que los datos son de una distribución markoviana se rechaza si $\chi^2 > \chi^2_{v,\alpha}$. Se utilizó un valor de α de 0.05.

RESULTADOS

La concatenación de las imágenes Landsat MSS y ETM+ de los path/row 33/42 y 34/42 de los años 1973, 1986, 1992 y 2000, así como el posterior acotamiento a los límites de la cuenca dieron como resultado escenas multiespectrales con coordenadas UTM extremas 653533.56, 2797705.29 y 762373.56, 2902345.29 (zona 12 norte), cubriendo un área total de 1,138,901 hectáreas de las cuales el 40% se mantuvo como información y el resto como fondo o background.

Diferenciación de imágenes con el NDVI

Los mapas del índice normalizado de vegetación (NDVI por sus siglas en inglés), estimados con las bandas dos y cuatro de las escenas Landsat MSS de 1973, 1986 y 1992 se muestran en la Figura 4. En 1973 la media del NDVI fue de 0.002

y la desviación estándar de 0.278, en 1986 de 0.014 y 0.341, respectivamente y en 1992 la media fue de 0.001 y la desviación estándar 0.271. Estas estadísticas fueron calculadas para la población entera, pues se considero la totalidad de píxeles que conforman las escenas de la cuenca. Lo resultados denotan mayor cantidad de vegetación en 1986. Asimismo, el mapa del NDVI de ese año muestra mayor intensidad de verde que los otros dos mapas, en especial en la parte media de la cuenca donde se localizan los terrenos agrícolas.

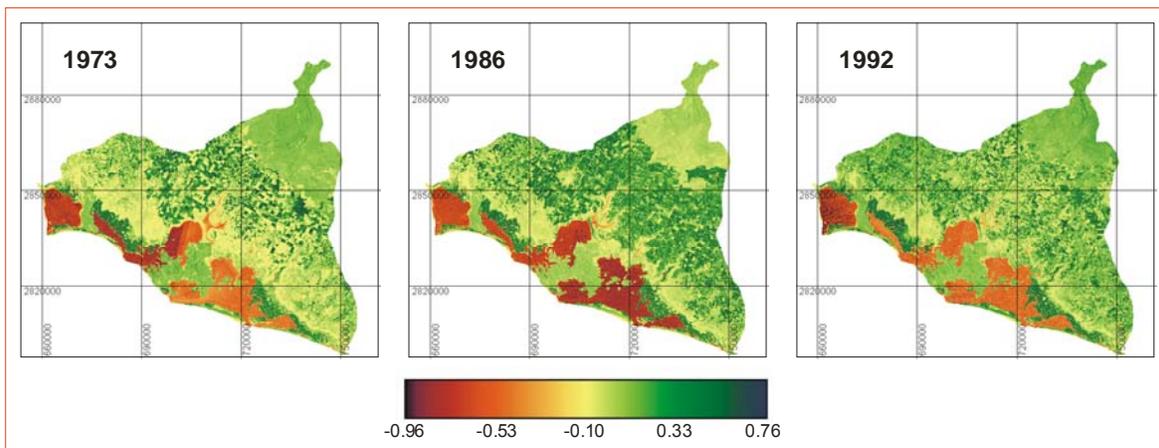


Figura 4. Índice normalizado de vegetación (NDVI) en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa estimado con imágenes Landsat MSS de 1973, 1986 y 1992. Coordenadas de los mapas UTM, zona 12 norte, Datum NAD 27.

8.0 RESULTADOS

Es importante señalar que en este caso han influido las fechas de toma de la imagen dado que las imágenes de 1973 y 1992 fueron tomadas en marzo, época considerada como fin de invierno donde la vegetación se encuentra nula o en inicio de crecimiento. Por otro lado, no se tiene registrada la fecha de la toma de imagen en 1986 pero probablemente esta ha pertenecido a un par de meses después donde el desarrollo de vegetación no se vio influenciada por condiciones atmosféricas extremas como ocurre en las imágenes contrarias. En este caso la etapa agrícola se encuentra en una fase superior de allí que se presente una mayor intensidad en verde. Comparando las tres imágenes se observa que

durante 1973 el norte de cuenca tenía vegetación selvática que para 1986 disminuye y para 1992 se recupera por selva secundaria.

Además de lo anterior, la topografía del área de estudio y el ángulo solar son factores que pueden modificar la reflectancia de las imágenes tomadas y que en este caso por carecer de datos exactos no fueron considerados.

La distribución de la diferencia del NDVI de 1973 y 1986 presentó una media de 0.012 y una desviación estándar de 0.216, por lo que los umbrales de cambio (los límites del intervalo de la media del 95%) se establecieron en -0.411 y 0.444. Para el periodo 1986-1992 la media fue de -0.013, la desviación estándar de 0.194 y los umbrales de cambio de -0.393 y 0.368. De 1973 a 1992 la media fue de 0.0 y la desviación estándar de 0.188, en este caso los umbrales se establecieron en -0.368 y 0.368. Detectándose mayor cambio en el NDVI de 1973 a 1986, toda vez que el intervalo para la media fue más amplio, que de 1986 a 1992 (Figura 5).

Partiendo del hecho de que la escala considerada es -1 a 1 donde 0 es un escenario sin cambio y solo los valores positivos representan variaciones y a partir del umbral son cambios marcados; es claro que las columnas del histograma 1973-1986, de menor tamaño cerca del cero y mayor hacia los extremos, es la de mayor variación en la cubierta vegetativa dado que se considera un intervalo al 95% con 2.5% incierto de cambios total.

RESULTADOS

Comparando los mapas con los histogramas es notorio que el estado de cubierta vegetal en 1973 es mucho menor que en 1986 por lo que coincide con el umbral de cambios en este periodo; inmediatamente después en 1992 la cubierta vegetal se ve disminuida pero sin grandes cambios como lo marca el histograma de este periodo. En lo que se refiere a los valores negativos en mapa e histograma referidos en color a tendencia rojo se observa una estabilidad en zonas cercanas al agua (marismas) con valor cero y lo que tiene variaciones mínimas son los cuerpos de agua.

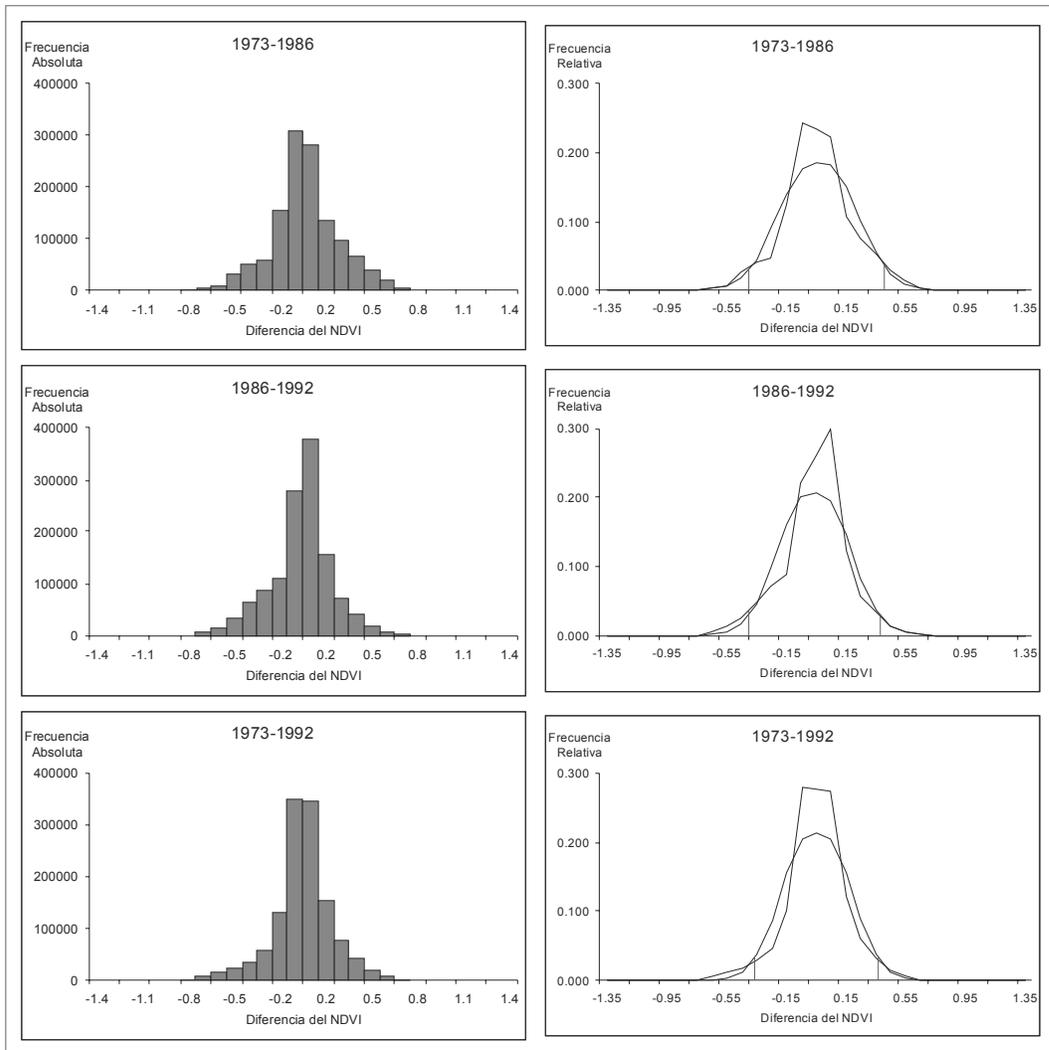


Figura 5. Histogramas y polígonos de frecuencia para las diferencias del NDVI de 1973 a 1986, 1986 a 1992 y 1973 a 1992. La curva azul en los polígonos de frecuencia representa el ajuste a la distribución normal y las líneas verticales rojas los umbrales de cambio (intervalo para la media del 95%).

Análisis multitemporal post-clasificatorio

Los mapas temáticos de las coberturas y usos del terreno de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste en 1973, 1986 y 2000 producidos por la clasificación supervisada de imágenes Landsat MSS y ETM+ y la digitalización de datos auxiliares se muestran en la Figura 6, en tanto que las firmas espectrales de los proyectos de clasificación de cada año se muestran en el Cuadro 4.

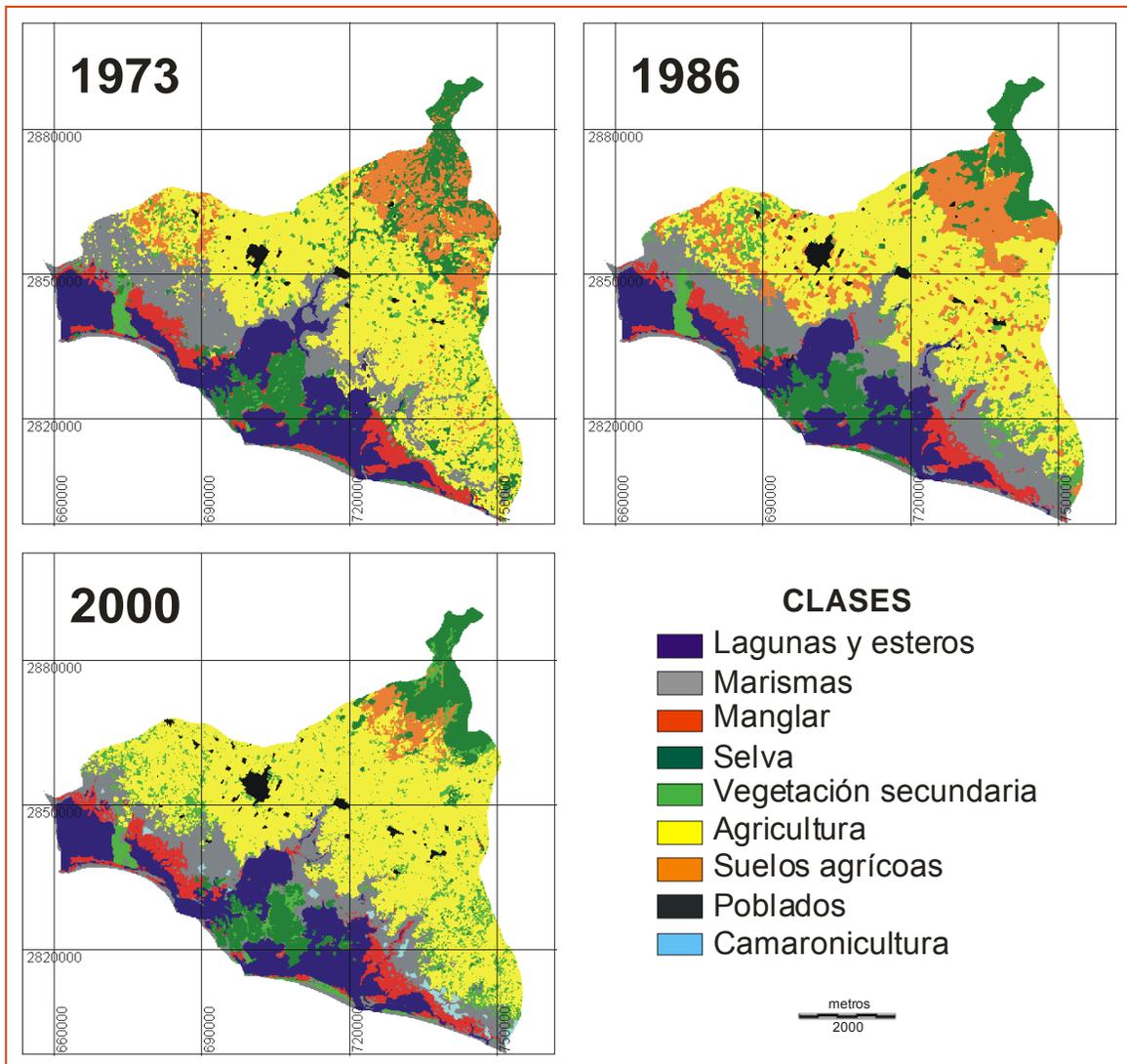


Figura 6. Mapas temáticos de cobertura y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa en 1973, 1986 y el 2000. Coordenadas de los mapas UTM, zona 12 norte, Datum NAD 27.

RESULTADOS

Una primera interpretación de los mapas anteriores es que existe un marcado cambio en suelos agrícolas que en principio se encontraba asociado a selva , para 1986 desplazó la cubierta vegetal y para 2000 fue desplazada por agricultura. Vegetación secundaria que representaba amplias áreas en 1973 para 1986 fue cubierta por agricultura y en 2000 se asoció a ésta misma.

Por otro lado, el mapa temático del 2000 se produjo con una exactitud total del 81% y un estimador del coeficiente de Kappa (K') de 0.78, para un total de 127 puntos de prueba. Las clases Lagunas y esteros, Poblados y Granjas camaronícolas fueron clasificadas con exactitudes del productor y usuario del 100%. Asimismo, la clase Agricultura fue la de menor exactitud del productor y la clase Vegetación secundaria la que presentó menor exactitud del usuario (Cuadro 5).

Cuadro 4. Datos estadísticos de valores de brillantez para los diferentes campos de entrenamiento

Clase	Año	No. subclases	Brillantez (ND)					
			B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-7
1 Lagunas y esteros	1973	3	31.7	23.2	13.3	6.1		
	1986	4	19.7	16.6	7.9	2.5		
	2000	2	69.1	49.5	37.7	18.0	10.8	9.8
2 Manglar	1973	3	25.7	17.8	37.0	42.2		
	1986	3	17.1	13.3	39.1	44.0		
	2000	2	64.1	44.9	36.4	87.8	36.3	21.4
3 Marismas	1973	3	49.8	57.0	54.6	48.8		
	1986	3	44.9	59.7	59.3	49.4		
	2000	5	94.6	80.7	97.6	83.9	99.3	86.6
4 Selva	1973	2	27.0	22.2	27.2	28.4		
	1986	3	16.6	16.1	27.0	29.7		
	2000	3	67.4	49.7	54.4	68.1	81.1	55.5
5 Vegetación secundaria	1973	2	29.5	25.4	33.4	35.4		
	1986	2	22.3	23.5	40.4	42.5		
	2000	4	76.3	63.4	75.1	103.1	103.3	74.8
6 Agricultura	1973	6	31.4	27.5	42.9	46.4		
	1986	6	22.1	23.1	48.6	50.9		
	2000	8	71.9	57.0	56.3	111.9	72.7	48.2
7 Suelos	1973	3	32.8	32.7	34.2	33.3		
	1986	2	31.8	42.9	49.2	45.9		
	2000	2	89.1	78.5	104.2	92.8	113.1	94.9

Notas: Valores de brillantez en número digital (ND). En 1973 y 1986 Landsat MSS, en 2000 Landsat ETM+.

RESULTADOS

CUADRO 5. Matriz de error para la clasificación supervisada de la imagen Landsat ETM+ de la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa. 2000.

Clasificación	Datos de Referencia								Total	Exactitud Usuario
	1	2	3	4	5	6	8	9		
1 Lagunas y esteros	18	0	0	0	0	0	0	0	18	100.0
2 Marismas	0	14	3	0	0	1	0	0	18	77.8

3 Manglar	0	0	11	0	0	0	0	0	11	100.0
4 Selva	0	0	0	12	0	0	0	0	12	100.0
5 Veg. Secundaria	0	3	1	3	8	7	0	0	22	36.4
6 Agricultura	0	0	3	0	3	9	0	0	15	60.0
8 Poblados	0	0	0	0	0	0	16	0	16	100.0
9 Camaronicultura	0	0	0	0	0	0	0	15	15	100.0
Total	18	17	18	15	11	17	16	15	127	
Exactitud Productor	100.0	82.4	61.1	80.0	72.7	52.9	100.0	100.0		

Notas: exactitud total = 81%; K' = 0.78. La exactitud de la clase 7 Suelos, se evaluó junto con la clase Agricultura.

En todos los años analizados la Agricultura fue la clase dominante, representando entre el 34 y 45% de la cuenca. Por el contrario, la clase Poblados representó un pequeño porcentaje del área de la cuenca. La clase Camaronicultura solo estuvo representada en el mapa temático del 2000, cubriendo poco menos del 1% del área de la cuenca, en tanto que el porcentaje de Lagunas y esteros prácticamente se mantuvo constante en 14% (Cuadro 6).

CUADRO 6. Extensión territorial de las coberturas y usos de terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, 1973-2000.

	1973		1986		2000	
	área (ha)	%	área (ha)	%	área (ha)	%
1 Lagunas y esteros	66344	14.6	64055	14.1	63827	14.1
2 Marismas	66693	14.7	79118	17.5	59176	13.0
3 Manglar	21918	4.8	22622	5.0	24602	5.4
4 Selva	55317	12.2	41893	9.2	41601	9.2
5 Veg. Secundaria	23377	5.2	27031	6.0	40462	8.9
6 Agricultura	173308	38.2	156756	34.6	203646	44.9
7 Suelos agrícolas	43084	9.5	56790	12.5	10124	2.2
8 Poblados	3484	0.8	5259	1.2	6042	1.3
9 Camaronicultura	0	0.0	0	0.0	4045	0.9
TOTAL	453525		453525		453525	

RESULTADOS

De 1973 a 1986 el porcentaje de cambio en la cuenca fue del 32%, asociado a un K' de 0.59. Las clases con mayor pérdida de área, reflejada en la estabilidad de localización, fueron Vegetación secundaria y Selva que fueron desplazadas principalmente por las clases Agricultura y Vegetación secundaria,

respectivamente. La estabilidad de residencia es una medida del cambio neto de una clase, el resultado del área sin cambio, de las ganancias y pérdidas. Para el periodo 1973-1986 las clases Lagunas y esteros y Manglar fueron las de menor cambio, con una ligera tendencia negativa la primera y positiva la segunda. Por el contrario la clase Selva fue la de mayor cambio con tendencia negativa y Poblados y Suelos agrícolas las de mayor cambio con tendencia positiva (Cuadro 7).

De 1986 al 2000, el cambio a nivel de paisaje fue menor que en el periodo anterior, el porcentaje de cambio fue de 27% y K' de 0.65. Las clases con mayor pérdida de área fueron Suelos agrícolas y Vegetación secundaria, reportando estabilidades de localización de 17 y 26%, respectivamente. En cuanto al cambio neto, las clases Lagunas y esteros y Selva prácticamente permanecieron sin cambio, las de mayor cambio negativo fueron Suelos agrícolas y Marismas y las de mayor crecimiento Vegetación secundaria y Agricultura (Cuadro 8).

Cuadro 7. Matriz de detección de cambio de las coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa de 1973 a 1986. (Áreas en hectáreas).

		1973									Tot. 1986
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1986	1 Lagunas y esteros	61500	667	647	267	51	921	1	0	0	64055
	2 Marismas	3327	49514	1817	4385	1622	18055	328	69	0	79118
	3 Manglar	724	1010	18507	1503	458	410	9	0	0	22622
	4 Selva	576	894	582	30541	981	361	7958	0	0	41893
	5 V. Secundaria	102	3171	294	2371	4908	13982	2164	40	0	27031
	6 Agricultura	34	7660	4	6465	12522	118483	11509	78	0	156756
	7 Suelos agrícolas	13	3720	51	9762	2649	19527	21048	19	0	56790
	8 Poblados	69	57	15	22	186	1567	66	3276	0	5259
	9 Camaronicultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total 1973		66344	66693	21918	55317	23377	173308	43084	3484	0	453524
Estabilidad Localización (%)		92.7	74.2	84.4	55.2	21	68.4	48.9	94		
Estabilidad Residencia (%)		-3.45	18.63	3.21	-24.3	15.63	-9.55	31.81	50.95		

Notas: Porcentaje de cambio = 32%; K' = 0.59. Enmarcado en cuadro indica el área de cada clase sin cambio.

RESULTADOS

A pesar de que alrededor del 85% de los píxeles identificados como Vegetación secundaria en 1986 cambiaron a otra cobertura, principalmente a Agricultura, una buena extensión de Agricultura y Suelos agrícolas fueron

cubiertos por vegetación herbácea o arbustiva en alguna etapa temprana de sucesión, por lo cual la clase Vegetación secundaria terminó en el 2000 con un incremento de alrededor del 50% con respecto a su área en 1986.

La Camaronicultura por estar presente solo en el año 2000 quedó representada únicamente con áreas en el renglón correspondiente en la matriz de cambio de 1986 al 2000, así el área de esta clase en el año final significó cambio, de manera concreta ganancia, por lo cual las estabildades de localización y residencia no fueron definidas para esta clase. La clase Marismas prácticamente fue la única subsidiaria de la estanquería para el cultivo de camarón, de las 4025 ha de Camaronicultura estimadas en el 2000 (Cuadro 6) el 94%, poco más de 3800 ha, eran Marismas en 1986 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Matriz de detección de cambio de las coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa de 1986 al 2000. (Áreas en hectáreas).

		1986									Tot. 2000
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2000	1 Lagunas y esteros	61591	1098	715	289	102	5	21	6	0	63827
	2 Marismas	1102	53022	1249	704	1665	665	663	108	0	59176
	3 Manglar	552	2952	20399	213	314	104	69	0	0	24602
	4 Selva	402	804	63	35502	195	1260	3311	63	0	41601
	5 V. Secundaria	158	6433	152	4188	7103	13911	8338	178	0	40462
	6 Agricultura	244	10762	17	510	17253	139733	34494	632	0	203646
	7 Suelos agrícolas	0	0	0	486	6	63	9494	75	0	10124
	8 Poblados	0	239	0	1	296	1015	310	4181	0	6042
	9 Camaronicultura	6	3809	26	0	97	0	90	16	1	4045
Total 1986		64055	79118	22622	41893	27031	156756	56790	5259	1	453525
Estabilidad Localización (%)		96.2	67	90.2	84.7	26.3	89.1	16.7	79.5		
Estabilidad Residencia (%)		-0.36	-25.2	8.76	-0.7	49.69	29.91	-82.17	14.89		

Notas: Porcentaje de cambio = 27%; K' = 0.65. Enmarcado en cuadro indica el área de cada clase sin cambio.

RESULTADOS

De 1973 al 2000 el porcentaje de cambio estimado fue del 33%, asociado a un K' de 0.57. Las estabildades de residencia, en concordancia con las matrices

anteriores, reflejan que las clases Lagunas y Esteros y Manglar fueron las de menor cambio en los 27 años analizados; el desplazamiento de las Marismas por la Camaronicultura y de la Selva por la Agricultura; el crecimiento considerable de la Vegetación secundaria y los Poblados y la disminución drástica de los suelos Agrícolas. Asimismo, no fueron definidas las estabildades de residencia y localización para la camaronicultura (Cuadro 9).

Cuadro 9. Matriz de detección de cambio de las coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa de 1973 al 2000. (Áreas en hectáreas).

		1973									Tot. 2000
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2000	1 Lagunas y esteros	61404	543	1131	289	50	390	20	0	0	63827
	2 Marismas	3084	40415	1669	2553	1475	9818	119	42	0	59176
	3 Manglar	891	2123	18255	1715	567	1034	15	1	0	24602
	4 Selva	668	264	313	29133	753	1242	9226	1	0	41601
	5 V. Secundaria	191	6024	503	7141	4940	17011	4584	68	0	40462
	6 Agricultura	104	15474	5	11434	14936	138910	22526	257	0	203646
	7 Suelos agrícolas	0	0	0	2944	212	444	6458	67	0	10124
	8 Poblados	0	279	24	1	311	2278	114	3034	0	6042
	9 Camaronicultura	1	1571	18	107	133	2181	22	12	1	4045
Total 1973		66344	66693	21918	55317	23377	173308	43084	3484	1	453525
Estabilidad Localización (%)		92.6	60.6	83.3	52.7	21.1	80.2	15	87.1		
Estabilidad Residencia (%)		-3.79	-11.27	12.25	-24.8	73.09	17.51	-76.5	73.42		

Notas: Porcentaje de cambio = 33%; K' =0.57. Enmarcado en cuadro indica el área de cada clase sin cambio.

Para poder llevar acabo la modelación de los cambios en las coberturas y usos del terreno con las cadenas de Markov, en las matrices de detección de cambio en la celda correspondiente a Camaronicultura en t_1 y t_2 se sustituyó el valor de cero por uno, simulando que desde 1973 la camaronicultura estaba representada por una hectárea y esa granja ficticia no presentó cambios al paso del tiempo.

La matriz de detección de cambio con los valores esperados bajo la hipótesis nula (H_0) de independencia estadística se muestra en el Cuadro 10. Confrontando estos valores esperados con los observados (Cuadro 9) a través de la prueba de X^2 , el valor del estadístico de X^2 , en este caso denotado como K^2 , fue de 1.23×10^6 , muy por arriba del valor de la distribución X^2 con 64 grados de libertad ($v = 64$) y un nivel de significancia de 0.05 ($\alpha = 0.05$) de 83.675 ($X^2_{64;0.05} = 83.675$), por lo que H_0 se rechazó y se considera que los cambios de 1973 a 1986 y 1986 al 2000 son dependientes.

Cuadro 10. Matriz de detección de cambio de 1973 al 2000 con los valores esperados bajo la hipótesis nula (H_0) de independencia estadística. (Áreas en hectáreas).

		1973								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2000	1 Lagunas y esteros	9337	9386	3085	7785	3290	24391	6063	490	0
	2 Marismas	8657	8702	2860	7218	3050	22613	5622	455	0
	3 Manglar	3599	3618	1189	3001	1268	9401	2337	189	0
	4 Selva	6086	6118	2010	5074	2144	15897	3952	320	0
	5 V. Secundaria	5919	5950	1955	4935	2086	15462	3844	311	0
	6 Agricultura	29790	29947	9842	24839	10497	77820	19346	1564	0
	7 Suelos agrícolas	1481	1489	489	1235	522	3869	962	78	0
	8 Poblados	884	889	292	737	311	2309	574	46	0
	9 Camaronicultura	592	595	195	493	209	1546	384	31	0

Notas: Valores esperados estimados con la ecuación Chapman –Kolmogorov (pág. 28) con la matriz aplicada a datos de cuadro 9. $K^2 = 1.23 \times 10^6$; $X^2_{0.05;64} = 83.675$; $K^2 > X^2_{64;0.05}$ se rechaza H_0

Las probabilidades de transición observadas, estimadas a partir de cada una de las matrices de detección de cambio, así como las estimadas bajo la hipótesis de Markov (multiplicando las matrices de 1973-1986 y 1986-2000) (Cuadro 11) muestran que las transiciones de cambio observadas más significantes son las de vegetación secundaria y suelos agrícolas a agricultura y las de menor transición son lagunas y esteros a marismas y poblados a agricultura.

Cuadro 11. Probabilidades de transición de las coberturas y usos del terreno en la cuenca

Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa. observadas y esperadas de

	1973-1986								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Lagunas y esteros	0.9270	0.0100	0.0295	0.0048	0.0022	0.0053	0.0000	0.0000	0.0000
2 Marismas	0.0501	0.7424	0.0829	0.0793	0.0694	0.1042	0.0076	0.0199	0.0000
3 Manglar	0.0109	0.0151	0.8444	0.0272	0.0196	0.0024	0.0002	0.0001	0.0000
4 Selva	0.0087	0.0134	0.0266	0.5521	0.0420	0.0021	0.1847	0.0000	0.0000
5 V. Secundaria	0.0015	0.0475	0.0134	0.0429	0.2099	0.0807	0.0502	0.0116	0.0000
6 Agricultura	0.0005	0.1149	0.0002	0.1169	0.5357	0.6837	0.2671	0.0224	0.0000
7 Suelos agrícolas	0.0002	0.0558	0.0023	0.1765	0.1133	0.1127	0.4885	0.0056	0.0000
8 Poblados	0.0010	0.0009	0.0007	0.0004	0.0080	0.0090	0.0015	0.9404	0.0000
9 Camaronicultura	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1986-2000									
1 Lagunas y esteros	0.9615	0.0139	0.0316	0.0069	0.0038	0.0000	0.0004	0.0012	0.0000
2 Marismas	0.0172	0.6702	0.0552	0.0168	0.0616	0.0042	0.0117	0.0205	0.0000
3 Manglar	0.0086	0.0373	0.9017	0.0051	0.0116	0.0007	0.0012	0.0000	0.0000
4 Selva	0.0063	0.0102	0.0028	0.8474	0.0072	0.0080	0.0583	0.0120	0.0000
5 V. Secundaria	0.0025	0.0813	0.0067	0.1000	0.2628	0.0887	0.1468	0.0338	0.0000
6 Agricultura	0.0038	0.1360	0.0008	0.0122	0.6383	0.8914	0.6074	0.1202	0.0000
7 Suelos agrícolas	0.0000	0.0000	0.0000	0.0116	0.0002	0.0004	0.1672	0.0142	0.0000
8 Poblados	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0109	0.0065	0.0055	0.7951	0.0000
9 Camaronicultura	0.0001	0.0481	0.0011	0.0000	0.0036	0.0000	0.0016	0.0030	1.0000
1973-2000 (observadas)									
1 Lagunas y esteros	0.9256	0.0081	0.0516	0.0052	0.0021	0.0022	0.0005	0.0000	0.0000
2 Marismas	0.0465	0.6060	0.0761	0.0462	0.0631	0.0567	0.0028	0.0122	0.0000
3 Manglar	0.0134	0.0318	0.8329	0.0310	0.0243	0.0060	0.0004	0.0004	0.0000
4 Selva	0.0101	0.0040	0.0143	0.5266	0.0322	0.0072	0.2142	0.0004	0.0000
5 V. Secundaria	0.0029	0.0903	0.0229	0.1291	0.2113	0.0982	0.1064	0.0195	0.0000
6 Agricultura	0.0016	0.2320	0.0002	0.2067	0.6389	0.8015	0.5228	0.0739	0.0000
7 Suelos agrícolas	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0091	0.0026	0.1499	0.0191	0.0000
8 Poblados	0.0000	0.0042	0.0011	0.0000	0.0133	0.0131	0.0026	0.8709	0.0000
9 Camaronicultura	0.0000	0.0236	0.0008	0.0019	0.0057	0.0126	0.0005	0.0035	1.0000
1973-2000 (esperadas)									
1 Lagunas y esteros	0.8918	0.0216	0.0565	0.0111	0.0084	0.0051	0.0043	0.0021	0.0000
2 Marismas	0.0628	0.5220	0.1181	0.0887	0.1324	0.1030	0.0883	0.0470	0.0000
3 Manglar	0.0182	0.0440	0.7628	0.0296	0.0176	0.0047	0.0071	0.0017	0.0000
4 Selva	0.0124	0.0194	0.0268	0.4747	0.0176	0.0102	0.0707	0.0112	0.0000
5 V. Secundaria	0.0035	0.0609	0.0164	0.0598	0.1102	0.0912	0.0914	0.0282	0.0000
6 Agricultura	0.0071	0.2148	0.0110	0.1660	0.5853	0.6586	0.5468	0.1257	0.0000
7 Suelos agrícolas	0.0030	0.0638	0.0065	0.1689	0.1066	0.1124	0.1777	0.0320	0.0000
8 Poblados	0.0011	0.0053	0.0007	0.0013	0.0182	0.0149	0.0121	0.7491	0.0000
9 Camaronicultura	0.0001	0.0481	0.0011	0.0000	0.0036	0.0000	0.0016	0.0030	1.0000

Notas: $X^2 = 1.72$; $X^2_{64,0.05} = 83.675$; $X^2 < X^2_{64,0.05}$ no se rechaza H_0 Obsérvese Anexo.

Las tendencias de cambio que se espera en cada cobertura engloban el mismo comportamiento de las transiciones observadas donde agricultura solo puede ser desplazada por suelos agrícolas y que a la vez es imposible que se cambie de agricultura a la actividad camaronícola. El valor calculado de X^2 en la tabla de contingencia de las probabilidades de transición observadas y esperadas de 1973 al 2000 fue de 1.72, menor a $X^2_{64;0.05} = 83.675$, por lo que en este caso la hipótesis nula (H_0), los datos son generados por un proceso de Markov, no fue rechazada. Si bien los cambios en ambos periodos analizados son dependientes, estos siguen un comportamiento estocástico que se puede modelar con una cadena de Markov de primer orden.

DISCUSIÓN

La importancia en la elaboración del presente trabajo radica en hacer notoria la necesidad de establecer medidas de manejo, aprovechamiento, planeación y administración de recursos naturales terrestres y acuáticos considerando la función de las cuencas hidrográficas al ser descritas como territorios idóneos de interacción de los diferentes sistemas partiendo de que la acción humana, principalmente, cometida en zonas terrestres altera o modifica propiamente a la acuática y viceversa.

Para la primera aproximación en la detección de cambio se recurrió al Índice Normalizado de Vegetación que ilustra la densidad presentada por la cobertura vegetal y que se observa en color verde, haciendo notorio que, la fecha de toma de la imagen de 1986 pudo haber influido en la tonalidad que ésta representa pues se tiene una gran diferencia con las de 1973 y 1992 cuya fecha corresponde a marzo. Dentro de los umbrales de cambio las etapas de 1973 a 1986 son las de mayor cambio en cuanto a cobertura vegetal se refiere, pues el umbral, que arroja la media al 95% de confianza, es mayor que la etapa de 1986 a 2000; es decir, en cuanto mayor sea el umbral mayor será el cambio entre etapas debido a que solo con el 2.5% de confianza localizada a cada extremo del gráfico e histograma corresponde a cambio “total” y que para este no es considerado debido a la baja confiabilidad con la que se obtiene.

Uno de los problemas presentados para la clasificación y caracterización de la zona de estudio a partir de imágenes de satélite ha sido la respuesta espectral de los objetos ya que la resolución de cada imagen no fue la más representativa al crear confusión entre el reconocimiento de zonas de selva, agricultura y manglar por un lado y por otro zonas de marismas, suelos desnudos y poblados. En este caso la curva de reflectancia de la vegetación verde y sana, siempre manifiesta la configuración de “picos y valles”. Los valles en la porción visible del espectro son

determinados por los pigmentos de hojas de las plantas; la clorofila, por ejemplo, absorbe fuertemente la energía generando valles en el sector visible, en cambio

DISCUSION

cuando una hoja es sometida a estrés o pierde clorofila no absorbe energía y genera picos en la zona de los infrarrojos. La curva de reflectancia del suelo muestra menos variación de picos y valles.

Los factores que influyen en la reflectancia del suelo son: contenido de humedad, textura del suelo, rugosidad de la superficie, contenido de materia orgánica y fecha de toma de la imagen; generalmente estos factores reducen la reflectancia de energía. A mayor humedad contenida los mapas obtenidos tienen mayor reflectancia de verde que se puede confundir con densidad de cubierta vegetal, la textura y rugosidad de la superficie modifican la extensión de áreas de coberturas y usos de terreno. El agua limpia absorbe relativamente poca energía reflejando las longitudes de onda en el visible; sin embargo, la turbidez del agua cambia aumentando la reflectancia en el visible. Así mismo, la reflectancia del agua cambia con el contenido de clorofila ya que al incrementarse ésta tiende a disminuir la reflectancia del agua en el azul y rojo e incrementar la reflectancia del verde. Considerando la reflectancia espectral del agua, probablemente la característica más distintiva es la absorción de energía en las longitudes de onda del infrarrojo, se ha permitido tener el porcentaje más alto de exactitud debido a que no se presentan traslapes significativos entre clases que representarían en su caso errores. Las clases poblados y granjas camaronícolas no representan errores debido a que ambas fueron obtenidas de la digitalización directa con ayuda de datos auxiliares (mapas).

La similitud en selva con vegetación secundaria así como de agricultura con manglar es a consecuencia de que los comportamientos en las firmas espectrales se asemejaron erróneamente en la etapa de creación de los campos de entrenamiento de manera que durante el proceso de clasificación se originaron zonas de homogeneidad incorrecta aun cuando se recurrió a la subdivisión de las

clases de hasta seis apartados cada una. A pesar de esta situación la exactitud del mapa ha sido de 80% considerándosele aceptable.

Otra problemática que ya ha sido mencionada fue la corroboración de puntos de control espacial, donde por cuestión de temporalidad no fue posible

DISCUSION

obtenerlos; es decir, se planteó en un inicio un estudio multitemporal a partir de imágenes de satélite Landsat de 1973, 1986, 1992 y 2000 pudiéndose tomar puntos en el año 2000 respaldado con puntos en 2004 de tal manera que la exactitud y coincidencia de los mismos se aplicaron para los cuatro mapas temáticos. Las coberturas manglar, selva y lagunas y esteros fueron clasificadas con un 100% de exactitud y contrario a ello, vegetación secundaria presentó los niveles más bajos de clasificación debido a que de 22 puntos tomados solo 8 correspondían acertadamente mientras que 7 se confundieron con agricultura debido principalmente a que ambas tienen una alta asociación en el terreno pues se localizan inmediatamente una al lado de la otra compitiendo por el desplazamiento mutuo.

La caracterización del paisaje de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa ha sido realizada acertadamente al utilizar el procedimiento de clasificación supervisada pues se han obtenido mapas temáticos con exactitud global del 80% y un coeficiente de Kapa de 0.78 que indica que el proceso de clasificación mediante el algoritmo de máxima verosimilitud es mejor que el de una clasificación debida al azar (Mas, 1997); de tal manera que se ha permitido establecer la comparación post-clasificatoria de los mismos y obtener el análisis de detección de cambio que se planteo como objetivo del presente estudio.

Con base en lo anterior se establece que el mapa de coberturas y usos de terreno de 2000 ha sido el más representativo del paisaje actual de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste que enmarca la presencia de coberturas inducidas que comprenden extensas zonas agrícolas, en diferentes etapas de desarrollo del cultivo, y de vegetación secundaria. Las zonas de origen natural como lo son

marismas y selva también ocupan lugares importantes en cuanto a territorio se refiere.

De los resultados se obtiene una interpretación que caracteriza geográficamente el área de estudio basado en mapas topográficos y de hidrología superficial editados por INEGI (G12-6 y G12-9) y los mapas temáticos de coberturas y usos de terreno desarrollados en el presente estudio de donde se

DISCUSION

describe lo siguiente: la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa esta constituida fisiográficamente por una altura no mayor a los 200m en la zona de serranías; mayoritariamente es llanura costera carente de ríos y cuerpos de agua significativos por lo que el clima es clasificado dentro de los más secos (Koppen, modificado por García) lo que da lugar a suelos difícilmente manejables o factibles para el desarrollo agrícola; sin embargo, esto no ha representado obstáculo para el desarrollo de ésta y otras actividades económicas pues la inversión que se realiza permite la obtención de ganancias, no obstante las limitantes de las características geográficas del área de estudio.

Aunque se tengan por un lado suelos altamente inundables y salinos en la zona costera y suelos arcillosos de poca permeabilidad en la planicie, se posibilita trabajar ambos campos, por un lado el desarrollo de la vegetación que soporta altos grados de sales como lo es el manglar, que permite el desenvolvimiento de diferentes especies marinas; además se pueden aprovechar estos espacios para el establecimiento de las granjas camaronícolas pues si bien es una actividad reciente aparentemente, se puede comprobar que ésta misma es rentable para cualquier comunidad involucrada pues de cada granja se obtienen ganancias al aprovechar suelos que prácticamente son clasificados dentro de los que no tienen una función significativa.

De igual manera, los suelos de la llanura costera donde a pesar de su poca permeabilidad y alta dureza, se presentan niveles de alta fertilidad que si bien las características físico-químicas del suelo no lo permiten, la inversión económica representa gran ayuda pues con ella se han realizado diferentes canales y

sistemas de riego para las zonas agrícolas establecidas que carecen de este sistema; también la alta tecnificación ha permitido mayor aprovechamiento de estos campos donde la fertilización de los mismos va en aumento de manera notoria lo que ha derivado en que para la etapa de cosecha de productos mejorados se ha permitido ocupar más personal para realizar esta etapa en dicha actividad por otra parte, esto ha propiciado que también se incrementen los contaminantes vertidos sobre los suelos y el agua.

DISCUSION

También el establecimiento, desarrollo y aumento de éstas actividades ha originado el desplazamiento de otras coberturas del terreno como lo fue comprobado a través de las matrices de detección de cambio donde la agricultura ha ocupado grandes espacios, anteriormente constituidos por vegetación secundaria (pastizales) o suelos abandonados; estos últimos son los referidos a los suelos que anteriormente fueron selva según el mapa temático de coberturas en 1973, y que después fueron áreas remplazadas por agricultura, que posteriormente se abandonaron al acabarse todas las propiedades orgánicas del suelo, mismas que fueron recuperadas al permitir un descanso a la explotación de estos campos pero con la característica de que no es una vegetación de selva similar a la antes establecida, pues las especies arbóreas se tienen que desarrollar en condiciones de propiedad de suelo muy diferentes a las anteriores.

Fuentes (1992) describe que al abrir un suelo al cultivo, mediante el desmonte indiscriminado, el impacto que se ocasiona a una comunidad vegetal estable es tremendo ya que se favorece la instalación de vegetación secundaria que se traduce en invasiones de malezas que compiten con los cultivos por los nutrientes del suelo. Lo que ocurre en las selvas tropicales es que el clima y las condiciones edáficas limitan el uso de suelo para la agricultura, esto explica, en parte, los limitados rendimientos que se obtienen y los altos costos de mantenimiento para aprovechar estos terrenos con praderas extensivas cuya limpieza y adaptación son costosas por la invasión de malezas y vegetación secundaria menor. Comparativamente con lo antes descrito es comprobable que

esta situación sucede de manera repetitiva no solo en zonas de clima caluroso sino también de zonas de frío extremo y sequía prolongada, en suelos salinos y hasta impermeables como sucede en algunas áreas de la cuenca.

La matriz de detección de cambio en la etapa 1973-1986 describe que el porcentaje de cambio total fue de 32% donde la cobertura vegetación secundaria tuvo pérdidas del 80% (estabilidad de localización) del cual 12522has se convirtieron a agricultura; suelos agrícolas perdieron 51% de su cobertura donde 11509has pasaron a agricultura. Las de menor pérdida fueron lagunas y esteros y

DISCUSION

manglar con tendencia negativa la primera pues las pérdidas presentadas surgieron en el año final (1986); con tendencia positiva en el segundo caso, aun cuando se tienen pérdidas surgen ganancias en cobertura durante el año final. (estabilidad de residencia). Poblados y agricultura obtuvieron ganancias del 50% y 30% respectivamente a costa de otras coberturas.

De 1986 a 2000 el porcentaje de cambio registrado fue de 27% con una dinámica similar al periodo anterior, en este caso vegetación secundaria tiende a recuperar gran parte de su área (50%) al asociarse fuertemente a agricultura recuperando 13911has. que correspondían a este uso de terreno.

De 1973 a 2000 suelos agrícolas resultaron ser los de mayor pérdida con tendencia negativa en la estabilidad de residencia, las coberturas que recuperaron mayor porcentaje de áreas son vegetación secundaria y poblados; agricultura, lagunas y esteros y poblados fueron las de mayor estabilidad.

El emplazamiento de pequeñas localidades se ha visto en aumento, aunque por extensión territorial individual no son tan notorias, en conjunto son muy significativas, pues para ellas se requieren servicios lo que recae en mayor inversión, mayor generación de empleos y apertura o invasión de zonas para el establecimiento de las mismas.

A partir de los mapas temáticos elaborados se puede comprobar el crecimiento agrícola, enmarcado a partir de 1973 y hasta 2000 como también concluyó Martínez (2003) y Trelles (2002) en trabajos similares al área de estudio,

donde en el primer caso se establece un inicio de desarrollo agrícola en Sinaloa desde 1940 y que se ha observado un aumento muy notorio, caso contrario a lo que establece el inicio de las granjas camaronícolas que a partir de 1992 han tenido un aumento de hasta el 70% tan solo en el área de estudio provocando una disminución territorial en marismas y patrones de escurrimientos hidrológicos como lo considera Martínez (2003).

El desarrollo de la camaronicultura en Sinaloa y el aporte tecnológico asociado traen consigo modificaciones espaciales por la construcción de canales de agua, estanques, caminos y sistemas de transporte, y otros. Cuando se

DISCUSION

establece una granja camaronícola se requiere de un amplio espacio que interfiere algunas veces con el desarrollo de vegetación alterna pues en ocasiones estas actividades se establecen sobre zonas de manglar que son totalmente taladas o destruidas provocando inestabilidad para la sobrevivencia de especies acuáticas y terrestres. También se tiene que considerar el aporte de desechos que trae consigo el establecimiento de estanques ya que se utilizan cantidades importantes de nutrientes para acelerar el crecimiento de camarones que luego son desechados al mar; por otro lado, el depósito de sedimentos hacia el mar por acarreo se lleva a cabo en zonas lejanas a la costa lo que hace imposible la inundación de terrenos y explotación agrícola de los mismos.

Por otro lado, las coberturas naturales representaron hasta el año 2000 el 50.63% y las inducidas el 49.37% lo que hace pensar en un equilibrio aparente; sin embargo, dentro de la coberturas naturales donde se incluye marismas, manglar, selva, vegetación secundaria y agua, esta última representa una mayoría con 14.07%. Mientras tanto en las coberturas inducidas, agricultura, suelos agrícolas o desnudos, poblados y camaronicultura; la agricultura representa la cobertura mayoritaria con un 44.9% lo cual indica la creciente dependencia respecto a esta actividad económica. Considerando que esta ocupación se realizó a lo largo de 60 años según lo descrito por Martínez (2003) cabe pensar que se necesitarían otros 60 años para llegar al máximo de ocupación, pues las zonas

que de alguna manera representan parte importante de agua difícilmente podrían ser ocupadas, sin embargo se excluyen eventos extraordinarios como pérdida de propiedades orgánicas de suelo, reducción de presupuesto económico destinado a esta actividad, etcétera, por lo tanto no es considerada una opción proyectable a futuro.

Sin embargo mediante las matrices de detección de cambio fue posible obtener las matrices de probabilidades de transición observadas y a través de estas la matriz de probabilidad de transición esperada y la prueba de ajuste X^2 planteada por Markov para la modelación de eventos estocásticos.

DISCUSION

Para el periodo 1973-2000 de las matriz observada y esperada las probabilidades de transición se inclinan a que lagunas y esteros y manglares tienden a convertirse principalmente a marismas y estas a su vez en agricultura. La selva que se observó como cambios a agricultura se espera cambie a suelos agrícolas después de aquella etapa; vegetación secundaria, poblados y suelos agrícolas seguirán perdiendo terreno al convertirse en zonas agrícolas; la agricultura tiene mayor probabilidad de convertirse a suelos agrícolas pero no es un dato con gran significancia comparado con las probabilidades de conversión que presentan el resto de coberturas y usos del terreno.

La prueba X^2 (Anexo) demuestra que la evolución de las coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste son dependientes y siguen un comportamiento en cadena. Lo anterior indica que los cambios que se generaron de 1986 a 2000 dependieron del desarrollo habido durante 1973 a 1986; el comportamiento en cadena se refiere a que el desarrollo de una cobertura o uso del terreno en alguna etapa determinada seguirá el mismo comportamiento a menos de que surja un evento extraordinario que modifique tal comportamiento y que esto mismo se puede modelar a través de cadenas de Markov.

CONCLUSIONES

La caracterización del estado actual del paisaje de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa ha sido representativa al ser realizada por medio del uso de las técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica.

Las coberturas y usos del terreno que enmarcan la situación espacial actual del área de estudio tiene su máxima importancia en la representatividad que significa una amplia ocupación de la agricultura con un 45% del área total, lo cual puede indicar la dependencia de la población hacia esta actividad económica que, si bien, no es la única, se encuentra estrechamente ligada al desarrollo social.

La cobertura granjas camaronícolas que cubre un 0.90% del área total comienza a tener mucha importancia al presentar un desarrollo acelerado a partir de 1990 y tener con ello un impacto en el paisaje costero de la región por aportación de nutrientes a los cuerpos de agua que alteran su composición y con

lo cual se genera la propagación de enfermedades que atacan a los mismos camarones dentro y fuera de las granjas.

El cambio del paisaje a lo largo de 27 años desde 1973 hasta 2000 ha sido de un 33% en toda la región surgiendo suelos desnudos, vegetación secundaria, selva y marismas como las coberturas de menor estabilidad de localización y las de mayor pérdida de terreno por causa del desarrollo de agricultura y establecimiento de granjas camaronícolas en el caso de las zonas costeras.

Las probabilidades de transición de una cobertura a otra permite visualizar lo que a largo plazo puede ocurrir con cada cobertura de terreno, de tal manera que los resultados más importantes son que lagunas y esteros tiene mayor probabilidad de convertirse en marismas en un lapso de 27 años que en cualquier otra cobertura sin que mantenga un equilibrio con esta cobertura, pues las marismas tiene mayor probabilidad de transformación hacia agricultura y granjas camaronícolas en zona costera. El manglar disminuirá su área a causa de marismas, esteros y granjas; la vegetación secundaria toma terreno a costa de la

CONCLUSIONES

selva y suelos desnudos principalmente, de igual manera la agricultura desplaza una gran mayoría del terreno de suelos descubiertos y vegetación secundaria.

La sociedad y su interrelación entre las coberturas y usos de terreno estudiados para la cuenca hidrológica Lechuguilla-Ohuira-Navachiste define una asociación entre cuerpos de agua, marismas, manglar, selva, vegetación secundaria, agricultura, suelos desnudos poblados y granjas camaronícolas. Además se concluye que existe una alta dependencia de 83.6% entre los periodos de desarrollo del área de estudio.

Con lo anterior se determina que de continuar el comportamiento de las coberturas y usos de terreno de la zona de estudio donde se incluye el establecimiento o desplazamiento de áreas principales por áreas secundarias o no originales de la zona se puede esperar una amplia evolución en la tecnificación de la agricultura y el desarrollo de las granjas camaronícolas produciendo notables cambios en el paisaje a costa del resto de coberturas.

Con lo anterior se concluye que, con cada uso de suelo que pueda producirse para aprovechar el espacio se genera un cambio en las coberturas asociadas al mismo, con repercusiones en zonas no solo internas inmediatas sino en las subsecuentes a estas, es decir, se refuerza la idea de la asociación de todos los elementos que se pueden contener dentro de las cuencas hidrográficas pues el desarrollo económico implica una obtención de bienes económicos a expensas del medio natural terrestre y costero.

VOCABULARIO DE TESIS

ACUICULTURA. Arte de multiplicar y cultivar vegetales o animales acuáticos con vistas a proceder a una recolección controlada. En la acuicultura cerrada o intensiva los sujetos de cultivo son alimentados artificialmente y mantenidos en alta densidad por medio de instalaciones artificiales en un medio a menudo controlado por recintos y circulaciones de fluidos.

ALGORITMO. Conjunto de reglas bien definidas para la solución de un problema en un número finito de etapas.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL POSTCLASIFICATORIO. Consiste en la comparación, a través de una tabla de contingencia denominada matriz de detección de cambio, de mapas temáticos de fechas diferentes producidos de manera independiente por la clasificación de imágenes multiespectrales.

BANDA. Un rango seleccionado de longitudes de onda del espectro electromagnético.

BANDA ESPECTRAL. Es el intervalo entre dos longitudes de onda, en el espectro electromagnético.

CARTOGRAFIA. El arte, la ciencia y la técnica de hacer mapas y cartas, y su estudio como documentos científicos y obras de arte

CLASIFICACION. La clasificación de imágenes se entiende como la interpretación de las mismas mediante un proceso asistido por computadora. Aunque algunos procedimientos pueden incorporar la información sobre las características tales de la imagen como textura y contexto, la mayoría de clasificación de la imagen es

basada solamente en la detección de la firma espectral (patrones de la respuesta espectral) de clases de la cobertura. La **clasificación supervisada** comienza de un cierto conocimiento de la zona a clasificar, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esto permite delimitar áreas representativas de las categorías analizadas (**sitios de entrenamiento**). Se caracteriza por la identificación de algunos ejemplos que proporcionan las clases (tipo de cobertura de suelo) de la imagen interesada. Estos son denominados sitios o campos de entrenamiento. A partir de aquí se calculan los ID (número digital) que definen las clases.

COORDENADAS (retícula). Sistemas para localizar puntos sobre la superficie de la tierra, mediante un reticulado rectangular superpuesto y ligado a una proyección cartográfica.

CUENCA HIDROGRÁFICA. Espacio geográfico que alimenta un curso de agua y drenado por éste; tiene por eje el curso de agua principal y por límite la línea divisoria de las aguas que las separa de la cuenca hidrográficas adyacentes. Su acción hidrológica depende de su extensión, topografía, suelos, cubierta vegetal, estructura geológica, de la organización de la red hidrológica que la drena y del clima.

DATUM. Una referencia, tal como una línea o un plano en relación con la cual se determina la posición de otros objetos.

ERMAT. El módulo ERRMAT de **Idrisi** construye una matriz de error considerando sólo los píxeles que tienen valor mayor de cero en la capa de datos de campo. El programa calcula el índice Kappa de similitud (KIA), con un ajuste que da cuenta de las similitudes aleatorias. KIA que es una medida de la exactitud del mapa y varía entre 0 (disimilitud total) a 1 (similitud total).

ESTABILIDAD DE LOCALIZACIÓN. Mide la proporción de pérdida de una clase con respecto a su cobertura inicial, cae en el intervalo de cero a 100, el límite inferior denota que la clase presentó pérdida total en tanto que el límite superior implicaría la no pérdida de esa clase dentro del paisaje.

ESTABILIDAD DE RESIDENCIA. Es una medida de la razón de cambio de las clases, que puede tomar valores negativos cuando la cobertura de una clase es menor en el año final que en el año base, toma valores positivos cuando la clase aumenta con respecto al año inicial y toma valores de cero cuando la clase no presenta cambios.

EUTROFIZACION. Pérdida de oxígeno que da como resultado reducción de la vida marina.

EXACTITUD DEL PRODUCTOR. Razón porcentual de los puntos de prueba de una clase en particular correctamente clasificados entre el total de puntos de referencia para esa clase.

EXACTITUD DEL USUARIO. Razón porcentual de los puntos de prueba de una clase en particular correctamente clasificados entre el total de puntos de clasificación para esa clase.

MATRIZ DE ERROR. Es un arreglo cuadrado de un conjunto de números en renglones (i) y columnas (j) que expresan el número de unidades de muestra (píxeles, cúmulos o polígonos) asignados a una categoría particular en una clasificación con relación al número de unidades de muestra asignado a una categoría particular en otra clasificación.

MODELO DE MARKOV sirve para analizar la cubierta del terreno en un par de imágenes; de él se obtiene una matriz de la probabilidad de la transición, una matriz de las áreas de la transición, y un sistema de imágenes condicionales de la probabilidad. La matriz de la probabilidad de la transición registra la probabilidad que cada clase de terreno cambiará a otra categoría. La matriz de las áreas de la transición registra el número de los píxeles que se espera que cambien de una clase a otra en el terreno.

NDVI. El índice de vegetación diferencial normalizada, es una variable que permite estimar el desarrollo de una vegetación en base a la medición, con sensores remotos, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la misma emite o refleja.

PERCEPCIÓN REMOTA. Grupo de técnicas para recolectar e interpretar información sobre la superficie terrestre sin tener que estar en contacto físico con ella; con apoyo de una fuente de iluminación externa (sol).

PIXEL. En percepción remota orbital, se utiliza un gran número de datos para representar una imagen, los cuales pueden ser manipulados en formato digital, con la finalidad de extraer informaciones de estas imágenes. Cada punto captado por los sensores, corresponde a un área mínima denominada "**píxel**" (picture element), que debe estar geográficamente identificado y para el cual son registrados valores digitales relacionados con la intensidad de energía reflejada en diferentes bandas bien definidas del espectro electromagnético.

RADIANCIA. Es el flujo radiante que proviene de una fuente en una determinada dirección por unidad de área. En realidad la medida de la radiancia representada en cada "píxel" por su nivel de gris, no es solamente la de la radiación reflejada por la superficie contenida en la escena del "píxel", sino también la radiación debido a la dispersión atmosférica.

RESOLUCION. *Es una medida de la habilidad que posee un sistema sensor en distinguir entre respuestas que son semejantes espectralmente o próximas espacialmente. La resolución puede ser clasificada en espacial, espectral y radiométrica. 1) Resolución espacial: mide la menor separación angular o lineal entre dos objetos. Por ejemplo, una resolución de 20 metros implica que objetos distanciados entre sí menos que 20 metros, en general no serán discriminados por el sistema. 2) Resolución espectral: es una medida del ancho de las bandas espectrales del sistema sensor. Por ejemplo, un sensor que opera en el intervalo de 0,4 a 0,45 m tiene una resolución espectral menor que un sensor que opere en el intervalo de 0,4 a 0,5 um. 3) Resolución radiométrica: está asociada a la sensibilidad del sistema sensor en distinguir dos niveles de intensidad de la señal de retorno. Por ejemplo, una resolución de 10 bits (1024 niveles digitales) es mejor que una de 8 bits.*

SIG. Tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal).

USO DEL TERRENO. Es el resultado de síntesis entre la acción antrópica y el medio natural. La aplicación derivada de este producto resulta en elementos de planificación para el uso adecuado (sustentable) del Territorio.

LITERATURA CONSULTADA

- Barrera, N.; Ortiz, B.** *Transformaciones del uso del suelo y diferencialidad espacial: el caso del trópico veracruzano.* 1992. Cambios en el uso de suelo agrícola en México. México: Instituto de Geografía. Pág. 83-122.
- Bartlett, D.** *GIS and the coastal zone: an overview.* 1993. Journal of Coastal Research Kevin St Martin. Pág. 3-23.
- Berlanga Robles, C. A.** *Evaluación de las Condiciones Actuales y del Cambio en los Paisajes de humedales de la Costa Sur de Sinaloa, México: una aproximación con el uso de datos provenientes de sensores.* 1999. Tesis de Maestría. México: UNAM Facultad de Ciencias.
- Bocco, G.; Palacio, J.L.; Valenzuela, C.** *Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica.* 1991. Ciencia y Desarrollo. México: CONACYT. Pág. 79-88.
- Buttler, M.J.A.; Le Blanc, C.; Belbin, J.A.; Mc Neall J.L.** *Cartografía de recursos marinos: un manual de introducción.* 1990. FAO: documento técnico No. 274. Roma.
- Campbell, J. B.** *Introduction to remote sensing.* 1996. Taylor & Francis. London
- Eastman, J.R., et al.** *Changes and time series analysis.* 1995. 2ªed. Estados Unidos: UNITAR / GRID
- Fuentes, L.** *Cambios en el uso de suelo agrícola en México.* Presentación.1992. México: Instituto de Geografía.
- Fuentes, L.** *La colonización como factor de cambio en el uso de suelo en Quintana Roo, México.*1992. Cambios en el uso de suelo agrícola en México. México: Instituto de Geografía. Pág. 137-150
- Green, E.P.; Mumby, J.,A.** *A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources.* 1996. pág. 1-40 vol 24
- Houghton, R. A.** *The world wide extent of land use change.* 1994. American Institute of Biology Sciences.

- INEGI.** *Anuario estadístico del estado de Sinaloa.* 1995 y 2000
- Martínez, S.A.** *Estudio sobre el uso de suelo en las subcuencas Bahía Navachiste y Río Sinaloa al Noroeste de México.* 2003. Tesis de Maestría. México: CIAD A.C. Unidad Mazatlán.
- Mas J.F.** *Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques.* 1998. University of Campeche: Centre of Ecology, Fisheries and Oceanography of the Gulf of Mexico.
- Meaden, G.J.; Kapetsky, J.M.** *Los sistema de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura.* 1992. FAO: documento técnico No. 318. Roma
- O'Regan.** *The use contemporary information Technologies for coastal research and management-a review.* 1996. Journal of Coastal Research.
- Weng, Q.** *Land use change analysis in the Zhujiang delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling.* 2001. Indiana State University:Department of Geography, Geology, and Anthropology.
- Ramsey III, E.W., et al.** *Coastal change analysis implemented in Louisiana.* 2001. Journal Coastal Research. Pág. 53-71 vol 17
- Richardson, C.J.; McCarthy E. J.** *Effect of land use development and forest management on hydrologic response in southeastern coastal wetlands: a review.* 1994. Wentlands. pág 56-71 vol 14
- Ruiz, A y Berlanga, C.** *Modifications in coverage patterns and land use around Huizache-Camainero lagoon system, Sinaloa, México: a multitemporal analysis using Landsat images. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 1999. México: CIAD A.C. Unidad Mazatlán.
- Sabins, F.F.** *Remote sensing. Principles and interpretation.* 1997. 3ªed. E.U.
- Singh, A.** *Digital change detection techniques using remotely sensed data.* International Journal of remote sensing. 1989. prensa

Trelles R. *Caracterización del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, México, utilizando técnicas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica.* 2002. Tesis de Maestría. México: CIAD A. C. Unidad Mazatlán

UNEP. *Programa de acción mundial para la protección del medio marino frente a las actividades realizadas en tierra.* 1995. Programa de la Naciones Unidas para el medio ambiente. Estados Unidos: Washington. UNEP (OCA)/ LBA / IG.2/7.

13.0 ANEXOS

Tabla de contingencia con χ^2 para las probabilidades de transición de 1973-1986 y 1986-2000

H₀: los datos son de una distribución markoviana (los cambios de cobertura y uso del terreno siguen un proceso estocástico que se puede modelar con cadenas de Markov)

$$\chi^2 = \sum_{ij} \frac{(obs_{ij} - esp_{ij})^2}{esp_{ij}}$$

Los valores observados son las probabilidades de transición calculadas de la matriz de detección de cambio de 1973-2000 y los valores esperados se obtuvieron de multiplicar las matrices de las probabilidades de transición de 1973-1986 con 1986-2000 (Cuadro 11)

Tabla de contingencia: el valor de cada celda es $\frac{(obs_{ij} - esp_{ij})^2}{esp_{ij}}$ para el renglón i y la columna j

	esteros	marismas	mangle	selva	v. sec.	agro	suelos	poblados	granjas
esteros	0.0013	0.0084	0.0004	0.0031	0.0047	0.0016	0.0034	0.0021	0.0000
marismas	0.0042	0.0135	0.0149	0.0204	0.0363	0.0209	0.0828	0.0258	0.0000
mangle	0.0013	0.0034	0.0064	0.0001	0.0025	0.0003	0.0065	0.0010	0.0000
selva	0.0004	0.0123	0.0059	0.0057	0.0123	0.0009	0.2912	0.0104	0.0000
v. sec.	0.0001	0.0142	0.0026	0.0805	0.0928	0.0005	0.0025	0.0027	0.0000
agro	0.0043	0.0014	0.0105	0.0100	0.0049	0.0310	0.0011	0.0213	0.0000
suelos	0.0030	0.0638	0.0065	0.0792	0.0893	0.1073	0.0044	0.0052	0.0000
poblados	0.0011	0.0002	0.0001	0.0013	0.0013	0.0002	0.0074	0.0198	0.0000
granjas	0.0001	0.0126	0.0001	0.4280	0.0012	0.0000	0.0007	0.0001	0.0000

$$\chi^2 = 1.715$$

Valor crítico para la prueba con $\alpha = 0.05$ y v (grados de libertad) = 64, $\chi^2_{0.05,64} = 83.675$

No se rechaza H₀. Los cambios de cobertura y uso del terreno siguen un proceso estocástico que se puede modelar con cadenas de Markov ($p < 0.05$)

Obtención de las matrices de detección de cambio (ejemplo de 1973-1986).

El mapa temático de 1973 y 1986 se traslapan con el comando Cross-Tabulation de IDRISI 32 para generar la matriz con la conjunción de cambios de cada píxel, por ejemplo: el píxel de la columna 1 y renglón 1 pasó de la clase de cobertura 2 a la 5, el número de píxeles con el mismo cambio aparecen en la celda de la columna 2 y el renglón 5.

Cross-tabulation of final (columns) against 1986 final (rows)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9 Total
1	170833	1852	1798	743	143	2559	3	0	0 177931
2	9242	137540	5046	12181	4506	50154	911	193	0 219773
3	2010	2805	51409	4175	1272	1140	26	1	0 62838
4	1600	2484	1617	84835	2725	1004	22105	0	0 116370
5	282	8807	817	6587	13632	38839	6011	112	0 75087
6	94	21279	12	17958	34783	329120	31969	217	0 435432
7	36	10332	143	27118	7358	54241	58468	54	0 157750
8	191	159	41	62	517	4353	184	9100	0 14607
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1 1
Total	184288	185258	60883	153659	64936	481410	119677	9677	1 1259789

Cada valor de la celda (número de píxeles) se multiplicó por la resolución espacial de las imágenes (0.36 ha) para generar la matriz de detección de cambio en hectáreas. Las celdas sombreadas, corresponden al área sin cambio de cada clase.

	esteros	marismas	mangle	selva	v. sec.	agro	suelos	pob.	granjas	total 1986	%
esteros	61500	667	647	267	51	921	1	0	0	64055	14.12
marismas	3327	49514	1817	4385	1622	18055	328	69	0	79118	17.45
mangle	724	1010	18507	1503	458	410	9	0	0	22622	4.99
selva	576	894	582	30541	981	361	7958	0	0	41893	9.24
v. secundaria	102	3171	294	2371	4908	13982	2164	40	0	27031	5.96
agro	34	7660	4	6465	12522	118483	11509	78	0	156756	34.56
suelos	13	3720	51	9762	2649	19527	21048	19	0	56790	12.52
poblados	69	57	15	22	186	1567	66	3276	0	5259	1.16
granjas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total 1973	66344	66693	21918	55317	23377	173308	43084	3484	0	453524	
%	14.63	14.71	4.83	12.2	5.15	38.21	9.5	0.77	0		

Algunos indicadores estimados de la matriz de cambio

pérdida	4844	17178	3411	24777	18469	54824	22035	208	0
est. de localización	92.7	74.2	84.4	55.2	21	68.4	48.9	94	
est. de residencia	-3.45	18.63	3.21	-24.3	15.63	-9.55	31.81	50.95	
diagonal	307778								
% no cambio	67.9	32.1							
n2	2.06E+11								
Kappa	0.59								

%= representación relativa porcentual de cada clase = (área de la clase *i* /área total de la cuenca)x100. Por ejemplo la clase esteros en 1973 es $(66344 / 453524) \times 100 = 14.63$

Pérdida= suma del área pérdida de cada clase. Por ejemplo la clase esteros perdió 3327 ha que cambiaron a marismas, mas 724 ha que cambiaron a manglar, suman un total de 4844 ha que se convirtieron a otras clases.

Estabilidad de localización= $[(\text{total de la clase } i \text{ en } 1973 - \text{pérdida de clase } i) / \text{total de cada clase } i \text{ en } 1973] \times 100$

Ejemplo para esteros: E.loc= $[(66344 - 4844) / 66344] \times 100 = 92.7$ lo que significa que esteros no tuvo perdidas considerables pues la escala manejada es de 0 perdida total o 100 sin perdida alguna.

Estabilidad de localización= $[(\text{total de la clase } i \text{ en } 1973 - \text{total de clase } i \text{ en } 1986) / \text{total de cada clase } i \text{ en } 1973] \times 100$

Ejemplo para esteros: E.red= $[(64055 - 66344) / 66344] \times 100 = - 3.45$ lo que significa que los cambios fueron con una ligera tendencia negativa.

% de no cambio = $(\text{suma de la diagonal} / \text{total de área de la cuenca}) * 100 = 307778/453524 * 100 = 67.9\%$

% de cambio = $100 - \% \text{ de no cambio} = 100 - 67.9 = 32.1\%$

Kappa (formula en página 25) = 0.59