

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.

CARACTERIZACIÓN DEL PAISAJE DEL MUNICIPIO DE AHOME, SINALOA,
MÉXICO, UTILIZANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

POR

NORA ALICIA TRELLES RIOS

TESIS APROBADA POR LA

UNIDAD MAZATLÁN
ENACUICUL RURAL y MANEJO AMBIENTAL

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE


MAESTRÍA EN CIENCIAS

MAZATLÁN, SINALOA


DICIEMBRE 2002

APROBACIÓN


Los miembros del comité designado para revisar la tesis de Nora Alicia Trelles Ríos, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias, con Especialidad en Manejo Ambiental




Dr. Arturo Ruiz Luna
Director de Tesis



Dr. Juan Madrid Vera



M. en C. César Berlanga Robles



M. en C. Guillermo Rodríguez Domínguez

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita del director general del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en este tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa aprobación escrita del manuscrito en cuestión, del director de la tesis.

Dr. Alfonso Gardea Bejar

Director General

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca brindada durante el transcurso del programa de posgrado.

Se agradece al proyecto CONACYT 28347B por el apoyo económico brindado para la realización de trabajo de campo.

En especial al Dr. Arturo Ruiz Luna investigador titular del Laboratorio de Manejo Ambiental y director de este mi trabajo de tesis, por su acertada y siempre valiosa enseñanza.

Al M. en C. César Berlanga Robles por sus relevantes aportaciones a mi trabajo de tesis.

Agradezco al Dr. Juan Madrid Vera por sus sugerencias y en lo personal por haber creído en mí y darme la oportunidad de trabajar a su lado.

Al M. en C. Guillermo Rodríguez Domínguez por su colaboración y adecuados consejos en el desarrollo de esta tesis y por haber formado parte de mi comité de tesis.

Al distinguido presidente municipal del H. Ayuntamiento de Ahomé C. Mario López Valdez, por el apoyo brindado para asistir al congreso internacional realizado en La Habana, Cuba: Geomática 2002 y dar a conocer nuestro importante y productivo paisaje Ahomense.

Agradezco a la Dra. Ana Margarida Trigo de Sousa Roque por su gran ayuda en la traducción de resumen.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. por apoyo otorgado en el transcurso de mis estudios de posgrado.

Al Centro de Ciencias del estado de Sinaloa CECYT, por la ayuda económica otorgada para la terminación de mi trabajo de tesis.

DEDICATORIA

A mis padres que siempre han estado a mi lado dedico ésta, una más de mis metas y les doy las gracias por su amor y comprensión por entender mi vida.

A mis hermanas Marthita, Chely, Monica y Alida, gracias por su apoyo y amor.

Mis tremendas pero sobretodo hermosas sobrinas, Alejandra, Pamela, Laura Sofía y Monica, a mi abuelita Vicky, las quiero.

Muy en especial a mi cuñado Venancio Téllez, gracias por tus alentadoras porras y tu gran ayuda

A mi querido amigo Arturo Ruiz, como siempre lo he dicho:

"Eres mi ángel de la guarda"

A mis amigas y amigos que son muchos, Daniela Barrios, Ernesto Sánchez, Joanna Acosta, Cipactli Meza, Tere Maldonado, Tania Caamal, Miguel Angel, Jose Luis Camacho, Carolina, Rosario Arredondo, Mayra, Marie y Elsa Bernardet, Lorena Paez, Dilian Anguas, Jessy Montoya, Selene Gómez, Carlos Navarro, Jaime Borboa, Carlos Lira, a todos GRACIAS.

A Nora por seguir adelante.....

CONTENIDO

INDICE DE CUADROS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	6
Objetivo General.....	6
Objetivos particulares.....	6
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
Desarrollo económico y ambiente en zonas costeras.....	7
Zona Costera.....	10
Aspectos generales de Percepción Remota.....	14
Aspectos generales de Sistemas de Información Geográfica.....	18
Usos de sistemas de información geográfica en el mundo.....	19
SIG en zona costera.....	20
Aplicaciones de SIG en la zona costera de México.....	22
MATERIAL Y MÉTODOS.....	23
Descripción del área de estudio.....	23
Selección y pre-procesamiento de imágenes de satélite.....	26
Aislamiento del área de estudio.....	27
Realce o mejoramiento de imágenes.....	28
Enmascaramiento de áreas.....	28
Corrección Geográfica.....	29
Caracterización del paisaje actual del municipio de Ahome.....	30
Selección de campos de entrenamiento.....	31
Generación de firmas espectrales.....	32
Clasificación.....	33
Elaboración de mapas temáticos.....	34
Validación de la exactitud.....	34
Caracterización del paisaje actual.....	37
Estimación de cambios del paisaje de 1973 al 2000.....	38
Clasificación de 1973.....	38
Elaboración de mapas temáticos y cálculo de área.....	39
Tendencias y análisis de cambios.....	39
Integración de resultados a un sistema de información geográfica.....	40
RESULTADOS.....	43
Caracterización del paisaje.....	46
Validación de la exactitud.....	46

Caracterización del paisaje actual	49
Análisis multitemporal post-clasificadorio	51
Clasificación de la escena de 1973.....	51
Variación temporal	54
Tendencias y análisis de cambio	56
Integración al Sistema de Información Geográfico.....	57
Datos primarios.....	58
Usos de suelo naturales e inducidos	58
Datos secundarios	60
DISCUSION.....	61
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFIA.....	75
ANEXOS.....	94

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Principales características de las imágenes del satélite Landsat empleadas para la caracterización del paisaje actual del municipio de Ahome y análisis multitemporal de cambios en el paisaje (1973-2000)	27
Cuadro 2.- Clases informacionales para clasificación supervisada en escenas Landsat	32
Cuadro 3.- Matriz de error (de acuerdo a Congalton y Green, 1999)	35
Cuadro 4.- Datos estadísticos de valores de brillantez para los campos de entrenamiento de las clases informacionales que fueron utilizadas en el proceso de clasificación supervisada para la imagen Landsat ETM+ del año 2000	45
Cuadro 5.- Matriz de error utilizada para evaluar la exactitud global de la clasificación supervisada ETM+ 2000	48
Cuadro 6.- Valores de exactitud del Productor y Usuario para la clasificación supervisada de escena correspondiente al municipio de Ahome (Landsat ETM+, 2000)	48
Cuadro 7.- Datos estadísticos de valores de brillantez para los campos de entrenamiento de las clases informacionales que fueron utilizadas en el proceso de clasificación supervisada para la imagen Landsat MSS de 1973	51
Cuadro 8.- Cálculo de área ocupada (%) entre 1973 y 2000 para cada una de las clases / extensión de coberturas, usos de suelo y tendencias de cambios 1973-2000	54
Cuadro 9.- Matriz de cambio entre dos escenas Landsat clasificadas para los años 1973 (MSS) y 2000 (ETM+). Las unidades están expresadas en km ²	56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Macrolocalización del área de estudio	24
Figura 2. Localización geográfica del área de estudio. Coordenadas UTM (us27tm12	25
Figura 3. Límites del área de estudio establecidos por digitalización de los límites políticos correspondientes al municipio de Ahome	43
Figura 4. Escena del municipio de Ahome, Sin., compuesta en falso color a partir de dos imágenes Landsat-MSS (bandas 3,2,1, sistema RGB) de 1973	44
Figura 5. Escena del municipio de Ahome, Sin., compuesta en falso color a partir de dos imágenes Landsat-ETM+ (bandas 4,3,2 sistema RGB) del año 2000	44
Figura 6. Firmas espectrales de siete clases de cobertura y usos de suelo obtenidas a partir de una imagen Landsat ETM+	46
Figura 7. Localización de 420 puntos de control en el área de estudio	47
Figura 8. Clasificación del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, a partir de una escena Landsat ETM+ correspondiente a mayo del 2000	50
Figura 9. Firmas espectrales de siete clases de cobertura y usos de suelo obtenidas a partir de una imagen Landsat MSS	52
Figura 10. Clasificación del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, a partir de una escena Landsat MSS correspondiente a marzo de 1973	53
Figura 11. Variación en la proporción del área ocupada por clase entre 1973–2000	55
Figura 12. Distribución de coberturas naturales e inducidas en el municipio de Ahome	59

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar el paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa y estimar las tendencias y dirección de las transformaciones en los usos de suelo y coberturas naturales, ocurridas de 1973 al 2000, se analizaron dos escenas del satélite Landsat (MSS y ETM+). El área de estudio se definió por los límites geopolíticos municipales, que incluyen una superficie aproximada de 4350 km², lo que representa aproximadamente el 6% de la superficie estatal. Se estimó la superficie de nueve clases informacionales representativas de coberturas naturales y de usos de suelo, por medio de técnicas de clasificación supervisada y digitalización directa. Las clases corresponden a aguas costeras, manglar, selva, marismas, suelos desnudos, agricultura, vegetación secundaria. Asentamientos humanos y acuicultura fueron evaluadas por digitalización. Los resultados de la clasificación del 2000 fueron validados con datos de campo obteniéndose un mapa temático cuya exactitud global fue de 84,8%, con valores del coeficiente de Kappa de 0.81 ± 0.04 . Ambos resultados indican concordancia elevada entre los datos de referencia y la clasificación. La región se caracterizó como mayoritariamente agrícola (>24%) y englobada con otras coberturas inducidas (acuicultura, asentamientos humanos, suelos desnudos y vegetación secundaria), representa más del 55% del área total. Existe un componente importante de áreas naturales susceptibles de conservación y manejo (bahías, esteros, manglar, selva) que representan alrededor del 40% del área total. El análisis multitemporal postclasificadorio indicó que existe un crecimiento de aproximadamente 49% a 56% de áreas con coberturas inducidas y que los mayores cambios en extensión se observan en el crecimiento de vegetación secundaria y agricultura y en la reducción de selva. Proporcionalmente, asentamientos humanos y acuicultura fueron las clases con mayor crecimiento. Parte del análisis de datos con atributos espaciales y la integración general de los resultados se realizó utilizando un SIG, cuyo producto final se presenta en ArcView y aplicaciones similares, a fin de favorecer el almacenamiento, manejo y actualización de la información y su disponibilidad para diversas plataformas y usuarios.

ABSTRACT

Satellite sensors (Landsat MSS and ETM+) were used to characterize land cover types of the municipality of Ahorn, Sinaloa, evaluating their change from 1973 to 2000, for a surface around 4350 km² (nearly 6% of the state area), limited by the municipal geopolitical boundaries. The area of nine informational classes, with distinctive land uses and natural covers was evaluated using supervised classification techniques (coastal aquatic systems, mangrove, dry forest, saltmarsh, agriculture, bare soils secondary succession) and digitalization (human settlements and shrimp farms). Results of the classification of the year 2000 scene were validated using field data, obtaining a thematic map which overall accuracy estimation was 84.8%, reaching values of the Kappa coefficient corresponding to moderate-high agreement (0.81 ± 0.04), between the classification and the reference data. The municipal landscape is characterized mainly by agriculture cover (>24%) and together with other anthropogenic covers (shrimp farming, human settlements, bare soils and secondary succession), represents more than 55% of the total area. Around 40% of the landscape was represented by natural covers (aquatic systems, mangrove, saltmarsh and dry forest), suitable for conservation and management. The multitemporal post-classification analysis detected an increase of the induced covers from 49% to 56% of the total area, with the highest growth allocated to secondary succession and agriculture, and the highest reduction identified for the dry forest. The main relative changes, in relation to scene for 1973, were the increment of human settlements and shrimp farms. Data with spatial attributes were partially analyzed using applications of geographical information systems (GIS), and the final results were integrated to an ArcView format, to improve the GIS capabilities for storage, management, updating and sharing of data with other GIS application and users.

INTRODUCCIÓN

El estado de Sinaloa, localizado en el noroeste de México, es una de las entidades más productivas de la República mexicana, particularmente en lo que respecta al sector primario (agricultura, pesca, ganadería). Dentro del sector agrícola, Sinaloa produce alrededor del 30% del total nacional por año, ocupa normalmente el tercer o cuarto lugar en producción pesquera y es el principal productor de camarón producido en granja (Gobierno de Sinaloa <http://www.sinaloa.gob.mx>). Para 1993, Sinaloa produjo cerca del 2.5% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y aunque para 1998 éste se redujo a casi 1% del total nacional, en términos absolutos se incrementó en más del 100% (INEGI, 2000a).

Como parte del estado, el municipio costero de Ahome ha mantenido esta misma tendencia de crecimiento económico a través del tiempo, situándose en un lugar privilegiado dentro del ámbito económico-social sinaloense. Ahome cuenta con más del 8% del total de unidades de producción del estado, siendo particularmente importante su participación en la agricultura (INEGI, 1999).

El continuo crecimiento económico y el incremento en la densidad poblacional en el estado, pero particularmente en sus municipios costeros, donde se concentra más del 80% de la población estatal (INEGI, 2000b), genera un aumento en la demanda de recursos y servicios, con el consecuente impacto sobre el ambiente. Para evaluar la magnitud de dicho impacto y para contar con elementos para minimizarlo y generar un mejor manejo y administración de los recursos naturales, se requiere de datos históricos que

permitan conocer la tendencia en los cambios y al mismo tiempo, de inventarios actualizados para conocer el estado de los recursos.

El desarrollo de diversas actividades humanas, definidas por patrones culturales específicos, ha causado modificaciones en los ambientes naturales, muchas de ellas evidentes a nivel de paisaje, dado que el cambio en los usos de suelo está muy relacionado con los patrones culturales (Brondizio *et al.*, 1994; Ojima *et al.*, 1994; Elliot, 1995). Estas actividades generan alteración o destrucción de los recursos naturales, que además de su importancia ecológica pueden tener importancia económica, científica, medicinal, recreativa o para usos ornamentales. Para evitar que estos cambios afecten de una manera irreversible o generen fuertes impactos ambientales, se ha hecho necesario contar con programas de ordenamiento y desarrollo regional basados en estudios técnicos de uso de suelo y el manejo de los recursos naturales en el territorio nacional (SEDUE, 1988).

Estos programas generalmente son promovidos por entidades federativas y municipales, que tienen jurisdicción para tomar las decisiones sobre el manejo de recursos en su área de competencia, aún cuando no coincida con límites naturales. La delimitación geográfica del ordenamiento está definida por criterios geopolíticos, administrativos, ecológicos y fisiográficos (SEDUE, 1988). Además puede promoverse el ordenamiento de áreas que contengan ecosistemas o unidades ambientales completas, zonas definidas por rasgos lineales reconocibles en el terreno tales como carreteras, ríos, litorales, cañadas y/o coordenadas geográficas, o territorios donde se manifiesten claramente los problemas ambientales (OECES, 2002).

Por lo anterior y a diferencia de otros trabajos en los que predominan los criterios naturales de selección de área (p.e. cuencas o subcuencas hidrológicas), el presente estudio sigue criterios geopolíticos y administrativos (límites políticos municipales). Esta delimitación se apega a una de las cinco

opciones (ordenamiento ecológico municipal o de los centros de población) establecidas en la Ley del equilibrio ecológico y la protección al ambiente del estado de Sinaloa (LEEPAES, 1991).

Como región, Ahome no solo es importante por su notable desarrollo económico propiciado por su adelanto agrícola, siendo esta la principal actividad en el municipio (Trelles, 2000), sino que también cuenta con importantes zonas urbanas como Los Mochis y el puerto de Topolobampo (ambos conforman el corredor industrial Los Mochis-Topolobampo). Asimismo presenta un considerable desarrollo en el sector pesquero, silvícola y agroindustrial en general (INEGI, 1999), mientras que en el sector camaronícola se ubica como el cuarto municipio en cuanto a número de granjas y superficie en cultivo (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, *en prensa*). A pesar de este desarrollo, aún se mantienen áreas con un alto nivel de conservación, que contienen la mayor representación florística de la región (Trelles, 2000). También es importante por la extensión de ecosistemas acuáticos y humedales con que cuenta, por lo que es necesario integrar información actualizada, útil para la gestión de los recursos naturales municipales.

El presente estudio va dirigido en este sentido y se encuentra en estrecha relación con el programa de investigación *Cambios de paisaje en la llanura costera de Sinaloa y norte de Nayarit, producidos por actividades humanas y sus efectos sobre la producción de comunidades naturales terrestres y acuáticas* desarrollado en el Laboratorio de Manejo Ambiental (LAMA), del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD, A.C.).

Como parte de este programa de investigación se ha realizado una serie de estudios utilizando diferentes criterios para la selección de área (sistemas acuáticos costeros, cuenca hidrológica, área de influencia urbana), siendo éste el primer estudio que incorpora la división geopolítica como criterio para el análisis del paisaje. Para los fines del presente estudio, paisaje se define como

una amplia porción de un territorio, homogéneo para algunas características, de tal manera que es posible distinguir su tipo por las relaciones entre sus elementos estructurales y funcionales (Farina, 1998). También se considera el criterio de Petch y Kolejka (1993), quienes asumen que el paisaje es una amalgama de influencias naturales y culturales, una manifestación de condiciones físicas y económicas locales, que han evolucionado en periodos largos de tiempo, más que como una entidad definida por divisiones estrictamente naturales. Frohn (1998), quien estudia el paisaje desde el enfoque ecológico, selecciona sitios de estudio que corresponden a escenas totalmente regulares, rectángulos o cuadrados que no se ajustan a ningún límite natural, por lo que el criterio de circunscribir el paisaje a límites geopolíticos es aceptable.

Como parte de dicho proyecto, cuyos resultados se documentan adelante, se han detectado diversos agentes de transformación del paisaje, siguiendo técnicas similares a las que aquí se proponen, donde el factor común es el uso de técnicas modernas a través de las cuales es posible evaluar las tendencias de cambio en las características del paisaje, particularmente técnicas de Percepción Remota (PR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En términos generales, la PR se basa en el análisis de información espectral contenida en formatos digitales, con características y escalas espacio-temporales definidas. Una definición más formal de PR es la propuesta por Campbell (1996), quien indica que la PR es la práctica de derivar información acerca de las coberturas terrestres o superficies acuáticas usando imágenes captadas desde una perspectiva elevada, por medio del análisis de la radiación electromagnética, en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida de la superficie terrestre.

Por su parte, los SIG, dentro del contexto de los recursos naturales, permiten vincular información de diversas fuentes (percepción remota, cartografía, bases de datos, datos de campo), para integrarla e interpretarla con el fin de establecer los lineamientos requeridos para el manejo eficaz de los recursos. Estos sistemas tienen como objetivo el almacenamiento, integración y manipulación de datos geográficos, incluidos en programas de cómputo. Actualmente el levantamiento de información de la superficie terrestre no es concebible sin el apoyo de estos sistemas ya que además de que facilitan la interpretación de la información, es posible generar mapas temáticos y sintéticos de aspectos particulares o generales, así como informes y otro tipo de salidas gráficas, de texto o tabulares (Pheng y Kam, 1989; Bocco *et al.*, 1991).

Por lo anterior y considerando que un ejercicio similar al presente se está realizando a nivel estatal y que sus resultados se están integrando a formatos estándar de SIG, se propone para el presente trabajo la integración de los resultados de la caracterización actual del paisaje en el Municipio de Ahome y la evaluación de las tendencias de cambio, a un sistema de información geográfica con la finalidad de que este producto pueda incorporarse posteriormente a planes de manejo de recursos.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Caracterizar el paisaje actual y evaluar los cambios de uso de suelo en el municipio de Ahome, mediante el uso de técnicas de Percepción Remota y su integración a un Sistema de Información Geográfica

Objetivos particulares

- Caracterizar el estado actual del paisaje en el municipio de Ahome, usando técnicas de percepción remota.
- Estimar los cambios en el paisaje, generados por las principales actividades antropogénicas, por comparación multitemporal.
- Integrar la información generada y datos secundarios en un SIG.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Desarrollo económico y ambiente en zonas costeras

El rápido crecimiento de la población, la explotación a gran escala de los recursos de la zona costera y el acelerado desarrollo de infraestructura frecuentemente ha resultado en el deterioro y disminución de la calidad de los ambientes costeros (Kay y Alder, 1999). Para reducir este deterioro en México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente promulgada en 1993 (LGEEPA, 1994), contempla una serie de disposiciones en materia ambiental, entre las que se encuentran en primer término, definir la política ecológica, el ordenamiento ecológico, la protección de áreas naturales y el aprovechamiento racional de los elementos naturales, entre otras.

Estas medidas han surgido como respuesta al deterioro ambiental que se ha venido presentando en el país, como consecuencia del desarrollo mal planeado. También, el uso desordenado del territorio produce, a veces innecesariamente, una reducción de las áreas naturales, a lo que se asocia la pérdida de diversidad, por lo que es necesario seleccionar áreas para su preservación y mantenimiento de estas zonas (Escofet *et al.*, 1993).

Para que la legislación sea efectiva y contribuya a la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente, tal como se propone, es necesario contar con dos elementos importantes. Por una parte se requiere el conocimiento detallado de los recursos disponibles y de su potencialidad para diversos usos y por otra, se necesita la coordinación entre las dependencias y

entidades de la administración pública federal que tienen ingerencia en el manejo de estos recursos, aspecto también mencionado en la LGEEPA.

Cuando se carece de información actualizada sobre el estado actual de los recursos y sus tendencias de uso, como es el caso del Municipio de Ahome, no es factible proponer programas de desarrollo viables, por lo que la generación de esta información se hace indispensable si se pretende un desarrollo sostenible basado en la adecuada gestión de los recursos naturales.

El Municipio de Ahome es el sexto en extensión y se sitúa dentro de los cinco primeros dentro del estado de Sinaloa, en términos de desarrollo económico (INEGI, 2000b). Cuenta con una gran diversidad de escenarios naturales, que van desde extensas zonas modificadas de manera extrema dedicadas a la producción, hasta zonas con gran valor ecológico, adecuadas para preservación o protección. Dentro de éstas últimas destacan la Sierra de Barobampo, así como grandes áreas de marismas a lo largo de la costa, las cuales sirven de zona de anidación y refugio para una gran diversidad de especies de aves y las bahías de Santa María, Topolobampo y Ohuira, siendo la Sierra de Navachiste lo que delimita a la Bahía de Topolobampo y puerto del mismo nombre (Olea, 1975).

Dentro de las áreas con desarrollo urbano, la ciudad de Los Mochis es la de mayor importancia dentro del municipio, siendo ésta la cabecera municipal, además de contar con la infraestructura necesaria para el desarrollo social y económico, asociado con actividades agrícolas, comerciales, turísticas y otras como la acuicultura, pesca, desarrollo industrial y silvícola (INEGI, 1999). En un estudio previo realizado en este municipio, se caracterizó como una zona mayoritariamente agrícola, aunque en los últimos años se ha dado un notable crecimiento de la actividad acuícola y agroindustrial (Trelles, 2000). Aunado a ello la conformación de un corredor industrial con el puerto de altura

Topolobampo, ha incrementado el intercambio comercial de la región (Millán, 1997), generando con ello una mayor proyección del estado a nivel nacional.

El desarrollo de estas actividades tiene un impacto sobre los ambientes naturales, en este sentido se han realizado algunas investigaciones para el área de estudio, dentro de las que destaca la realizada por Galindo (2000), quien señala elevada contaminación para los sistemas acuáticos de Ohuira y Topolobampo, dada su cercanía a zonas agrícolas y considerando que estos sistemas son áreas terminales en las que se descargan volúmenes considerables de plaguicidas.

El mayor desarrollo agrícola y por tanto el cambio más notable en el paisaje del municipio ocurrió a fines de la primera mitad del siglo pasado, siendo a partir de los años 40's cuando se dieron los inicios del desarrollo agrícola de la región, aunque desde sus inicios, a casi 100 años de su fundación, se perfiló como región de gran importancia económica (Martínez, 2000). Cabe destacar que los últimos 25 años han sido importantes en cuanto al avance tecnológico, particularmente en la agricultura y la agroindustria, por lo que aquí ya se presentan problemas de contaminación y cambios de usos de suelo. Sin embargo, es necesario puntualizar que para reducir este impacto se han promovido los Planes de Ordenamiento Ecológico (POET), con el objetivo de establecer un marco de actuación ambiental, conjuntamente con la sociedad, dependencias estatales y públicas (SEDUE, 1988).

Pese a estos esfuerzos, el paisaje de la región se ha ido transformando con el desarrollo económico y social, dando lugar a nuevas relaciones entre sus habitantes y la naturaleza que los rodea y de la cual dependen, tal como ocurre en diversos sitios del planeta (Ojima *et al.*, 1994). Por ello se requiere del conocimiento de los principales usos y manejo de los recursos costeros del municipio, tal como aquí se propone.

Zona Costera

La zona costera ha sido delimitada considerando diversos enfoques y uno de los conceptos más ampliamente aceptados es el citado por Yáñez-Arancibia (1999), donde se define en términos generales, como el espacio geográfico en el cuál los principales intercambios de materia y energía son producidos entre ecosistemas marinos y terrestres, región de interacción entre mar, continente, descarga de aguas residuales y la atmósfera. Usualmente la extensión de esta región se considera entre 20 y 200m. En México, con fines administrativos, se maneja el concepto de zona marítimo-terrestre cuya amplitud es de 20m a partir de la línea de marea alta (Yáñez-Arancibia, 1999).

Desde un enfoque más amplio, Ketchum (en Kay y Alder, 1999) define a la zona costera como la banda de tierra emergida y el océano adyacente (agua y tierra sumergida) en la que los procesos terrestres y usos de suelo afectan directamente los procesos y usos oceánicos y viceversa.

Esta región es la más importante e intensivamente usada dentro de todas las zonas con asentamientos humanos y se estima que entre el 50 y 70% de la población total en el mundo habita en las zonas costeras. Los usos que se dan en esta zona son diversos y esto a su vez genera problemas ambientales (Kay y Alder, 1999).

El impacto generado por actividades antropogénicas puede afectar tanto la fase terrestre como acuática, en sus funciones morfodinámica y procesos ecológicos en zonas costeras (Bartlett, 1993). De acuerdo con este autor, el manejo de sedimentos con fines de construcción, su descarga a través de ríos, el uso inapropiado de estructuras, tales como rompeolas y espigones, los cuales afectan la morfodinámica de la costa y traen consigo problemas de erosión o acresión en la franja costera. Finalmente, el desarrollo puede propiciar

la destrucción de hábitat y diversidad genética a través del crecimiento urbano e industrial, contaminación, sobre-explotación de recursos marinos, introducción de especies exóticas o enfermedades, siendo estos algunos de los problemas que se generan en la zona costera.

Por su dinámica y complejidad, las zonas costeras son estudiadas desde diversos puntos de vista, sin embargo el uso de técnicas de percepción remota (PR) y su integración a sistemas de información geográfica (SIG) permite una visión amplia y sinóptica del paisaje, que no se obtiene únicamente con trabajo de campo y al mismo tiempo provee de suficiente exactitud, a costos relativamente bajos y con mayor velocidad que los métodos de campo convencionales (Dimiyati *et al.*, 1996; Green *et al.*, 1996; Baban-Serwan y Wan-Yusof, 2001).

Esta técnica se ha utilizado en diversos lugares del mundo para fines distintos. Gulinck *et al.* (2000) determinaron la estructura del paisaje con base a la estructura espacial del medio ambiente externo y su representación ante el medio natural y sociedad. Green *et al.* (1996) realizaron una revisión bibliográfica evaluando los usos y efectividad de las técnicas de percepción remota en la evaluación de recursos costeros tropicales. Foody y Hill (1996) y Brondizio *et al.* (1994), identificaron coberturas naturales de bosques tropicales y determinaron cambios de usos de suelo en Perú y Brasil, respectivamente. Long y Skewse (1996), Maracchi *et al.* (1996), Smith *et al.* (1998), De la Lanza *et al.* (1993) y Martin (2000) han evaluado vegetación costera, con énfasis en humedales costeros, en Australia, Italia, Reino Unido y México, respectivamente.

Como técnica para la determinación de cambios de uso de suelo y caracterización del paisaje en zona costera, Baily y Nowell (1996) en el Reino Unido, Dimiyati *et al.* (1996) en Yakarta, Mas (1997) en Campeche y Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1999b) y Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2002) en Sinaloa,

México, Luque (2000) en los EUA y Baban-Serwan y Wan-Yusof (2001) en Malasia, entre otros, han analizado imágenes procedentes de fotografía aérea y satélites, siguiendo técnicas de análisis multitemporal.

Otros ejemplos importantes de la aplicación de técnicas de percepción remota en el análisis de cambios del paisaje, son los trabajos publicados por la Environmental Protection Agency (EPA) de los EUA (Jones *et al.*, 1997), para la zona costera del Atlántico medio, así como las descripciones metodológicas de Martín (1993) para la República Dominicana y el sur de Australia y de Eastman *et al.* (1995) para la zona costera de África, así como el trabajo realizado por Petity Lambin (2001), en el río Lusitu en Zambia y Zimbabwe, en el que compararon dos tipos de información (fotografía aérea e imágenes SPOT), con la finalidad de contrastar la variabilidad entre estos dos medios y su nivel de detalle espacial para detectar cambio.

Esta técnica ha sido ampliamente utilizada para fines diversos, relacionados con el cambio de coberturas terrestres. Además de los citados anteriormente, Foody y Hill (1996) identificaron clases espectralmente diferentes en bosques tropicales de Perú; Phinn *et al.* (2000) combinaron aspectos relacionados con PR y ecología del paisaje, para proveer información objetiva para la selección de criterios óptimos para el manejo, seguimiento y modelación en ambientes costeros. Cracknell (1999) concentra y define de manera muy clara las posibilidades de uso de la PR con relación a estuario y zonas costeras.

En México, se están desarrollando investigaciones mediante el uso de Percepción Remota, enfocada al análisis del paisaje, modificación y principales agentes modificadores. Bajo este dentro del Laboratorio de Manejo Ambiental de la Unidad Mazatlán del CIAD se han desarrollado algunos trabajos, evaluando los diversos usos de suelo y tendencias de cambios en la zona costera de Sinaloa y norte de Nayarit. Los resultados derivados de estos

estudios son los antecedentes más directos para el presente trabajo, proporcionando información acerca de las transformaciones que ha sufrido el paisaje sinaloense.

En particular para el sur de Sinaloa, se ha determinado que uno de los principales agentes modificadores del paisaje es la agricultura, aunque también el crecimiento urbano tiene un papel determinante en algunas zonas. Para la zona correspondiente al sistema Huizache-Caimanero y al sistema litoral Majahual, el crecimiento urbano no parece tener relación con la reducción de manglar o con las variaciones en la cobertura del espejo de agua, sin embargo hay pérdida de las principales coberturas naturales (manglar, selva baja), mientras que ha habido un crecimiento de la agricultura y de vegetación secundaria, asociada al desarrollo agrícola, siendo éste un indicador de perturbación (Berlanga, 1999; Ruiz y Berlanga, 1999a; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002). Por otra parte, Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (*aceptado*) determinaron que hay una reducción de sistemas lagunares costeros asociados al crecimiento urbano de Mazatlán.

Para otras regiones del estado, Gurrola (2000) y Alonso (2000) evaluaron los cambios en las coberturas naturales y usos de suelo en Bahía Santa María y la Bahía de Ceuta, siendo la agricultura la principal cobertura y asumiendo que la camaronicultura es el principal modificador del equilibrio lagunar dado por las descargas de nutrientes de las granjas y suelos agrícolas a las lagunas. Lieberknecht (2000) analizó las características del paisaje y cambios en Altata, así como el impacto antropogénico del uso de suelo, el cual incluye contaminación por agroquímicos y aguas residuales provenientes de zonas urbanas. Finalmente, Trelles (2000) realizó un estudio multitemporal del paisaje en el corredor industrial Los Mochis-Topolobampo y encontró que el principal modificar del paisaje está dado por el desarrollo de actividades antropogénicas, caracterizando al municipio como mayoritariamente agrícola.

Aspectos generales de Percepción Remota

Las técnicas de percepción remota (PR) se basan en la capacidad de los objetos para captar y reflejar energía en diversos intervalos del espectro electromagnético. En términos generales se considera como la adquisición de información de un objeto, área o evento, con base en mediciones tomadas a cierta distancia. Tal información se genera por la interacción de la radiación electromagnética y la superficie de la tierra cuando ésta es iluminada por una fuente de energía externa y posteriormente es captada por sensores instalados sobre satélites o plataformas aéreas (Green *et al.*, 1996). También es definida como la adquisición de datos por medio de un sensor que no está en contacto con el objeto observado y en la evaluación de los datos adquiridos, que se denominan entonces información y se presentan en forma de mapas o estadísticas (Howard, 1985).

El uso de técnicas de percepción remota, tal como se reconocen actualmente, inicia a principios de la década de los 60's en el siglo pasado, con la puesta en órbita del satélite meteorológico TIROS (Campbell, 1996). Con ello se propició la generación de diversas fuentes de información, provenientes de satélites de observación con diferentes capacidades para el registro de datos. Originalmente la información obtenida por este medio, tuvo aplicaciones de tipo militar y para la obtención de información meteorológica; sin embargo, esta tecnología ha tenido un importante desarrollo en los últimos cuarenta años, incrementando la variedad de plataformas y sensores, así como las posibilidades de aplicación para el conocimiento y manejo de los recursos naturales.

En la actualidad los sensores con mayores aplicaciones para el estudio de ambientes terrestres y de sistemas costeros y oceánicos se clasifican en dos

grandes grupos; satélites con órbita geoestacionaria y satélites con órbita casi-polar (Green *et al.*, 2000). Dentro de los primeros, la mayoría tiene una resolución mayor de 100m por pixel. Estos sensores son particularmente eficaces para el registro de parámetros meteorológicos, temperatura de la superficie oceánica, concentración de clorofila, escala de color en el océano (relacionado con distribución de especies), entre otras aplicaciones. Algunos de los más utilizados son los denominados AVHRR, CZCS, SeaWiFs, ATSR.

El segundo tipo de sensores, generalmente con una mayor resolución espacial, resulta más apropiado para obtener información cuantitativa sobre la distribución espacial del medio ambiente, tal como inventario de recursos, cartografía, detección de cambios, batimetría. Los más utilizados han sido los sensores instalados en los satélites Landsat (MSS Landsat 1-5, con resolución de 80m; TM-Landsat 4-5, resolución de 30m, ETM-Landsat 7, resolución 30m multiespectral y 15 pancromático) y SPOT (HRV-SPOT 1-3 y HRVIR-SPOT 1-4, resolución de 20m). Algunas de las características de los sensores cuyas imágenes fueron analizadas en el presente trabajo se presentan en el Anexo A.

Actualmente se cuenta con sensores de mayor resolución tales como IKONOS, puesto en órbita en 2001, con una alta resolución espacial (1m pancromático y 4m multispectral), ubicado en el satélite Athena II. Asimismo, las imágenes ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) localizado en el satélite Terra, puesto en órbita en 1999 (<http://www.asterweb.jpl.nasa.gov/>).

Considerando el avance tecnológico de estos sensores y la posibilidad de contar con diversos niveles de resolución espacial y temporal, es posible su aplicación para diferentes objetivos, tales como la cuantificación de las tendencias que se presentan en el uso de suelo, detectando el grado de evolución y deterioro de áreas específicas (Pan *et al.*, 1999; Luque, 2000; Stefanov, 2001), seguimiento de incendios forestales, evolución de fenómenos

meteorológicos como huracanes y tormentas tropicales y aún la predicción de fenómenos oceanográficos como la Niña durante 1999-2000, mediante el análisis de datos de temperatura superficial del mar procedentes del satélite TOPEX/POSEIDÓN (Chen, 2001).

El uso de este tipo de técnicas para la evaluación de recursos naturales abre la posibilidad de evaluación de zonas de difícil acceso para evaluaciones en campo y permite la disponibilidad de una buena base de datos y cartografía actualizada. Sin embargo, pese a su flexibilidad, la percepción remota no está exenta de limitaciones o problemas prácticos. Green *et al.* (1996) recopilaron más de 150 artículos científicos, determinando las mayores restricciones prácticas en el uso de esta técnica, dentro las que destaca en primer término la atmosférica (nubosidad, humedad, polvo) que impide contar de manera continua con imágenes para un mismo punto. Asimismo destacan como otras limitantes importantes la resolución del sensor y la turbidez y variaciones en la columna de agua que hace confusa la clasificación y batimetría en ambientes costeros y oceánicos.

Particularmente para la zona costera tropical, Green *et al.* (2000), señalan que las principales limitantes en el uso de estas técnicas radican principalmente en dos niveles: práctico (cobrimiento de nubes, cobertura temporal limitada, baja resolución espacial) y las limitaciones del usuario (elevados costos de imágenes, software y equipo, conocimientos técnicos limitados, dificultad para validar la exactitud de las estimaciones), indicando que ambos tipos de limitación dejarán de ser tal, debido al avance tecnológico en los sensores (nuevos sensores y con mayor resolución)

Anteriormente se consideraba como limitante el costo del equipo (*hardware*) y de los programas para el procesamiento (*software*), que en la actualidad no representan gran problema (Green *et al.*, 2000), sin embargo el acceso a imágenes actuales con alta resolución sigue siendo una limitante por

su costo. Los costos por km² para imágenes procedentes de IKONOS varían de 18 a 52 dólares americanos, para las imágenes pancromáticas y multiespectrales, dependiendo del nivel de pre-procesamiento (ortorectificación, balance de tonos) que sean solicitadas (<http://www.intecamericas.com/>).

En ese sentido, la percepción remota no es una técnica de usos ilimitados o infalible y requiere del registro de información en campo para su calibración y validación, particularmente cuando se generan clasificaciones de coberturas y usos de suelo. Para determinar la validez de los datos procedentes de PR 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 (Congalton y Green, 1999).

La evaluación de la exactitud de la información procedente de PR es necesaria ya que permite identificar y corregir las fuentes de error, ya que finalmente la información resultante del análisis de imágenes puede ser utilizada para algunos procesos de toma de decisiones.

Una vez que se han generado los mapas temáticos con niveles de exactitud adecuados, se requiere de un sistema eficaz de manejo e interpretación de datos que permita procesamiento y transformación útil. En este sentido los SIG, representa el mecanismo más adecuado para utilizar la información generada por medio de técnicas de percepción remota. En la actualidad, tanto el procesamiento digital de imágenes como su integración a un SIG, pueden realizarse en computadoras personales con capacidad gráfica (Bocco *et al.*, 1991).

Aspectos generales de Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se definen como conjuntos de programas y equipos de cómputo, que permiten optimizar el acopio, recuperación, manipulación transformación y despliegue de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite, puntos de control adquiridos con GPS) y no espaciales (datos tabulares, atributos) provenientes de varias fuentes, temporal y espacialmente diferentes (Nath *et al.*, 2000). El subsistema de salida permite representar la información procesada bajo un SIG en forma de mapas (interrelación de capas), cuadros, gráficos e informes (Bocco *et al.*, 1991).

Con relación a la percepción remota, la posibilidad de integrar y analizar la información procesada a partir de imágenes, datos secundarios (estadísticas, datos de campo, cartografía, fotografía aérea, etc.) se amplían con la aplicación de estos sistemas, generando vínculos informacionales dinámicos y actualizables.

Los primeros SIG fueron desarrollados a mediados de los años 60's por agencias gubernamentales en Canadá y EUA, como una respuesta urgente a la necesidad de reconocer el medio ambiente y el uso de los recursos naturales. Estos sistemas se caracterizaron por la acumulación y uso de un grupo de datos a escala local, regional y ocasionalmente mundial. El mercado mundial de sistemas y datos de información geográfica se estimó para 1990 en 4000 millones de dólares y su crecimiento se calculó en un 20% anual (Meaden y Kapetsky, 1992).

Dadas las características de los SIG, estos pueden integrar datos de tipo primarios (generados ex profeso para el sistema, a través de digitalización de imágenes y vectores, localización de puntos en campo, creación y manejo de bases de datos) y con datos secundarios, que son derivados de los primarios o

se adquieren de fuentes externas (Meaden y Do Chi, 1996). Sus funciones básicas consisten, de acuerdo a Langran (1993) en, a) inventario; b) análisis; c) programación; d) presentación de datos; e) actualización y f) control de calidad.

Los principales beneficios generados por el desarrollo de SIG para sistemas costeros, se centran en su capacidad de integración de información proveniente de distintas fuentes y la facilidad de visualización de datos espaciales. También es útil para caracterizar las interacciones entre algunos procesos continentales y oceánicos presentes en zonas costeras, permite un uso más adecuado de datos provenientes de percepción remota, genera productos gráficos de alta calidad con fines de análisis de información y permite la actualización y eficiencia en el manejo de la estructura y características de las bases de datos (Tim, 1995).

Usos de sistemas de información geográfica en el mundo

La aplicación de los sistemas de información geográfica es muy amplia y puede darse con fines diversos, desde comerciales (localización de áreas de interés comercial, puntos de venta), para desarrollo de infraestructura urbana y evaluación de riesgos (Lyon y McCarthy, 1995), evaluación de recursos naturales (Caloz y Collet, 1997), estimación de cambios en humedales (Williams y Lyon, 1995), modelos espaciales de sistemas y procesos ecológicos basados en SIG (Hunsaker *et al.*, 1993), dinámica de comunidades marinas (Isaak y Hubert, 1997; Grassle, 2000; Myers, 2000) y evaluación de la actividad agrícola como fuente de contaminación (Hamlett *et al.*, 1995) y para la toma de decisiones para el desarrollo de actividades acuícolas en diversos países (Nath *et al.*, 2000).

Otras aplicaciones de SIG se han dado para el desarrollo urbano y para la evaluación enfocada hacia auditoría ambiental, impacto y análisis de cambios en los usos de suelo, monitoreo y modelación ambiental (Tim, 1995) y en algunos casos se ha combinado esta técnica con la percepción remota (Baban-Serwan y Wan-Yusof, 2001; Barale, 2000), con fines de manejo de recursos. Bocco *et al.* (1991) utilizaron esta técnica para determinar áreas de riesgo a la erosión y para la planeación de prioridades de conservación para el municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo. Meaden (1993) los aplica para el manejo de información pesquera con el objetivo de planear y llevar a cabo programas para el desarrollo pesquero en Libia.

Hoy en día el uso de esta técnica no solo se ha limitado a la evaluación de recursos naturales, gracias a las ventajas que brinda su capacidad de manejo de información variada, ha dado los primeros resultados en otros campos. Tim (1995), creó un programa con aplicaciones en ArcView denominado EMPHASIS para el área de ciencias de la salud. Con el uso de SIG generó una técnica interactiva para la integración, manejo y disponibilidad de datos ambientales, demográficos, mortalidad y morbilidad colectados en Iowa, con la finalidad de determinar la relación espacial entre morbilidad/mortalidad de datos actividades de vigilancia sobre cáncer y otros datos demográficos y ambientales.

SIG en zona costera

Por lo que respecta particularmente a recursos costeros, el uso tradicional de la franja costera es sumamente variable y va desde los aprovechamientos culturales (asentamientos humanos, áreas de defensa, turismo), a regiones de

gran valor en lo que se refiera a fuente importante de recursos explotables (energía primaria, petróleo, minería, pesca, tierras aptas para agricultura). Por tal motivo es de gran importancia hacer uso de tecnologías como los SIG para contar con información que permita planear el manejo razonable de los recursos y ventajas que ofrecen las zonas costeras (Bartlett, 2000).

Considerando el enfoque de Manejo Integral de Zona Costera (MIZC), que pretende apoyar el desarrollo organizado de las zonas costeras desde una perspectiva de usos múltiples, fundamentado en la relación naturaleza-hombre, las aplicaciones de SIG resultan de gran utilidad, ya que el MIZC involucra la planeación en el manejo y protección de recursos y línea de costa a escala regional (Carter, 1990, Bartlett y Carter, 1990).

Algunas de las aplicaciones de SIG en la zona costera son las generadas por Pheng y Kam (1989), quienes utilizan esta técnica para ayudar en la resolución de conflictos generados a partir del aprovechamiento de la tierra y los recursos (extracción y cultivo) en Malasia, generando zonas y asignación de los usos de los recursos de manera que se eviten las incompatibilidades. También MacMillan *et al.* (citados en Haines-Young *et al.*, 1993) se apoyan en estos sistemas para la predicción de efectos de la agricultura en el manejo de cuerpos de agua mediante el uso de modelos hidrológicos.

El uso de SIG no se limita al manejo de recursos costeros en ambientes terrestres y sistemas acuáticos semi-cerrados tales como bahías y esteros, ya que con la proliferación de datos, reducción de costos e integración de tecnología moderna, hace que tal técnica se utilice con gran éxito en el área de pesquerías marinas (Meaden y Do Chi, 1996). Dado el avance tecnológico bajo el cual operan actualmente los SIG, se hace posible un mejor manejo y control de problemas relacionados a la distribución espacial de especies marinas de importancia económica, planeación para el desarrollo camaronero, monitoreo de crecimiento algal o el inventario de zonas intersticiales (Meaden, 2000).

Aplicaciones de SIG en la zona costera de México

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 estas técnicas. Los primeros reportes se enfocaron a análisis exploratorios con base en aspectos socioeconómicos, tal fue el caso para el estado de Tabasco donde se desarrollaron SIG para ubicar sitios adecuados para el cultivo en granjas de tilapia y carpa (Gutiérrez-García, 1995; Aguilar-Manjarrez, 1996). Con el mismo enfoque Flores-Nava (1990) desarrolló un SIG para el estado de Yucatán.

En particular para el estado de Sinaloa, Aguilar-Manjarrez (1996), desarrolló un SIG compuesto por diversas fuentes de información con el objetivo de generar modelos para determinar las diferentes perspectivas en el manejo y planeación del desarrollo acuícola en Sinaloa. El mismo autor utilizó técnicas similares para el análisis de cultivo tilapia, carpa y camarón para el mismo estado. Finalmente, Trelles-Rios *et al.* (2002) utilizaron técnicas de PR y SIG, para la zonificación del municipio de Ahome.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El Municipio de Ahome, al noroeste de Sinaloa, se localiza entre los meridianos 108°45' y 109°26' longitud oeste y entre los paralelos 25°27' y 26°24' latitud norte. Cuenta con una superficie aproximada de 4,350 km², representando el 5.92% del total de la superficie estatal y se ubica como el sexto municipio en dimensión a nivel estatal. Colinda al norte con el golfo de California, el estado de Sonora y el municipio El Fuerte; al este con los municipios El Fuerte y Guasave; al sur con el municipio de Guasave y el golfo de California y al oeste con el golfo de California (Fig. 1).

Presenta un clima muy seco y cálido, clasificado de acuerdo a Köppen (modificado por García, 1973) como Bw(h') hw(e), con temperatura media anual de 25.4° C y máxima de 43.5° C; los meses más calurosos son de julio a octubre y de temperaturas más bajas los de noviembre a marzo. La precipitación total anual registrada para el municipio varía de 350 a 500 mm (INEGI, 1999).

El municipio por sus características fisiográficas, se adecua a la planicie costera de la región noroeste de la entidad, en una configuración que se constituye básicamente con la presencia de los valles agrícolas de El Fuerte y El Carrizo. También están presentes sierras secundarias de escasa elevación, como la serranía de Navachiste la que se limita a una prolongación de la misma hacia la bahía de Topolobampo; la altitud más importante dentro del territorio

municipal es el Cerro de Bisvi en la sierra de Barobampo, frente a Higuera de Zaragoza (<http://www.sinaloa.gob.mx/>). Ahome es uno de los municipios con mayor longitud de costa en el estado, con aproximadamente 120 kilómetros, lo que favorece la formación de bahías, islas y lagunas. El paisaje está dominado por zonas de cultivo, sistemas estuarinos y bahías destacando Ohuira, Santa María y Topolobampo, conjuntamente estas tres contienen una superficie de más de 16,000 ha (Contreras, 1985; Trelles, 2000). Otros sistemas importantes son los esteros Bacorehuis, Jitzámuri y bahía El Colorado o San Esteban.

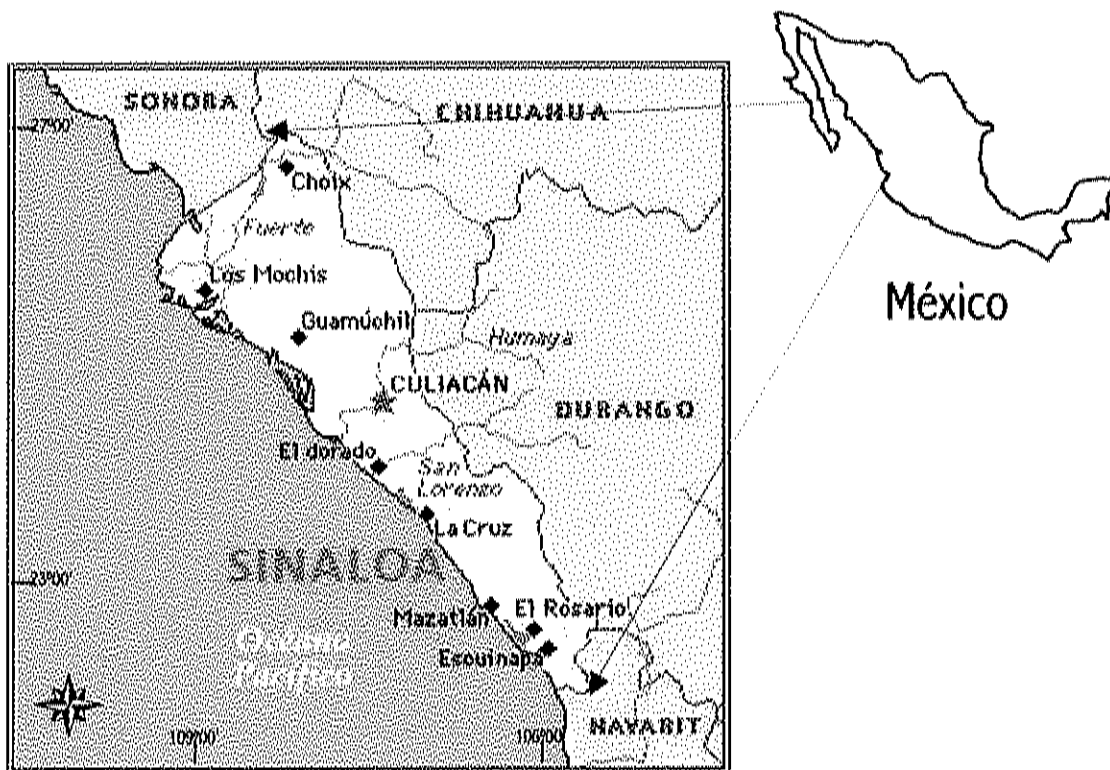


Figura 1. Macrolocalización del área de estudio

El municipio dispone de uno de los recursos hidrológicos más importantes de la vertiente del Pacífico Norte, el río Fuerte, cuyo origen se localiza en las estribaciones de la Sierra Tarahumara. El río Fuerte penetra al municipio por su parte oriental, alineándose de este a oeste hasta llegar a las inmediaciones de Higuera de Zaragoza donde cambia su rumbo hacia el suroeste para descargar en el Golfo de California.

Escurre un volumen promedio de 4,838 millones de m^3 , desarrolla un máximo de 9,200 y un mínimo de 1,550 millones de metros cúbicos. Su área de cuenca es de 33,590 kilómetros cuadrados, contados de su origen, a la estación hidrométrica en San Blas, municipio de El Fuerte.

De acuerdo al Censo General de Población y Vivienda del 2000, se localizan importantes asentamientos humanos con más de 5000 habitantes. En primer término se ubica Los Mochis (Fig. 2), cabecera municipal, con más de 200,000 habitantes, siguiendo en ese orden Villa de Ahome (1), puerto de Topolobampo (2) y San Miguel Zapotitlán (3). Asimismo, dentro del área de estudio se sitúan numerosos asentamientos, la mayoría de carácter ejidal, con menos de 5000 habitantes, con 126,100 habitantes y un total municipal de 359,146 (INEGI, 2000b).

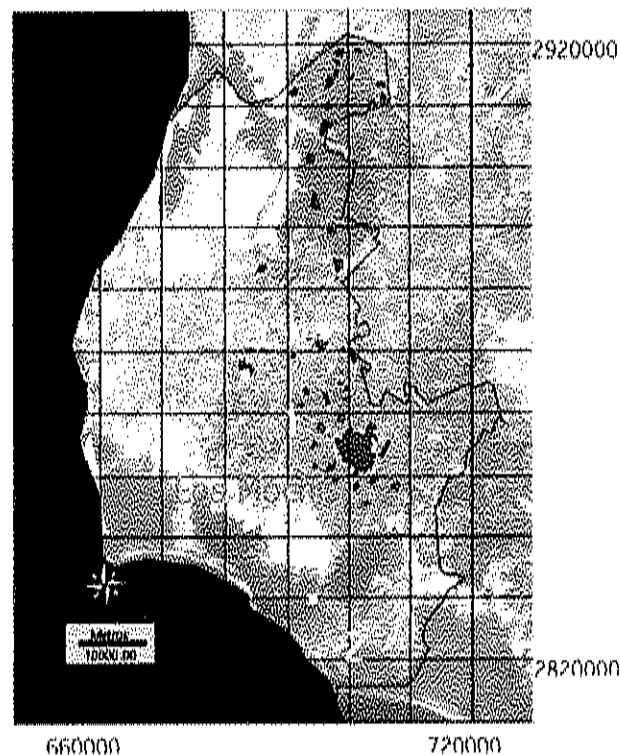


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio. Coordenadas utm (us27tm12).

Selección y pre-procesamiento de imágenes de satélite

Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente estudio, esto es, la caracterización del estado actual del paisaje del municipio de Ahome con base en el análisis digital de imágenes de satélite, la evaluación de los cambios a partir de 1973 y la integración de los resultados a un Sistema de Información Geográfica (SIG), se siguieron distintos procedimientos que requirieron de un tratamiento previo de las imágenes a analizar.

Considerando el periodo de estudio y la ruta que cubre el satélite Landsat, se requirieron dos imágenes por cada una de las fechas de estudio, a fin de abarcar totalmente el área correspondiente al municipio de Ahome. Estas imágenes están definidas por la ruta (*path*) 33 y 34 y por la fila (*row*) 42 del sistema mundial de referencia (*Worldwide Reference System*, WRS) para ambos sensores (Landsat MSS y ETM+). En todos los casos, las imágenes están referenciadas a la zona us27tm12, basada en la elipsoide de Clarke 1866 y sus características se describen en el Cuadro 1.

El procesamiento digital de las imágenes se llevó a cabo con los programas de cómputo IDRISI para Windows e IDRISI32 (Eastman, 1995; 1999) y Multispec v1.2 para Windows (Landgrebe y Biehl, 1995). En su fase inicial consistió en la selección del área de estudio (límites políticos municipales), el realce de las imágenes y la eliminación o enmascaramiento de áreas no incluidas en el área de estudio.

Aislamiento del área de estudio

Dado que las imágenes cubren un área mayor a la de interés del presente estudio, se generaron subimágenes o escenas acotando latitudinal y longitudinalmente el municipio de Ahome. Este procedimiento se logró mediante la edición de imágenes para ajustarlas a las coordenadas extremas del municipio (650003 y 730023 en el eje X y 2810029 y 2929998 en el eje Y) utilizando unidades UTM (Sistema Universal Transversal de Mercator) para ambas imágenes de los años 1973 y 2000. Este procedimiento se aplicó simultáneamente en todas las bandas de cada imagen.

Cuadro 1. Principales características de las imágenes del satélite Landsat empleadas para la caracterización del paisaje actual del Municipio de Ahome y análisis multitemporal de cambios en el paisaje (1973-2000).

Columna / línea (WRS)	1973		2000			
	33/42	34/42	33/42		34/42	
Plataforma	Landsat I		Landsat VII		Landsat VII	
Sensor	MSS		ETM+		ETM+	
Líneas	3857	3857	6967	13912	8228	13715
Columnas	4077	4077	7810	15620	9421	15701
Xmin (UTM)	652980	499500	662984.8	662984.9	501712.9	501724.9
Xmax (UTM)	897540	744060	897284.8	897284.9	784342.9	737239.9
Ymin (UTM)	2769480	2767140	2773367.3	2773386.5	2734702.9	2772818.8
Ymax (UTM)	3000840	2998500	2982077.3	2982066.5	2981542.9	2981543.8
Resolución espacial (m)	*60	*60	30	15	30	15
No. de Bandas	4	4	7	Panromática	7	Panromática
Fecha de registro	24/03/1973	24/03/1973	22/05/2000	09/05/2000	25/04/2000	24/04/2000

* La resolución original es 80 m y fue corregida a la actual por la agencia North America Landscape Characterization (NALC)

Realce o mejoramiento de imágenes

Con el fin de mejorar la interpretación visual de la información contenida en cada una de las escenas y facilitar la toma de muestras para los procesos de clasificación, se procedió a realzar las características visuales de las escenas por medio de la técnica de estiramiento de bandas (*stretch*). Este procedimiento consiste en mejorar el contraste en cada una de las bandas, redistribuyendo los valores de reflectancia del intervalo en que se encuentran originalmente, al intervalo de 0 a 255. De esta manera se optimizan visualmente las características de la imagen y puede realizarse por tres métodos: lineal, ecualización de histogramas y lineal con saturación. En el presente estudio se utilizó la tercera técnica estableciendo un porcentaje de saturación del 2.5%, que es la proporción de píxeles en la imagen, forzados a ocupar los valores mínimos y máximos para obtener un mejor contraste (Eastman, 1995).

Una vez que se obtuvo el realce de las bandas, se produjeron imágenes compuestas en falso color, combinando las bandas 3,2,1 para MSS y 4,3,2 para ETM+ y asignándoles un color específico dentro del sistema RGB (rojo, verde, azul, por sus siglas en inglés). Se denomina falso color porque la imagen resultante no corresponde al color verdadero, pero representa con mejor calidad visible las variables de estudio (Eastman, 1999).

Enmascaramiento de áreas

Como parte del procesamiento digital se procedió a emplear las escenas en falso color como mapa base sobre el que se digitalizaron vectores que

funcionaron como máscaras para cubrir áreas de escasa utilidad para el análisis. Dichas áreas corresponden al golfo de California y las situadas fuera de los límites políticos municipales. Estos límites se digitalizaron sobre dos croquis municipales editados por INEGI (1995), a escala 1:100,000 (clave 25 municipio 001), utilizando una tableta digitalizadora CALCOMP Drawing Board III y el programa AutoCAD v.13-14 (1999).

Además de las anteriores máscaras, de manera independiente se digitalizaron en pantalla, sobre la imagen en falso color las áreas ocupadas por las clases Asentamientos Humanos (AH) y Acuicultura (AI), a fin de anularlas de manera temporal durante la clasificación, pero no del proceso de caracterización del paisaje.

Los polígonos de las distintas máscaras fueron transformados a formato raster resultando en imágenes con valores de cero (fondo) y de uno, correspondientes al área delimitada por el polígono. Estos se transpusieron a cada una de las bandas de cada escena para dejar únicamente los valores de reflectancia para el área sobre la que se llevaría a cabo el proceso de clasificación.

Corrección Geográfica

Una vez que se obtuvieron las escenas con los límites del área de estudio en ambas fechas, se realizó un proceso de corrección geográfica de la imagen de 1973, para que sus límites registraran con los de la escena del 2000, que fue tomada como imagen de referencia. De esta manera, los vectores obtenidos de la imagen del 2000 pudieron aplicarse directamente sobre la escena de 1973. Esta técnica de remuestreo (*Resample*) emplea un proceso de regresión lineal

entre un conjunto de puntos distribuidos sobre la imagen a corregir y la posición de estos mismos puntos sobre el sistema de referencia (puntos de control), que pueden obtenerse a partir de cartografía, una imagen correctamente georreferenciada, puntos obtenidos con GPS o una combinación de estos (Green *et al.*, 2000). En este caso la georreferenciación se hizo con base en cartografía de INEGI (escala 1:50,000), con al menos 10 puntos de control y la imagen generada fue aceptada cuando el error cuadrático medio (RMS) fue menor o igual a 2 píxeles. Dado que no se efectuó una corrección geométrica, el número original de líneas y columnas se mantuvo igual.

Caracterización del paisaje actual del municipio de Ahome

Mediante un proceso de clasificación de imágenes de satélite, se llevó a cabo la caracterización del estado actual del paisaje de Ahome, entendida como la estimación de la composición y organización espacial, para comparar paisajes, identificar diferencias significativas y determinar relaciones de procesos funcionales con características espaciales (Imbernon y Branthomme, 2001).

La clasificación consiste de una serie de métodos por medio de los cuales los píxeles son agrupados y etiquetados con base en sus características espectrales a través de sistemas de cómputo y dependiendo de la técnica utilizada pueden ser categorizados como técnicas supervisadas y no supervisadas (Campbell, 1996). Particularmente para este estudio se utilizó la Clasificación Supervisada, la cual se basa en la detección de los patrones de respuesta espectral, característicos de diferentes tipos de cubierta de terreno seleccionadas por el usuario (Campbell, 1996).

La clasificación supervisada puede ser definida como el proceso de reunir unidades con características espectrales similares, agrupados en clases informacionales previamente establecidas, para clasificar píxeles sin definir. Este procedimiento requiere de un conocimiento previo del área de estudio para la toma de muestras ó campos de entrenamiento, las cuales tienen como finalidad cubrir toda la variabilidad espectral de las escenas, su función consiste en proveer a la computadora con información previamente analizada o conocida (Green *et al.*, 2000).

El proceso de clasificación supervisada consiste básicamente en tres pasos: a) identificación y generación de campos de entrenamiento (coberturas o clases informacionales) por vectorización, b) creación de firmas espectrales generadas a partir de los campos de entrenamiento que incluyen los píxeles "semilla" y c) aplicación de un algoritmo de agregación. (Campbell, 1996; Green *et al.*, 2000).

Selección de campos de entrenamiento

Los campos de entrenamiento son muestras de píxeles de las clases de información del terreno, definidas con base en el conocimiento previo de los diferentes uso de suelo y vegetación natural. Considerando que el presente trabajo forma parte de un programa de investigación más amplio sobre el estudio del paisaje (CONACYT 28347B), se siguieron los lineamientos del mismo para definir el tipo y número de clases informacionales (Cuadro 2).

Los campos de entrenamiento se digitalizaron sobre la escena compuesta en falso color, siguiendo los criterios señalados por Campbell (1996), que consideran el número total de píxeles en la muestra, tamaño, forma, número y

localización de los campos y uniformidad en la distribución de valores de reflectancia de los píxeles.

Como parte del proceso de caracterización del paisaje, las clases informacionales Asentamientos humanos (AH) y Acuicultura (AI) se identificaron y digitalizaron independientemente tal como se describe posteriormente. Cada uno de los vectores digitalizados sobre las diferentes capas fue identificado por medio de un código que lo asociaba con la clase informacional.

Cuadro 2.- Clases informacionales para clasificación supervisada en escenas Landsat.

CLASE	ID	Código	Descripción
SUELOS DESNUDOS	1	SD	Zonas sin vegetación, frecuentemente erosionadas.
MANGLAR	2	MN	Mangle y especies halófitas
MARISMA	3	MR	Suelos de inundación intermedia con escasa vegetación, principalmente halófitas
AGUAS COSTERAS	4	AC	Cuerpos de agua; Bahías, esteros
ACUICULTURA*	5	AI	Granjas camaronícolas
SELVA	6	SL	Bosque caducifolio
AGRICULTURA	7	AG	Cultivos en pie y/o suelos en preparación
VEGETACION SECUNDARIA	8	VS	Vegetación de segunda generación o en proceso de sucesión
ASENTAMIENTOS HUMANOS*	9	AH	Áreas urbanas o zonas pobladas

* Digitalizado directamente en pantalla

Generación de firmas espectrales

Una vez que se concluyó con el proceso anterior se generó la información espectral de dichos campos necesaria para el proceso de clasificación. Esta se

obtuvo mediante la extracción y análisis de los píxeles identificados para cada clase en los campos de entrenamiento, obteniendo estadísticos como la media, valores mínimo y máximo, desviación estándar y datos de varianza para todas las bandas y de covarianza entre bandas (Eastman, 1995). De estos, el vector de valores promedio y las covarianzas son los elementos utilizados por el algoritmo para la generación de las firmas espectrales (Richards y Jia, 1999).

Clasificación

Una vez que se cuenta con las firmas espectrales para las clases o variables seleccionadas, la clasificación se realiza mediante la utilización de técnicas de estadística multivariada, que incluyen algoritmos de agregación (Paralelepípedo, Mínimas distancias, máxima verosimilitud, ECHO). En el presente trabajo se utilizó el algoritmo de Máxima Verosimilitud ya que esta técnica de clasificación permite maximizar la probabilidad de una correcta clasificación de píxeles que son traslapados en dos distribuciones y es considerado el algoritmo más robusto estadísticamente (Gibson y Power, 2000). La variabilidad de las clases y la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase son tomadas en cuenta para calcular la distancia entre un píxel y la media de todas las clases (Green *et al.*, 2000). En otras palabras, para un píxel en una posición x en un espacio multiespectral, es posible calcular distintas probabilidades que indiquen la vecindad relativa y pertenencia de este píxel a cada una de las clases disponibles (Richards y Jia, 1999).

Elaboración de mapas temáticos

Todos los procesos señalados anteriormente se realizaron con las dos subimágenes o escenas ETM+ del 2000 por separado, dado que las diferencias en las fechas de adquisición y por tanto probables diferencias ambientales (nubosidad, humedad relativa, etc.) durante el registro de datos, podrían haber ocasionado errores en la clasificación (Green *et al.*, 2000). Una vez que las escenas fueron clasificadas de acuerdo a los criterios señalados, se procedió a unir los mapas temáticos por medio de un procedimiento de concatenación, que consiste en la unión de dos o más imágenes de igual resolución espacial y localizadas dentro del mismo sistema de referencia (Eastman, 1995).

Validación de la exactitud

Una vez que se obtuvo el mapa temático por clasificación y digitalización para el municipio de Ahome, se estimó la exactitud del resultado al contrastar un número determinado de campos de prueba extraídos del mapa con datos de campo. Se siguió el procedimiento descrito en Congalton y Green (1999), que consiste en crear una matriz de error o de confusión a partir de datos de referencia y su correspondencia con la clasificación obtenida.

La matriz de error es un arreglo que expresa el número de unidades de muestra asignados a una categoría o clase particular en una clasificación con relación al número de unidades de muestra asignadas a la misma categoría, pero en otra clasificación (datos de referencia o de prueba). En una matriz de error, las columnas usualmente representan los datos de referencia, mientras

Elaboración de mapas temáticos

Todos los procesos señalados anteriormente se realizaron con las dos subimágenes o escenas ETM+ del 2000 por separado, dado que las diferencias en las fechas de adquisición y por tanto probables diferencias ambientales (nubosidad, humedad relativa, etc.) durante el registro de datos, podrían haber ocasionado errores en la clasificación (Green *et al.*, 2000). Una vez que las escenas fueron clasificadas de acuerdo a los criterios señalados, se procedió a unir los mapas temáticos por medio de un procedimiento de concatenación, que consiste en la unión de dos o más imágenes de igual resolución espacial y localizadas dentro del mismo sistema de referencia (Eastman, 1995).

Validación de la exactitud

Una vez que se obtuvo el mapa temático por clasificación y digitalización para el municipio de Ahome, se estimó la exactitud del resultado al contrastar un número determinado de campos de prueba extraídos del mapa con datos de campo. Se siguió el procedimiento descrito en Congalton y Green (1999), que consiste en crear una matriz de error o de confusión a partir de datos de referencia y su correspondencia con la clasificación obtenida.

La matriz de error es un arreglo que expresa el número de unidades de muestra asignados a una categoría o clase particular en una clasificación con relación al número de unidades de muestra asignadas a la misma categoría, pero en otra clasificación (datos de referencia o de prueba). En una matriz de error, las columnas usualmente representan los datos de referencia, mientras

que los renglones indican la clasificación generada con datos de percepción remota (Cuadro 3).

Cuadro 3. Matriz de error (de acuerdo a Congalton y Green, 1999)

		Datos de referencia j = columna			total renglones n_{i+}
		1	2	k	
Clasificación i = renglones	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+j		n_{+1}	n_{+2}	n_{+k}	n

Para el registro *in situ*, se recorrió la zona de estudio durante cinco salidas (marzo 2000 a noviembre 2001) con apoyo de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), marca Trimble Navigation, modelo Ensign XL con una precisión aproximada de 100 m.

A partir de la matriz de error, se calcularon los coeficientes de exactitud global y Kappa, además del error de usuario y del productor, como indicadores del nivel de exactitud. La exactitud global de una clasificación es la proporción obtenida de dividir la suma de los valores de la diagonal mayor, que representa las clases evaluadas correctamente o número de coincidencias, entre el número total de datos. Para asumir como aceptable los resultados de la clasificación, se definió *a priori* un valor mínimo de 80%. Este valor es considerado por algunos autores como el mínimo aceptable y significativo para la clasificación de coberturas (Henderson *et al.*, 1999). En caso que la precisión resultara menor de este valor, se procedió a realizar nuevamente la clasificación generando los campos de entrenamiento sobre los puntos de prueba registrados en campo.

Además del anterior se utilizó el coeficiente de Kappa (K), que es una forma analítica para evaluar la exactitud total del proceso de clasificación tomando en cuenta la contribución del azar. La estimación de K es un estadístico que mide la coincidencia o exactitud entre los datos de la clasificación y datos de referencia ubicados en la diagonal mayor y las posibles coincidencias debidas al azar, representadas por los valores marginales de la matriz.

El coeficiente K toma valores dentro del intervalo de -1.0 a 1.0 , sin embargo dado que se espera una correlación positiva entre los datos de la clasificación y los de referencia, se esperan valores positivos de K (Congalton y Green, 1999). Cuando los valores de K, se acercan a 1.0 , se asume una total coincidencia o máxima exactitud de la clasificación, por lo que siguiendo la clasificación de Landis y Koch, (citado por Congalton y Green, 1999), se aceptarían valores de K mayores o igual a 0.8 , para considerar como alto el nivel de exactitud, de una manera análoga al 80% de la exactitud global. El coeficiente de Kappa, se calcula de acuerdo a la ecuación que se formula a continuación.

$$\text{Coeficiente de Kappa } (^K) = \frac{n \sum n_{ii} - \sum n_{i+} n_{+j}}{n^2 - \sum n_{i+} n_{+j}}$$

Los coeficientes anteriores permiten la evaluación general de la exactitud de la clasificación, sin embargo también es necesario conocer cual es la exactitud individual obtenida para cada una de las clases o categorías en el análisis. De igual manera es importante conocer la magnitud del error que existe al generar o interpretar una clasificación, lo cual es designado como error del Productor y del Usuario, respectivamente. La exactitud del productor se obtiene como el cociente entre el número de muestras evaluado correctamente, esto es, el resultado localizado en la diagonal principal, con respecto al número

total de muestras analizadas para cada clase. La exactitud de la clasificación para el usuario se evalúa de manera similar, aunque el número de muestras clasificadas correctamente se divide entre el total de unidades clasificadas como una categoría dada (Congalton y Green, 1999).

Caracterización del paisaje actual

Una vez que los procesos de clasificación y verificación en campo concluyeron, se generó el mapa temático definitivo, incluyendo las capas correspondientes a asentamientos humanos y acuicultura. En el caso de la clase manglar se generó una máscara adicional para eliminar de la clasificación los píxeles ubicados en áreas de la imagen que no corresponden a la zona de distribución de esta clase. Estos píxeles fueron categorizados como píxeles sin clasificar.

El mapa temático se creó por asignación de un valor (con un color asociado) a cada una de las clases de cobertura que integran la escena clasificada. A partir de los mapas se estimó la cobertura en km² y número de píxeles para cada una de las clases o entidades de estudio. Partiendo de lo anterior, el paisaje del municipio se caracterizó en función de la extensión, ubicación y predominancia de las clases informacionales en estudio, siguiendo una propuesta similar a las de Imbernon y Branthomme (2001) y Arteaga (2002). Estos autores consideran que la caracterización consiste en la cuantificación de variables de análisis que permite expresar en un mapa el nivel de complejidad que tiene el medio natural, identificando diferencias significativas con el fin de comparar paisajes y establecer las relaciones de procesos funcionales con características espaciales.

Estimación de cambios del paisaje de 1973 al 2000.

Como parte de la evaluación de los cambios del paisaje en el municipio de Ahome producidos principalmente por actividades humanas, se procedió a estimar las tendencias de cambio, en términos de pérdida y/o ganancia en cada una de las coberturas (naturales e inducidas), por comparación multitemporal. Para tal efecto se realizaron los siguientes procedimientos

Clasificación de 1973

Siguiendo un procedimiento similar al empleado para la creación del mapa de coberturas de la escena ETM+ del 2000, se clasificaron las escenas MSS 1973 y dado que no se contó con datos de referencia para la valoración de la exactitud, se asume de manera arbitraria que el error en esta clasificación es equivalente al obtenido en la clasificación de la imagen más reciente, de forma similar a la realizada por Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1999) y Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2002).

De esta manera los campos de entrenamiento se obtuvieron en zonas en las que no se percibió cambio del tipo de cobertura o clase observada en ambas imágenes y se procedió a la clasificación supervisada, utilizando las cuatro bandas disponibles para la obtención de las firmas espectrales, con máxima verosimilitud como algoritmo de clasificación.

Elaboración de mapas temáticos y cálculo de área

Una vez que los procesos de clasificación concluyeron, se elaboraron los mapas temáticos correspondientes para cada fecha. Dado que con excepción de la camaronicultura, que inició en la primera mitad de los ochentas, en el siglo pasado, el número de clases es el mismo en todas las escenas clasificadas, incluyendo fondo y píxeles sin clasificar, las dos escenas que corresponden a una fecha, fueron unidas por el método de concatenación para integrar una escena por año. De igual manera que con la escena del 2000, se enmascararon los píxeles clasificados como manglar, alejados de su área de distribución, para ser recategorizados como píxeles sin clasificar. Considerando el número total de píxeles que constituye cada clase, así como la resolución (tamaño de píxel) se estimó la cobertura en km² para cada una de las clases o entidades en estudio.

Tendencias y análisis de cambios

Con base en el cálculo de área por clase para cada fecha evaluada, se obtuvo la diferencia en áreas y la proporción que representó con respecto al área total por año de estudio (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 1999; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002). Partiendo de esta información se elaboraron gráficos y cuadros comparativos para determinar en que medida se presentaron los cambios por clase, cuales fueron los grupos predominantes y cuales fueron los cambios proporcionales más importantes.

Finalmente, utilizando los mismos principios de la matriz de error, se creó una matriz de detección, donde las columnas representan una de las fechas, en este caso el mapa temático de 1973, mientras que en los renglones se incluyen los valores de la fecha a comparar (2000). Como en la matriz de confusión o de error, los valores observados en la diagonal principal corresponden a las coincidencias por clase entre ambos mapas (Congalton y Green, 1999). El resto de las celdas corresponden a los cambios de una clase a otra, que pueden ser efectivos o producto de los errores de clasificación. Este procedimiento se llevó a cabo por el método de tablas de contingencia (*crosstab*), que además de la matriz de detección de cambio, genera valores del Índice de Kappa generales y para cada clase. Para este análisis los valores de Kappa van de 0 a 1, indicando cambio total a coincidencia completa o cambio nulo entre las fechas contrastadas, respectivamente (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, *aceptado*).

Integración de resultados a un sistema de información geográfica

El diseño final del SIG siguió un esquema simple, de integración de los resultados generados por el análisis digital de imágenes de satélite (datos primarios) y datos procedentes de otras fuentes o datos secundarios (Meade y Do Chi, 1996). Este diseño permite un manejo más flexible de la información, una vez que son generadas capas individuales que pueden ser analizadas y manipuladas con diversos fines, al mismo tiempo que cumple las funciones básicas de un SIG, dentro de las que cabe destacar la posibilidad de incorporación de nueva información con atributos espaciales explícitos y cuantificables (Wadsworth y Treweek, 1999), así como de mantenimiento y actualización (Pheng y Kam, 1989; Bocco *et al.*, 1991).

Particularmente para este trabajo, además de la integración de las capas correspondientes a cada una de las categorías generadas por el proceso de clasificación y que fueron posteriormente procesadas con las utilidades de SIG presentes en IDRISI, se incluyeron croquis de las principales localidades del municipio de Ahome, con población mayor de 5000 habitantes. Esta información se obtuvo en formato de AutoCad y corresponden a productos comerciales desarrollados por INEGI. También se incorpora parte de la información generada por el programa de diagnóstico ambiental de los ecosistemas costeros y situación jurídica de las unidades de producción camaronícola en el estado de Sinaloa, provistos por la SEMARNAP y que son descritos en Múgica y Zavaleta (2001). Finalmente se incluyó material gráfico (fotografía digital y gráficas de datos), obtenidas durante el presente estudio.

Para la integración de los resultados, los mapas temáticos resultantes de la clasificación en ambas fechas, fueron exportadas con formato .BMP, manteniendo sus características espaciales. En ambos casos se generó un archivo de documentación en formato ASCII (world file, *.bmpw), donde se almacena la información necesaria para su referenciación geográfica en el formato de ArcView (ESRI, 1996).

Con esta información el archivo gráfico es importado a ArcView, utilizando el mismo sistema geográfico de referencia utilizado en IDRISI. Posteriormente se sigue un procedimiento de interpolación denominado *Grid*, por medio del cual las escena se ordena dentro de un plano cartesiano, asignando valores a cada pixel o celda. Este procedimiento permite que las clases del mapa temático pueden ser manejadas individualmente.

Cada una de las clases se aisló a fin de tratarlas como capas independientes y posteriormente se agruparon como coberturas inducidas y naturales. En el primer caso se incluyeron a las clases de origen antropogénico (agricultura, asentamientos humanos, suelos desnudos, vegetación secundaria

y acuicultura). Las coberturas naturales correspondieron a aguas costeras, manglar, marismas y selva.

Finalmente, se incluyeron fotografías digitales, representativas de cada una de las clases incluidas en el estudio, así como gráficas de las firmas espectrales correspondientes. Una vez concluido lo anterior, no se realizó ningún análisis adicional, aunque las características de la información en formato de SIG permiten la evaluación inmediata de distancias, áreas, integración y sobreposición de capas, así como distintos tipos de salidas gráficas. Todo el procedimiento se realizó utilizando ArcView GIS 3.1, que permite su exportación a otros formatos como ArcGIS 8 y ArcExplorer 2.0, para su distribución y uso compartido.

RESULTADOS

Como resultado de la proyección al sistema UTM y corrección de las imágenes para la caracterización del paisaje y la evaluación de los cambios en los usos de suelo, se generaron escenas cuyas coordenadas finales variaron ligeramente. La escena de 1973 quedó limitada por las coordenadas 650003 y 730023 en el eje X y 2810029 y 2929998 para el eje Y. Para la escena 2000, las coordenadas mínima y máxima fueron 650003 y 730013 para el eje X y 2810010 y 2929992 en el eje Y. La acotación del área de estudio, siguiendo los límites políticos municipales, que incluye la zona de bahías, lagunas y estuarios, generó un polígono con un área total correspondiente a 4100 km² (Fig. 3).

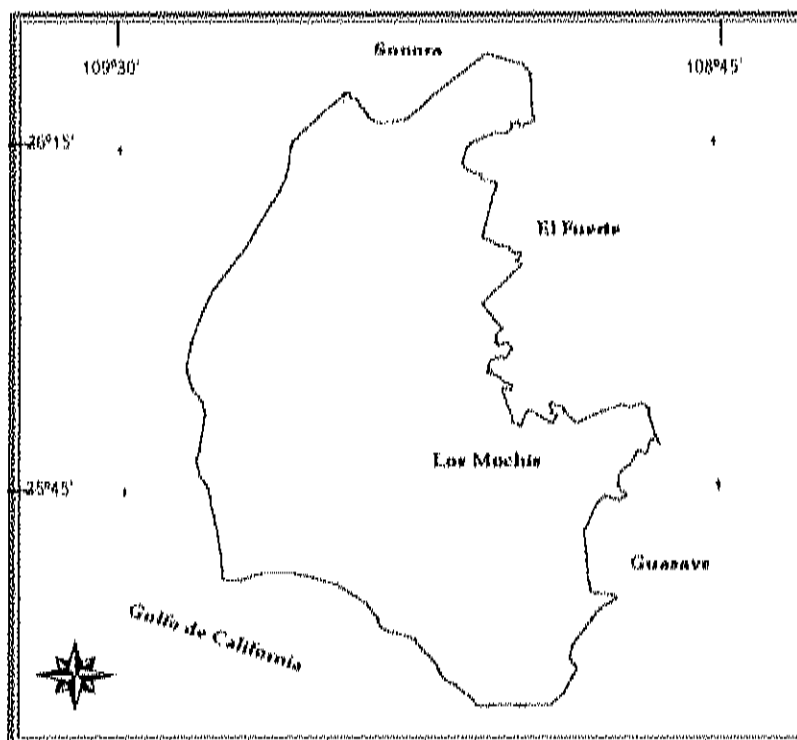


Figura 3. Límites del área de estudio establecidos por digitalización de los límites políticos correspondientes al municipio de Ahome.

RESULTADOS

Como resultado de la proyección al sistema UTM y corrección de las imágenes para la caracterización del paisaje y la evaluación de los cambios en los usos de suelo, se generaron escenas cuyas coordenadas finales variaron ligeramente. La escena de 1973 quedó limitada por las coordenadas 650003 y 730023 en el eje X y 2810029 y 2929998 para el eje Y. Para la escena 2000, las coordenadas mínima y máxima fueron 650003 y 730013 para el eje X y 2810010 y 2929992 en el eje Y. La acotación del área de estudio, siguiendo los límites políticos municipales, que incluye la zona de bahías, lagunas y estuarios, generó un polígono con un área total correspondiente a 4100 km² (Fig. 3).

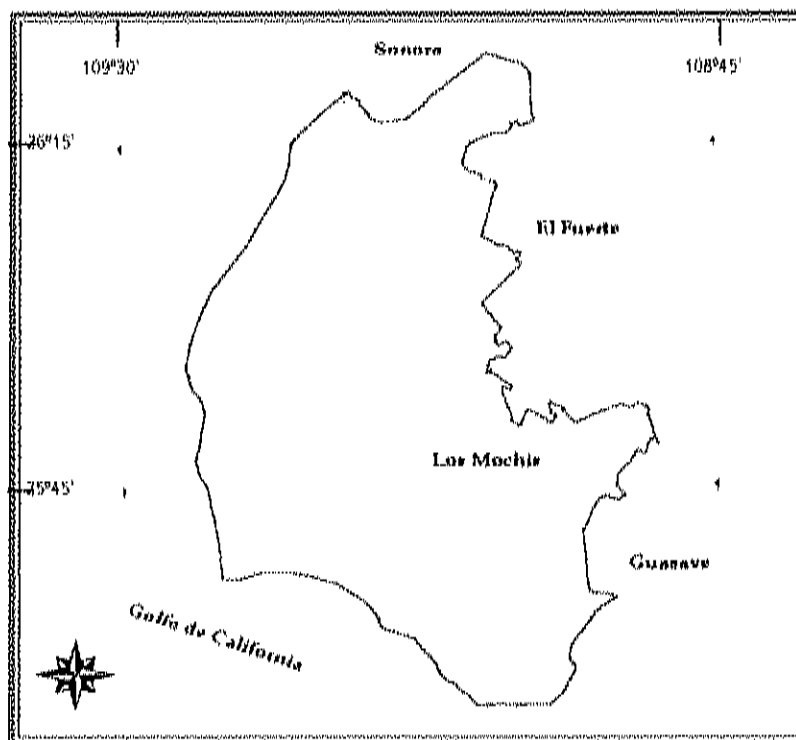


Figura 3. Límites del área de estudio establecidos por digitalización de los límites políticos correspondientes al municipio de Ahome.

Con el área de estudio delimitada en cada una de las bandas de ambas imágenes y realizadas por medio del estiramiento lineal con 2.5% de saturación, se generaron las escenas en falso color (Figs. 4, 5), a partir de las cuales se llevó el proceso de digitalización de campos de entrenamiento.

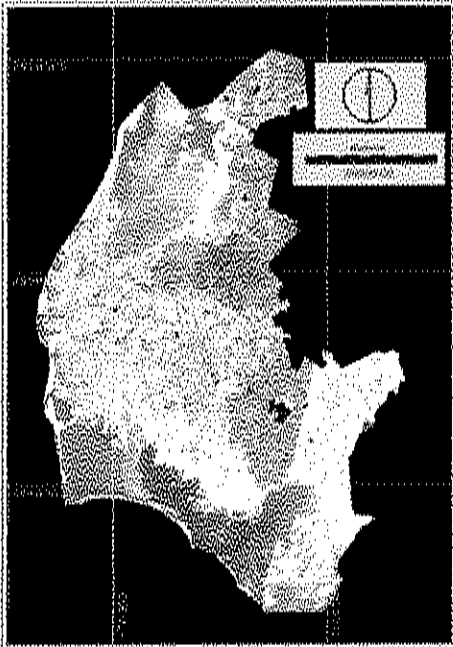


Figura 4.- Escena del municipio de Ahome, Sin., compuesta en falso color a partir de dos imágenes Landsat-MSS (bandas 3,2,1, sistema RGB) de 1973.

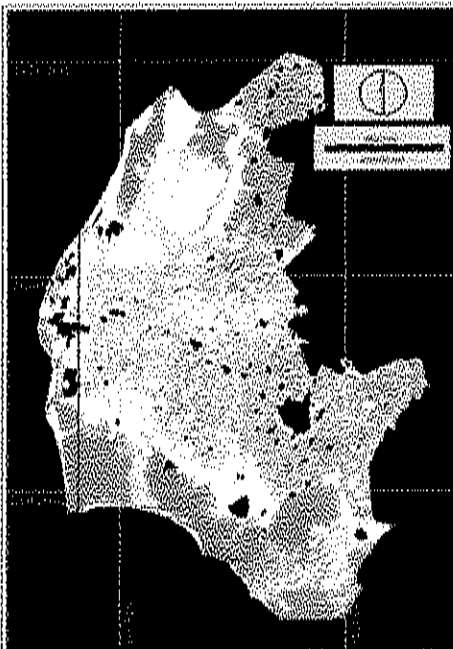


Figura 5. Escena del municipio de Ahome, Sin., compuesta en falso color a partir de dos imágenes Landsat-ETM+ (bandas 4,3,2 sistema RGB) del año 2000.

Se digitalizaron de 10 a 15 campos de entrenamiento de cada una de las clases informacionales y se obtuvieron las firmas espectrales para la imagen del año 2000, cuyos estadísticos básicos se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Datos estadísticos de valores de brillantez para los campos de entrenamiento de las clases informacionales que fueron utilizadas en el proceso de clasificación supervisada para la imagen Landsat ETM+ del año 2000.

Clase	Banda	Mínimo	Máximo	Media	desviación estándar	N
AGUAS COSTERAS	1	55	106	68.9	5.6	9346
	2	33	87	47.6	7.4	9346
	3	19	93	34.8	9.0	9346
	4	12	78	15.8	7.1	9346
	5	8	74	10.7	2.5	9346
	7	6	54	10.2	1.8	9346
AGRICULTURA	1	57	129	66.3	4.9	8590
	2	39	115	49.7	5.7	8590
	3	25	141	42.2	11.5	8590
	4	37	195	116.4	28.2	8590
	5	39	125	61.0	9.4	8590
	7	20	107	35.0	12.0	8590
MANGLAR	1	58	84	66.5	3.3	1878
	2	38	65	47.7	3.7	1878
	3	27	71	39.5	5.4	1878
	4	44	111	85.0	12.0	1878
	5	16	78	38.5	6.6	1878
	7	10	67	23.4	4.9	1878
MARISMA	1	72	133	98.0	8.8	2716
	2	53	124	87.7	10.6	2716
	3	57	156	116.3	15.4	2716
	4	62	131	100.0	11.4	2716
	5	54	162	127.5	14.1	2716
	7	38	149	114.3	16.1	2716
SUELOS DESNUDOS	1	1	126	84.4	9.3	5510
	2	1	114	69.5	10.7	5510
	3	1	154	85.0	14.5	5510
	4	1	144	80.2	10.9	5510
	5	1	150	102.2	14.2	5510
	7	1	145	88.8	16.2	5510
SELVA	1	57	96	75.8	5.9	2769
	2	32	82	56.9	7.7	2769
	3	26	104	66.7	13.9	2769
	4	19	104	66.5	14.9	2769
	5	16	161	92.2	24.5	2769
	7	13	120	68.2	18.2	2769
VEG. SECUNDARIA	1	62	101	75.6	6.5	1264
	2	45	93	59.4	6.9	1264
	3	35	122	66.7	12.8	1264
	4	52	120	75.9	9.1	1264
	5	37	134	83.0	16.2	1264
	7	24	123	62.8	18.0	1264

Los valores del coeficiente de variación (desviación estándar/media*100) se ubicaron entre el 5.0% y 44.9%, aunque en la mayoría de los casos se obtuvieron valores menores de 17%, que en términos estadísticos es un valor que refleja escasa variabilidad. Las firmas espectrales generadas con los valores promedio de brillantez, se aprecian en la Fig. 6.

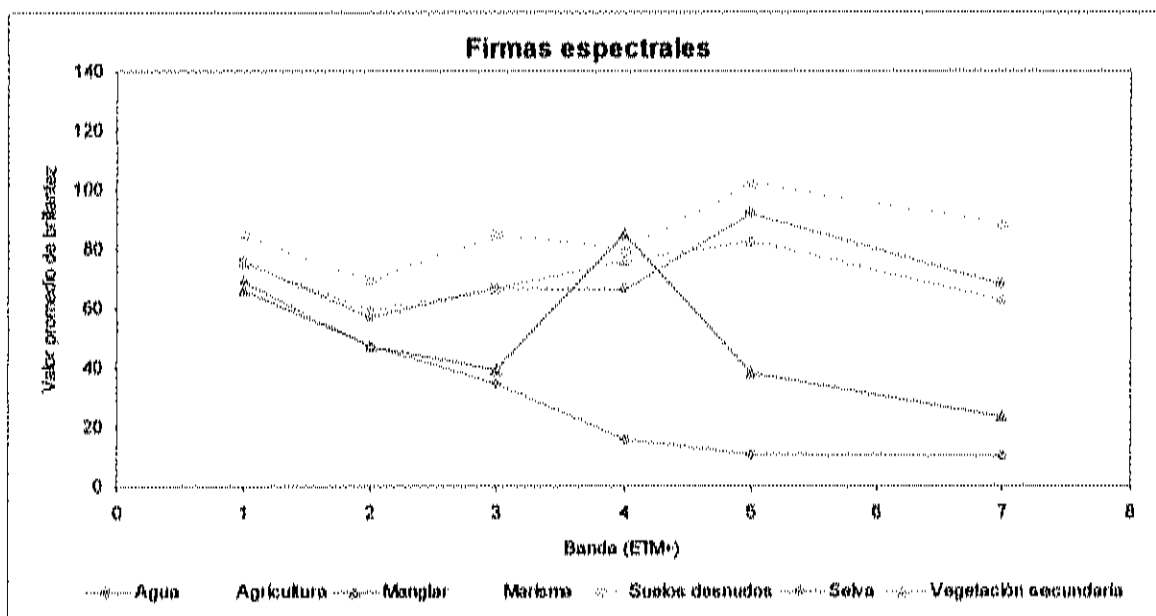


Figura 6. Firmas espectrales de siete clases de cobertura y usos de suelo obtenidas a partir de una imagen Landsat ETM+

Caracterización del paisaje

Validación de la exactitud

Se obtuvo un total de 632 datos durante las cinco salidas realizadas en el periodo de estudio. Una vez que la base de datos fue depurada eliminando

puntos de prueba que se encontraban repetidos o en posiciones muy cercanas, datos cuya identificación fue incierta por errores en el registro de la información y datos que se ubicaron fuera de los límites del área de estudio, quedo un total de 420 puntos, incluyendo datos para los cuerpos acuáticos obtenidos de cartografía de INEGI a escala 1:50,000 (Fig. 7).

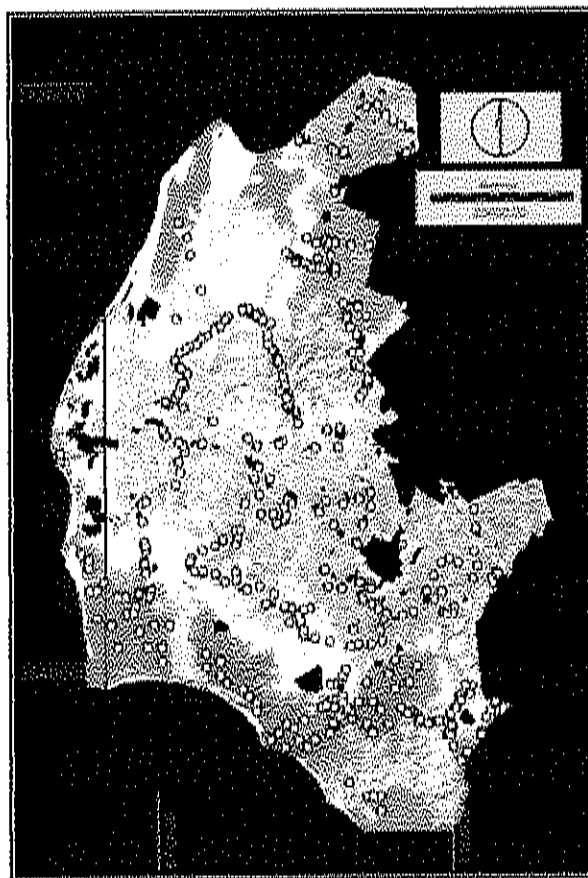


Figura 7. Localización de 420 puntos de control en el área de estudio

A partir de la matriz de error generada al contrastar los datos de referencia y los procedentes de la clasificación supervisada (Cuadro 5), se obtuvo un total de 356 puntos para los que se dio coincidencia (suma de los valores situados en la diagonal mayor), lo que representa una exactitud global de 84.8%. El

coeficiente de Kappa obtuvo valores de 0.81 ± 0.04 . Ambos resultados son indicadores de una concordancia alta.

Cuadro 5. Matriz de error utilizada para evaluar la exactitud global de la clasificación supervisada ETM+ 2000

Clase	Datos de referencia							Total columnas
	AC	AG	MN	MR	SD	SL	VS	
Aguas costeras (AC)	72	0	3	1	0	0	0	76
Agricultura (AG)	0	112	0	0	2	2	1	117
Manglar (MN)	1	0	18	0	0	1	0	20
Marismas (MR)	0	3	1	52	2	0	0	58
Suelos desnudos (SD)	1	13	1	5	18	5	4	47
Selva (SL)	0	0	0	2	0	43	2	47
Vegetación secundaria (VS)	0	6	1	2	0	5	41	55
Total renglones	74	134	24	62	22	56	48	420

Con respecto a la evaluación individual, las clases con valores de exactitud del productor más elevados, fueron aguas costeras (AC) y agricultura (AG) con más del 94%, mientras que suelos desnudos (SD) y vegetación secundaria (VS) resultaron las categorías con menor exactitud del productor con valores de 75% o menos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Valores de exactitud del Productor y Usuario para la clasificación supervisada de escena correspondiente al municipio de Ahome (Landsat ETM+, 2000)

Clase	Exactitud (%)	
	Productor	Usuario
AC Aguas Costeras	95	97
AG Agricultura	96	84
MR Marisma	90	84
SD Suelos Desnudos	38	82
SL Selva	91	77
VS Vegetación secundaria	75	85

Con respecto a la evaluación de la exactitud del usuario, el valor más elevado correspondió a la clase Aguas costeras, con 97%. En caso contrario, la clase selva obtuvo el valor mínimo de exactitud (77%). El resto de las clases obtuvieron valores por encima del 80%.

Caracterización del paisaje actual

Con base en los resultados obtenidos y una vez que se satisfizo el criterio establecido para considerar aceptable la clasificación (exactitud global >80%), se procedió a la estimación de la superficie ocupada para cada clase informacional evaluada.

La clase con mayor superficie durante el año 2000, de acuerdo a los resultados de la clasificación, fue agricultura con aproximadamente 990 km² (24.4%), mientras que la acuicultura, con poco más de 56 km², fue la que menor extensión ocupó (1.4%). En ambos casos el uso de suelos corresponde a actividades humanas. La categoría correspondiente a asentamientos humanos, fue solo ligeramente superior (1.7%) a la destinada a la camaronicultura, alcanzando poco más de 70 km². Las clases suelos desnudos, vegetación secundaria y marismas alcanzaron superficies aproximadas de 612 (15.1%), 560 (13.7%) y 437 km² (10.8%), respectivamente. El mapa temático resultante se muestra en la figura 8.

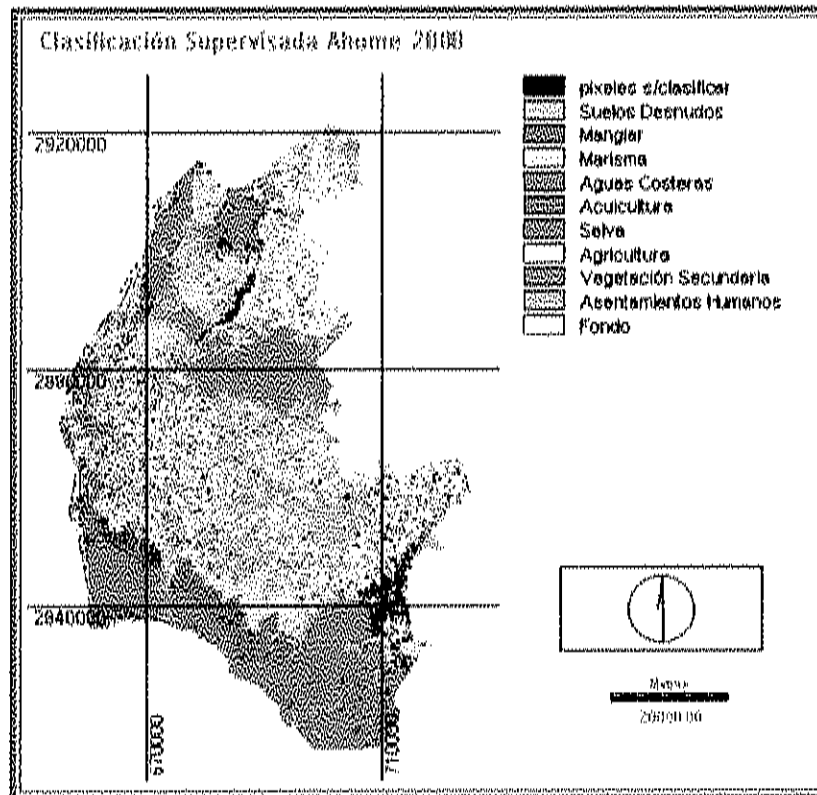


Figura 8. Clasificación del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, a partir de una escena Landsat ETM+ correspondiente a mayo del 2000.

Dentro de las categorías pertenecientes a coberturas naturales, las aguas costeras con aproximadamente 540 km^2 y el manglar con un poco más de 140 km^2 , fueron las que mayor y menor extensión presentaron, 13.3% y 3.4%, respectivamente. Para la clase selva se estimó una superficie de aproximadamente 492 km^2 (12.1%). En esta clasificación, la proporción de pixeles que quedaron sin asignación a ninguna de las clases seleccionadas fue de 4.0% con respecto al total.

Análisis multitemporal post-clasificadorio

Clasificación de la escena de 1973

Una vez que se obtuvo una clasificación con valores de exactitud mayores de 80% para la imagen del año 2000, se clasificó la imagen de 1973 siguiendo los mismos criterios de selección de los campos de entrenamiento. Para cada una de las clases se obtuvieron entre 5 y 12 campos de entrenamiento con aproximadamente 50 píxeles en promedio. Los datos estadísticos básicos obtenidos para las firmas generadas se resumen en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Datos estadísticos de valores de brillantez para los campos de entrenamiento de las clases informacionales que fueron utilizadas en el proceso de clasificación supervisada para la imagen Landsat MSS de 1973.

Clase	Banda	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	n
AGUAS COSTERAS	1	0	65	29.78	4.43	9155
	2	0	67	20.60	6.49	9155
	3	0	63	12.35	7.08	9155
	4	0	58	5.65	6.46	9155
AGRICULTURA	1	0	62	31.86	4.26	8949
	2	0	67	30.02	7.60	8949
	3	0	72	42.28	7.66	8949
	4	0	115	44.54	11.64	8949
MANGLAR	1	20	63	26.64	3.70	698
	2	13	72	19.06	5.10	698
	3	18	70	37.04	4.43	698
	4	16	61	41.23	5.83	698
MARISMA	1	24	90	43.80	9.98	6296
	2	15	96	46.10	13.12	6296
	3	19	87	46.34	9.57	6296
	4	13	94	43.21	8.11	6296
SUELOS DESNUDOS	1	24	91	36.64	7.66	4436
	2	16	106	36.93	11.44	4436
	3	24	99	40.98	9.42	4436
	4	9	87	40.05	8.12	4436
SELVA	1	18	54	28.92	3.44	6080
	2	11	60	25.82	5.12	6080
	3	10	59	30.03	5.11	6080
	4	8	56	30.83	5.27	6080
VEG. SECUNDARIA	1	26	48	35.61	5.08	180
	2	19	59	35.31	8.83	180
	3	23	80	40.10	7.66	180
	4	30	62	40.22	7.19	180

Para este caso, se obtuvo una mayor variación en la distribución de los valores de brillantez para cada categoría y banda, con estimados del coeficiente de variación cercanos al 20% en la mayoría de los casos, siguiendo patrones característicos para este tipo de coberturas (Fig. 9).

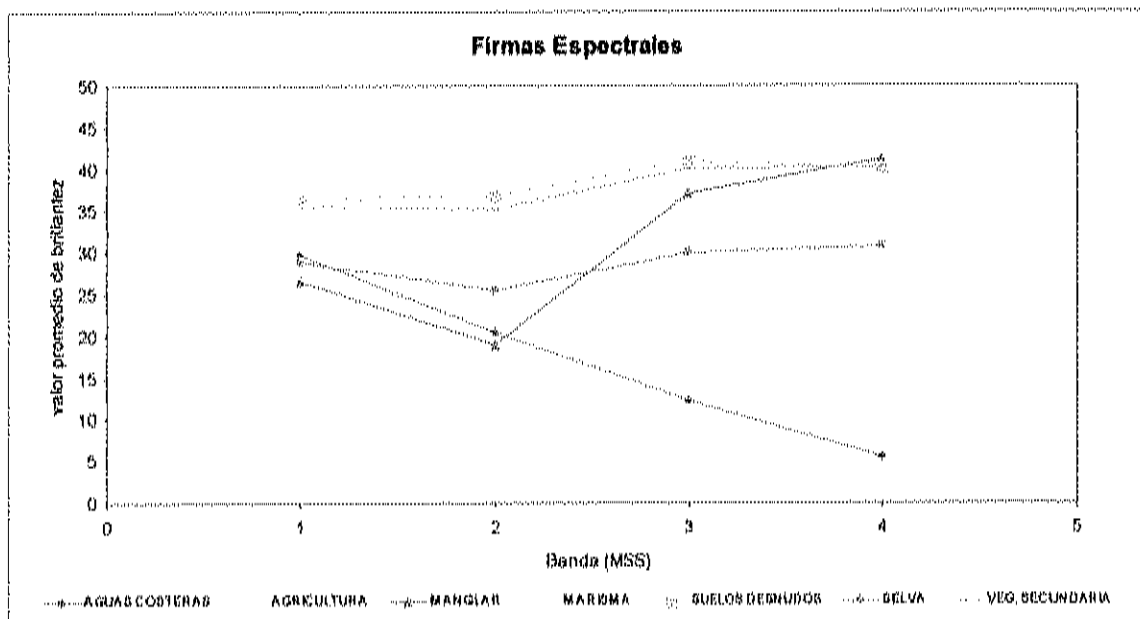


Figura 9. Firmas espectrales de siete clases de cobertura y usos de suelo obtenidas a partir de una imagen Landsat MSS

Los resultados de esta clasificación indican que para 1973 la clase suelos desnudos predominó en el paisaje con cerca de 940 km² que equivalen aproximadamente a la cuarta parte (23.1%) del área de estudio (Fig. 10). Para la fecha en que fue registrada la imagen MSS, la actividad camaronícola no se encontraba presente en la zona.

En términos de los usos de suelos culturales o inducidos, la agricultura fue la segunda categoría más importante en cuanto a extensión, después de suelos desnudos, con 800 km² ha (19.8%). Siguiendo en este orden, para la vegetación secundaria se estimó una extensión próxima a 230 km² (5.7%),

mientras que para asentamientos humanos la superficie ascendió a poco menos de 240 km² (0.6%). También, de la clasificación resultante se deriva que la extensión de las coberturas naturales estuvo dominada por la clase selva, con una superficie estimada en 780 km², aproximadamente el 19.2% del total. Siguiendo en orden de importancia la categoría aguas costeras obtuvo más de 550 km² (13.7%), mientras que para marismas se estimaron aproximadamente 505 km² (12.5%) y para manglar poco más de 160 km² (4.0%). La proporción de píxeles sin clasificar en la imagen de 1973 ascendió a 1.5% del total (Fig. 10).

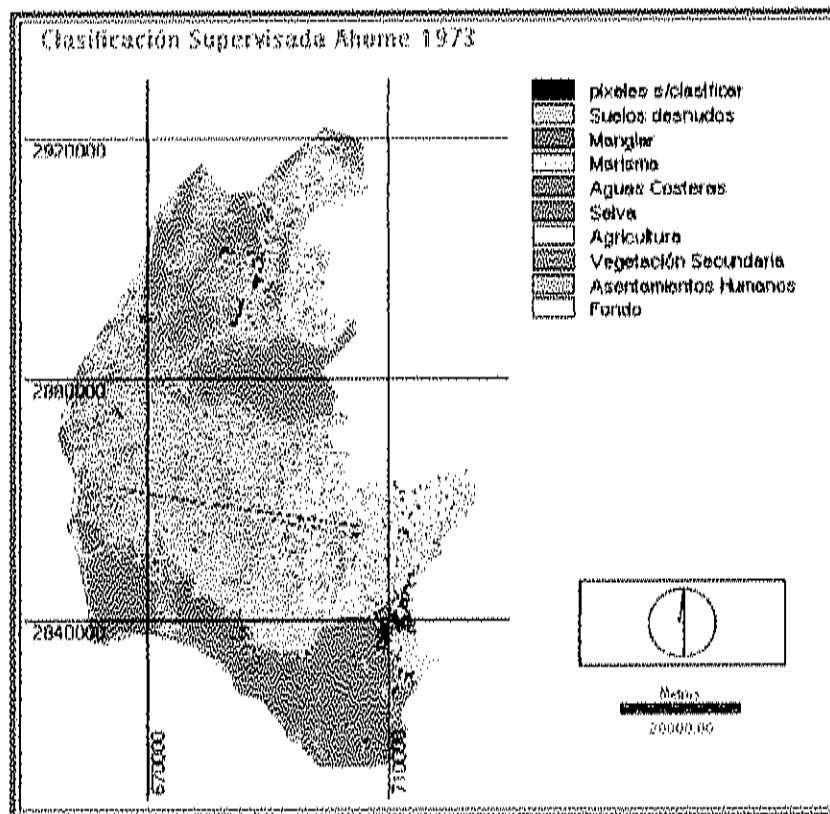


Figura 10. Clasificación del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, a partir de una escena Landsat MSS correspondiente a marzo de 1973.

Variación temporal

Con las estimaciones de área para cada una de las fechas en estudio, se procedió a determinar la magnitud del cambio en la extensión de cada clase durante el periodo comprendido en el estudio. Se determinó por diferencia simple, la superficie ganada o perdida entre ambas fechas y se determinó la magnitud del cambio en términos relativos (%), ordenándose las categorías a partir de la mayor ganancia de terreno hasta las que mostraron la mayor pérdida (Cuadro 8).

Cuadro 8.- Cálculo de área ocupada (%) entre 1973 y 2000 para cada una de las clases / extensión de coberturas, usos de suelo y tendencias de cambios 1973-2000

Clases	1973 (km ²)	2000 (km ²)	Diferencia (km ²)	% Área ocupada 1973	% Área ocupada 2000	Δ(%)
Asent. Humanos	23.6	70.4	46.8	0.6	1.7	198.3
Veg. Secundaria	229.8	559.5	329.7	5.7	13.7	143.5
Agricultura	802.8	988.9	186.1	19.8	24.4	23.2
Acuicultura	0.0	56.3	56.3	0.0	1.4	
Aguas Costeras	553.9	537.7	-16.3	13.7	13.3	-2.9
Manglar	161.1	140.1	-21.0	4.0	3.4	-13.1
Marisma	505.3	436.5	-68.7	12.5	10.8	-13.6
Suelos Desnudos	936.5	611.8	-324.7	23.1	15.1	-34.7
Selva	779.6	491.4	-288.2	19.2	12.1	-37.0

De acuerdo con estos resultados, las categorías que presentaron mayor reducción en su extensión, considerando como base los resultados obtenidos para 1973, fueron selva y suelos desnudos, con aproximadamente 300 km²

cada una. En contraste, las clases con mayor ganancia fueron, vegetación secundaria con cerca de 325 km² y en menor proporción, la agricultura, que creció poco menos de 190 km².

En comparación, asentamientos humanos fue la clase con mayor crecimiento relativo, prácticamente triplicando en el 2000 la superficie evaluada para 1973. En una situación similar de crecimiento acelerado, se ubica la camaronicultura, aunque en este caso no es posible comparar, dado que en 1973 no existía tal actividad en la zona de estudio.

Por lo que toca a la reducción de extensión, la categoría que mayor proporción perdió fue la clase selva, que se redujo aproximadamente 40% con respecto a 1973. Las variaciones interanuales para cada una de las categorías analizadas se pueden observar en la figura 11.

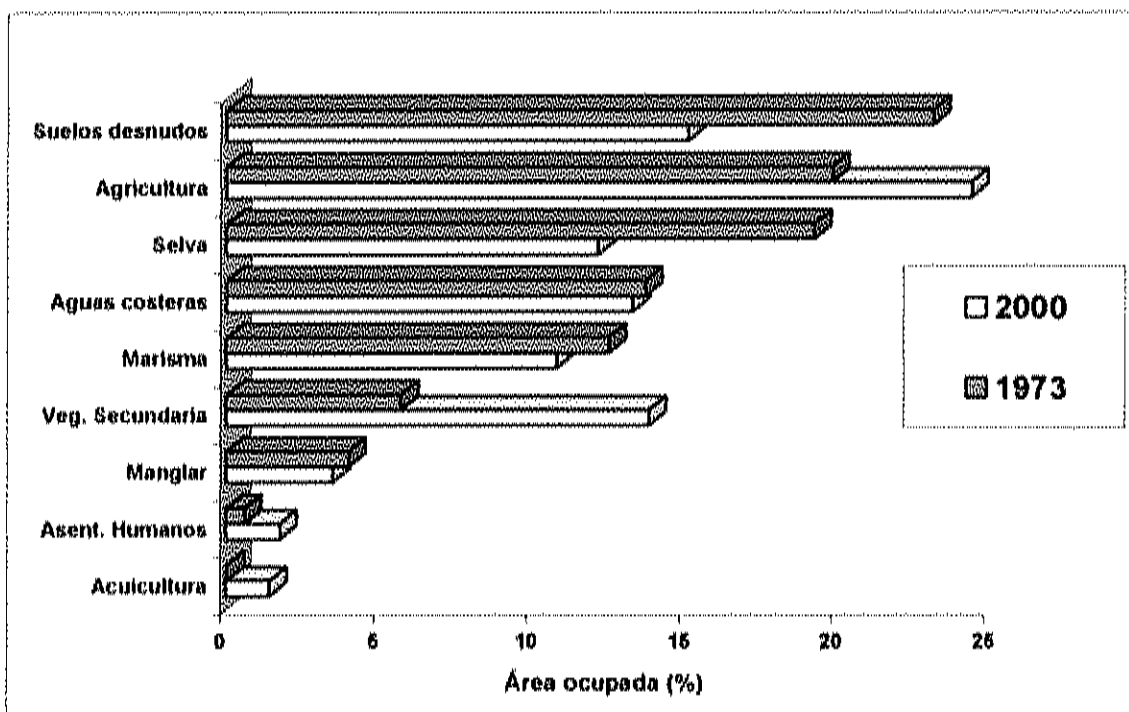


Figura 11. Variación en la proporción del área ocupada por clase entre 1973 – 2000

Tendencias y análisis de cambio

Mediante la matriz de cambio se determinó la dirección seguida por las clases evaluadas, considerando la escena de 1973 como referencia, con respecto a la escena del año 2000 (Cuadro 9). Se obtuvo un valor general del coeficiente de Kappa de 0.65. El análisis por categoría indica que las clases aguas costera ($K = 0.90$) y asentamientos humanos ($K = 0.84$) fueron las clases que menos diferencias espaciales presentaron. Mientras que vegetación secundaria ($K = 0.13$), suelos desnudos ($K = 0.21$) y marismas ($K = 0.36$) fueron las que presentaron menos coincidencias.

Cuadro 9. Matriz de cambio entre dos escenas Landsat clasificadas para los años 1973 (MSS) y 2000 (ETM+). Las unidades están expresadas en km^2

Clases	1973										Total 2000
	PS	SD	MN	MR	AC	AI	SL	AG	VS	AH	
2000 Píxeles s/clasificar (PS)	20.1	27.1	7.3	48.2	20.3	0.0	12.9	18.4	8.6	0.4	163.6
Suelos Desnudos (SD)	5.3	244.2	10.8	94.4	3.0	0.0	108.4	93.1	50.4	1.0	610.5
Manglar (MN)	2.4	7.7	93.8	9.4	4.3	0.0	10.2	6.0	4.5	0.0	138.2
Marisma (MR)	7.7	118.6	4.8	197.4	6.6	0.0	54.8	19.4	27.1	0.2	436.3
Aguas Costeras (AC)	4.5	3.9	3.9	5.3	503.6	0.0	8.2	2.6	4.9	0.0	537.9
Acuicultura (AI)	1.4	17.0	0.5	22.2	2.1	0.0	2.9	1.3	8.2	0.0	56.3
Selva (SL)	1.8	53.3	8.4	8.6	5.3	0.0	363.4	38.0	12.2	0.1	401.3
Agricultura (AG)	9.3	203.4	17.0	56.7	1.8	0.0	103.8	247.7	65.9	1.1	908.5
Vegetación secundaria (VS)	6.5	169.4	12.9	57.9	4.2	0.0	107.7	154.0	241.7	0.8	554.2
Asentamientos humanos (AH)	1.0	11.7	0.7	2.7	0.1	0.0	5.5	20.2	5.8	18.9	70.3
Total 1973	59.9	936.5	161.1	505.3	563.9	0.0	779.6	802.8	229.6	23.6	3883.6

De las clases con mayor transformación, suelos desnudos, que presentó la máxima reducción, tuvo cambios dirigidos principalmente hacia zonas agrícolas y vegetación secundaria. Por su parte, la cobertura con mayor ganancia, vegetación secundaria, observó cambios hacia las clases agricultura y suelos desnudos.

En otros casos, parte de la extensión de manglar y marisma clasificada originalmente en 1973, fue evaluada como zonas agrícolas, suelos desnudos y vegetación secundaria en la clasificación correspondiente al 2000. La clase aguas costeras cambió principalmente hacia marismas y selva, mientras que en la clase selva, los principales cambios se dieron hacia suelos desnudos, vegetación secundaria y agricultura, en proporciones similares. Los suelos definidos como agrícolas en 1973 fueron parcialmente clasificados como vegetación secundaria y suelos desnudos en la fecha posterior, siendo estos los cambios más importantes. Finalmente, píxeles originalmente clasificados como asentamientos humanos en 1973, se clasificaron en baja proporción como agrícolas, suelos desnudos y vegetación secundaria.

Integración al Sistema de Información Geográfico

Como resultado final del presente estudio, se integró la información derivada de los procesos de clasificación, en un formato que facilita el manejo de la información generada y permite la actualización e incorporación de nueva información. El producto final fue concluido en formato de ArcView y exportado posteriormente a ArcMap. Consta de dos tipos de datos, los primarios, directamente obtenidos del proceso de clasificación y trabajo de campo (fotografía, georreferenciación de datos *in situ*) y datos secundarios que fueron

generados a partir del manejo y análisis de la información anterior, además de fuentes externas al presente proyecto. Se anexa en formato de ArcView, conjuntamente con el visualizador ArcExplorer v.2 (Anexo C).

Datos primarios

A partir de los resultados de la clasificación se generaron capas en formato raster, por medio de los procesos de interpolación y reclasificación citados en métodos. Se obtuvo una capa para el mapa base o contorno de la zona de estudio y 17 capas correspondientes a las clases seleccionadas para la caracterización del municipio, incluyendo en este caso píxeles sin clasificar. Solamente en el caso de la clase acuicultura no se cuenta con el mapa correspondiente al año 1973 dado que para esa fecha aún no iniciaba la actividad en la región.

Como información adicional se incorporaron las firmas espectrales generadas a partir de la selección de campos de entrenamiento para la clasificación supervisada y de igual manera se integró fotografía digital correspondiente a las clases incluidas en el estudio, obtenidas *in situ*.

Usos de suelo naturales e inducidos

Con los resultados exportados al SIG, se integraron las capas correspondientes a los usos de suelo y coberturas naturales, para definir en que medida el uso de suelos ha sido modificado por efecto de actividades humanas. Las clases consideradas como naturales incluyen manglar, marismas, selva y cuerpos de

agua costeros. Las cinco clases restantes se agruparon como coberturas inducidas o culturales.

Considerando lo anterior, para 1973 la proporción entre ambos tipos de cobertura fue similar, con 49.4% para las coberturas naturales y 49.2% para las inducidas (Fig. 12). La diferencia con el 100% corresponde a los denominados píxeles sin clasificar.

Para la escena del año 2000, la proporción del área asociada a usos de suelo inducidos o de origen antropogénico, se incrementó considerablemente, pasando a 56.3%. La correspondiente a las coberturas naturales se estimó en aproximadamente 39.6% del total. De igual manera que en el caso anterior, la diferencia con el 100% está asociada con los píxeles que no fueron asignados a ninguna categoría específica.

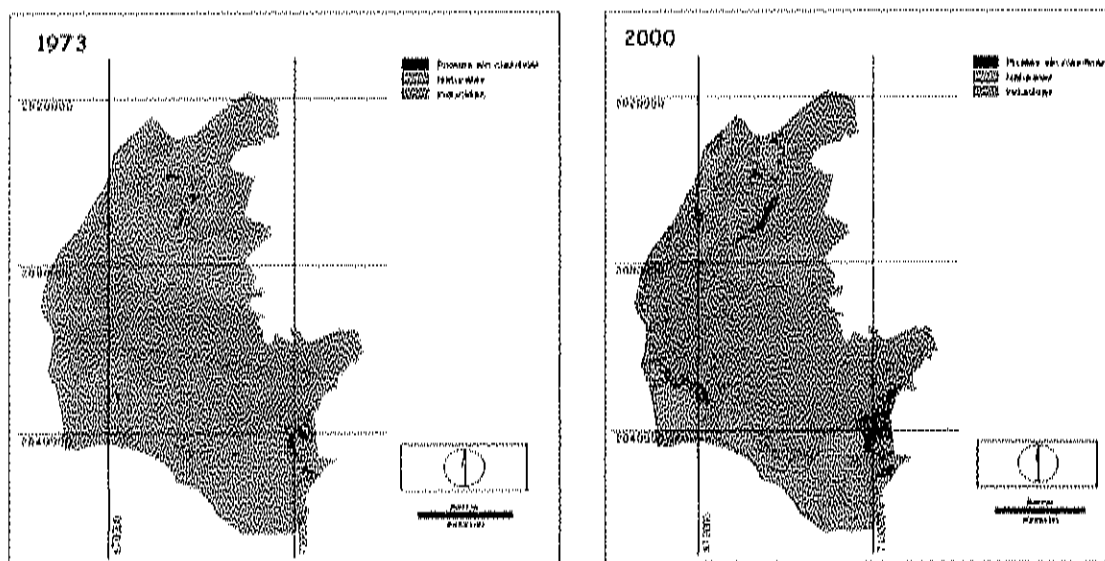


Figura 12. Distribución de coberturas naturales e inducidas en el municipio de Ahome

Datos secundarios

Además de la información correspondiente a las coberturas naturales e inducidas, obtenidas directamente de la clasificación, se integraron a este SIG croquis de la mayoría de los asentamientos humanos del municipio, obtenidos a partir de digitalizaciones en Autocad realizadas por INEGI. Asimismo se incorporaron algunas de las capas generadas por el programa de investigación Ordenamiento Ecológico de la costa centro de Sinaloa (DGA, 1998), correspondientes a vías de comunicación e índices (fragilidad, vulnerabilidad y presión) utilizados para la definición de unidades de gestión ambiental (UGA's). Esta información se adecuó a los límites geográficos del estudio para su incorporación, aunque no se abarca toda el área del municipio de Ahome dado que en dicho proyecto se consideró únicamente la zona costera, definida de acuerdo a criterios particulares del mencionado proyecto.

DISCUSION

Los objetivos planteados para este estudio se cumplieron en su totalidad siguiendo la metodología propuesta, lo que permitió la caracterización del paisaje del municipio de Ahome, la evaluación de las tendencias de cambio durante un periodo de 27 años (1973-2000) en los elementos del paisaje analizados y su incorporación a un Sistema de Información Geográfica, tal como se propuso inicialmente, a fin de contar con una herramienta que permita el manejo y actualización de esta información.

Con respecto a la fase de caracterización del paisaje, que comprende la estimación de las partes que lo componen y el análisis de su organización espacial, con fines de comparación e identificación de diferencias significativas (Imbernon y Branthomme, 2001), la derivada del proceso de clasificación supervisada de la escena del año 2000, resulta representativa del paisaje actual.

En función de esta evaluación, cuya exactitud global fue superior a la mínima propuesta para su aceptación (80%) y con valores de coincidencia (Kappa) de moderados a altos, de acuerdo a la propuesta de Landis y Koch (en Congalton y Green, 1999), el paisaje del municipio de Ahome se caracteriza como mayoritariamente agrícola. Este paisaje está dominado por coberturas inducidas (suelos desnudos, vegetación secundaria, además de agricultura) y aunque solamente ocupa 1.7% de la superficie evaluada, la clase asentamientos humanos resulta un componente importante dado que su influencia es evidente en todo el municipio. Aunado al desarrollo agrícola y de asentamientos humanos, la reciente incorporación de la acuicultura, integra a

estas actividades económicas como las principales promotoras de cambio del paisaje.

Un resultado similar para el corredor industrial Los Mochis–Topolobampo, ubicado dentro de la región de estudio, fue obtenido por Trelles (2000) y Trelles-Rios y Ruiz-Luna (2001). En dicho trabajo se caracterizó la región (aproximadamente 2400 km²) como mayoritariamente agrícola (50%) dominada por campos agrícolas, cultivos en pie y tierras en preparación, destinándose la mayor parte a agricultura de riego. En el presente estudio, con una área mayor, los usos de suelo directa o indirectamente relacionados con la agricultura (clases agricultura, vegetación secundaria y suelos desnudos) representaron una proporción similar a la citada.

En términos generales, para la escena del 2000 la agricultura representó una cuarta parte del paisaje evaluado y se encuentra distribuida por todo el municipio, con excepción de las áreas más cercanas a la costa, dominadas por manglar y zonas de marismas, además de las zonas donde se ubican asentamientos humanos y áreas con topografía elevada, donde se sitúan los parches de selva de mayor extensión e importancia. El área que ocupa la agricultura es compartida con la clase vegetación secundaria y con suelos desnudos, que en parte corresponden a zonas agrícolas en barbecho, pero que no pueden separarse dada su respuesta espectral. Por lo anterior se interpreta que la clase agricultura se encuentra subvaluada y que la proporción de terreno que ocupa en el municipio es superior a la calculada, probablemente más del 50% del área, si consideramos la extensión ocupada por suelos desnudos y vegetación secundaria, ambas clases muy relacionadas con los usos agrícolas.

Otra de las actividades de origen humano que han modificado el paisaje actual de Ahome es la acuicultura, que si bien no ocupa más del 2% de la extensión total del municipio, representa una extensión mayor del 10% del total evaluado como aguas costeras, aun cuando es una actividad incipiente que

inició a en la década de los 80's durante el siglo pasado (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, *en prensa*).

Finalmente, como parte de la caracterización del paisaje actual de Ahome, es importante destacar que aunque la selva es la segunda cobertura natural en extensión, después de aguas costeras, una proporción importante no cuantificada, corresponde a pequeños parches distribuidos en el área de estudio, por lo que se presenta como una cobertura altamente fragmentada, si bien no existe un análisis específico para determinar en que medida se presenta dicha fragmentación. Es también importante mencionar que estos parches clasificados como selva podrían corresponder a otro tipo de vegetación e inclusive a agricultura, ya que aunque la exactitud del productor para la clasificación para esta cobertura fue elevada (91%), es también la más baja en lo que corresponde a la exactitud del usuario (77%).

Al respecto, es importante mencionar que solo en el caso de la selva se obtuvo un valor por debajo del 80% para la exactitud del usuario, mientras que para la exactitud del productor se obtuvieron valores inferiores a este nivel únicamente en el caso de la vegetación secundaria y de suelos desnudos.

En general, el paisaje de la zona de estudio se ajusta al patrón de las principales actividades económicas desarrolladas en el municipio y con una zonación similar a la de la carta de Agricultura y Vegetación (1:1,000,000) actualizada por INEGI a 1996 (INEGI, 1999), a diferencia de otras regiones del estado donde las coberturas naturales o el desarrollo urbano caracterizan al paisaje, tal como lo indican Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2002) y Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (*aceptado*), para el sistema litoral de Majahual y la zona de Mazatlán respectivamente, donde inclusive se han ido disminuyendo las áreas destinadas a la agricultura para su transformación a usos urbanos.

El paisaje del municipio de Ahome es similar al de otras zonas productivas del centro y norte de Sinaloa, donde la agricultura, la expansión

urbana y recientemente el crecimiento de la actividad acuícola, son algunos de los rasgos de origen antropocéntrico más notables, tal como ocurre en los sistemas lagunares costeros San Ignacio, Navachiste, Vinorama y Macapule en los que predomina la agricultura (40%) y la acuicultura, ambas con elevado potencial para afectar los sistemas lagunares (Santos *et al.*, 2002). También es el caso de Bahía Santa María-La Reforma (Gurrola, 2000), Bahía de Ceuta (Alonso, 2000) y particularmente en el paisaje aledaño a bahía de Altata – Ensenada del Pabellón. Para este sistema el 68% de las coberturas evaluadas por Lieberknecht (2000) correspondieron a categorías de origen antropogénico, sin que se haya manifestado un cambio importante desde 1984 a la fecha, con excepción del crecimiento de la actividad acuícola. Una situación similar propone Ramírez (1998) para una zona más reducida al sur de Sinaloa (Estero de Urías) al considerar que la agricultura tuvo su mayor desarrollo en la región antes de la década de los setentas, período a partir del cual se cuenta con imágenes de satélite.

Como se observó posteriormente, en el análisis de la escena de 1973 donde ya la agricultura se manifiesta como uno de los componentes del paisaje más notables, presentes de manera significativa desde principios de los 40's (Martínez, 2000), la estructura del paisaje tiene diferencias importantes con respecto a la imagen más actual, pero sin dejar de ser mayoritariamente agrícola o con coberturas asociadas a esta actividad, como podría ser el caso de los suelos desnudos. Es importante señalar que la ausencia de datos de campo para validar los resultados de la clasificación correspondientes a esta fecha, pudiera ser un factor de error en cuanto a las proporciones de cambio entre categorías, sin embargo, las características del paisaje corresponden a un ambiente eminentemente agrícola.

En esos términos, el crecimiento de la agricultura y de la vegetación secundaria, resultado de deforestación son los principales modificadores del paisaje, tal como ha sido el caso en otras localidades del estado (Ramírez,

1998; Ruíz y Berlanga, 1998; Ruíz y Berlanga, 1999). Se observó que las principales áreas en ser afectadas por el crecimiento de la frontera agrícola están representadas por suelos desnudos y selva, principalmente, aunque también se dio un proceso de transformación a partir de áreas clasificadas como marismas y vegetación secundaria.

Con relación a las estimaciones correspondientes a las áreas de asentamientos humanos, en términos relativos fue la clase que creció a mayor velocidad, triplicando en poco menos de 30 años la extensión originalmente evaluada en 1973. Cabe señalar que la técnica utilizada para la estimación, basada en digitalización sobre pantalla y apoyada en cartografía (escala 1:250000), pudiera producir subevaluación o sobrevaluación de extensión, particularmente para las estimaciones en la escena 1973. Sin embargo, un punto importante por señalar es que durante el periodo de estudio no se observó la creación de nuevos asentamientos humanos, por lo que el desarrollo de la zona urbana consistió en un aumento de su superficie.

De acuerdo al análisis de detección de cambio con la matriz de error (crosstab), en el que se expone de manera sencilla la dirección y dimensión en que se dieron los cambios, es importante señalar que para esta clase los principales subsidiarios fueron las clases suelos desnudos ($\approx 12 \text{ km}^2$) y agricultura ($>20 \text{ km}^2$), que se encontraban rodeando a las zonas de asentamientos humanos. Otras clases que también tuvieron pérdida significativas para su conversión a AH, fueron principalmente marismas, selva y vegetación secundaria, que en conjunto perdieron aproximadamente 15 km^2 con respecto al 1973. Otros cambios relativamente menores corresponden a la transformación de aguas costeras y manglar en asentamientos humanos, aunque esto se considera como parte del error de clasificación.

Estas tendencias de cambio de coberturas naturales hacia zonas agrícolas y de asentamientos humanos se presenta frecuentemente como

resultado del desarrollo económico regional (Grimm *et al.*, 2000; Ji *et al.*, 2001, Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, *aceptado*). Parte del crecimiento se realiza sobre tierras arables, pero también sobre otras que no necesariamente son productivas, como pudiera ser el caso de marismas, que son poco fértiles por lo que se requieren fuertes inversiones para su explotación, en el caso de desarrollos agrícolas. Precisamente su escaso valor o utilización en desarrollos agrícolas ha facilitado que sea esta la cobertura que en mayor proporción ha sido utilizada para el establecimiento de camaronicultura.

La adición de esta nueva actividad a otras de origen antropogénico incrementa la presión ambiental y además del cambio de paisaje, puede generar consecuencias tales como aumento en las tasas de erosión por efecto de la deforestación, crecimiento urbano y usos agrícolas (Goudie, 1994; Barale y Folving, 1996), pérdida de tierras arables por crecimiento urbano (Ji *et al.*, 2001), cambios en la disponibilidad de hábitat para la vida silvestre (Cuarón, 2000), pérdida de humedales y cambios en los patrones hidrológicos (Ruiz y Berlanga, 1999; Ramsey III *et al.*, 2001).

Además de lo anterior, otros autores concluyen que el impacto generado a partir de la inserción de actividades antropogénicas ha generado fragmentación en el paisaje, que constituye uno de los más severos dilemas a tratar para la conservación de la biodiversidad en el medio ambiente global (Ojima *et al.*, 1994; Collinge, 2001; Burke, 2000; Wickham *et al.*, 2000). Como medida para disminuir estos efectos negativos se ha propuesto la generación de estrategias de manejo, planeación y regulación local de recursos y usos de suelos (Merino, 1987; Crist *et al.*, 2000; Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, *aceptado*).

Finalmente, con respecto a los procesos de clasificación y la estimación de las tendencias de cambio, es importante señalar que para las principales coberturas naturales evaluadas en este estudio (Manglar, Selva y Aguas

Costeras), se observaron patrones de cambio que resultan evidentes como pudiera ser el paso de selva a zonas agrícolas, de manglar a marismas o suelos desnudos y de aguas costeras a manglar o marismas. En todos los casos esta conversión es posible, aunque también estuvieron presentes situaciones de cambio poco comprensibles y que probablemente son producto del error de la clasificación. La confusión de respuestas espectrales es señalado como uno de los principales problemas para la generación de mapas de coberturas a partir de imágenes digitales (Palacio-Prieto y Luna-González, 1996).

En ese sentido algunas de estas confusiones pueden considerarse lógicas, particularmente entre coberturas de características similares como es el caso de manglar a selva y/o agricultura y viceversa dada las características de distribución y heterogeneidad en el paisaje. Otros cambios deben atribuirse definitivamente a las técnicas de clasificación, además de las características espectrales y de resolución de las imágenes. Particularmente para el caso de agua a otras cubiertas se asume que una elevada proporción del error se debe a la corrección geométrica aplicada para ajustar los parámetros espaciales de las dos imágenes a comparar. Este mismo efecto pudo haberse observado en otras clases, ya que aunque poco significativos, se manifiestan reducciones o aumentos de área para cada clase, cuando se hizo el remuestreo necesario para el proceso de detección de cambio. Para el caso de la clase aguas costeras, con resolución de 30m se obtuvieron arriba de 537.7 km², reduciéndose esta cantidad a 536.4 km² al ajustarse el pixel a una resolución de 60m.

Otros casos en los que pudiera haber confusión por la proporción de cambio observada, se relaciona con las propias características ambientales prevaletes durante el registro de las imágenes. En términos generales las firmas espectrales obtenidas a partir de los campos de entrenamiento siguieron patrones similares a los descritos para coberturas similares. Aunque no existen firmas espectrales únicas es posible el reconocimiento de patrones espectrales

distintivos para vegetación, áreas carentes de cobertura vegetal y aún patrones de distribución de ciertas plantas y características de suelos (Campbell, 1996).

Uno de los casos más evidente es el caso de la clase aguas costeras, donde se manifiesta una reducción paulatina en el valor de la brillantez, con respecto a las bandas de mayor longitud de onda. También se presenta un patrón típico en el caso de vegetación asociada a manglar y agricultura con cultivos en pie, con reducción en la banda correspondiente al rojo y un incremento en la brillantez en la banda del infrarrojo cercano (Sabins, 1997).

Tanto para el sensor MSS como para el ETM+ no hubo variación en este patrón, aunque se observa que lo correspondiente a las clases selva y vegetación secundaria siguieron un patrón más cercano a la firma espectral de suelos desnudos y marismas que al patrón típico de vegetación que se observa en agricultura y manglar. Este resultado se interpreta como producto de la estructura del tipo de selva presente en la región, que presenta escaso follaje durante el periodo de estiaje (Rzedowski, 1986), por lo que el efecto del suelo dominó dado su alta reflectancia, es por ello que a firma espectral de selva y vegetación secundaria en el presente estudio se asemeja a suelos desnudos, dado que la captura de las imágenes procesadas fueron en la época de estiaje a lo que se atribuye este comportamiento.

Con relación a la aplicación de las técnicas de evaluación de cambios multitemporales, es importante señalar que algunos de los principales inconvenientes que enfrentan son las diferencias en las características de las imágenes, tanto a nivel de resolución espectral como espacial (Eastman *et al.*, 1995). Para evitar al máximo que el procesamiento digital tuviera efecto sobre los resultados finales, se determinó con base en datos obtenidos de cartografía cual de las escenas contenía el mínimo error (RMS), encontrándose un elevado ajuste con la escena del 2000, por lo que la imagen MSS fue la única corregida geográficamente. Sin embargo se hizo necesario un nuevo proceso de

remuestreo para la imagen clasificada del 2000, a fin de ajustarla geoméricamente con la MSS y efectuar el análisis de detección de cambio, con las consecuencias ya señaladas anteriormente.

Cabe destacar que la resolución espectral mas que la espacial, resulta en una considerable desventaja para procesos de clasificación, ya que aún cuando la resolución espacial sea mejor, como es el caso del satélite SPOT con respecto a las imágenes TM de Landsat, es con este último con el que se obtienen clasificaciones con mayor exactitud que las que se consiguen con el satélite europeo (Green *et al.*, 1998).

En el presente estudio como en otros similares (Mas, 1997; Berlanga, 1999), el uso de análisis post-clasificadorio ha resultado una técnica adecuada y útil para estudios multitemporales, considerando que la clasificación se realiza de manera independiente por lo que no se hace necesaria la normalización radiométrica de las imágenes, quedando como único problema el registro geográfico y geométrico de las escenas en análisis. Este problema como se discutió anteriormente, se solucionó al efectuar la corrección geométrica de la escena del 2000, para ajustarla a la de 1973, con menor resolución.

No hay elementos técnicos suficientes para garantizar que el error en la clasificación de la imagen de 1973 sea similar al obtenido para la del 2000, pese a que la técnica de clasificación fue la misma, con la diferencia del número de bandas y de resolución espectral. Para la clasificación de 1973 la proporción de píxeles sin clasificar fue menor que la del 2000, por lo que presumiblemente sea debido a la baja resolución espectral del sensor MSS y de esta manera incorpore erróneamente píxeles en las clases seleccionadas para la clasificación. Esto incrementaría notablemente el error del productor, sin embargo al no contar con datos de campo u otro tipo de información auxiliar para validar los resultados de la clasificación de la escena de 1973, se asume un error similar entre las escenas utilizadas en el análisis.

Cabe señalar que en la escena MSS fue fácil distinguir las áreas de interés para la obtención de los campos de entrenamiento, pero se observó una mayor variabilidad en las estadísticas de las firmas espectrales, a diferencia de lo ocurrido en la imagen ETM, donde la variabilidad fue menor, indicando que la selección de campos fue adecuada y generó clases espectrales correspondientes a clases informacionales homogéneas. En ambos casos las firmas espectrales siguieron patrones similares por clase, tal como se señaló anteriormente, también parecidas a las encontradas por Páez (2000) para Nayarit, por lo que nuevamente se considera que el error de la clasificación puede asumirse como similar en ambas escenas y considerar por lo tanto que la clasificación y el proceso de análisis multitemporal son confiables.

Con relación al papel que juega el sistema de información geográfica (SIG) desarrollado en este trabajo, se hace necesario señalar que a diferencia de otros trabajos similares efectuados en el estado y en otras regiones (Aguilar-Manjarrez, 1996; van Horssen, *et al.*, 1999; Williams, 1995), el SIG no fue la parte central del presente estudio, sino que se incorpora como una herramienta que permite un mejor manejo, organización y actualización de la información. De acuerdo con Green (1999) los SIG son herramientas usadas para (1) organizar y presentar información espacial y (2) analizar el impacto a nivel espacial de las consecuencias de decisiones alternativas. El SIG que forma parte del presente estudio cumple las funciones descritas en el primer punto y es parte importante para el desarrollo del segundo, aunque no se presentan aquí escenarios distintos de manejo de recursos como consecuencia del manejo de la información.

De acuerdo con el mismo autor, los modelos de SIG se pueden categorizar como descriptivos, predictivos y prescriptivos, siendo los primeros los más comunes y que combinan diferentes tipos de información de entrada (*input*) para la creación de nueva información, siendo este el nivel al cual se desarrolló el SIG en el presente trabajo. Es importante mencionar que IDRISI,

uno de los programas de cómputo empleados en este trabajo para el análisis digital de imágenes de satélite, cuenta también con aplicaciones de SIG que han sido utilizadas en estudios similares, de igual manera que con otro tipo de programas (Bocco y Valenzuela, 1988; Baban-Serwan y Wan-Yusof, 2001). Algunos de los procedimientos realizados (reclasificación, análisis de cambio, estimación de áreas), forman parte del SIG elaborado en este estudio y su exportación a ArcView, permite normalizar la información a un formato con mayores capacidades para el diseño de SIG, dado que es una plataforma que permite escalar a módulos para análisis más complejos, facilita la difusión e incorporación de nueva información.

En la actualidad, se recomienda que cualquier estudio que involucre datos referenciados espacialmente tenga como producto terminal un SIG, dado que es un componente de apoyo para la toma de decisiones (Nath *et al.*, 2000) y que resuelve el problema de combinar conocimiento científico general, con información específica y da valor práctico a ambos (Longley *et al.*, 2001), además de que los datos que incluye pueden ser posteriormente actualizados o manipulados para obtener información adicional (Wadsworth y Treweek, 1999). Por otra parte, es importante considerar la parte práctica, tal como menciona Barale (2000) con relación a resultados provenientes de percepción remota y su aplicación a SIG. Muchos bancos de datos con información proveniente de PR requieren de una continua necesidad de edición, cambio de formato y procesamiento dada su creciente demanda de información, siendo los SIG la solución a este problema de manejo de la información.

En el presente trabajo, el SIG desarrollado cumple estas funciones de almacenamiento de información, de capacidad de presentación en diversas escalas y formatos y de facilidad de manejo de los datos para futuros estudios. El SIG facilitará también la posibilidad de compartir e incrementar el acervo de datos a través de la incorporación de datos de otras fuentes, pero particularmente pretende contribuir en lo inmediato con el objetivo de apoyar al

ordenamiento territorial de acuerdo a como se plantea en la Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente (LGEEPA, 1994). En el texto de la LGEEPA se señala que se considera de utilidad pública el ordenamiento ecológico del territorio nacional, con la concurrencia del gobierno federal, entidades federativas y municipios, entendiéndose como tal el proceso de planeación dirigido a evaluar y programar el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales.

Se señala también en esta ley que es competencia de las entidades federativas y municipios la formulación de políticas y criterios ecológicos que guarden congruencia con los de la Federación, por lo que en el presente trabajo no se presentan propuestas de manejo o zonificación de áreas en función de los resultados, lo cual es competencia de la autoridades municipales, pero se ofrece la información base y herramientas para el desarrollo de estas políticas a nivel municipal, siendo esta una de las principales aportaciones del presente trabajo.

CONCLUSIONES

El paisaje del municipio de Ahome, caracterizado para el año 2000, está modificado por efecto de actividades antropogénicas, siendo posible asociar algunos de sus componentes a diferentes patrones de respuesta espectral, para su evaluación por medio de técnicas de percepción remota, con un elevado nivel de confiabilidad.

El paisaje asociado al municipio de Ahome se encuentra dominado por la clase agricultura y conjuntamente con suelos desnudos, vegetación secundaria, asentamientos humanos y acuicultura, representan casi el 70% del paisaje terrestre. Considerando aguas costeras dentro del área total de estudio, las coberturas inducidas representan poco más del 55% del área total.

El análisis postclasificadorio permitió determinar en que proporción fueron transformadas las clases informacionales evaluadas para 1973 y 2000, así como el seguimiento de la sustitución entre clases.

Por su importancia ecológica, la modificación más notable observada durante el periodo de estudio (1973-2000), es la tendencia negativa de transformación de coberturas naturales a coberturas inducidas, aunque representa poco menos del 10% del total. Individualmente las clases correspondientes a coberturas naturales presentaron reducciones de aproximadamente 3 a 40%.

Pese a no representar más del 4% del área total del municipio de Ahome, las clases Asentamientos humanos y Acuicultura fueron las de mayor crecimiento proporcional con respecto a 1973. Las clases Vegetación secundaria y Agricultura presentaron las tasas anuales de crecimiento más altas, mientras que la clase Selva tuvo la mayor tasa de pérdida.

El SIG producto del presente estudio cumple las funciones básicas para las que fue diseñado, al permitir la integración de información derivada del análisis digital de escenas Landsat (MSS y ETM+), el manejo y análisis de datos con atributos espaciales y la incorporación de datos secundarios complementarios, en un formato accesible a diversos usuarios, que facilita y optimiza la incorporación de nuevos datos, el mantenimiento y actualización de capas y bases de datos, así como su representación gráfica.

BIBLIOGRAFIA

Aguilar-Manjarrez, J. 1996. Development and evaluation of GIS-based models for planning and management of coastal aquaculture: a case study in Sinaloa, Mexico. Tesis Doctoral. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Reino Unido. 373 p.

Alonso, P.F. 2000. An evaluation of land cover changes in the Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico, using Landsat imagery. Tesis de Maestría. School of Ocean Sciences, University of Wales, Bangor. Reino Unido. 100 p.

Arteaga, A.M.A. 2002. Caracterización y análisis del medio natural utilizando sistemas de información geográfica. Memorias IX Conferencia Latinoamericana de usuarios de ESRI y Erdas. México. D.F. versión digital.

AutoCad 13-14. 1999. Manual de referencia. LIMUSA. México. 342 p.

Baban-Serwan, M.J. and K. Wan-Yusof. 2001. Mapping land user/cover distribution on a mountainous tropical island using remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 22:1909-1918.

Baily, B. and D. Nowell. 1996. Techniques for monitoring coastal change: a review and case study. *Ocean and Coastal Management*. 32:85-95.

Barale, V. 2000. Integrated geographical and environmental remotely sensed data on marginal and enclosed basins: The Mediterranean case. pp. 177-187. En: Wright, D. and D. Bartlett. 2000. Marine coastal geographical information systems. Taylor & Francis. London. 320 p.

Barale, V. and S. Folving. 1996. Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region. *Ocean and Coastal Management*. 30:217-223.

Bartlett, D. 1993. GIS and the coastal zone: an overview. pp. 3-23. En: Kevin St. Martin. (ed.). 1993. *Explorations in Geographic Information Systems Technology. Applications in coastal zone research and management*. UNITAR. Suiza. 157 p.

Bartlett, D.J. 2000. Working on the frontier of science: Applying GIS to the coastal zone. pp. 10-36. En: Wright, D. and D. Bartlett. 2000. (eds.). *Marine coastal geographical information systems*. Taylor & Francis. London. 320 p.

Bartlett, D.J. and Carter. 1990. Seascape ecology: The landscape ecology of the coastal zone. pp. 43-53. En: Wright, D. and D. Bartlett. 2000. (eds.). *Marine and coastal geographic information systems*. *Ekologia*. 10. Taylor & Francis. London. 320 p.

Berlanga, R.C.A. 1999a. 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 remotos. Tesis de Maestría. UNAM. Facultad de Ciencias. 111 p.

Bertanga-Robles, C.A. y A. Ruiz-Luna. 2002. Land use mapping and change in the coastal zone of northwest Mexico using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research*. 18: 514-522.

Bocco, V.G. and C. Valenzuela, R. 1988. Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *ITC Journal*. 4:309-318.

Bocco, V.G., J.L. Palacio, P. y C. Valenzuela, R. 1991. Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica. *Ciencia y Desarrollo*. 17:79-88.

Brondizio, E.S., E. Moran F., P. Mausel and Y. Wu. 1994. Land use change in the Amazon estuary: patterns of Caboclo settlement and landscape management. *Human Ecology*, 22:249-278.

Burke, V.J. 2000. Landscape ecology and species conservation. *Landscape Ecology*. 15:1-3.

Caloz, R. and C. Collet. 1997. Geographic information systems (GIS) and remote sensing in aquatic botany: methodological aspects. *Aquatic Botany*. 58:209-228.

Campbell, J.B. 1996. Introduction to remote sensing. Taylor & Francis. London. 622 p.

Carter, R.W.G., 1990. Coastal environments. Academic Press. London. 617 p.

Collinge, S.K. 2001. Spatial ecology and biological conservation. *Biological Conservation*. 100:1-2

Congalton, R.G. and K. Green.1999. Assessing the accuracy of remote sensing data: Principles and practices. Lewis Publisher. Estados Unidos. 137 p.

Contreras, F. 1985. Las lagunas costeras mexicanas. Centro de Ecodesarrollo. Secretaria de Pesca. México. 253 p.

Cracknell, A.P. 1999. Remote sensing techniques in estuarine and coastal zones - an update. *International Journal of Remote Sensing*. 19:485-496.

Crist, P.J., T.W. Kohley and J. Oakleaf. 2000. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert systems tool. *Landscape Ecology* 15:47-62.

Cuaron, A.D. 2000. Effects of land-cover changes on mammals in a neotropical region: a modeling approach. *Conservation Biology*. 14:1676-1692.

Chen, D. 2001. Applying satellite remote sensing to predicting 1999-2000 La Niña. *Remote Sensing of Environment*. 77:275-278.

De la Lanza, G., P. Ramírez, G., Y. Thomas, F. y A. Alcántara, R. 1993. La vegetación de manglar en la laguna de Términos, Campeche. Evaluación preliminar a través de imágenes Landsat. *Hidrobiológica*, 3 29-39.

Dimiyati, M., K. Mizuno, S. Kobayashi and T. Kitamura. 1996. An analysis of land use/cover change using the combination of MSS Landsat and land use map: a case study in Yogyakarta, Indonesia. *International Journal of Remote Sensing* . 17: 931-944.

Dirección General de Acuacultura (DGA). 1998. Diagnóstico ambiental de los ecosistemas costeros y situación jurídica de las unidades de producción camaronícola en el estado de Sinaloa. SEMARNAP, Contrato No. 16509-001-98. México. D.F. 320 p.

Eastman, J.R. 1995. IDRISI for WINDOWS. User's guide. Clark University. Estados Unidos. 297 p.

Eastman, J.R. 1999. IDRISI32. Guide to GIS and image processing. Clark University. II. Estados Unidos. 169 p.

Eastman, J.R., J. McKendry, E. and M. Fulk, A. 1995. Change and time series analysis. Second ed. UNITAR/GRID. Estados Unidos. 119 p.

Elliot, R. 1995. Environmental Ethics. Oxford University Press. New York. 255 p.

Escofet, A., I. Espejel., J.L. Fermán, L. Gómez, M.F. y G. Torres, M. 1993. Manejo de fragmentos en la zona costera. pp. 182-193. En: Salazar, V.S.I. y N.E. González. (eds.). 1993. Biodiversidad marina y costera de México. CONABIO. CIQRO. México. 865 p.

ESRI. 1996. ArcView GIS. Manual del usuario. Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI). USA: 340 p.

Farina, A. 1998. Principles and methods in landscape ecology. Chapman & Hall. Reino Unido. 235 p.

Flores-Nava, A. 1990. Water resources and freshwater aquaculture development in Yucatan, Mexico. Tesis Doctoral. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Scotland. Reino Unido. 373 p.

Foody, G.M. and R. Hill, A. 1996. Classification of tropical forest class from Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*. 17:2353-2367.

Frohn, R.C. 1998. Remote sensing for landscape ecology: New metrics indicators for monitoring, modeling, and assessment of ecosystems. Lewis publishers. Estados Unidos. 99 p.

Galindo, R.J.G. 2000. Condiciones ambientales y de contaminación en los ecosistemas costeros. UAS-SEMARNAP. México. 34-37 pp.

García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana). Instituto de Geofísica. UNAM. pp. 245

Gibson, P.J. and C.H. Power. 2000. Introductory remote sensing. Digital image processing and applications. Taylor & Francis Group, New York. 249 p.

Goudie, A. 1994. The human impact on the natural environment. The MIT Press. 4th. Reino Unido. 454 p.

Grassle, J.F. 2000. The Ocean Biographic Information Systems (OBIS): an on-line, worldwide atlas for accessing, modeling and mapping marine biological data in a multidimensional geographic context *Oceanography*, 13. 3:5-7.

Green E.P., C. Clark, D., P. Mumby, J., A. Edwards, J. and A. Ellis, C. 1998. Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 19: 935-956.

Green, E.P., P. Mumby J., A. Edwards, J. and C. Clark, D. 2000. Remote sensing handbook for tropical coastal management. UNESCO Pub. Francia. 316 p.

Green, E.P., P. Mumby, J., A. Edwards, J. and C. Clark, D. 1996. A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. *Coastal Management*. 24:1-40.

Green, K. 1999. Development of the spatial domain in resource management. pp. 5-15. En: Morain, S. (ed.). 1999. GIS solutions in natural resources management. Balancing the technical-political equation. Oxford press. Estados Unidos. 364 p.

Grimm, N.B., J. Grove, M., S. Pickett, T.A. and C. Redman, L. 2000. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. *BioScience*. 50: 571-584.

Gulinck, H., H. Dufourmont., P. Coppin and M. Hermy. 2000. Landscape research, landscape policy and earth observation. *International Journal of Remote Sensing*. 21:2541-2554.

Gurrola, L. H. 2000. Evaluación de los cambios en la cobertura vegetal y de uso de suelo de Bahía Santa María, Sin. Estudio multitemporal con aplicaciones de percepción remota. Tesis de Maestría. CIAD-Mazatlán. 91 p.

Gutiérrez-García, A. 1995. Development of a GIS-based socio-economic model for aquaculture development in Tabasco state, Mexico. Tesis de Maestría. Institute of Aquaculture. University of Stirling. Reino Unido. 83 p.

Haines-Young, R., D. Green, R. and S. Cousins. 1993. Landscape ecology and geographic information systems. Taylor & Francis. London. 288 p.

Hamlett, J., T. Mertz. and G. Petersen. 1995. GIS targets agricultural nonpoint source pollution. pp. 159-172. En: Lyon, J.G. and J. McCarthy (eds.). *Wetland*

and environmental applications of GIS. CRC Lewis Publishers. Boca Raton. 400 p.

Henderson, F.M., T.F. Hart Jr., B.P. Heaton and J.E. Portolese. 1999. Mapping coastal ecosystems over a steep development gradient using C-CAP protocols. *International Journal of Remote Sensing*. 20: 727-744.

Howard, J.A. 1985. Overview of remote sensing en report of the ninth international training course on applications of remote sensing to aquaculture and inland fisheries. RSC Series 27; FAO. Rome, Italy. pp. 15-21.

Hunsaker, C.T., R.A. Nisbet, D.C. Lam, J.A. Browder, W.L. Baker, M.G. Turner, and D. B. Botkin. 1993. Spatial models of ecological systems and processes: The role of GIS. 248-264. En: Goodchild, M. F., B. Parks, and L.T. Steyaert. 1993. *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York. 520 p.

Imbernon, J. and A. Branthomme. 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *International Journal of Remote Sensing*. 22:1753-1765.

INEGI. 1999. Ahome. Estado de Sinaloa. Cuaderno Estadístico Municipal Ahome. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 185 p.

INEGI. 2000a. Anuario Estadístico. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 420 p.

INEGI. 2000b. Sistema para la Consulta de Información Censal, SCINCE. 2000 Sinaloa. Versión Digital. México.

Isaak, D. J. and W. Hubert, A. 1997. Integrating new technologies into fisheries science: the application of Geographic Information Systems. *Fisheries*. 22: 6-10.

Ji, C.Y., Q. Liu, H., D. Sun., S. Wang., P. Lin, and X. Li. 2001. Monitoring urban expansion with remote sensing in China. *International Journal of Remote Sensing*. 22:1441-1455.

Jones, B. K., K.H. Riitters, J.D. Wickham, R.D. Tankersley, R.V. O'Neill, D.J. Chaloud, E.R. Smith, and A.C. Neale. 1997. An ecological assessment in the United States mid Atlantic region: A landscape atlas. EPA. Estados Unidos. 104 p.

Kay, R. and J. Alder. 1999. Coastal planning and management. E & FN SPON. London. 375 p.

Landgrebe. D. and L. Biehl. 1995. An Introduction to Multispec v1.2. Purdue Research Foundation. Indiana. Estados Unidos. 85 p.

Langran G. 1993. Time in geographic information systems. Taylor & Francis. London. 189 p.

LEEPAES. 1991. Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Sinaloa. México.

LGEEPA. 1994. Leyes y Códigos de México. Ed. Porrúa. México. 673 p.

Lieberknecht, L. 2000. Coastal land use and land use changes in Sinaloa, México. An analysis using Landsat MSS and TM imagery. Tesis de Maestría. School of Ocean Sciences. University of Wales, Bangor. Reino Unido. 138 p.

Long, B.G. and T.D. Skewes. 1996. A technique for mapping mangroves with Landsat TM satellite data and geographic information systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43:373-381.

Longley, P.A., M.F. Goodchild, D.J. Maguire and D.W. Rhind. 2001. *Geographic information systems and science*. Wiley, Chichester. 354 p.

Luque, S.S. 2000. Evaluating temporal changes using Multi-Spectral Scanner and Thematic Mapper data on the landscape of a natural reserve: the New Jersey Pine Barrens a case of study. *International Journal of Remote Sensing* . 21: 2589-2611.

Lyon, J.G. and J. McCarthy. 1995. Wetland and environmental applications of GIS. CRC Lewis Publishers. Boca Raton. 400 p.

MacMillan, R.A., P.A. Furley and R.G. Healey. 1993. Using hydrological models and geographic information systems to assist with the management of surface water in agricultural landscapes. 181-209 pp. En: Haines-Young, R., D. Green, R. and S. Cousins. 1993. Landscape ecology and geographic information systems. Taylor & Francis. London. 288 p.

Maracchi, G., C. Conese., F. Maselli. and L. Bravetti. 1996. Assessment and examination of coastal vegetation deterioration by means of Landsat TM data. *Journal of Coastal Research*. 12:103-111.

Martín, A.A.C. 2000. Mangrove mapping and carrying capacity assessment of a tropical coastal lagoon in Mexico. Tesis de Maestría. School of Ocean Sciences, University of Wales, Bangor. Reino Unido. 77 p.

Martín, K.S. 1993. Applications in coastal zone research and management. UNITAR, Vol. 3. 157 p.

Martínez, D. R. E. 2000. Los Mochis. Orígenes y fundación. Universidad de Occidente. Fondo Histórico Regional. México. 209 p.

Mas, J.F. 1997. Monitoring land cover changes in the Terminos lagoon region, Mexico: A comparison of change detection techniques. Proceedings of the IV

International Conference on Remote Sensing for marine and coastal environments. Orlando, Florida. I:159-167.

Meaden, G. and T. Do Chi. 1996. Geographical information systems. FAO Fisheries Technical Paper. Roma. 335 p.

Meaden, G.J. 1993. Instigation of the world's first marine fisheries GIS. Proceedings ICES Statutory Meeting.

Meaden, G.J. 2000. Application of GIS to fisheries management. pp. 205-226. En: Wright, D. and Barlett, D. 2000. Marine coastal geographical information systems. Taylor & Francis. London. 320 p.

Meaden, G.J. y J. Kapetsky, M. 1992. Los sistemas de información geográfica y la teledetección en la pesca continental y la acuicultura. FAO. Roma. 299 p.

Merino, M. 1987. The coastal zone of Mexico. Coastal Management.15: 27-42.

Millán, A.A.O. 1997. Topolobampo. Puerto mexicano del futuro. Memorias del foro internacional Noroeste, Topolobampo y la cuenca del Pacífico. FUNTOPAC. Culiacán, Sinaloa, México. 305 p

Múgica A.J. y G. Díaz Z. 2001. El ordenamiento ecológico costero y la camaronicultura: conceptos y criterios. pp. 299-326. En: Páez, O.F. (ed.) Camaronicultura y medio ambiente. ICMYL. PUAL. CS. México. 452 p.

Myers, R.A. 2000. The synthesis of dynamic and historical data on marine populations and communities; putting dynamics into the Ocean Biogeographical Information Systems (OBIS). *Oceanography*, 13: 56-59.

Nath, S.S., J.P. Bolte, G.R. Lindsay and J. Aguilar-Manjarrez. 2000. Applications of geographical information systems (GIS) for spatial decision support in aquaculture. *Aquaculture Engineering*, 23: 233-278.

OECEC. 2002. Ordenamiento Ecológico Costero del Estado de Sinaloa. SEMARNAT. México. 370 p.

Ojima, D.S., K.A. Galvin, and B.L. Turner II. 1994. The global impact of land-use change. *BioScience*, 44:300-304.

Olea, R.H. 1975. Ecología descriptiva de Sinaloa. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. México. 201 p.

Páez, B.L.P. 2000. Evaluación de cambios de paisaje del sistema estuarino de San Blas, Nayarit y su área adyacente a la desembocadura del río Santiago con aplicación de Percepción Remota. Tesis de Maestría. CIAD-Mazatlán. 76 p.

Palacio-Prieto, J.L. and L. Luna-González. 1996. Improving spectral results in a GIS context. *International Journal of Remote Sensing*, 17:2201-2209.

Pan, D., G. Domon., S. de Blois and A. Bouchard. 1999. Temporal (1958-1993) and spatial patterns of land use changes in Haut.-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Landscape Ecology*. 14:35-52.

Petch, J.R. and J. Kolečka. 1993. The tradition of landscape ecology in Czechoslovakia. pp. 39-56. En: Haines-Young, R., D.R. Green and S.H. Cousins (eds.). *Landscape ecology and GIS*. Taylor & Francis. London.

Petit C.C. and E. Lambin, F. 2001. Integration of multi-source remote sensing data for land cover change detection. *International Journal of Geographical Information Science*. 15: 785-803.

Pheng, K.S. and W.P. Kam. 1989. Geographic information systems in resource assessment and planning. *Tropical coastal area management*. 4:13.

Phinn, S. R., C. Menges., G. J. Hill, E. and M. Stanford. 2000. Optimizing remotely sensed solutions for monitoring modeling and managing coastal environments. *Remote Sensing of Environment*. 73:117-132.

Ramírez, Z.J.R. 1998. Estimación de las tendencias de cambio ambiental en el estero de Urias, Sinaloa, México, por medio de un análisis multitemporal (1973-1997) con imágenes Landsat. Tesis de Maestría. CIAD-Mazatlán. 85 p.

Ramsey III E.W., G. Nelson, A. and S. Sapkota, K. 2001. Coastal change analysis implemented in Louisiana. *Journal of Coastal Research*. 17: 53-71.

Richards, J.A. and X. Jia. 1999. Remote sensing digital image analysis. An introduction. 3^{ra} ed. Springer. Berlin. 363 p.

Ruiz, L.A. y C. A. Berlanga, R. 1998. Detección de cambios en el paisaje costero de Mazatlán, Sinaloa, asociados al crecimiento urbano. Memorias del V congreso Interamericano Sobre Medio Ambiente, versión digital, archivo 5-04-O.doc, La Habana, Cuba.

Ruiz, L.A. y C. A. Berlanga, R. 1999. Caracterización de la costa sur de Sinaloa, México, por medio de percepción remota y el uso de indicadores del paisaje. X Reunión Nacional SELPER-MEXICO'99. Guanajuato. Noviembre de 1999. Versión electrónica. Doc. 11.

Ruiz-Luna, A. and C. A. Berlanga-Robles. 1999. Modifications in coverage patterns and land use around the Huizache-Caimanero lagoon system, Sinaloa, Mexico: A multi-temporal analysis using LANDSAT images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 49: 37-44

Ruiz-Luna, A. and C. Berlanga-Robles. (*aceptado*). Land use and land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in northwest Mexico. *Landscape Ecology*.

Ruiz-Luna, A. y C. Berlanga-Robles. (*en prensa*). Los sistemas de producción camaronícola en Sinaloa. En: El Colegio de Sinaloa (ed.). Atlas de la biodiversidad y ecosistemas de Sinaloa. México, pp. 365-374.

Rzedowski, J. 1986. Vegetación de México. LIMUSA. México. 432 p.

Sabins, F.F. 1997. Remote sensing. Principles and interpretation. 3a. ed. Estados Unidos. 494 p.

Santos, M.A., C. Berlanga, R., A. Ruiz, L., J. Acosta, V. y N. Trelles, R. 2002. Aplicación de técnicas de percepción remota para evaluar los usos de suelo del entorno inmediato a los sistemas lagunares costeros San Ignacio, Navachiste, Vinorama y Macapule, en el Noroeste de México. Congreso Internacional Geomática 2002. La Habana, Cuba. GE130.doc versión digital.

SEDUE. 1988. Manual de ordenamiento ecológico del territorio. SEDUE. Subsecretaría de Ecología. Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica. México. 355 p.

Smith, G. M., T. Spencer., A. Murray, L., and J. French, R. 1998. Assessing seasonal vegetation change in coastal wetlands with airborne remote sensing: an outline methodology. *Mangrove and Salt Marshes* 2:15-28

Stefanov, W. L., M. Ramsey, S. and P. Christensen, R. 2001. Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote sensing of environment*. 77:173-185.

Tim, U.S. 1995. The application of GIS in environmental health science opportunities and limitations. *Environmental Research* 71, 75-88.

Trelles, R.N.A. 2000. Caracterización actual del paisaje adyacente al corredor industrial Los Mochis-Topolobampo, Sinaloa, México, e identificación de cambios en los usos de suelo utilizando técnicas de Percepción Remota. Tesis Profesional. Universidad de Occidente, Campus Los Mochis, Sin. 53 p.

Trelles-Rios, N.A. y A. Ruiz-Luna. 2001. Caracterización del paisaje e Identificación de cambios en los usos de suelo en el corredor industrial Los Mochis-Topolobampo, Sinaloa, México. Boletín CIAD. 10:3-4.

Trelles-Rios, N.A., A. Ruiz-Luna, C.A. Berlanga-Robles, J. Acosta-Velázquez y A. Martínez-Santos. 2002. Zonificación del municipio de Ahome, Sinaloa, noroeste de México, basada en estudios de Percepción Remota y la elaboración de un Sistema de Información Geográfica. Congreso Internacional Geomática 2002. La Habana, Cuba. GE136.doc versión digital.

van Horssen, P.W., P. Schot, P. and A. Barendregt. 1999. A GIS based plant prediction model for wetland ecosystems. *Landscape Ecology*. 14:253-265.

Wadsworth, R. and J. Treweek. 1999. GIS for ecology: An introduction. Longman. Singapore. 184 p.

Wickham, J.D., R. O'Neill, and B. Jones. 2000. Forest fragmentation as an economic indicator. *Landscape Ecology*. 15:171-179.

Williams, D. C. and J. Lyon, G. 1995. Use of a Geographic information system database to measure and evaluate wetland changes in the St. Mary's river,

Michigan. pp. 125-139. En: Lyon, J.G. and J. McCarthy (eds.). Wetland and Environmental Applications of GIS. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, 400 p.

Yáñez-Arancibia, A. 1999. Terms of reference towards coastal management and sustainable development in Latin America: introduction to special issue on progress and experiences. *Ocean and Coastal Management* 42: 77-104.

ANEXOS

Anexo A. Características y aplicaciones de imagen Landsat (MSS y ETM+)

Banda MSS	Resolución espectral μm	Aplicación	Resolución m
4	0.50-0.60	Enfatiza movimientos de masas de agua con alto contenido de sedimentos, estudios de aguas someras, bancos de arena y arrecifes	80
5	0.60-0.70	Características culturales, como áreas urbanas y caminos, tonos de suelos áridos	80
6	0.70-0.80	Realza vegetación y relieves topográficos	80
7	0.80-1.10	Mejor penetración en la bruma y ponen de relieve la vegetación y los límites tierra-agua	80

Banda ETM+	Resolución espectral μm	Aplicación	Resolución m
1	0.45-0.515 Azul	Batimetría en aguas con escasa turbiedad, diferencias entre suelo y vegetación, vegetación decidua 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 térmico	Temperaturas aparentes de la superficie, separación de usos de suelo y zonas urbanas. Diferenciación de zonas incendiadas y masas de agua	30
7	2.09-2.35 infrarrojo medio	Zonas con alteraciones hidrotérmicas, exploración de minerales, discriminación de tipos de suelos.	30
Pan	0.52-0.90	Características culturales, como áreas urbanas y caminos, tonos de la superficie de suelos áridos	15

Adaptado de Meaden y Kapetsky, 1992

**Anexo B. Polígonos de Asentamientos Humanos digitalizados
para el municipio de Ahome, Sinaloa.**

POLÍGONO	POBLADO	X	Y
1	Mártires de Sinaloa nuevo	704786	2913538
2	Niños Héroes de Chapultepec	705626	2913614
3	Revolución Mexicana	705397	2911627
4	El Desengaño	698071	2917130
7	Dolores Hidalgo	697843	2915372
8	Chávez Talamantes	696927	2913920
9	Bacorehuís	690823	2912314
10	Carranza y Reforma #1	696927	2910251
11	Mártires de Sinaloa	700437	2914761
12	Gustavo Díaz Ordaz	695859	2906887
13	Poblado Cinco	693570	2901766
16	Chihuahuita	694885	2984198
17	Los Natoches (Poblado seis)	697080	2889535
18	Alfonso G. Calderón	697919	2884032
19	Barobampo	697995	2882121
20	Tabalojeca	685939	2883573
21	Los Mochis	701506	2854415
22	Zona industrial Minsa-Pacsa	705735	2854697
23	Ej. 20 de nov.	703855	2849433
24	Ej. 1ero de mayo	707238	2848400
25	Ej. R. Flores Magon	701037	2848400
26	Ej. Ohuira	702822	2845768
27	Ej. 9 de dic.	697748	2849433
28	Ej. Plan de Ayala	696808	2851590
29	Ej. Plan de San Luis	694459	2851877
30	La Louisiana	694271	2855261
31	Ej. Mochis	695399	2857987
32	Compuertas	698594	2859490
33	Ej. 18 de marzo	691922	2861558
34	Ej. Vallejo	693050	2863908
35	Ej. Felipe Ángeles	696432	2862498
36	Los Goros num. 2	699678	2862652
37	G. Leyva Solano	699526	2863970
38	Las Varitas	698310	2865136
39	Bocaporobampo	698715	2866859
40	Zapotillo num. 1	700692	2868989

Anexo B. Polígonos de Asentamientos Humanos digitalizados
para el municipio de Ahome, Sinaloa.

POLÍGONO	POBLADO	X	Y
41	San Miguel Zapotitlán	695319	2871321
42	Bajada de San Miguel	698816	2870662
43	Villa de Ahome	683297	2867620
44	El Guayabo	686389	2870358
45	Cohuibampo	684209	2870408
46	El Porvenir	690829	2869496
47	San Antonio	687788	2870459
48	Cachoana	690322	2871524
49	Los Goros pueblo	693414	2872132
50	Nuevo San Miguel	694883	2872842
51	Bachomobampo #2	685974	2847892
52	Bachomobampo	681586	2850190
53	Plan de Guadalupe	691302	2842879
54	Genaro Estrada	700912	2841313
55	Las Mañanitas	697779	2845281
56	Topolobampo	695689	2832854
57	Ej. Rosendo G. Castro	695480	2836196
58	Lázaro Cárdenas	704360	2833272
59	El Muellecito	703148	2830283
60	El Carricito	702731	2825999
61	San Ignacio	712174	2822573
62	Cerro Cabezón	714932	2829842
63	Bachoco 2	714097	2836609
64	Ej. Cerro Cabezón	712342	2836860
66	El Caracol	711212	2846620
67	Juan José Ríos	717731	2850921
68	La Arrocera	714362	2857494
69	Los Batequis	716918	2856110
70	Campos Ceballos	718836	2861328
71	El Capulín	721074	2862152
72	Cerritos	710326	2863737
73	5 de mayo	704566	2860596
75	Choacahui	697298	2872336
76	La Tea	698639	2873034
77	La Laguna	701682	2874318
92	Macapule	688865	2863026

Anexo B. Polígonos de Asentamientos Humanos digitalizados
para el municipio de Ahome, Sinaloa.

POLÍGONO	POBLADO	X	Y
93	Emiliano Zapata	685503	2864371
94	Santa Bárbara	684920	2859350
101	El Chinito	681020	2856302
79	La Florida	681405	2869152
80	Mayocoba	678278	2869866
81	San José	675241	2870405
82	Huatabampito	679439	2871920
83	El Tule	677564	2873796
84	San Isidro	674616	2874689
85	La Despensa	672918	2875850
86	El Refugio	670239	2876297
87	Higuera de Zaragoza	670149	2873171
88	El Aguajito	667380	2872010
89	San Lorenzo viejo	670596	2871295
90	El Guamuchilito	664164	2874868
91	La Ballena	661625	2872876
95	El Colorado	669057	2849638
96	Grullas Margen Izquierdo	667699	2860514
97	El Bule	671344	2863801
98	Grullas Margen Derecho	666556	2863158
99	Chileta	670844	2865373
100	El Recodo	674160	2861801

