

# CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, HIDROLÓGICAS Y DEL MANGLAR EN LA PLANICIE COSTERA DE NAYARIT, MÉXICO\*

Guadalupe de la Lanza Espino\*\*

Norma Sánchez Santillán\*\*\*

Valentino Sorani\*\*\*\*

José Luis Bojórquez Tapia\*\*\*\*

## Resumen

Las diferentes geofomas de la zona costera son consecuencia de cambios del marco ambiental (hidrología, clima, hidrodinámica marina e incluso del crecimiento orgánico como el de la vegetación de manglar). La planicie costera de Nayarit es un ejemplo típico de la confluencia de estos factores que han dado como resultado una compleja red de marismas, deltas, meandros, canales, lagunas, esteros, estuarios, entre otras formas, bordeados por un denso manglar, que por sus características físicas han sido aprovechadas para diversas actividades humanas. Este trabajo analiza dicha evolución geológica, hidrológica y de la vegetación halófila con la evaluación del manglar, a través de una imagen de satélite LANDSAT, cuya cobertura alcanzó un área de 108 113 ha, de una distribución heterogénea de sus cuatro especies y un predominio de *Laguncularia racemosa*, seguida de *Rhizophora mangle*.

## Summary

The different geofoms of the coastal zone are consequence of environmental changes (hydrology, climate, marine hydrodynamic and organic growth). The coastal plain of Nayarit is an example of the confluence of these factors which result in saltmarshes, lagoons, deltas, meanders, channels, swamps, all of which are bordered by high mangrove density. These characteristics coastal plain structures are exploited for human activities. In this paper the geologic, and hydrologic evolution, as well as the mangrove vegetation distribution was analyzed, using a LANDSAT image, which covers 108 113 ha, with heterogeneous species distribution and predominance of *Laguncularia racemosa* followed by *Rhizophora mangle*.

## Introducción

La planeación territorial para la adecuada utilización de los recursos naturales, es medida inminente en la actualidad; condición que ha sido manejada a través del concepto de desarrollo sustentable, sobre todo en una época en que la ser humano se ha incrementado y requiere para su desarrollo de armonía hacia el mundo que lo rodea.

\* Recibido: 16 de mayo de 1995.

\*\* Instituto de Biología, UNAM, México.

\*\*\* Depto. El Hombre y su Ambiente, UAM, Unidad Xochimilco.

\*\*\*\* Instituto de Geografía, UNAM, México.

\*\*\*\*\* Centro de Ecología, UNAM, México.

La problemática de la planeación territorial relacionada con el manejo de la zona costera (lagunas, marismas, estuarios, bahías) con fines de pesca, acuicultura, turismo entre los más importantes, es más compleja debido a que es una zona de transición de delicado equilibrio y donde se dejan sentir los efectos del uso agrícola, ganadero y forestal de la zona aledaña.

Las lagunas costeras son ambientes particularmente complejos e inestables, por la fuerte dinámica en su evolución geológica, comportamiento fisicoquímico y ocurrencia de diversos fenómenos climáticos, que las hacen susceptibles al cambio en periodos cortos en sus diferentes comunidades. Esta complejidad se agudiza porque son ecosistemas terminales de las cuencas hidrográficas que reciben, por tanto, el impacto de las actividades en áreas terrestres lejanas (FAO, 1995).

Una de las comunidades más importantes en las lagunas costeras no solo por su gran biomasa sino por el alto aporte de materia orgánica que mantiene, es el manglar, comunidad que representa en latitudes tropicales, zonas de riqueza vegetal y animal, además de los recursos pesqueros de especies económicamente importantes. Sin embargo, por desconocimiento, el hombre tala los bosques de manglar para implantar actividades agrícolas y ganaderas, causando problemas ecológicos sobre esta comunidad y consecuentemente en el ambiente lagunar, acelerando los procesos de envejecimiento, con disminución de los recursos pesqueros y la pérdida de las especies nativas, entre otros.

Para delimitar áreas naturales de aquéllas con actividades antropogénicas en sistemas acuáticos costeros y terrestres, se requiere de realizar estudios integrados con fines de ordenamiento. En la zona costera de México, hasta finales de 1995, fueron escasos los estudios sobre este aspecto, así como en la planeación y el desarrollo sustentable, para evitar el impacto.

El sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, Marismas Nacionales-Mezcaltitán ubicado en la planicie costera del estado de Nayarit, es científicamente importante desde los puntos de vista geológico, fisicoquímico, biológico, pesquero, hidrológico y recientemente de actividades acuícolas, además de las posibles turísticas, condición por la cual se ha elegido como área de interés para realizar estudios de planeación territorial (FAO, 1995). En dicho sistema lagunar se encuentran los manglares más extensos del país.

Dentro de las técnicas para determinar áreas de distribución y composición de la vegetación halófila en lagunas costeras, se encuentra la fotografía aérea y las imágenes de satélite; estas últimas proporcionan valiosa información sobre especies en llanuras inundables, siempre y cuando éstas tengan una dominancia monoespecífica (Anderson *et al.*, 1973 y Carter, 1978), esta herramienta permite, según sus reflectancias espectrales, identificar diferentes estados fenológicos y caracterización específica.

La distribución de especies de manglar no tiene un esquema de zonación universal y según Boaden y Seed (1985), ésta se presenta en bandas discretas a nivel regional y aun local, consecuencia de factores físicos y biológicos como: *a)* la influencia de la marea y del agua dulce; *b)* la salinidad como un factor de competencia pero que no es determinante, dado que las especies tienen diferentes tolerancias aun en sus diversos estados de crecimiento y desarrollo; *c)* el clima y la geomorfología, que definen la exuberancia y la exclusión del mangle; *d)* la interacción entre especies que previene la colonización por disponibilidad de luz, y *e)* eventos meteorológicos recurrentes como los huracanes y la incidencia a mediano plazo del fenómeno ENSO, que cambian la distribución de especies. Un factor más que debe ser considerado es la combinación de los anteriores que conduce a la caracterización local.

De la Lanza *et al.* (1993) cuantificaron la distribución y composición de la comunidad del mangle mediante una imagen del Barredor Multiespectral (MSS) del satélite LANDSAT en la Laguna de Términos, y concluyeron que es consecuencia de la dinámica de la salinidad con un predominio de la asociación *Laguncularia racemosa-Avicennia germinans* en el área de mayor influencia dulceacuícola y *Rhizophora mangle* que se encontró heterogéneamente repartido. Estos autores determinaron que la discriminación en clases espectrales permitió definir (con un 80% de confianza) la mayor abundancia de la vegetación compuesta por *Scirpus emerus* y *Fimbristylis spadicea* hacia el sureste de la laguna, en la que predomina la llanura de inundación con mayor influencia marina.

## Objetivo

El objetivo central de este trabajo es definir las características geológicas, hidrológicas de las cinco cuencas de los seis ríos que drenan al sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales-Mezcaltitán en Nayarit, los patrones climáticos de periodos anuales y de mayor lapso, así como la evaluación de la abundancia de las especies del manglar a través de una imagen de satélite LANDSAT.

## Área en estudio

El sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Mezcaltitán-Marismas Nacionales se encuentra en las coordenadas 106°00'00" N y 22°53'03" W, 105°49'09" N y 22°53'03" W, 105°25'00" N y 21°45'00" W, 105°15'00" N y 21°45'00" W. Pertenece a la provincia denominada Planicie Costera Nayarita con una superficie total de 852 km<sup>2</sup> y más de 150 000 ha de canales de marea, llanuras de inundación, lagunas y manglar. Drenan a este sistema los ríos Cañas, Acajoneta, Rosa Morada, Bejuco, San Pedro y Santiago con una superficie total de las cuencas de 161 515 km<sup>2</sup> (**Tabla 1**). La amplitud de la planicie es en promedio de 59.5 km (a partir de la línea de costa y hasta los 200 msnm) configurando una morfología compleja. El establecimiento de la extensa área de manglar ha sido resultado del amplio sistema de deltas entre las cuencas, donde por lo menos seis ríos han tenido una



confluencia en la Planicie Costera Nayarita, con una historia y evolución geológicas muy activas, asociadas íntimamente con la alta y particular dinámica marina, además del cambiante patrón climático anual de las lluvias.

A continuación se presenta el marco geológico más sobresaliente extraído en buena medida de los trabajos de Ortiz (1978, 1979 y 1994), Ortiz y Romo (1994) y Romo (1994).

### Geomorfología

La historia de la dinámica geológica para los seis ríos que vierten sus aguas a la planicie costera se presenta en este trabajo como un hecho generalizado, con base en las semejanzas entre las estructuras topográficas, dado que solo se cuenta con información comprobada para los ríos San Pedro y Santiago.

La llanura costera, el litoral y la plataforma continental se encuentran bajo el dominio o la influencia fluvial de los ríos: Baluarte, Cañas, Acaponeta, Rosa Morada, Bejuco, San Pedro y Santiago. Es una planicie costera acumulativa sedimentaria construida por la evolución de un sistema de deltas coalescentes que han avanzado paulatinamente hacia el oeste. Las llanuras fluviales de los ríos, por sus características fisiográficas y sedimentarias, se dividen en dos unidades: llanura alta fluvial y llanura baja fluviodeltaica. Debido a que la primera está conformada por la llanura aluvial y el lecho fluvial erosivo, es la fracción interna la que no se considera en esta descripción.

En la llanura baja fluviodeltaica, que se distribuye en una franja entre el ambiente terrestre y el lagunar costero cuya anchura promedio es de 60 km, los sedimentos finos se depositan en la cavidad de antiguos lechos fluviales abandonados que son el receptáculo pluvial en la temporada de lluvias; en esta época destacan los ríos San Pedro y Santiago que suman 17 126 909 m<sup>3</sup> de material acarreado anualmente (Tabla 1). Los suelos están constituidos por materiales disgregados formando unidades como fluvisol eútrico, fluvisol gleyco, luvisol crómico y solonchak órtico, relacionados con fenómenos hidricos y de composición semejante a la roca madre. Se encuentran en esta llanura manchones de selva baja caducifolia, manglar, vegetación halófito y pastizal inducido (INEGI, 1981 y 1988).

Los cinco ríos que desembocan en esta llanura edificaron un complejo sistema deltaico durante el pleistoceno tardío, en periodos de bajo nivel del mar. La característica distintiva de este complejo, fue la formación de múltiples cordones de playa que aislaron a un alto número de cuerpos de agua. Dichos cordones están formados de sedimentos aluviales y depósitos lacustres.

Según Curray *et al.* (1969), la historia y evolución de esta planicie y el sistema lagunar fue consecuencia de un ascenso del nivel del mar anterior a los 7 000 AP, que causó una transgresión relativamente rápida de la línea de playa a través de la plataforma continental;

cuando dicho ascenso disminuyó, la transgresión fue localmente balanceada con depósitos de arena en un periodo comprendido entre 3 600 y 4 750 años, y una progradación de la costa (regresión deposicional) se manifestó inmediatamente después, mientras que el nivel eustático continuaba un lento ascenso. Durante este periodo se formaron cordones que dieron lugar a lagunas longitudinales y bocas mareales que han migrado a lo largo de la costa como respuesta a los cambios de dirección del transporte litoral. La formación de estas lagunas longitudinales formadas entre los cordones litorales (con más de 200 en su parte más ancha) es más conspicua en el área de Marismas Nacionales-Mezcaltitán (**Figura 1**) donde se han asentado comunidades de manglar con una topografía que favorece el establecimiento secuencial de *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans* y *Conocarpus erecta*, típica de esa área (Flores *et al.*, 1992). El continuo aporte de sedimentos a través de los ríos, ha tenido una velocidad de depósito que supera el avance transgresivo, aunado al levantamiento de la costa (Romo, 1994), e incrementando la amplitud de la planicie.

La extensa superficie aluvial adyacente a los lechos fluviales constituida por acumulación de sedimentos, resulta de la depositación progresiva que hacen los ríos y se extiende en dirección NE-SW, con pendiente muy suave hacia el mar que oscila de 0 a menos de 1% y con pendientes complejas que fluctúan de 1 a 3% (CFE, 1994). La llanura baja fluviodeltaica es un terreno deprimido de 10 m de altura sobre el nivel del mar.

Desde el punto de vista de la formación de las lagunas, los deltas distributarios de los ríos migraron creciendo y ganando terreno a través de la colmatación de aluviones; dichos deltas son formas acumulativas tanto subaéreas como subacuáticas. El delta distributario se puede considerar como un amplio abanico deltaico, que en el caso de los seis ríos se han fusionado formando la amplia llanura fluviodeltaica que bordea a los sistemas lagunares. La planicie costera tiene un carácter de sedimentación superficial y frontal, cuyo escurrimiento reconoce como nivel de base, al extenso sistema lagunar. El frente deltaico se forma por la distribución semiradial de los brazos distributarios que penetran en los cuerpos de agua, formando una compleja red de corrientes con diques naturales que forman centros de acumulación sedimentaria local. El abanico deltaico puede elevarse propiciando una mayor inestabilidad hidrológica (Romo, 1994).

La morfología de la llanura aluvial ha sido formada y modelada por los ríos que han divagado a través de toda su extensión, dejando numerosas formas meándricas. Como remanentes de la acción de tales desplazamientos, se han formado en la llanura surcos y rastros de antiguos cauces abandonados que temporalmente se inundan en el periodo de lluvias o crecidas, pues el drenaje es generalmente muy malo y la red fluvial adyacente al río se encuentra desorganizada. El avenamiento anárquico es favorecido en la porción baja de las llanuras, porque se presentan con mayor frecuencia los desbordes que propician condiciones lacustres y palustres, que se evidencian en charcas, estanques, jagüeyes, arroyos y lagunas abandonadas que constituyen más de 160 cuerpos de agua (FAO, 1995).

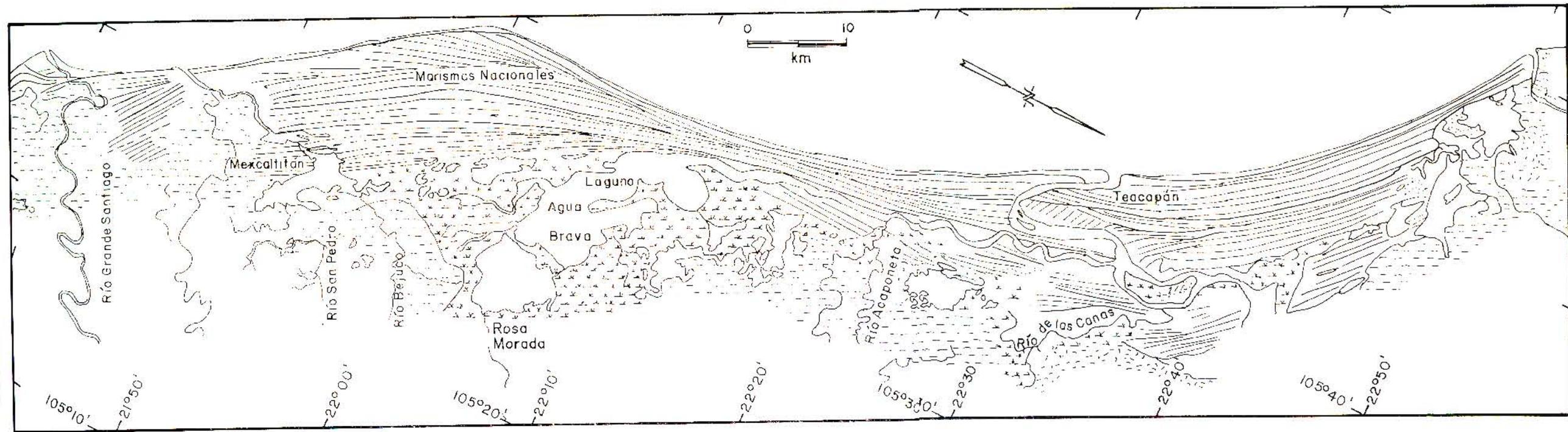


Figura 1. Sistema lagunar Teacapan-Mexcaltitán (tomado de Curray *et al.*, 1969).

Como resultado del carácter divagante y de las constantes modificaciones de los cursos fluviales, quedan como relictos de estos procesos numerosos meandros abandonados que forman lagunetas en forma de herradura o de media luna, en las cuales se puede establecer vegetación (Ortiz, 1978, 1979).

Como en la mayoría de los deltas activos, los citados ríos han continuado acumulando sedimentos, y como consecuencia del proceso de sedimentación se determinan rápidos y significativos cambios, derivados del crecimiento y expansión de los deltas. Esto se traduce, entre otras causas, en un incremento de las inundaciones en el período de lluvias y ciclones; Ortiz (1978, 1979) señala que el factor primordial que influye tanto en las inundaciones como en la modificante morfología aluvial de la llanura costera, lo constituye el fluctuante curso del Río Santiago, aplicables a los otros cinco, que divaga en la continua búsqueda del perfil longitudinal de mayor pendiente, con tendencia a trasladarse a un renovado lecho fluvial, que permita a sus descargas reconocer un camino más fácil hacia el mar. Dicho fenómeno generado en un momento dado por los citados ríos, se tradujo en un anastomosado y amplio paleodelta que favoreció el establecimiento de comunidades diversas de halófitas costeras.

Los lechos de inundación se han dispuesto a ambos márgenes de los ríos y su origen está íntimamente relacionado con las altas inundaciones periódicas de las crecidas ordinarias, abriéndose paso por medio de brechas o vertederos naturales. La superficie irregular y de poca pendiente de la planicie de inundación, causa el estancamiento de las aguas pluviales y fluviales de inundación, permitiendo la existencia de cientos de cuerpos de agua que se instalan en las depresiones o zonas bajas, que funcionan como cubetas de decantación durante el descenso de las inundaciones, favoreciendo de esta manera el desarrollo de condiciones palustres, donde la densa vegetación de manglar reduce aún más la velocidad de escorrentía (Ortiz, 1978, 1979), permitiendo la acumulación de sedimentos finos, como por ejemplo entre los deltas de Acajoneta, Rosa Morada, Bejuco y San Pedro.

Los cursos bajos de los ríos Santiago y San Pedro son los mayores colectores de material en suspensión y, junto con sus cuencas, son los más importantes del país por su vasta extensión, que encierran valiosos recursos naturales (**Tabla 1**).

Ortiz y Romo (1994) consideran que la construcción y llenado de la Presa Aguamilpa y la presa derivadora de San Rafael, ubicada río abajo, constituirán eficientes receptáculos de azolves, pues capturarán prácticamente todos los sedimentos que se erosionan de la cuenca de la porción montañosa, alterando por completo el sistema de sedimentación en el delta. Por lo que a partir de 1993 los procesos de acumulación sedimentaria cesaron y se invirtieron por los de erosión tanto marina como fluvial, modificando severamente la morfología del delta y en donde, con seguridad, los cambios ocurrirán con mayor rapidez para los próximos años.

## Hidrología

El clima de la planicie costera se caracteriza por ser del tipo  $Aw_0$ , que corresponde al más seco de los subhúmedos de acuerdo con el Sistema Modificado por García (1977). Dentro del sistema lagunar, parte norte, que corresponde a los ríos Cañas, Acajoneta, Bejuco y Rosa Morada, se presenta una oscilación extremosa ( $7.6^{\circ}\text{C}$ ); la parte sur que incluye a los ríos San Pedro y Santiago es de poca oscilación ( $6.5^{\circ}\text{C}$ ).

Debido a que las características geomorfológicas de la planicie costera son resultado de la dinámica hidrológica y de la cuenca, las variaciones en los gastos de los seis ríos determinan la magnitud del aporte del material suspendido, de la sedimentación, incremento de los deltas y otras formas topográficas, así como de la erosión.

Sobresale el volumen medio anual del Río Santiago con 9 500 millones de  $\text{m}^3$ , San Pedro con 2 692 y Acajoneta con 1 180 millones de  $\text{m}^3$ ; en tanto el Cañas, el Bejuco y el Rosa Morada sólo son significativos en periodos de lluvias y en el invierno, respectivamente. Los tres primeros ríos pueden rebasar en ocasiones, como en huracanes y eventos de mayor envergadura como los ENSO (El Niño-Oscilación del Sur, fenómeno oceánico-atmosférico generado por el amainamiento de los Vientos Alisios), los 1 000  $\text{m}^3/\text{s}$  que representan fases erosivas y acumulativas considerables, y de los cuales se han construido también los deltas, abanicos deltaicos, llanura fluviodeltaica, hoyas, albarradones, canales y llanuras de inundación, meandros y otras estructuras de la planicie.

Tanto el San Pedro como el Santiago, durante las crecidas ordinarias y extraordinarias representan prácticamente un 60% del total de veces que rebasan los gastos críticos de inundación (Romo, 1994), consecuencia tanto del comportamiento anual pluvial como el de mayor plazo (tormentas tropicales y huracanes de mayo a octubre que tocan tierra en el estado de Nayarit, con una regularidad aproximada de tres por año, como lo señala Jáuregui (1980) y de fenómenos ENSO con una ocurrencia dominante de 4-5 años y una secundaria de 21 años, donde se puede sobrepasar en más de dos veces los 1 000  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

El periodo de retorno más frecuente que se observa por las modificaciones y significado de las inundaciones es de dos años, que según Romo (1994), es de inundaciones ordinarias del régimen del San Pedro, pero aplicable al Santiago, y bajo ciertas circunstancias extraordinarias el Acajoneta. Lo anterior manifiesta que tanto los paleodeltas, canales y todas las estructuras de nivel que forman acumulaciones de agua, permanecen inundadas favoreciendo a la vegetación halófila incluyendo al manglar; la CFE (1994) señala que es muy probable que un cambio en el ciclo hidrológico de las cuencas (control de inundaciones) pueda influir en el plazo de dos a cinco años.

La zona expuesta al riesgo de inundaciones de grandes magnitudes, incluye paleocauces, bancos y barras de meandros, meandros abandonados, porciones frontales de abanico deltaico, y tres cuartas partes de la llanura fluvial, en donde se presentan intervalos de

gastos mayores anuales de las avenidas a 2 500 m<sup>3</sup>/s según clasificación de Kates y White (1961); Naciones Unidas, 1977 referidas por Romo (1994), requiere de un periodo de retorno de 50 años. Este tipo de inundación es provocado por lluvias generadas por eventos de lapso mayor al anual, por ejemplo, en 50 años se han presentado 29 ciclones y dos ENSO de intensidad 4. Dicha zona representa el 35.5% donde se ubica el manglar, selva baja caducifolia, vegetación halófito, como condiciones naturales, y pastizal inducido, agricultura de riego anual y agricultura de temporal permanente, como actividades antrópicas (Romo, 1994).

Otro fenómeno que incrementa el volumen de las lluvias y, en consecuencia los gastos, son los monzones, que según García y Trejo (1990) se presentan particularmente en Nayarit entre mayo y octubre con una alta frecuencia al año, enriquecidos en humedad de la Celda de Alta Presión del Pacífico Norte, cuyo tamaño e intensidad varía año con año. Sin embargo, durante la mitad caliente del año la Altiplanicie Mexicana, dada su enorme extensión, manifiesta condiciones de continentalidad y se calienta mucho más que el aire, al mismo nivel sobre las tierras bajas o el mar, generando altas evaporaciones; durante la mitad fría del año los vientos monzónicos cesan y en consecuencia el aporte de humedad, conduciendo a un déficit hídrico, balanceado por las lluvias generadas por los otros fenómenos.

Los gastos y volúmenes de los ríos del sistema lagunar tienen una marcada estacionalidad, consecuencia del desplazamiento de las celdas anticiclónicas por movimiento de la Zona Intertropical de Convergencia, que conduce a sequías y lluvias extremas. El primer periodo se ubica de noviembre a abril, y el segundo de mayo a octubre.

Los meses más lluviosos en los seis ríos abarcan de agosto a octubre (960-1 396 mm y 2 397 m<sup>3</sup>/s, promedios) y los menos lluviosos de mayo a julio (141.4 mm y 514 m<sup>3</sup>/s, promedio). El periodo de secas comprende de noviembre a abril (57-91 mm y 571.5 m<sup>3</sup>/s, esto último corresponde a las equipatas o lluvias de invierno). Sin embargo, los mayores gastos mensuales del Río San Pedro han ocurrido en noviembre de años ENSO con intensidad 4 (de acuerdo con la clasificación de Quinn *et al.*, 1978; Rasmusson, 1984), comprobado a través de la prueba de t de Student con un nivel de significancia de 95%; en donde alcanzan máximos hasta de 5 000 m<sup>3</sup>/s y mínimos de 1 445 m<sup>3</sup>/s, que comparados con los gastos de ese mes en años normales son 80 y 20 veces más, respectivamente. Dicho fenómeno se deja sentir incluso en los ríos Santiago y Acaponeta a través de los incrementos de los escurrimientos y precipitaciones, con los aportes correspondientes de material suspendido y los efectos tanto de erosión como de sedimentación.

Para corroborar la regularidad del ENSO y su influencia en los gastos, se calcularon las oscilaciones en una serie de tiempo (**Figura 2**), las cuales se pueden describir en términos sinusoidales a través del análisis espectral, que muestra la tendencia de las oscilaciones para ciertas frecuencias que aparecen en los datos, en lugar de las oscilaciones mismas. La

periodicidad de los eventos ENSO y los gastos máximos del Río San Pedro, se establecieron tanto para noviembre como para el total anual, a partir de los análisis de autocorrelación de espectro de potencia, máxima entropía y espectro de amplitud (también llamado transformada de Fourier) (Figura 3). En los tres casos se implicó una descomposición de la serie de datos sin tendencia central en una suma de componentes sinusoidales, cuyos coeficientes son la transformada de Fourier discreta de la serie (Bath, 1974; Bloomfield, 1976; Wei, 1990) y en el sentido más amplio se utilizan para describir cualquier procedimiento de análisis de datos para medir las fluctuaciones en una serie de tiempo, comparándolas con sinusoides. El resultado de estos análisis corroboran que el incremento en el volumen de la lluvia y en consecuencia de los gastos de los ríos, ocurren mayormente durante noviembre, mes que corresponde al último de la temporada de lluvias; así mismo se registra un incremento periódico en el volumen total anual de la precipitación y del volumen de gasto de los ríos, el cual se atribuye al fenómeno ENSO que oscila en un intervalo de entre 2 a 4.5 años.

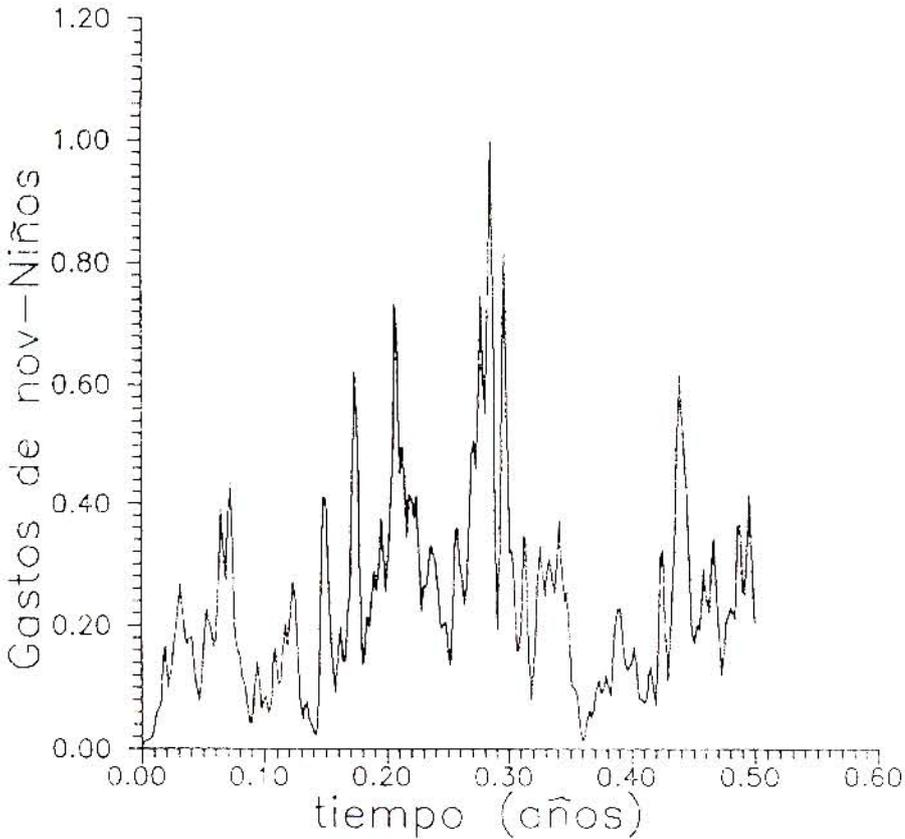
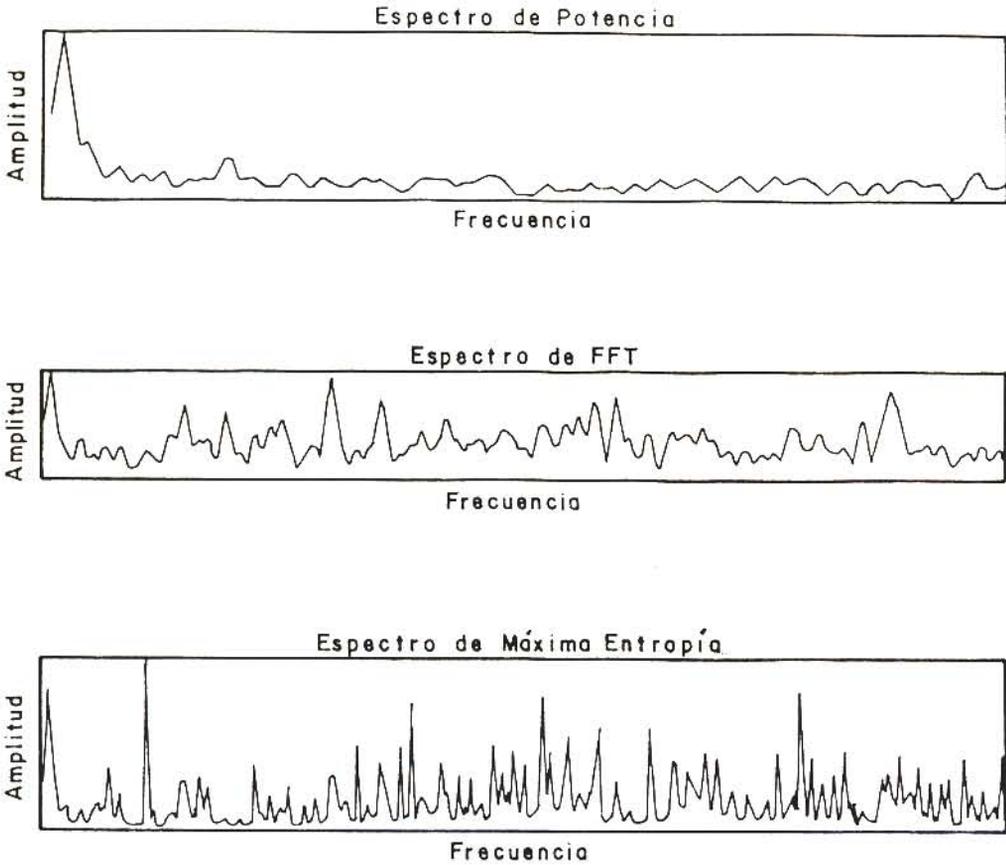


Figura 2. Serie de tiempo de los gastos del Río San Pedro y la ocurrencia del ENSO.



**Figura 3.** Espectro de potencia, transformada de Fourier y máxima entropía del fenómeno ENSO en el Río San Pedro.

Posteriormente se calcularon las funciones de correlación cruzada de los espectros de potencia, con objeto de medir el grado de paralelismo entre las variables antes mencionadas. La ventaja de las correlaciones cruzadas, es que permite establecer un vínculo de dependencia entre sus frecuencias. A través de los espectros de potencia, los espectros de potencia cruzada, la coherencia y la dependencia de la frecuencia que es la propiedad, hace que todas estas funciones sean utilizadas en este tipo de observaciones (Bath, 1974). Los tres análisis corroboraron la frecuencia dominante de 6-7 meses de lluvias; la frecuencia secundaria observada en los tres casos corresponde a 4-5 meses que se refiere a la época de secas y la última de dos meses que se atribuye a la ocurrencia de ciclones tropicales durante octubre y noviembre.

## Manglar

El bosque de manglar se caracteriza por su alta productividad y abundante biomasa; crece en un amplio intervalo de salinidad, pero las mejores condiciones son las salobres. En los sistemas costeros mexicanos se encuentran cuatro especies: mangle rojo *Rhizophora mangle*, mangle blanco *Laguncularia racemosa*, mangle negro *Avicennia germinans* y mangle botoncillo *Conocarpus erecta*, cuya distribución depende entre otras causas de la morfología e hidrología y del clima.

De aproximadamente 660 000 ha de manglar en México (Blasco, 1988) un 17% se encuentra entre Teacapán y San Blas, con áreas frecuentemente inundadas, consecuencia de los seis ríos que drenan a la zona costera, tres permanentes (Santiago, San Pedro y Acajoneta) y tres estacionales (Cañas, Rosa Morada y Bejuco), y de la influencia de la marea. Este manglar ocupa 70% del área total estuarina (Flores *et al.*, 1992).

El manglar se ha clasificado, según su distribución zonal (Cintrón *et al.*, 1980), consecuencia de los factores ambientales ya señalados, en cuatro tipos.

a) **Riberino**, que se ubica a lo largo de las riberas, esteros o riachuelos, con predominancia de *Rhizophora mangle* o *Laguncularia racemosa* si la salinidad excede de 25%.

b) **Borde o franjeante**, presente a lo largo de áreas protegidas y lagunas costeras, frecuentemente con inundaciones por marea; se puede encontrar una zonación *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*, o una distribución heterogénea según el patrón de salinidad.

c) **Cuenca**, localizado en áreas interiores terrestres, en depresiones, con menor influencia de la marea, detrás del franjeante y del ribereño, con predominio de *Avicennia germinans* cuando la salinidad sobrepasa un 40%.

d) **Sobrelavado**, ubicado en áreas someras de islas o penínsulas, generalmente monoespecífico de *Rhizophora mangle* o *Laguncularia racemosa*, según el predominio de marea.

Flores *et al.* (1993) cuantificaron en el área de la planicie costera Nayarita (Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales-Mezcaltitán) 113 238 ha, con predominio de *Laguncularia racemosa* en la laguna de Agua Brava. Debido a la alta sensibilidad en las evaluaciones de distribución de esta comunidad por sensores remotos, en la presente contribución se determinó a través de una imagen de satélite, un área total de 155 690 ha (**Figura 4**), 4.5% menos de lo estimado por los citados autores. La metodología utilizada en la interpretación de la imagen fue la siguiente. Las coordenadas del área en estudio (UTM) correspondieron a: W = 418 156, N = 2 518 307, E = 467 479, S = 2 422 049.

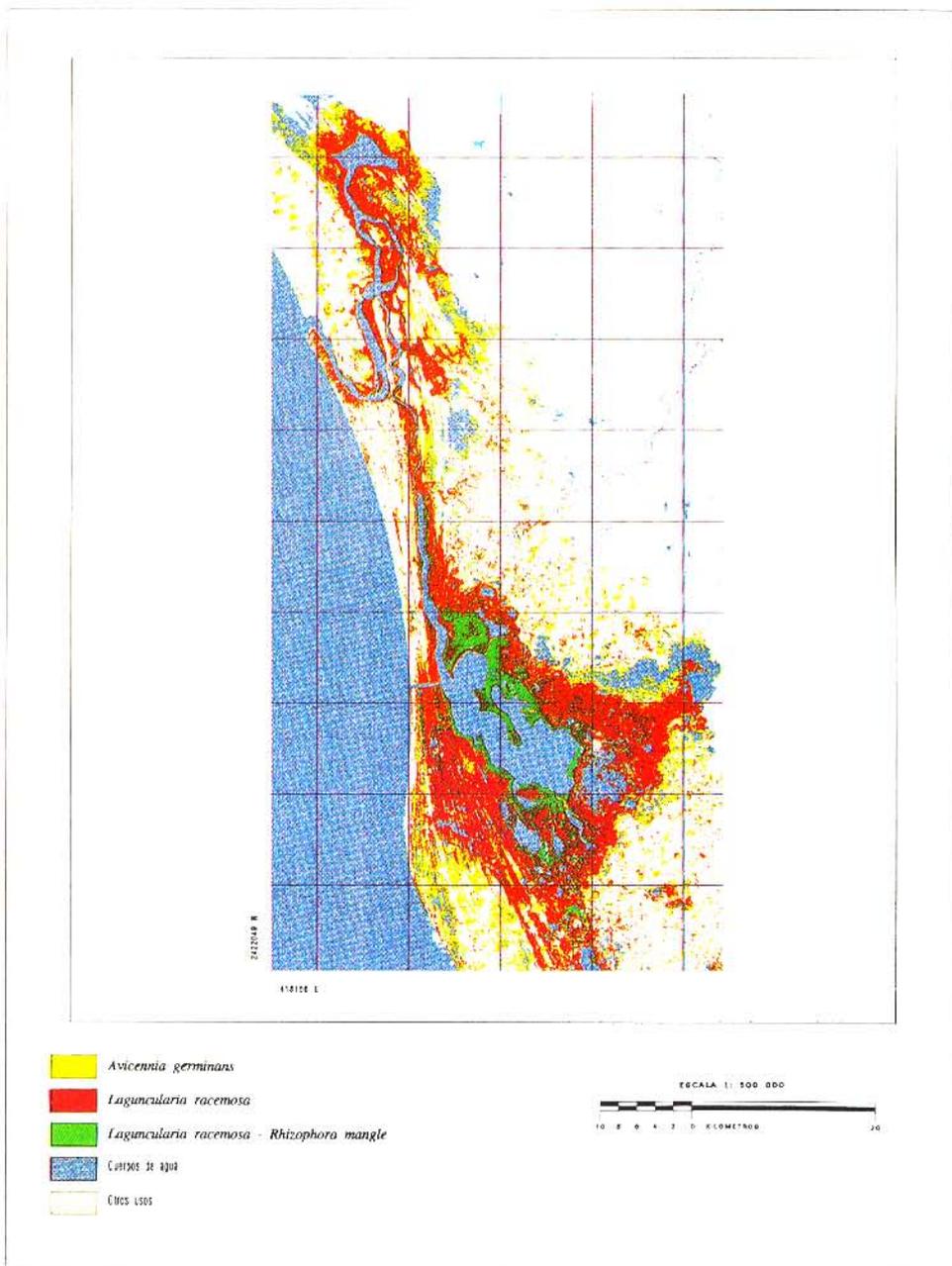


Figura 4. Distribución del bosque de manglar en la planicie costera Teacapán-Mezcaltitán.

Se utilizaron dos imágenes de satélite LANDSAT Thematic Mapper (TM) de dos fechas diferentes, épocas seca (29 de marzo de 1993) y húmeda (7 de octubre de 1993), con el fin de establecer una mejor clasificación de la vegetación. La última fecha se adquirió orientada a lo largo de la órbita del satélite, con resolución de 30 m. La imagen se obtuvo orientada hacia el Norte, con una resolución de 25 m por el remuestreo, aplicado durante la corrección geométrica.

Para disponer de la información digital de las elevaciones se utilizó un modelo numérico de terreno del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). El modelo se conformó con datos tomados cada tres segundos de arcos (aproximadamente 90 m para las latitudes del área en estudio).

Se utilizó un Sun Sparcstation 10 con sistema operativo SOLARIS versión 2.3, con 6 Gbytes en disco duro y una lectora de cintas de 8 mm. Para el procesamiento de las imágenes de satélite se utilizó el programa GRASS 4.1, y para la edición cartográfica final se escogió ARC/INFO. La transformación de las coordenadas del modelo numérico de terreno, de geográficas a UTM, se llevó a cabo con el programa PIXSAT. Posteriormente se desplegaron las imágenes después de efectuar un realce de histograma. El análisis visual sirvió para determinar la cobertura de nubes. La imagen de la época húmeda tuvo un recubrimiento nuboso en la parte continental. Se probaron varias composiciones de bandas espectrales hasta elegir las que permitieran distinguir mejor las clases de vegetación. Esta elección se llevó a cabo teniendo en cuenta el mapa de vegetación disponible. Las composiciones de bandas TM4 (rojo), TM3 (verde) y TM2 (azul) para la imagen de la época húmeda y TM7 (rojo), TM4 (verde) y TM3 (azul) para ambas imágenes.

Se realizó una clasificación supervisada de las imágenes ubicando parcelas de entrenamiento, con base en el mapa de vegetación, fotografías aéreas y muestreo de campo. Para ubicar las parcelas se utilizó el compuesto TM7, TM4 y TM3. Se aplicó un algoritmo de máxima verosimilitud con las bandas TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7 para la imagen de la época húmeda y TM2, TM3, TM4 y TM7 para la imagen de la época seca.

La corrección geométrica de la imagen de la época húmeda se efectuó con 31 puntos de control ubicados en mapas escala 1:500 000. El error promedio fue de 40 m en X (este-oeste) y de 48 m en Y (norte-sur). La corrección de la imagen de la época seca necesitó 16 puntos y el error promedio fue de 13 m en X y de 11 m en Y.

Para poder utilizar los resultados obtenidos de las clasificaciones de las imágenes de las épocas seca y húmeda, y para elevar la precisión de la clasificación con información de altitud sobre el nivel del mar, se utilizó un módulo del programa GRASS, que permite tomar decisiones sobre la clasificación de cada píxel con base en información obtenida de varias capas geográficas.

Para limpiar la imagen obtenida y evitar los píxeles aislados que tuvieran un valor cartográfico relativo, se aplicó dos veces un filtro de mayoría que atribuye al píxel central, el valor más frecuente entre los 8 píxeles situados a su alrededor. Con base en lo anterior, el mapa definitivo se imprimió en escala 1:500 000.

Los usos del suelo presentes en el área en estudio fueron los siguientes: selva mediana subcaducifolia, selva baja caducifolia, selva baja espinosa, manglar (tres especies), pastizal, pino-encino y uso agropecuario. Sobresalieron como actividades antropogénicas la agricultura de temporal y de riego, así como cultivos de coco (palmares) y de mango; en los bordes de la selva baja caducifolia se cultiva ciruela. La selva baja caducifolia se extiende en áreas con pendientes mayores a un 50% y de elevada pedregosidad, lo que explica que haya resistido a la perturbación.

La selva baja espinosa es una formación presente en las partes bajas del relieve; en algunos lugares subsiste por la elevada pedregosidad, sobre todo en los abanicos aluviales. La selva mediana subcaducifolia o subperennifolia se encuentra en áreas más húmedas y más fértiles (menor pedregosidad y áreas planas). Por tanto esta asociación ha sido más fuertemente deforestada; en el límite con el mar ha sido substituida por palmares.

Las firmas espectrales de los campos de entrenamiento respecto al manglar en las épocas húmeda y seca, se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 2.** Campos de entrenamiento para la clasificación supervisada de la imagen de la época húmeda

| Clases                               | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 | TM7 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 Manglar 1 ( <i>Avicennia</i> )     | 24  | 18  | 72  | 28  | 7   |
| 5 Manglar 2 ( <i>Rhizophora</i> )    | 24  | 19  | 63  | 28  | 8   |
| 9 Manglar 3 ( <i>Laguncularia</i> )  | 24  | 21  | 36  | 20  | 6   |
| 10 Manglar 4 ( <i>Laguncularia</i> ) | 25  | 22  | 33  | 24  | 8   |

La varianza para cada banda de campo de entrenamiento fue menor que 16 (desviación estándar inferior a 4), a excepción de algunos casos como el manglar (banda TM4), pino-encino (banda TM5), nubes (todas las bandas) y vegetación de montaña (banda TM5), que se tuvieron en cuenta por el hecho de tener una firma espectral muy particular que no generó confusiones cuando se ejecutó el algoritmo de máxima verosimilitud.

Los campos de entrenamiento generaron subclases que se constituyeron de las clases de la clasificación definitiva de la imagen de la época húmeda (**Tabla 3**).

**Tabla 3.** Clases de la clasificación de la imagen de época húmeda

| Número | Clases                                  | Campos de entrenamiento |
|--------|---|-------------------------|
| 1      | Manglar ( <i>Rhizophora-Avicennia</i> ) | 1 5                     |
| 2      | Manglar ( <i>Laguncularia</i> )         | 9 10                    |

Respecto a la clasificación supervisada de la época seca, los campos de entrenamiento se ubicaron también sobre el compuesto TM7 (rojo), TM4 (verde) y TM2 (azul) (Tabla 4). El número de campos de entrenamiento fue de 36. Respecto a los tipos de vegetación presentes en el área, no existió una fuerte representatividad para la selva baja espinosa y para el bosque de pino-encino. La señal radiométrica para la agricultura de riego apareció elevada, sobre todo para las bandas TM2 y TM3, por lo que fue improbable el cultivo en el momento de la toma de la imagen. La distinción entre tipos de especies de manglares fue satisfactoria.

**Tabla 4.** Campos de entrenamiento de la clasificación de la imagen de época seca

| Número | Clases                            | TM2 | TM3 | TM4 | TM7 |
|--------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 1      | Manglar 1 ( <i>A. germinans</i> ) | 20  | 16  | 74  | 8   |
| 5      | Manglar 5 ( <i>R. mangle</i> )    | 24  | 21  | 59  | 13  |
| 6      | Manglar <i>L. racemosa</i> 2      | 24  | 21  | 66  | 14  |
| 7      | Manglar <i>L. racemosa</i> 3      | 24  | 21  | 64  | 14  |
| 8      | Manglar 4 ( <i>A. germinans</i> ) | 27  | 26  | 61  | 23  |
| 22     | Manglar 2 (manglar muerto)        | 33  | 37  | 41  | 22  |
| 23     | Manglar 3 (manglar muerto)        | 41  | 48  | 47  | 26  |
| 30     | Manglar <i>L. racemosa</i> 6      | 24  | 20  | 67  | 13  |
| 31     | Manglar <i>L. racemosa</i> 1      | 25  | 23  | 63  | 18  |
| 33     | Manglar <i>L. racemosa</i> 4      | 25  | 28  | 46  | 33  |
| 34     | manglar <i>L. racemosa</i> 5      | 26  | 30  | 62  | 37  |

Con la finalidad de obtener las clasificaciones definitivas de la imagen de la época seca, se conjuntaron los campos de entrenamiento en 12 clases, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Clases de la clasificación de la imagen de época seca

| Número | Clases                          | Campos de entrenamiento |
|--------|---------------------------------|-------------------------|
| 6      | Manglar <i>L. racemosa</i>      | 6 7 30 31               |
| 1      | Manglar muerto                  | 22 23                   |
| 2      | Manglar ( <i>A. germinans</i> ) | 5 8                     |
| 3      | Manglar ( <i>R. mangle</i> )    | 1                       |

Para unir las imágenes de las épocas seca y húmeda se distinguieron algunas clases, de manera más exacta en una determinada época del año. Basándose en esta premisa, se establecieron prioridades en las elecciones de las clasificaciones de las dos épocas. Hay que subrayar el funcionamiento del algoritmo de unión de las dos imágenes, el cual evalúa las condiciones especificadas, hasta encontrar una condición válida e ignorando las condiciones que siguen.

- Mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Se obtuvo de las dos imágenes, con correcciones de eventuales confusiones de pino-encino. En caso de que la clasificación del tipo de mangle difiriera entre las dos imágenes, se otorgó la prioridad de la especie *Laguncularia racemosa*.
- Mangle negro (*Avicennia germinans*). Se obtuvo de las dos imágenes, reclasificando eventuales errores de confusión con áreas de suelo desnudo, pino-encino y pastizales. En el caso de que estos manglares estuvieran sumergidos en la época húmeda, se clasificaron como cuerpos de agua.
- Mangle blanco (*Laguncularia racemosa*). Se reclasificó teniendo en cuenta criterios y prioridades establecidos para el mangle negro.

Los resultados finales proporcionaron las siguientes superficies: *Laguncularia racemosa* 73 031 ha, *Laguncularia racemosa-Rhizophora mangle* 14 308 ha, *Avicennia germinans* 68 351 ha. Flores *et al.* (1993) dividen en cinco subsistemas la composición del manglar del área nayarita, que se integra con la información geológica, hídrica y climática de la manera siguiente.

- En Teacapán se encuentra una zonación de las cuatro especies que se ven afectadas frecuentemente por las mareas, dada la mayor cercanía de la boca, con menor incidencia de *Laguncularia racemosa* y frecuente presencia de *Avicennia germinans*. El intervalo de salinidad es amplio, con mínimos de 3.5% en la época de lluvias (verano-otoño) y máximos de 38% en la época de secas (en el resto del año). Geológicamente se caracteriza por presentar una amplia barra que separa a los cordones interiores del área marina.

- Agua Brava con dominio de *Laguncularia racemosa* como bosque monoespecífico o combinado con *Rhizophora mangle* (aunque poco dominante); por el reducido nivel topográfico *Avicennia germinans* es particularmente escaso. Geológicamente es el área con mayor amplitud de la planicie costera entre los deltas de los ríos Acaponeta y San Pedro, que encierra el cuerpo lagunar con una geomorfología heterogénea.
- Canales, esteros y lagunas que desembocan a Agua Brava con predominancia de *Rhizophora mangle* en las riberas y detrás de ésta *Laguncularia racemosa*. Desde el punto de vista geológico se presentan el mayor número de cuerpos de agua aislados (charcas, arroyos, estanques, lagunetas) que se han formado por los desbordes y avenamiento anárquico del régimen fluvial, dando como consecuencia una fisiografía compleja.
- Marismas Nacionales constituido principalmente por *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*; cabe destacar que es el único subsistema donde se registra *Conocarpus erecta*. Por las características topográficas (antiguas bermas y canales), existe un marcado declive topográfico que permite una zonación del manglar. Existen dentro de este subsistema, áreas de cañadas cercanas a Marismas Nacionales constituidas por barras, bajos y nuevas áreas de colonización con asociaciones de manglares (parches), distribuidos en todas las regiones y caracterizados por una gran heterogeneidad de especies.
- Zonas de manglar muerto consecuencia de dos situaciones de la incidencia directa de fenómenos meteorológicos (huracanes y fenómenos ENSO) y construcciones de carreteras; ejemplo de ello en Playa Novillero y en el canal de Cuautla (Teacapán) que impide el paso libre de mareas transformándose en marismas con suelos hipersalinos.

Teniendo en cuenta la importancia que representa el manglar dentro de los sistemas acuáticos costeros, por su alta productividad primaria y aporte de materia orgánica o flujo de energía hacia las pirámides tróficas o cadenas alimentarias, dentro de las comunidades que sostiene, así como para las pesquerías, esta vegetación ha sido protegida a través de reglamentaciones en otros países, tanto en su manejo como en su conservación; situación que ha sido incipiente en las costas mexicanas. Por tal motivo, es necesario contar con estudios integrados del marco ambiental (geológico, fisicoquímico, hidrodinámico y climático), con registros detallados de su distribución y composición, que pueden ser realizados a través de técnicas altamente sensibles, como imágenes de satélite que ofrecen cuantificaciones globales en un momento dado y que significan a la larga, una estabilidad ecológica armonizada con el manejo del ambiente y una herramienta para el Ordenamiento Ecológico.

## Referencias

- Anderson, R. R., J. Carter y J. McGuinness (1973), "Application of ERTS to coastal wetlands ecology with special reference to plant community mapping and impact of man", *Proc. 3rd. ERTS Symp.*, Washington, D. C., pp. 1925-1942.
- Bath, M. (1974), *Spectral Analysis in Geophysics*, Elsevier Scientific Co., Amsterdam.
- Blasco, F. (1988), Estudio sobre los manglares y la vegetación tropical utilizando datos proporcionados por satélite, Institute de la Carte de la Vegetation, Inst. Internat. map Vegetat. Univ. Paul Savatier, s/p.
- Bloomfield, P. (1976), *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- Boaden, P. T. S. y R. Seed (1985), *An Introduction to Coastal Ecology*, Blackie, Nueva York.
- Carter, J. (1978), Coastal wetlands: role of the remote sensing. Proc. Coastal Zone 78, Symposium on Technical, Environmental, Socioeconomic and Regulatory Aspects of Coastal Zone Management, *Am. Soc. Civil Eng. Publ.*, San Francisco, pp. 1261-1283.
- Cintrón, G., A. G. Lugo y R. Martínez (1980), Structural and functional properties of mangrove forest. A Symposium Signalin the Completion of the flora of Panama, Universidad de Panamá, *Monographs in Systematic Botany Missouri Botanical Garden*, Publ. Spetial, no. 30 A, s/p.
- Comisión Federal de Electricidad (1994), Estudio de impacto ambiental en el suelo y en la productividad agrícola, en el área de influencia de la P. H. Ahuamilpa, Nayarit, tomo I, Depto. de Edafología, UNAM, México.
- Curry, J. P., F. Emmel y P. Crampton (1969), Holocene history of a stran plain, lagoonal coast, Nayarit, Mexico, *Memorias del Simp. Intern. de Lagunas Costeras*, UNAM, UNESCO, México, pp. 62-100.
- De la Lanza, E. G., (1992), "Variación climática de corto plazo y su trascendencia en la zona costera", *Ciencia*, 43:103-110.
- De la Lanza, E. G., P. Ramírez García, Y-F. Thomas y A. R. Alcántara (1993), "La vegetación de manglar en la laguna de Términos, Campeche. Evaluación preliminar a través de imágenes Landsat", *Hidrobiológica*, vol. 3 (1-2):29-40.
- FAO (1995), *Estudio piloto para un Plan de Desarrollo Acuicola en el Sistema Lagunar Teacapán-Agua Brava, Nayarit*, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, México.

- Flores Verdugo, F., E. Sainz y J. W. Day Jr. (1991), "Estructura forestal del bosque de manglar, distribución de provincias. Ecología de los manglares y perfil de comunidades en los Sistemas Lagunares de Agua Brava y Marismas Nacionales, Nayarit", Informe Técnico Final del Proyecto UNAM-CONACyT, clave PCECDNA-022068, Inst. de Ciencias del Mar y Limnol., UNAM, México.
- Flores Verdugo, F., F. González Farías, D. S. Zamorano y P. Ramírez García (1992), "Mangrove ecosystems on the Pacific Coast: distribution, structure, litterfall, and detritus dynamics", in Seeling, U. (ed.), *Coastal Plant Communities Latin America*, Academic Press, pp. 269-288.
- Flores Verdugo, F., O. Calvario Martínez y M. A. Cárdenas Cárdenas (1993), "Distribución geográfica y algunas características ambientales de los humedales de Nayarit y Sinaloa", *Boletín Humedales Costeros de México*, 1(1):11-16.
- García, E. (1977), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a la República Mexicana)*, Offset Larios, México.
- García, E. e I. Trejo (1990), "Climatología de satélite aplicada al estudio de la precipitación en México", *Memorias del XII Congreso Nacional de Geografía*, tomo 1, Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Tepic, Nayarit, México, s/p.
- INEGI, DETENAL (1981), Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escuinapa. F13-5, Nayarit, Durango, Sinaloa, Zacatecas y Jalisco, escala 1:250 000.
- INEGI, DETENAL (1988), Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Tepic. F13-8, Nayarit, Jalisco, escala 1:250 000.
- Jáuregui, E. (1980), "La climatología de ciclones en México y el ciclón Gilberto", *Memorias de la 2a. Reunión Nacional de Agroclimatología*, Universidad Autónoma Chapingo, México, abril, pp. 269-296.
- Ortiz Pérez, M. A. (1978), Geomorfología fluvial del curso bajo del Río Grande de Santiago, Nayarit, tesis de maestría, Colegio de Geografía, UNAM, México, 92 pp.
- Ortiz Pérez, M. A. (1979), "Fotointerpretación geomorfológica del curso bajo del Río Grande de Santiago, Nayarit", *Boletín del Instituto de Geografía*, núm. 9, pp. 65-92.
- Ortiz Pérez, M. A. y M. de L. Romo Aguilar (1994), "Modificaciones de la trayectoria meándrica en el curso bajo del Río Grande de Santiago, Nayarit, México", *Investigaciones Geográficas Boletín*, núm. 29, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 9-23.
- Quinn, W. H., D. O. Zopf, K. S. Short y R. T. Kuo Yang (1978), "Historical Trends and Statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesian droughts", *Fishery Bulletin* 76(3), pp. 663-678.

Rasmusson, E. M. (1984), "El Niño: The Ocean/Atmosphere Connection", *Oceanus* 27(2), pp. 5-12.

Romo Aguilar, M. de L. (1994), Geomorfología de la llanura de inundación del Río San Pedro, Nayarit, tesis de licenciatura, Fac. de Geografía, Univ. de Guadalajara, México, 66 pp.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (1966), Boletín Hidrológico, región del noroeste y estado de Nayarit, compendio, núm. 26.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (1970), Boletín Hidrológico, Región Hidrológica No. 11, Zonas de los ríos Presidio a San Pedro, núm. 30, tomo I.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (1970), Boletín Hidrológico, Región Hidrológica No. 11, Zonas de los ríos Presidio a San Pedro, núm. 30, tomo II.

Wei, W. W. S. (1990), *Time Series. Univariate and Multivariate Methods*, Addison-Wesley Publ. Co., 478 pp.