

# INVENTARIO DE LOS HUMEDALES COSTEROS DEL SISTEMA LAGUNAR ALTATA-ENSENADA DEL PABELLÓN, SINALOA, MÉXICO, A PARTIR DEL ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT TM DEL 2005

César Alejandro Berlanga-Robles \*, Arturo Ruiz-Luna y Priscila Trujillo-Batiz

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., (CIAD), Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental, Ave. Sábalo-Cerritos s/n, CP 82010, Mazatlán, Sinaloa, México.

(\*) Autor correspondiente: Email: [cesar@ciad.mx](mailto:cesar@ciad.mx)

## RESUMEN

Se presenta un inventario de los humedales costeros del sistema Altata-Ensenada del Pabellón, localizado en el golfo de California, México, realizado a partir de la clasificación no supervisada de imágenes Landsat TM del 2005 y la digitalización de datos auxiliares. El mapa temático de los humedales del sistema, representando cinco humedales naturales y dos humedales antropogénicos, se produjo con una exactitud total de 94% y con un valor del estimador del coeficiente de Kappa (K) de 0.92. Pese a lo anterior algunas clases fueron clasificadas con exactitudes moderadas y bajas. El conjunto de humedales del sistema se extiende sobre 224 000 ha, de las que el 60% corresponden a la franja costera marina y el 40% se sitúa sobre la franja intermareal. Se describen los patrones espaciales de los humedales naturales por medio de métricas del paisaje. De éstas, la dimensión fractal perímetro-área presentó valores indicadores de parches con formas complejas, características de humedales con bajo grado de perturbación, pese a lo cual las métricas de configuración estimadas indican una baja conectividad entre los parches que conforman el mosaico de humedales.

Palabras clave: humedales; percepción remota; Landsat TM; ecología del paisaje; fragmentación; ISE, México

## ABSTRACT

An inventory of the coastal wetlands of Altata-Ensenada del Pabellón lagoon system, at the gulf of California, Mexico, was completed using unsupervised classification of Landsat TM 2005 imagery and digitization of ancillary data. The thematic map, with five natural and two anthropogenic wetlands, was produced with an overall accuracy of 94% and an estimator of the Kappa coefficient (K) of 0.92. Even so, some classes were classified with accuracies moderate to low. The wetlands system extends around 224000 ha, 60% of these corresponding to the marine coastal fringe, and 40% located on the intertidal fringe. The wetlands spatial patterns are described based on landscape metrics assessment. The perimeter-area fractal dimension for different wetland classes displayed values associated to patches with complex forms, which are characteristic of barely perturbed environments, despite that, results for the configuration metrics indicate low connectivity among patches that constitute the wetlands mosaic.

Key words: wetlands; remote sensing; Landsat TM; landscape ecology; fragmentation; ISE, Mexico

Los humedales son componentes ambientales complejos y dinámicos que se caracterizan por sus altos niveles de productividad y diversidad biológica. Son fuente, sumidero y transformadores de material químico y biológico, regulan los suministros y flujos de agua en los paisajes costeros, proporcionan hábitat para una amplia variedad de flora y fauna, depuran aguas contaminadas, protegen la línea de costa y recargan los acuíferos subterráneos. También han sido descritos como sumideros de bióxido de carbono y estabilizadores climáticos en una escala global (Mitsch y Gosselink, 2000).

A pesar de lo anterior, los humedales están bajo múltiples e intensas presiones que han alterado procesos ecológicos clave conduciendo a la reducción de superficie y a la disminución de la resiliencia de los ecosistemas (Agardy *et al.*, 2005). Aunque no es posible estimar con precisión el impacto antropogénico sobre la extensión global de los humedales (Mitsch y Gosselink, 2000; Zedler y Kercher, 2005) estiman que la mitad del área de humedales en el planeta se ha perdido.

Para revertir la degradación de los humedales se han creado planes de manejo para garantizar su funcionalidad y permanencia, siendo fundamental

el levantamiento de inventarios que señalen en diferentes escalas espaciales, los distintos tipos de humedales que existen en un región y paralelamente describan sus patrones espaciales (Berlanga, 2006). El desarrollo de estos inventarios requiere de información sinóptica y espacialmente referenciada, para lo cual la percepción remota presenta varias ventajas por su capacidad para coleccionar, estructurar y analizar información espacial relevante en diferentes intervalos de tiempo y espacio (Mumby y Edwards, 2000).

Partiendo de las consideraciones anteriores, en el presente trabajo se planteó como objetivo realizar un inventario y caracterizar la estructura espacial de los humedales costeros del sistema Altata-Ensenada Pabellón, Sinaloa, México a partir del procesamiento digital de imágenes de satélite Landsat TM de 2005. Este sistema de lagunas costeras es uno de los humedales prioritarios de México debido a su alta diversidad de fauna, particularmente de aves acuáticas, ya que alberga a más del 40% de las aves acuáticas migratorias invernantes del país. Asimismo, el sistema requiere medidas urgentes de protección ya que las lagunas reciben aportes de aguas negras, principalmente de la vecina ciudad de Culiacán, así como diversos contaminantes generados por la intensa actividad agrícola y acuícola practicada en la región.

## ÁREA DE ESTUDIO

El sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón se localiza en el centro del estado de Sinaloa en la costa noroeste de México, entre los 24° 19' y 24° 41' de latitud norte y los 107° 28' y 108° 00' de longitud oeste (Fig. 1). El sistema está conformado por la bahía de Altata y la laguna Ensenada de Pabellón, es un sistema con profundidad media de 5 m, protegido del mar por barras arenosas que se comunica con el golfo de California a través de la boca de Barra (Tonina), que es la que une a ambos sistemas, y por la boca de Palmita (Fig. 1). Se han clasificado como lagunas costeras de plataforma de barrera interna con barrera Gilber Beaumont y de erosión diferencial, con boca de valle inundado con barrera (Lankford, 1977).

## MATERIAL Y MÉTODOS

El inventario de los humedales del sistema Altata-Ensenada de Pabellón se realizó por medio de la clasificación de imágenes de satélite Landsat TM del 2005, generando un mapa temático de los diferentes humedales a partir del cual se

estimaron métricas del paisaje con el fin de describir los patrones espaciales, incluyendo extensión, complejidad y conectividad.

## Generación del mapa temático de humedales.

A partir de imágenes de satélite Landsat TM de los path/row: 32/43 del 21 Marzo de 2005 y 33/43 de 28 de Marzo de 2005 se editó una escena multiespectral del área de estudio con seis bandas espectrales y resolución espacial de 30 m por pixel, proyectadas a la zona UTM 13 norte, Datum NAD27. La escena se ajustó a los límites de la subcuenca Río Culiacán por un proceso de enmascaramiento y una vez editada se clasificó con un método no supervisado usando el algoritmo Isocluster. Este algoritmo aplica un procedimiento de optimización interactiva para asignar vectores (conjunto de valores espectrales de un pixel, en este caso 6, denotado por  $x$ ) dentro de cúmulos candidatos, pasando de un cúmulo a otro hasta minimizar la suma de cuadrados del error:

$$SCE = \sum_{Ci} \sum_{x \in Ci} (x - m_i)^t (x - m_i) = \sum_{Ci} \sum_{x \in Ci} \|x - m_i\|^2$$

donde  $m_i$  es la media del  $i$ -ésimo cúmulo y  $x \in Ci$  es el patrón asignado al cúmulo (Richards y Jia, 1999).

Esta asignación comúnmente es hecha con base en la distancia Euclidiana pero en IDRISI-Andes se utiliza un procedimiento de máxima verosimilitud (Eastman, 1999).

Inicialmente, la totalidad de píxeles de la escena se clasificaron en 16 cúmulos que posteriormente fueron reclasificados a seis clases de humedales y una clase de coberturas terrestres. Las clases de humedales naturales se definieron con base en una modificación de la propuesta de Cowardin *et al.* (1979) y las clases de humedales antropogénicos se clasificaron siguiendo los criterios de la Convención Internacional de Ramsar (2004).

El mapa resultante fue corregido mediante fotointerpretación a fin de separar clases de humedales con alta similitud espectral y por medio de un filtrado con ventana de 3 x 3 píxeles con la moda como medida de estandarización, para reducir el efecto sal y pimienta, que se refiere a píxeles aislados de una clase embebidos en un parche de una clase diferente (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002, 2006, 2007). Posteriormente, el mapa temático fue complementado con otras tres

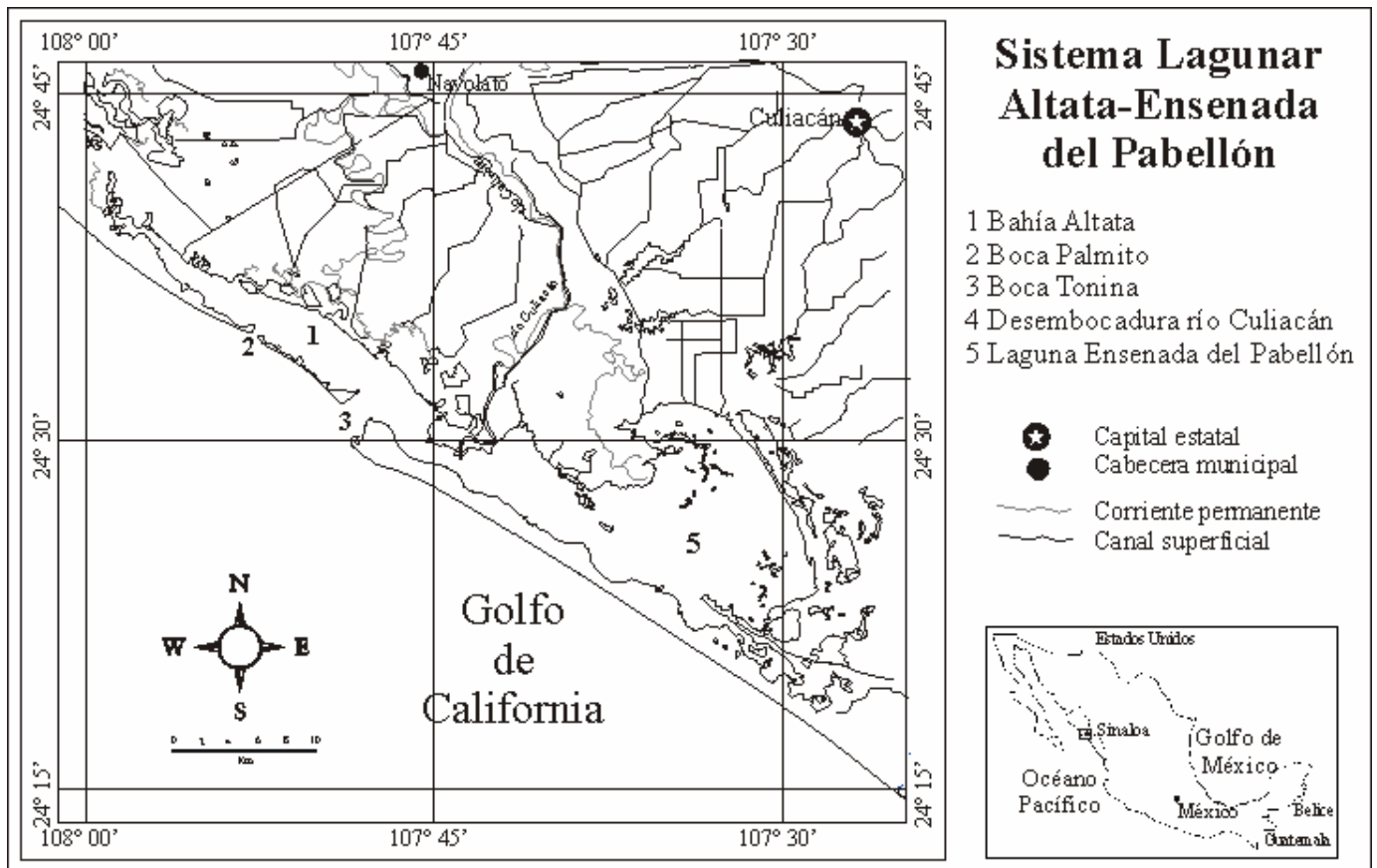


Fig. 1. Área de estudio. El sistema Altata Ensenada de Pabellón se localiza en el noroeste de México en la costa este del golfo de California.

clases de humedales, cuyos vectores se extrajeron de la edición del conjunto de datos vectoriales G1310hil escala 1:250 000 (INEGI, 1999) y la digitalización en pantalla de los polígonos de las granjas camarónícolas (Clase Estanques de acuacultura) identificadas en compuestos en falso color de las imágenes Landsat empleadas en el proceso de clasificación. El mapa temático de los humedales del sistema Altata-ensenada de Pabellón quedó conformado por nueve clases de humedales y una clase que agrupó a todas las coberturas terrestres.

La exactitud del mapa temático se evaluó generando una matriz de error a partir de la cual se estimaron la exactitud del productor y del usuario, la exactitud total y un el coeficiente de Kappa (Congalton y Green, 1999). La matriz se construyó para todos los píxeles del mapa temático por la tabulación cruzada (*crosstab*) de éste con un mapa de referencia editado a partir de los datos vectoriales temáticos de Vegetación y Uso del Suelo

G1310 escala 1:250 000 editados por INEGI (1999) actualizados con datos obtenidos con muestreos de campo asistidos con un sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) marca Garmin modelo Rino 130 con precisión de 5 m.

**Estimación de métricas de paisaje**

Con el fin de contar con mayores elementos para futuros programas de monitoreo y conservación de los humedales del sistema, el inventario se complementó con la descripción de patrones espaciales de los humedales a través de la estimación de métricas del paisaje. Los paisajes, intrínsecamente heterogéneos, pueden representarse a través de mapas categóricos y a partir de estos capturar la información de algún patrón espacial en una sola variable denominada índice o métrica del paisaje, que son útiles para describir y monitorear la estructura de los paisajes, así como para evaluar los impactos a los que están sujetos

(Frohman, 1998; Herzog *et al.*, 2001; Turner *et al.*, 2001; McGarical, 2002; Geneletti, 2004; Liu y Anderson, 2004).

A partir del mapa temático de los humedales con resolución espacial de 30 m y con el uso del programa Fragstats 3.3 (McGarical and Marks, 1995) se calcularon métricas a nivel de clase y paisaje (conjunto de humedales) para un modelo de paisaje de mosaico con la regla de vecindad de ocho parches y un umbral mínimo de tamaño de parche de cuatro píxeles. Una amplia descripción e interpretación de las métricas calculadas se encuentran en McGarical y Marks (1995) y en Jaeger (2000).

## RESULTADOS

El proceso de clasificación de la escena Landsat dio lugar a 15 cúmulos (clases espectrales), de los 16 propuestos al inicio de las interacciones de la clasificación, que fueron asociados a diferentes tipos de humedales (Tabla 1). Posteriormente, estos fueron reclasificados a las clases Franja acuática costera, Litoral, Laguna costera, Litoral-Marismas con sustrato no consolidado y Marismas con humedal emergente persistente y humedal forestal. Dada la similitud espectral entre las clases Litoral y Marismas con sustrato no consolidado, éstas fueron separadas por fotointerpretación. Con la adición de las clases Corriente de agua permanente, Canales de transportación y drenaje y Estanques de acuicultura, derivadas de la edición de datos vectoriales y digitalización en pantalla, el mapa temático final quedó representado con tres ámbitos, tres sistemas, cinco subsistemas, cinco clases de humedales naturales (con cuatro ecotopos o subclases) y dos clases de humedales artificiales (Fig. 2).

El mapa final se produjo con exactitud total del 94% y un estimador del coeficiente de Kappa ( $K^2$ ) de 0.92. A nivel de clase, el humedal clasificado con la menor exactitud fue el denominado Humedal emergente persistente (ecotopo de la Clase Marismas), que presentó una exactitud del productor del 40% y del usuario del 10%. Por el contrario, las clases que se incorporaron al mapa a partir de la digitalización de datos auxiliares presentaron exactitudes del productor y usuario de 100% (Tabla 2).

Para la estimación de las métricas del paisaje se excluyó a la Clase de coberturas terrestres (fondo)

asignándole valores negativos, la cual representó el 37% del total del área comprendida en la escena analizada. Las clase Franja acuática costera, que incluye a las aguas litorales y hábitat marinos de agua profunda aledaños, por estar constituida con un solo parche de aproximadamente 132 000 ha, junto con las clases Corriente de agua y Canales de transportación y drenaje, que más que parches actúan como corredores, fueron incluidas para estimar el área total del paisaje, pero no para la evaluación de métricas (Tabla 3).

Considerando la artificialidad de los límites del área de estudio, el mosaico de humedales del sistema Altata-Ensenada de Pabellón se extiende en 224 000 ha, de las que cerca del 60% correspondieron a la Franja marina costera. De la superficie restante, la Clase Laguna costera representó casi la mitad, con menos de 40 000 ha distribuidas en 546 parches, incluyendo al de mayor tamaño que equivalió al 15% del área total de humedales. Ninguna clase presentó dominancia marcada toda vez que la diversidad de Shannon-Weaner se aproximó al valor de máxima diversidad para seis clases (1.79) y por lo tanto el valor de equidad fue cercano al máximo valor de uno.

El número total de parches fue de poco más de 3 400, de los que el 40% correspondieron al ecotopo Humedal emergente permanente de la Clase Marismas, cuyo parche mayor únicamente representó el 0.37% del área total. Los parches tendieron a mostrar formas complejas, con valores de la dimensión fractal perímetro-área que variaron entre 1.32 y 1.47 a nivel de clases. En general el mosaico de humedales está dominado por parches pequeños, donde el 90% de los parches representa tan solo el 4% del área efectiva analizada. Este patrón influyó sobre las métricas de agregación del índice de división, el tamaño efectivo de malla y el índice de partición, que presentaron valores característicos de paisajes altamente fragmentados. En el caso del índice de división se estimaron valores iguales al máximo valor teórico (1.0) para cinco de las seis categorías analizadas; mientras que el tamaño efectivo de malla estimado para el conjunto de humedales sólo representó el 2.5% del área total de humedales.

## DISCUSIÓN

En México no existe consenso sobre el sistema de clasificación de humedales que se debe emplear para inventariar estos ambientes, por lo que en

Tabla 1. Clasificación de humedales del sistema Altata-Ensenada de Pabellón, Sinaloa, México, en función de sus valores espectrales (promedio y desviación estándar) registrados por el satélite Landsat TM (bandas 1-5, 7)

Cúmulo	B1	B2	B3	B4	B5	B7	Humedales asociados
1	60.8	19.3	12.2	6.9	5.5	3.8	Superficies acuáticas: Franja acuática costera, Laguna costera
	3.7	1.6	1.9	1.9	2.2	1.7	
2	70.7	26.9	18.7	8.7	6.9	4.6	Superficies acuáticas: Franja acuática costera, Laguna costera
	4.2	2.5	3.1	2.1	2.8	2.0	
3	87.2	44.0	48.7	59.2	80.0	40.1	Vegetación: Marisma con humedal emergente permanente
	10.3	11.1	8.8	13.9	20.7	11.6	
4	94.8	46.4	57.8	66.5	105.1	58.2	Sustrato expuesto: Litoral, Marisma con sustrato no consolidado
	7.9	6.6	5.6	9.7	11.6	5.7	
5	66.8	28.8	27.0	53.8	40.9	16.3	Vegetación: Marisma con humedal forestal
	5.3	3.9	5.5	7.7	11.8	5.5	
6	80.0	37.6	38.8	27.4	14.2	7.6	Superficies acuáticas someras y eutroficadas: Laguna costera
	21.2	10.5	15.6	14.9	10.5	5.3	
7	73.6	32.5	36.3	58.8	80.1	36.4	Vegetación: Marisma con humedal emergente permanente
	5.5	3.9	4.9	14.3	17.8	6.9	
8	65.7	28.1	24.1	71.0	42.4	15.8	Vegetación: Marisma con humedal forestal
	3.2	2.1	2.8	8.3	5.7	3.2	
9	131.5	68.1	91.3	90.6	155.6	89.9	Sustrato expuesto: Litoral, Marisma con sustrato no consolidado
	23.9	13.7	15.7	13.3	21.7	16.1	
10	66.8	31.6	27.0	79.4	65.7	24.9	Vegetación: Marisma con humedal forestal
	4.5	5.7	4.6	18.1	12.1	5.3	
11	72.8	32.7	30.5	11.1	5.2	3.3	Superficies acuáticas someras y eutroficadas: Laguna costera
	3.6	3.0	4.4	3.3	1.2	1.0	
12	104.1	47.5	68.2	75.5	132.2	75.8	Sustrato expuesto: Litoral, Marisma con sustrato no consolidado
	12.6	6.7	9.1	8.9	13.7	7.2	
13	109.9	55.4	71.1	68.0	110.6	65.5	Sustrato expuesto: Litoral, Marisma con sustrato no consolidado
	8.6	4.7	4.6	5.0	7.2	7.1	
14	113.3	58.9	77.9	76.3	132.0	81.4	Sustrato expuesto: Litoral, Marisma con sustrato no consolidado
	10.9	5.7	5.2	4.6	9.6	6.8	
15	66.8	27.9	24.6	18.6	11.3	5.5	Superficies acuáticas someras y eutroficadas: Laguna costera
	5.7	3.6	4.4	12.0	7.9	3.3	

este estudio se usó un esquema basado en la clasificación de Cowardin *et al.* (1973) modificada con criterios geomorfológicos e hidrológicos de acuerdo a la propuesta de Semeniuk y Semeniuk (1995) y adicionando las clases de humedales artificiales de la convención sobre Humedales de Ramsar (2004). El esquema propuesto permitió clasificar a todos los humedales del sistema sin ambigüedades, a la vez que permitió caracterizar a los humedales en categorías paisajísticas dentro de una estructura jerárquica conformada por cuatro niveles (Naveh y Lieberman, 1994): ecotopo, faceta acuática (que corresponde al nivel de clase en la clasificación de humedales empleada), sistema acuático y paisaje (este último nivel incluyendo las coberturas terrestres circundantes).

Por otro lado, los procedimientos seguidos para generar el mapa temático permitieron obtener niveles de exactitud global que indica una fuerte

coincidencia entre los datos de la clasificación y referencia. El valor obtenido para el estimador del coeficiente de Kappa ( $K'$ ), indica una clasificación casi perfecta de acuerdo a las categorías propuestas por Landis y Koch (1977), siendo en buena medida resultado de la incorporación de los datos vectoriales auxiliares. Aún excluyendo del análisis de exactitud a las clases representadas por los datos vectoriales la clasificación mantuvo valores altos de exactitud ( $K'=0.83$ ). Los indicadores estimados a nivel global estuvieron influidos por las exactitudes de productor y usuario obtenidas para las clases asociadas a superficies acuáticas (>90%), el resto de las clases identificadas tuvieron exactitudes moderadas y aún bajas, por lo que la información derivada del presente estudio debe usarse considerando los distintos indicadores de exactitud, tanto a nivel de paisaje como de clase.

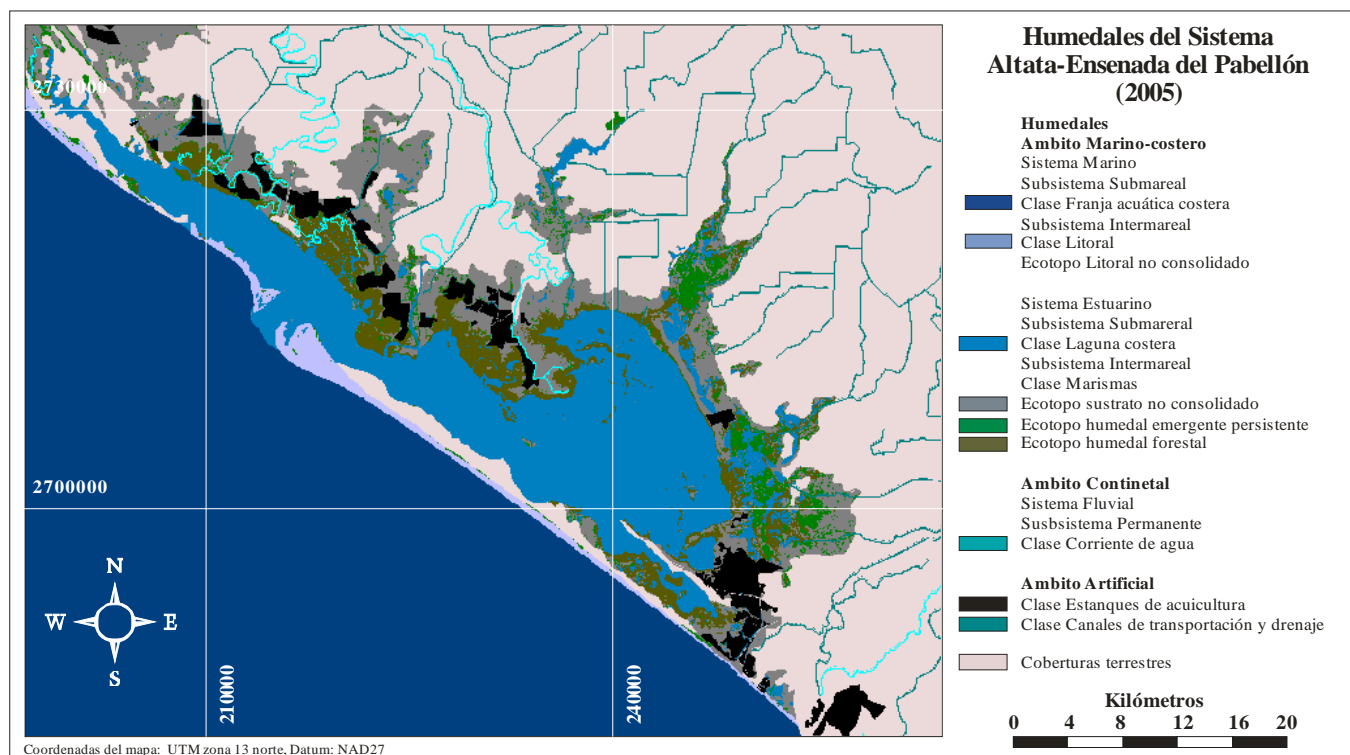


Fig. 2. Mapa temático de los humedales del sistema Altata Ensenada de Pabellón, Sinaloa, México generado por la clasificación no supervisada (Isocluster) de una escena Landsat TM de 2005 y la digitalización de datos auxiliares. El ancho de las clases Corriente de agua y Canales de transportación y drenaje está sobredimensionado para hacerlas evidentes en el mapa.

Además de identificar, mapear y cuantificar la extensión de los humedales del sistema, el inventario se complementó con indicadores de la estructura espacial del sistema con el fin de describir con mayor detalle el estado actual del sistema y contar con indicadores que permitan cuantificar el impacto de origen natural y antropogénico en futuros programas de monitoreo. Sin considerar la Franja acuática costera, la mayor proporción de la superficie correspondió a la Clase Laguna costera y el ecotopo de Sustrato no consolidado de la Clase Marismas; la primera representada básicamente por el sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón, humedal que integra el parche de mayor tamaño y de menor grado de fragmentación: el tamaño efectivo de malla correspondió al 14% del área de la clase.

La dimensión fractal perímetro-área es una métrica que sintetiza información sobre la regularidad del borde de los parches que toma valores teóricos de uno a dos, los valores próximos a dos indican mayor complejidad, asociados a

parches con un mayor grado de naturalidad (Hargis *et al.*, 1998). Con excepción de los Estanques para acuicultura, los valores de dimensión fractal estimados indican humedales con formas complejas, lo que genera disponibilidad de ambientes de frontera asociados con funciones ecológicas características de los humedales como el transporte de materiales y especies (Liu y Cameron, 2001). Asimismo, los valores obtenidos en este estudio son mayores a los estimados para humedales caracterizados con impacto medio y alto (Liu y Cameron, 2001; Berlanga, 2006).

Pese a lo anterior, la conformación del paisaje por numerosos parches pequeños disminuyen la conectividad y las métricas basadas en la distribución acumulativa del área de los parches como el índice de división, el tamaño efectivo de malla y el índice de partición tomaron valores que indican alto grado de fragmentación (Jaeger, 2000). A pesar de que estas tres métricas están fuertemente correlacionadas su uso simultaneo puede ser útil debido a sus diferentes interpreta-

Tabla 2. Matriz de error para la clasificación de humedales del sistema Altata-Ensenada de Pabellón, Sinaloa, México.

		Datos de referencia*										
		CT	FA	LI	LC	M-snc	M-he	M-hf	CA	CD	ES	Total
Mana temático	CT	14582 74	211	1301	4460	2084 2	2673	5975	0	0	0	14937 36
	FA	122	14661 00	1450	24	496	0	0	0	0	0	14681 92
	LC	1762	2757	2994 7	3588	3100	0	0	0	0	0	41154 43272
	EA	1464	4245	984	3959 62	9	2406	7921	0	0	0	1
	M-snc	6229	21	4272	1393 2	1980 61	1102	2359	0	0	0	25712 7
	M-he	1457	0	3192	6358 7	3154 7	1503 6	4378	0	0	0	61968 12469
	M-hf	599	0	807	1077 7	2432 6	5454	8273 1	0	0	0	4
	CA	0	0	0	0	0	0	0	513 9	0	0	5139
	CD	0	0	0	0	0	0	0	0	1595 4	0	15954
	ES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8596 9	85969
	Total	14699 07	14733 34	4195 3	4351 01	2981 11	3658 9	1245 97	513 9	1595 4	8596 9	39866 54
	EP	99.2	99.5	71.4	91.0	66.4	41.1	66.4	100. 0	100. 0	100. 0	
	EU	97.6	99.9	72.8	91.5	77.0	10.3	66.3	100. 0	100. 0	100. 0	

Exactitud total = 94%; K' = 0.92

Notas: CT. Coberturas terrestres; FA. Franja acuática costera; LI. Litoral; LC. Laguna costera; M-snc. Marisma con sustrato no consolidado; M-he. Marisma con humedal emergente permanente; M-hf. Marisma con humedal forestal; CA. Corriente de agua; CD. Canales y drenajes; ES. Estanques para la acuicultura; EP. Exactitud del productor; EU. Exactitud del usuario.

ciones y escalas (Neel *et al.*, 2004). El índice de división, por ejemplo, puede interpretarse como una probabilidad de que dos píxeles de una misma clase seleccionados al azar no se sitúen en un mismo parche, encontrándose en este estudio el máximo valor en prácticamente todos los tipos de humedales identificados. En tanto que el tamaño efectivo de malla, con excepción de la Clase Laguna Costera, representó menos del 1% del área correspondiente a cada humedal.

Finalmente debe señalarse que la introducción de humedales artificiales como canales, drenes y granjas camarónicas aumentaron la “riqueza específica” de humedales del sistema, lo que no necesariamente significa un aumento de este tipo de ambientes en el paisaje. Particularmente en el

estado de Sinaloa, la camaronicultura que por su extensión es la más significativa de las clases de humedales artificiales, ha sustituido coberturas naturales como marismas y lagunas (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002; Alonso-Pérez *et al.*, 2003, Berlanga, 2006), lo que además de generar la pérdida de humedales naturales provoca la perforación y disección de los mismos.

**CONCLUSIONES**

La franja de intermareal del sistema Altata-Ensenada del Pabellón está integrada por cinco humedales naturales y dos antropogénicos que en conjunto cubren más de 134 000 ha, encontrándose una dominancia de las coberturas acuáticas permanentes asociadas al medio

Tabla 3. Métricas del paisaje estimadas para humedales del sistema Altata-Ensenada de Pabellón, Sinaloa, México, estimadas a nivel de clase y paisaje. LI. Litoral; LC. Laguna costera; M-snc. Marisma con sustrato no consolidado; M-he. Marisma con humedal emergente permanente; M-hf. Marisma con humedal forestal; CA. Corriente de agua; CD. Canales y drenajes; ES. Estanques para la acuicultura; CH. Conjunto de humedales.

Métrica	Clase						
	LI	LC	M-snc	M-he	M-hf	ES	CH
Área (ha)	3704	38908	23074	5428	11148	7737	224363
Proporción (%)	1.65	17.34	10.28	2.42	4.97	3.45	100.00
Número de parches	8	546	736	1370	719	37	3416
Índice de parche mayor	1.15	15.38	1.80	0.37	1.22	0.51	15.38
Dimensión fractal <sup>1</sup>	n.d.	1.38	1.42	1.47	1.45	1.32	1.40
Índice de división	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97
Tamaño efectivo de malla	32	5309	207	5	63	20	5636
Índice de partición	6947	42	1084	43125	3554	11428	40
				Paisaje			
Contagio				51.9			
Diversidad <sup>2</sup>				1.5			
Equidad				0.8			

Notas: <sup>1</sup>Dimensión fractal perímetro área. <sup>2</sup>índice de diversidad de Shannon-Weaner.

estuarino. A pesar de conservar sus formas complejas, asociadas a un bajo grado de perturbación, los humedales conforman un mosaico fragmentado, en el que la adición de humedales artificiales ha aumentado la riqueza de humedales, pero también han contribuido a reducir la conectividad del sistema, pues su construcción implica la perforación y disección por remoción de los humedales naturales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo al proyecto SEMARNAT 2002 C01- 0112/A-1.

## REFERENCIAS

Agardy, T., J. Alder, P. Dayton, S. Curran, A. Kitchingman, M. Wilson, A. Catenazzi, J. Restrepo, C. Birkeland, S. Blaber, S. Saifullah, G. Brach, D. Boersma, S. Nixon, P. Dungan, N. Davidson and C. Vörösmarty (2005): Coastal system. In: *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*, (R. Hassan, R. Scholes and N. Ash, eds.), Volume 1. Island Press, London, pp:513-549.

Alonso-Pérez, F., A. Ruiz-Luna, J. Turner, C. A. Berlanga-Robles and M. G. Mitchelson-Jacob

(2003): Land cover changes in The Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico: assessing the effect of the establishment of shrimp aquaculture. *Ocean Coast. Manage.*, 46: 583-600.

Berlanga-Robles, C.A. and A. Ruiz-Luna (2002): Land use and mapping and change detection in the coastal zone of northwest Mexico using remote sensing techniques. *J. Coast. Res.*, 18: 514-522.

Berlanga-Robles, C.A. y A. Ruiz-Luna (2006): Evaluación de los cambios en el paisaje del sistema estuarino de San Blas, Nayarit, México por medio del análisis de imágenes de satélite Landsat MSS. *Cienc. Mar.*, 32: 523-53.

Berlanga-Robles, C.A. y A. Ruiz-Luna (2007): Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Univ. Cienc.* 23:29-46.

Congalton, R.G. and K. Green (1999): *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. Lewis Publisher, USA, 137 pp.

Cowardin, L.M., V. Carter, F.C. Golet and E.T. LaRoe (1979): *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States*. U. S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D. C., 131 pp.

- Eastman, J.R. (1999): *Idrisi32. Guide to GIS and image processing*. Clark University, USA, 139 pp.
- Frohm, R.C. (1998): *Remote sensing for landscape ecology*. Lewis Publishers, USA, 99 pp.
- Geneletti, D. (2004): Using spatial indicators and value functions to assess ecosystem fragmentation caused by linear infrastructures. *Int. J. Appl. Earth. Obs.*, 5:1-15.
- Hargis, C.D., J.A. Bissonette and J.L. David (1998): The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecol.*, 13: 167-186.
- Herzog, F., A. Lausch, E. Müller, H.H. Thulke, U. Steinhardt and S. Lehmann (2001): Landscape metrics for assessment of landscape destruction and rehabilitation. *Environ. Manage.* 27: 91-107.
- Jaeger, J.A.G. (2000): Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecol.*, 15:115-130.
- Klemas, V.V. (2001). Remote sensing of landscape-level coastal environmental indicators. *Environ. Manage.*, 27:47-57.
- Landis, J.R. and G.G. Koch (1977): The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33:159-174.
- Lankford, R.R. (1977): Coastal lagoons of Mexico, their origin and and clasification. In: *Estuarine Processes II: Circulation, sediment and transfer of material in estuary*. Academic Press Inc., New York, 182-215 pp.
- Liu, A.J. and G.N. Cameron (2001): Analysis of landscape patterns in coastal wetlands of Galveston Bay, Texas (USA). *Landscape Ecol.*, 16: 581-595.
- McGarigal, K. (2002): Landscape pattern metrics. In: *Encyclopedia of environmetrics* (El-Shaarawi a. H. y W.W. Piegorsch, eds.), Vol. 2., John Wiley and Sons, London, pp: 1135-1142.
- McGarigal, K. and B.J. Marks (1995): FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *General Technical Report PNW-GTR-351*, Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station, USA, 122 p.
- Mitsch, W.J. and J.G., Gosselink (2000): *Wetlands*. John Wiley and Sons, New York, 920 pp.
- Mumby, P.J. and A.J. Edwards (2000): Remote sensing objectives of coastal managers. In: *Remote sensing handbook for tropical coastal management* (E.P. Green, P.J. Mumby, A.J. Edwards and C.D. Clark, eds.), *Coastal Management Sourcebooks 3*, UNESCO, Paris, pp. 31-39.
- Naveh, Z. and A.S. Lieberman (1994): *Landscape ecology. Theory and application*. Springer-Verlag, New York, 360 p.
- Neel, M.C., K. McGarigal and S.A. Cushman (2004): Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. *Landscape Ecol.*, 19:435-455.
- Ramsar Convention Secretariat (2004): *Ramsar Handbooks for the Wise Use of Wetlands*. Ramsar Convention Secretariat, Switzerland, 60 pp.
- Richards, J.A. and X. Jia (1999): *Remote sensing digital image analysis*. Springer, Berlin, 363 pp.
- Semeniuk, C.A. and V. Semeniuk (1995): A geomorphic approach to global wetland classification. *Vegetatio* 118, pp.103-124.
- Turner, M.G., R.H. Gardner and R.V. O'Neill (2001): *Landscape ecology in the theory and practice*. Pattern and process. Springe-Verlag, New York, 401 p.
- Zedler, J.B. and S. Kercher (2005). Wetland resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 30:39-74

Aceptado: 12 de noviembre de 2007