

Análisis espectral del arrecife coralino de Cayos Arcas, Campeche, México

Raúl Aguirre-Gómez*
Luis Miguel Morales Manilla*

Recibido: 12 de agosto de 2004
Aceptado en versión final: 11 de marzo de 2005

Resumen. La utilización de sensores remotos aerotransportados con alta resolución espectral o hiperespectrales, ha venido incrementándose, paulatinamente, en estudios de elementos sobre la superficie terrestre. En particular, el estudio de cuerpos de agua mediante estos instrumentos ha recibido un gran impulso en los últimos años, en diversos campos de investigación. El objetivo de este trabajo es mostrar una caracterización espacial del arrecife coralino de Cayos Arcas utilizando el sensor hiperespectral aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*). Los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes muestran que es posible la detección de sedimento (distribución y patrones de transporte), la bathimetría y las características fisiográficas de la región entre los aspectos más importantes.

Palabras clave: Cayos Arcas, arrecife coralino, sensores hiperespectrales, percepción remota.

Spectral analysis of the Cayos Arcas, Campeche, Mexico

Abstract. Utilisation of high-spectral resolution airborne remote sensors has steadily been increased in studies of elements on the Earth' surface. Particularly, the study of water bodies using these instruments has recently received special attention, in a number of research activities. The aim of this paper is to show a spectral characterization of the coral reef Cayos Arcas using the hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI). Image processing results show the possibility of sediment detection (distribution and transport patterns), bathymetry, and physiographic characteristics of the region among the principal features.

Key words: Cayos Arcas, coral reef, hyper-spectral sensors, remote sensing.

* Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior, Cd. Universitaria, 04510, México, D. F. E-mail: raguirre@igiris.igeograf.unam.mx; moraman@servidor.unam.mx

INTRODUCCIÓN

La utilización de sensores remotos aerotransportados con alta resolución espectral (hiperespectrales) se ha venido incrementado paulatinamente en estudios de elementos sobre la superficie terrestre. El estudio de cuerpos de agua mediante estos instrumentos ha recibido un gran impulso en los últimos años. Existe una amplia gama de posibilidades para los estudios marinos y costeros usando este tipo de sensores. Entre las diferentes aplicaciones están:

- a) cuantificación de la concentración de clorofila a (Matthews *et al.*, 2001a),
- b) detección de pigmentos fitoplanctónicos (Aguirre-Gómez *et al.*, 2001),
- c) estimación de batimetría (George, 1997; Liceaga and Euan, 2002),
- d) reconocimiento de vegetación sumergida (Alberotanza *et al.*, 1999),
- e) evaluación de la salud de corales (Holden and LeDraw, 1998),
- f) mapeo de hábitats marinos (Mumby *et al.*, 1998).

Las técnicas de evaluación varían en función de la información que desea obtenerse. Los métodos utilizados con más frecuencia en este tipo de estudios son el análisis por derivadas, componentes principales, análisis por cúmulos y cociente de bandas, principalmente. Estos métodos adquieren mayor relevancia al ser aplicados con datos obtenidos a través de sensores hiperespectrales. En particular, la utilización de sensores remotos aerotransportados como el *Compact Airborne Spectrographic Imager* (CASI) permiten una alta resolución tanto espectral como espacial y tienen un gran potencial para estudios ambientales.

ÁREA EN ESTUDIO

El arrecife coralino Cayo Arcas está localizado en la sonda de Campeche a 180 km al norte de Ciudad del Carmen ($20^{\circ} 12' 15''$ N; $-91^{\circ} 57' 44''$ W). Por su localización el arrecife es estratégico (Figura 1) y, por consiguiente, es custodiado por la Secretaría de Marina. Este pequeño complejo de arrecifes consta de tres

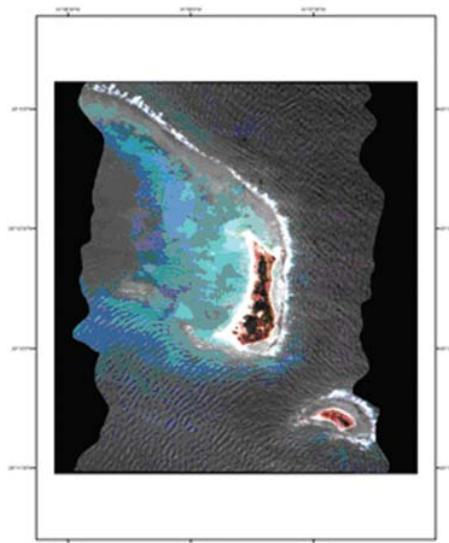


Figura 1. Ubicación del arrecife coralino de Cayos Arcas al norte de Ciudad del Carmen.

cayos arenosos someros con plataforma coralina. El área cubierta por el complejo es de aproximadamente 6.5 km², de los cuales sólo 18 ha son de tierra emergida. Su clima, de acuerdo con INEGI (1981), es seco y muy cálido, con lluvias en verano y escasas a lo largo del año, es isotérmico con una variación de 5° C entre el mes más frío y más cálido, y presenta una sequía interestival (canícula).

En este sitio se llevan a cabo actividades de abastecimiento y transporte de productos petrolíferos, para lo cual Petróleos Mexicanos (PEMEX) mantiene un buque-tanque anclado en las inmediaciones del arrecife. Cayo Arcas se considera como la terminal portuaria más importante de exportación de crudo del país.

Cayo Arcas posee una estructura orgánica con restos coralinos que se extiende a profundidades entre 15 y 18 m, donde se localiza la base arrecifal, la cual está enclavada en un basamento formado por una placa rocosa sumergida. La pendiente norte es suave en la isobata de 27 m, pero decae abruptamente a las orillas de la placa. La pendiente sur tiene una pendiente regular hasta los 40 m.

La estructura coralina mejor desarrollada se encuentra al NE de Cayos Arcas y tiene aproximadamente 3 km de largo. La parte norte del Cayo se curva hacia el SE. En la parte SO (sotavento) se presentan bajos niveles de energía en el embalse arrecifal. En esta zona, de acuerdo con Farell *et al.*, (1983) debería existir una cresta arrecifal arborescente (*Acropora palmata*) sobre el extremo norte de la semi-laguna y que correspondería a un frente arrecifal reducido y modificado. Actualmente este borde no existe y es probable que su ausencia se deba a las actividades petroleras en la región, aunadas a los fuertes eventos meteorológicos ocurridos en los últimos años como los huracanes Ophal y Roxana, entre otros.

El arrecife tiene tres islas emergentes, cuyos nombres se extienden también a las tres formaciones arrecifales a las que pertenecen: Cayo Centro (o Cayo Arcas), Cayo Este (o Cayo Negro) y Cayo Oeste (o Cayo Barro). El arrecife

Arcas es la mayor isla, tanto en extensión como en amplitud, y presenta una vegetación extensa y diversa con algunas especies introducidas como son: casuarinas, palmas de coco, uva marina, etc. Tiene una altura aproximada de 3.8 m, su topografía muestra dos montículos con dos depresiones en la isla; la parte exterior presenta depresiones que llegan por debajo del nivel del mar. Los dos montículos son originados por la influencia de los fuertes vientos que se presentan en las tormentas tropicales y los huracanes.

En años recientes se ha observado la disminución y blanqueo de las colonias de corales de la región. Este efecto podría estar asociado con las actividades de producción en las plataformas petroleras, con las actividades de abasto de petróleo en el buque cautivo, pero, principalmente, con la presencia de huracanes y/o como consecuencia de eventos climáticos severos como el ENOS (Clark *et al.*, 2000; Tada *et al.*, 2003).

El deterioro del sistema arrecifal puede analizarse en forma sinóptica mediante el uso de sensores remotos (Mumby *et al.*, 2001; Mumby and Edwards, 2002). Este tipo de análisis brinda la posibilidad de tener información integrada de zonas con dimensiones similares.

Por consiguiente, el objetivo de este trabajo es realizar una caracterización espacial del arrecife coralino de Cayos Arcas utilizando el sensor hiperespectral aerotransportado CASI.

METODOLOGÍA

Caracterización espectral

El trabajo se llevó a cabo del 9 al 12 de mayo de 2002 en la zona de Cayos Arcas. El análisis espectral sobre el área de estudio se realizó con el sensor hiperespectral CASI (*Borstad Associates Ltd*). Este sensor adquiere imágenes multiespectrales (*Borstad et al.*, 1994) y está equipado con una computadora auxiliar que registra y sincroniza los datos auxiliares del sistema de navegación de la aeronave. Posee

además un giroscopio de doble eje para corregir la imagen por los movimientos de balanceo y torsión del avión), un sensor de iluminación incidente para los cálculos de reflectancia y un receptor de Sistema de Posición Global (GPS, por sus siglas en inglés).

El sensor CASI cubre un rangopectral de 403 nm a 946 nm (que abarca el intervalo visual del ojo humano y del infrarrojo cercano) operando como visualizador multiespectral con hasta 15 bandas. Este sensor se montó en una avioneta ligera Piper Navajo PA-31 desde la cual se realizaron las mediciones. Se realizaron varias líneas de vuelo en dirección sur-norte y varias más en la dirección norte-sur. La línea de vuelo con mejor cobertura fue la línea 4 en dirección N-S, por lo que fue seleccionada para el análisis digital. El sensor CASI fue utilizado en modo espacial utilizando las bandas mostradas en la Tabla 1. Las bandas fueron elegidas de acuerdo con sus características de reflectancia o absorción para detectar la presencia de vegetación emergida y sumergida, la posible presencia de hidrocar-

buros y para evaluar el color del mar. El instrumento se configuró con una lente de ángulo de 35°. El tiempo de integración del instrumento (el tiempo requerido para colectar luz suficiente para realizar y registrar mediciones) fue de 400 mseg. Esta configuración permitió tener 14 bandas espetrales con una resolución espacial (tamaño de píxel) de 24 m en el eje vertical y de 4 m en el eje horizontal, determinada por la altitud de la aeronave (3 300 m) y la velocidad sobre el terreno de 80 km/h.

De las bandas espetrales elegidas 12 se localizaron en la parte visible del espectro (bandas: 1-12) y dos en el infrarrojo cercano (bandas: 13-14). Esta selección de bandas espetrales permite tener mediciones sobre la penetración luminosa en el agua (bandas 1-6); detección de absorción y reflectancia de clorofila a (bandas 2, 11 y 7, 8, respectivamente); detección de vegetación terrestre (bandas 13-14), presencia de hidrocarburos ligeros refinados (banda 1), presencia de crudo ligero (banda 3), presencia de crudos más pesados (banda 5) y de combustibles pesados (bandas

Tabla 1. Configuración espectral usada sobre Cayos Arcas

Banda	inicio (nm)	final (nm)	centro (nm)
1	403.5	420.8	412.2
2	426.0	446.9	436.5
3	450.4	469.7	460.1
4	473.2	492.5	482.9
5	496.0	515.3	505.7
6	518.9	540.0	529.5
7	543.6	563.0	553.3
8	568.3	587.8	578.1
9	593.2	612.7	603.0
10	618.1	639.4	628.8
11	644.8	664.4	654.6
12	669.8	689.4	679.6
13	694.8	714.5	704.7
14	719.9	739.6	729.8

6). En relación con los hidrocarburos, las bandas elegidas corresponden a zonas de fluorescencia de estos compuestos.

Procesamiento de imágenes

Con el fin de extraer información de las bandas del CASI se emplearon diferentes algoritmos tales como: cocientes de bandas, análisis de componentes principales y una clasificación no-supervisada. Los detalles de cada una de estas técnicas se presentan a continuación.

La Figura 2 muestra un compuesto RGB de la región de Cayos Arcas. Este compuesto se generó asignando la banda 12 (roja) al canal R, la banda 6 (verde) al canal G y la banda 2 (azul) al canal B. En esta figura se aprecian claramente los siguientes aspectos: el arrecife coralino circunscrito por las olas rompiéntes; la zona emergida del cayo rodeada por una zona de playa de alta reflectancia y la presencia de vegetación terrestre en los cayos emergidos.

Cocientes

El cálculo de cocientes es una técnica ampliamente utilizada en percepción remota. Ha sido aplicada en diversas disciplinas entre las que se incluyen la biogeografía y la exploración geológica, (Rowan, 1975; Tucker, 1979). El uso de cocientes permite eliminar efectos del ángulo de visión, y reducir efectos topográficos. Asimismo, permite establecer una correlación entre los valores del cociente y la forma de la curva de reflectancia espectral entre dos bandas dadas. Los cocientes de bandas empleados en este estudio se enlistan a continuación:

a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice considera los cambios abruptos y característicos de la reflectancia de la vegetación en el infrarrojo cercano y de la absorción de la misma en la región roja del espectro electromagnético (EEM). Este cociente se representa del siguiente modo:



Figura 2. Compuesto RGB de las bandas 12, 6 y 2 del sensor CASI.

$$NDVI = \frac{I_{IR} - I_R}{I_R + I_{IR}} \quad (1)$$

Al ser un índice normalizado su intervalo de variación oscila entre -1 y 1. Así, las áreas con vegetación densa presentan valores positivos del NDVI. Por su parte, los cuerpos de agua presentan una tendencia a valores negativos. Finalmente, las rocas y el suelo desnudo, al tener una respuesta espectral similar en ambas bandas, obtienen valores cercanos a cero. Como su nombre lo indica, el NDVI ha sido utilizado ampliamente en análisis de todo tipo de vegetación (Justice *et al.*, 1985; Batista *et al.*, 1997, Gilabert *et al.*, 1997). Sin embargo, en zonas costeras, el NDVI puede ser de utilidad en la detección de sedimentos presentes en el cuerpo de agua. Esto se logra partiendo de las características de absorción del agua de mar y la relativamente alta reflectancia de los sedimentos en las regiones roja e infrarroja del EEM. Existen diversos estudios donde esta metodología ha sido aplicada con éxito (Tassan and Sturm, 1986, Szekielda and McGinnis, 1987, Froidefond *et al.*, 1993, Aguirre-Gómez, 2000; Matthews *et al.*, 2001b)

b) Azul / verde (“Blue/Green”). Este cociente se utiliza para la estimación de clorofila en aguas oceánicas. En zonas costeras el algoritmo no es de gran confiabilidad dado que la señal de sedimentos presentes en el agua interfiere de manera importante en la del fitoplancton. No obstante, es posible estimar cualitativamente la presencia de clorofila a en regiones de profundidades mayores a los 40 m alejadas del arrecife. El algoritmo utilizado con las bandas CASI es el siguiente:

$$BG = \frac{CASIbanda2}{CASIbanda7} \quad (2)$$

El uso de este cociente fue establecido teóricamente por Gordon and Morel (1983) y

ha sido aplicado ampliamente en diversos estudios marinos y costeros (Moore and Aiken, 1990; Sturm *et al.*, 1999).

c) R550/R750. La determinación del grosor es mejor cuando se utilizan cocientes de radianza en lugar de valores absolutos de radianza, los cuales dependen fuertemente de los niveles de la luz incidente. Este método funciona mejor cuando una de las radianzas utilizadas para calcular el cociente se mide a una longitud de onda donde los cambios debidos al aumento del grosor de los hidrocarburos son relativamente altos, y la otra medición se hace a una longitud de onda donde tales cambios son relativamente bajos. Para hidrocarburos absorbentes esto se traduce en que uno de los canales o bandas debe elegirse cerca del pico de reflectancia del agua de mar (entre 500–570 nm), zona donde la absorción por hidrocarburos tiene el mayor efecto. El segundo canal puede elegirse convenientemente en la región del infrarrojo cercano (750 nm) donde la radianza emergente del agua marina es despreciable debido al alto coeficiente de absorción del agua (Byfield, 1998)

Por otro lado, la reflectancia R del agua es mayor en el intervalo de 430 a 580 nm dependiendo del tipo de agua, ya sea oceánica o costera. El agua oceánica tiene su máximo espectral en la región azul (450-480 nm), mientras que el agua costera, con gran cantidad de plancton o substancias húmicas, tiene su máximo en la región verde (540-570 nm). La reflectancia del agua decrece rápidamente en la región del rojo (> 600 nm) y es despreciable en la región del infrarrojo cercano (> 730 nm). Por consiguiente, el cociente entre la longitud de onda del pico máximo y el infrarrojo es una buena medida de cómo la señal de hidrocarburos o grasas ligeras suprimen la del agua.

Análisis de componentes principales

Esta es una técnica utilizada extensivamente en estudios de percepción remota. Las bandas adyacentes en una imagen multiespectral

están generalmente correlacionadas. La presencia de correlación entre estas bandas implica que hay redundancia en los datos, es decir, algo de la información se está repitiendo. La idea fundamental de esta técnica consiste en eliminar la correlación entre bandas. Esto se logra creando nuevas bandas, mutuamente ortogonales, las cuales son combinaciones lineales de las originales y son llamadas componentes principales (CP). Estas combinaciones se obtienen mediante métodos de álgebra lineal (Mather, 1976). La correlación de las bandas multiespectrales se manifiesta en su covarianza estadística. Las CP son pues una medida de la varianza al eliminar la correlación o covarianza de las bandas originales. El nivel de varianza se observa a través del conjunto de valores propios (eigenvalores) de la matriz estadística generada. Al conjunto de coordenadas que definen la ortogonalidad de las nuevas bandas se les conoce como vectores propios (eigenvectores), los cuales están asociados con cada uno de los eigenvalores. Por consiguiente, los eigenvalores y los eigenvectores describen la longitud y la dirección de los nuevos ejes. La técnica de las CP puede considerarse como un paso previo a la clasificación de imágenes. En este estudio se realizó el análisis de componentes principales y posteriormente se utilizó una combinación RGB de las componentes principales 2, 3 y 4. Esta combinación es de utilidad cuando se desea detectar la variación del color del mar debido a la presencia de sedimentos suspendidos (Rees, 1990).

Clasificación no supervisada

La clasificación no-supervisada es un proceso automatizado para encontrar "nubes" de datos (clusters) puntuales en un espacio n-dimensional, usando únicamente un subconjunto de la imagen satelital completa, y entonces decidir a qué clase pertenece cada píxel. Existen diversos métodos para encontrar clusters. El método de la K-medias (o ISODATA) es uno de los más importantes y ha

sido aplicado ampliamente en análisis espaciales. En este enfoque, el usuario especifica el número de clusters a identificar y una suposición inicial del lugar donde se localicen los puntos centrales (centroídes) de cada uno de los clusters definidos. El algoritmo calcula entonces a qué cluster pertenece cada píxel, con base en la distancia que lo separa del centroide más cercano. Esta distancia se calcula mediante el Teorema de Pitágoras en N-dimensiones y se conoce como distancia euclíadiana. Después de un primer reconocimiento, los centroídes son ajustados a las nuevas clases generadas y el proceso se repite iterativamente. Por consiguiente, el usuario debe definir un número determinado de iteraciones, o bien, definir un criterio aceptable de convergencia del porcentaje de píxeles clasificados (Swain and Davis, 1978). Para realizar este proceso se consideraron las cuatro primeras componentes principales. Esta clasificación se realizó utilizando el método ISODATA, proponiendo un intervalo de 5 a 10 clases, con un número máximo de diez iteraciones, un mínimo de 20 píxeles por clase, una desviación estándar de 1.5 y una distancia euclíadiana por clase de 3.00 unidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cocientes

NDVI. La Figura 3 muestra la resultante del algoritmo 1. La validez de este algoritmo ha sido probada en diferentes estudios (Szekielda and McGinnis, 1987; Stumpf, 1987). En la imagen es posible observar las siguientes características: *a)* la parte emergida de los cayos se muestra en color blanco con una franja de playa en color verde claro; *b)* los sedimentos están representados en color cian y se distribuyen alrededor del cayo principal y sobre la zona del arrecife. El transporte de sedimentos obedece en forma general al patrón de oleaje. Este patrón es más frecuente en la parte externa del Cayo, mientras que en la interna está supeditado a la topografía de la zona. Es

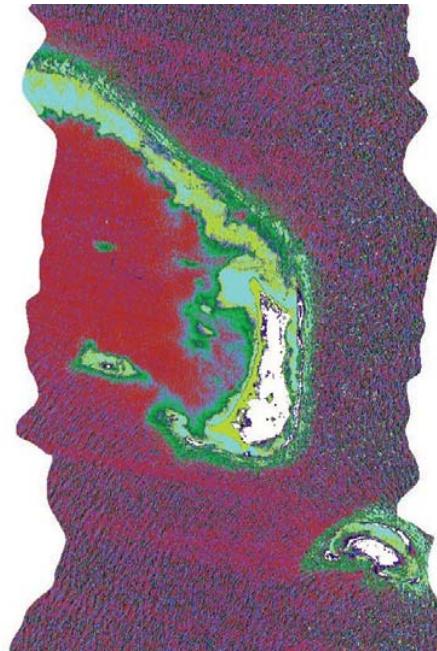


Figura 3. Detección de sedimentos en Cayos Arcas mediante un análisis NDVI.

particularmente notoria la distribución de sedimentos suspendidos en la punta norte y sobre la entrada en los cayos pequeños en la región sur del cayo principal.

Batimetría

Las características batimétricas de la zona de Cayos Arcas se pueden apreciar, cualitativamente, en la Figura 4. Esta figura fue generada mediante un cociente entre la banda azul, de mayor penetración luminosa y la banda infrarroja, donde el agua absorbe de manera importante esta longitud de onda.

En esta imagen es posible apreciar de manera cualitativa los diferentes niveles de profundidad en la región. En el cuerpo de agua se observa la zona somera en tonos verde claro mezclada con sedimentos en tonos cian. Una zona menos somera de la región se aprecia en tonos azules, mientras que las zonas más profundas aparecen en tonos verde oscuro (esto debe, sin embargo, ser tomado con cautela,

dado que la zona de arrecifes toma un color similar aunque más oscuro).

Detección de clorofila

La detección de este parámetro fue difícil por dos razones fundamentales: *a*) la región de Cayos Arcas es considerada como de aguas Caso 2, *i. e.* es una región en la cual los sedimentos y/o las sustancias disueltas húmicas son los elementos predominantes en la óptica de la zona; *b*) el algoritmo aplicado (2), aparte de no ser el más conveniente, no estaba calibrado para la zona y su relación funcional carecía de un coeficiente y un exponente para adoptar la forma convencional. La Figura 5 presenta el resultado de aplicar el algoritmo 2 a la banda 2 (azul) y la banda 7 (verde).

Componentes principales

La información estadística obtenida mediante el análisis de componentes principales se muestra en la Tabla 2.

La Figura 6 muestra la gráfica de los valores propios (eigenvalores) correspondientes a cada una de las componentes principales.

La Tabla 3 muestra los eigenvectores de las primeras 4 CP, las cuales representan el 99.81% de la varianza explicada.

Es posible advertir que en la CP1 los factores de peso de cada banda son similares, por consiguiente, el aporte espectral de cada una de ellas queda estandarizado. Por otro lado, las CP2, CP3 y CP4, tienen factores de peso conspicuos. En la CP2, las bandas 4 (460.1 nm) y 5 (505.7 nm) contribuyen positivamente en la combinación lineal y son indicadores de la absorción de los pigmentos accesorios. Por su parte, la banda 13 (704.7 nm) contribuye negativamente con el mayor factor peso (-0.40), correspondiente a la reflectancia

de los sedimentos y la absorción del agua de mar. En la CP3, la banda 1 (412.2) es la que presenta la mayor contribución positiva. Esto indica que la absorción de la sustancia amarilla, elemento primordial en aguas caso 2, es el elemento óptico principal. Mientras que la reflectancia debida a la clorofila contribuye mayoritariamente en forma negativa, a través de los factores de peso de la banda 7 (553.3 nm) y la banda 8 (578.1 nm). Finalmente, la combinación lineal de la CP4 indica que las bandas 1 (412.2 nm), 9 (603.0 nm) y 10 (628.8 nm) son las de mayor peso. Nuevamente, la banda 1 corresponde, ópticamente, a la absorción de la sustancia amarilla, mientras que las bandas 9 y 10, ubicadas en la región roja, permiten resaltar la presencia de sedimentos y la absorción de clorofila y agua.

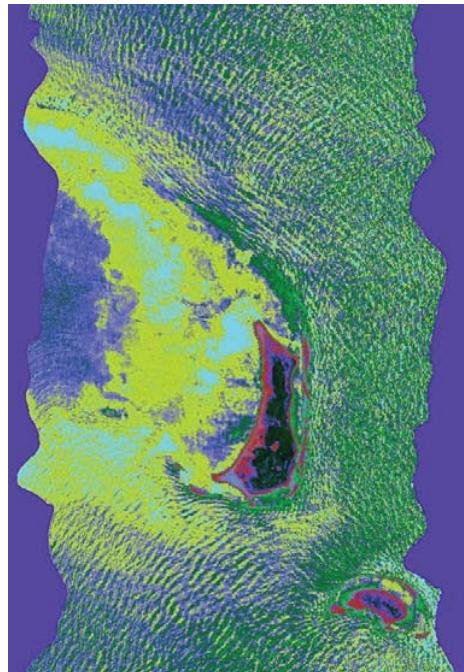


Figura 4. Imagen de batimetría de la zona de Cayos Arcas.

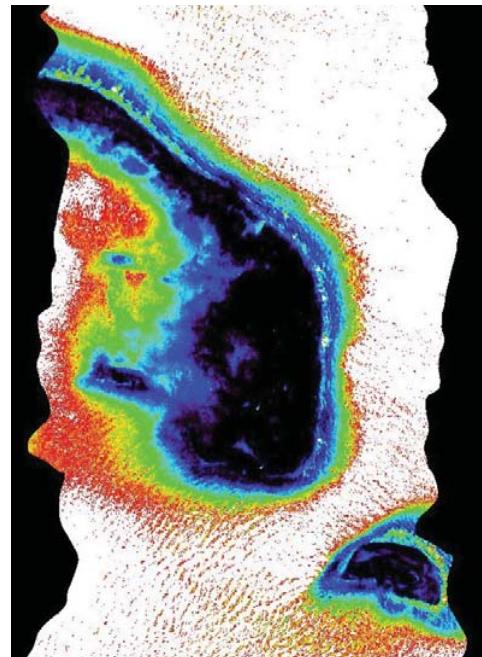


Figura 5. Cociente azul verde para la detección de clorofila. La señal de este pigmento está contaminada con la de los sedimentos suspendidos.

Tabla 2. Valores propios (eigenvalores) hallados a través del análisis de componentes principales

CP	Varianza	%
1	148925791.6140	97.30
2	2522197.8926	98.95
3	1009672.4385	99.61
4	307413.5671	99.81
5	163607.4550	99.92
6	40188.1365	99.94
7	24294.4207	99.96
8	20667.1457	99.97
9	16536.6221	99.98
10	13012.7486	99.99
11	7290.9092	100.00
12	3392.5128	100.00
13	3002.3773	100.00
14	1237.8471	100.00

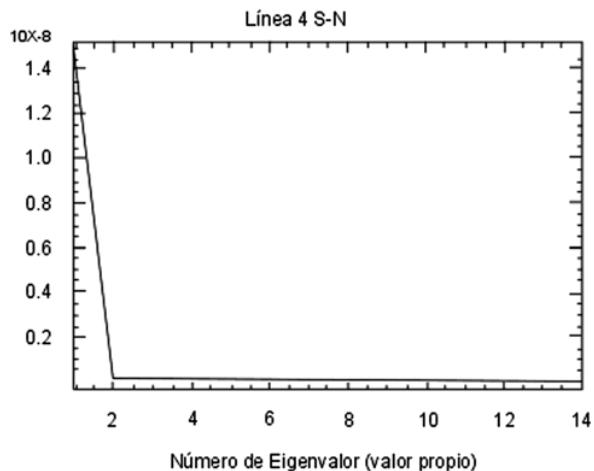


Figura 6. Magnitud de las componentes principales de acuerdo con sus valores propios (eigenvalores).

Tabla 3. Eigenvectores de las primeras cuatro componentes principales

#CP	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
CP1	0.224	0.264	0.322	0.326	0.329	0.326	0.322	0.290	0.255	0.236	0.219	0.209	0.176	0.147
CP2	0.114	0.182	0.263	0.291	0.254	0.163	0.105	-0.02	-0.29	-0.31	-0.35	-0.36	-0.40	-0.31
CP3	0.408	0.339	0.286	0.155	-0.03	-0.28	-0.43	-0.44	-0.15	-0.50	0.054	0.127	0.104	0.298
CP4	0.312	0.167	0.037	-0.09	-0.18	-0.19	-0.16	0.092	0.302	0.303	0.178	0.072	-0.28	-0.68

Con base en estos resultados se generó una imagen RGB con las bandas correspondientes a las componentes principales 2, 3 y 4, respectivamente. La elección de estas bandas se debió a que la composición RGB de las CP 2, 3 y 4 ha funcionado en zonas costeras para detectar la presencia de sedimentos y material disuelto. La omisión de la componente principal 1 en la composición se debe a que la mayor fuente de varianza se halla contenida en los elementos terrestres de la región. La Figura 7 presenta la composición RGB referida.

Esta imagen permite diferenciar características importantes en la región de los cayos. Las zonas emergidas están representadas en tonos verdes; la distribución de sedimentos se observa en tono magenta; la zona de arrecifes coralinos se observa en tonos azules; junto con los aspectos batimétricos asociados con corales y sedimentos los cuales aparecen en tonalidades rojas, naranjas y amarillas; finalmente, las aguas oceánicas más profundas se observan en tonos cian.

Clasificación no-supervisada

Con base en la información obtenida se procedió a una clasificación no-supervisada. Esta clasificación se realizó tomando como base la información contenida en las cuatro primeras componentes principales, las cuales aportan el 99.81% de la varianza de las bandas originales. La Figura 8 muestra la imagen clasificada no-supervisada. Esta figura muestra 10 clases espectrales halladas mediante el método ISODATA. Estas clases se muestran en la Tabla 4.

Con base en esta clasificación es posible tener una referencia espacial para identificar en campo aspectos de interés en estudios específicos. En particular, en este estudio esta clasificación ayudaría a conocer la extensión de la zona coralina y los cambios asociados a la batimetría de la región.

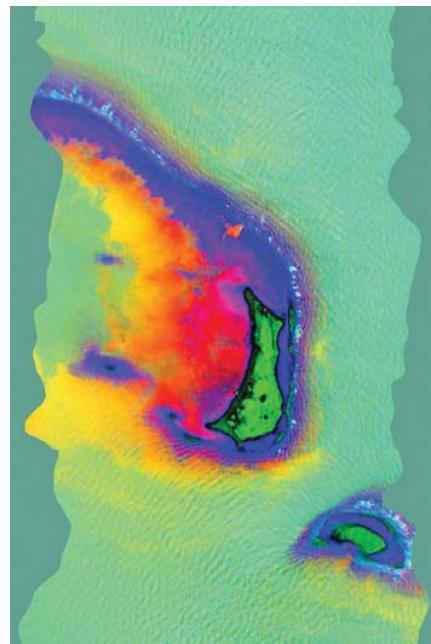


Figura 7. Compuesto RGB de las componentes principales 2, 3 y 4.

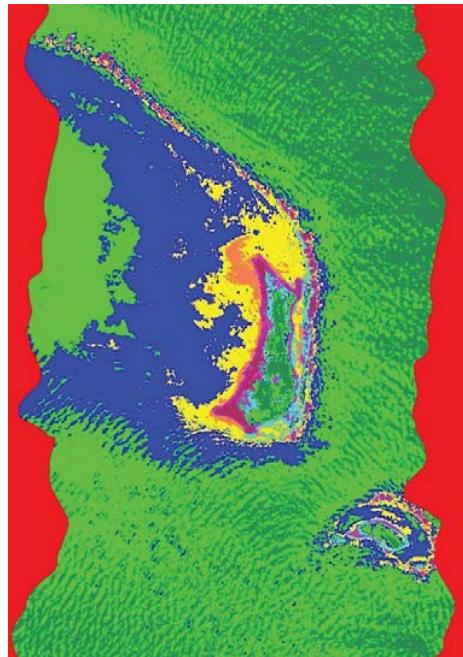


Figura 8. Clasificación no-supervisada de la región de Cayos Arcas.

CONCLUSIONES

La utilización del sensor remoto hiperespectral CASI en el análisis del arrecife coralino Cayos Arcas permite la obtención de información que no sería posible con sensores discretos. La aplicación de algoritmos sofisticados es también una característica de sensores como el CASI. La respuesta espectral fina y puntual en los cocientes permiten que la información de sedimentos suspendidos sea más precisa que la obtenida con sensores de banda ancha. Por otro lado, el análisis de componentes principales, utilizada como técnica pre-clasificatoria, permitió reconocer patrones definidos tanto en el Cayos Arcas como en sus inmediaciones, en la clasificación no supervisada. Así, esta clasificación permitió identificar zonas someras, zonas profundas y, por consiguiente, relacionar ambas con aspectos batimétricos, que no siempre es posible con sensores convencionales.

Tabla 4. Clases halladas mediante la clasificación no-supervisada

Color	Clase
•	No clasificado
•	Datos nulos
•	Aguas profundas
•	Zona coralina
•	Aguas someras
•	Arenas
•	Suelo desnudo
•	Zona de playa
•	Vegetación
•	Marisma
•	Sedimentos

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto "Actualización de la morfometría y la hidrodinámica del arrecife Cayos Arcas y de los riesgos asociados a la operación de la PEP" que se llevó a cabo en el Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA) y el Instituto de Geografía, ambas instituciones de la UNAM, y fue financiado por Petróleos Mexicanos (PEMEX).

REFERENCIAS

Aguirre-Gómez, R. (2000), "Detection of total suspended sediments in the North Sea using AVHRR and ship data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21(8), pp. 1583-1596.

Aguirre-Gómez, R., S. R. Boxall and A. R. Weeks (2001), "Detecting photosynthetic algal pigments in natural populations using a high-spectral-resolution spectroradiometer", *International*

- Journal of Remote Sensing*, vol. 22, núm. 15, pp. 2867-2884.
- Alberotanza, L., V. E. Brando, G. Ravagnan and A. Zandonella (1999), "Hyperespectral aerial images. A valuable tool for submerged vegetation recognition in the Orbetello Lagoons, Italy", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, núm. 3, pp. 523-533.
- Batista, G. T. E., E. Shimabukuro and W. T. Lawrence (1997), "The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonia region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. (18), pp. 3195-3210.
- Borstad, G. A., R. C. Kerr y M. Zacharias (1994), "Monitoring near shore water quality and mapping of coastal areas with a small airborne system and GIS", *Memorias del Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, New Orleans, Louisiana, vol. II, pp. 51-56.
- Byfield, V. (1998), *Optical remote sensing of oil in the marine environment*, Ph D Thesis, University of Southampton.
- Clark, C. D., Mumby, P. J., J. R. M. Chisholm, J. Jaubert and S. Andrefouet (2000), "Spectral discrimination of coral mortality states following a severe bleaching event", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21(11), pp. 2321-2327.
- Farrell, T. M. C. F. D'Ellia, L. Lubbers and L. J. Pastor (1983), "Hermatypic coral diversity and reef zonation at Cayo Arcas, Campeche, Gulf of Mexico", *Atoll Research Bulletin*, 270.
- Froidefond, J. M., P. Castaing, J. M. Jouanneau and R. Proud'homme (1993), "Method for the quantification of suspended sediments from AVHRR/NOAA-11 satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, pp. 885-894.
- George, D. G. (1997), "Bathymetric mapping using a Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 10, pp. 2067-2071.
- Gilabert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro (1997), "Acerca de los índices de vegetación", *Revista de Teledetección*, vol. (8), pp. 35-45.
- Gordon, H. R. and A. Morel (1983), "Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery", Barber, R. T., N. K. Mooers, M. J. Bowman and B. Zeitzschel (eds.), *A review, Lecture notes on coastal and estuarine studies*, Springer-Verlag, New York.
- Holden, H. and E. LeDrew (1998), "Spectral discrimination of healthy and non-healthy corals based on cluster analysis, principal components analysis, and derivative spectroscopy", *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, pp. 217-224.
- INEGI (1981), *Carta de climas de México*.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holden and J. Tucker (1985), "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. (6), pp. 1271-1318.
- Liceaga-Correa, M. A. and J. I. Euan-Ávila (2002), "Assessment of coral reef bathymetric mapping using visible Landsat Thematic Mapper data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, núm. 1, pp. 3-14.
- Mather, P. (1976), *Computational methods of multivariate analysis in physical geography*, Wiley, Chichester.
- Matthews, A. M., A. G. Duncan and R. G. Davison (2001a), "An assessment of validation techniques for estimating chlorophyll a concentration from airborne multispectral imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 2-3, pp. 429-448.
- Matthews, A. M., A. G. Duncan and R. G. Davison (2001b), "Error assessment of validation techniques for estimating suspended particulate matter concentration from airborne multispectral imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 2-3, pp. 449-470.
- Moore, G. and J. Aiken (1990), "Aircraft multispectral remote sensing of water colour off Helgoland. In applications and development in image spectrometry", *Proceedings of a Remote Sensing Society Workshop (20/Nov/1989)*, London, UK, pp. 18-31.

- Mumby, D. J., E. D. Green, C. D. Clark and A. J. Edwards (1998), "Digital analysis of multispectral airborne imagery of coral reefs", *Coral reefs*, vol. 17(1), pp. 59-69.
- Mumby, P. J. and A. J. Edwards (2002), "Mapping marine environments with IKONOS imagery: enhanced spatial resolution does deliver greater thematic accuracy", *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, pp. 248-257.
- Mumby, P. J., J. R. M. Chisholm, J. D. Hedley, C. D. Clark and J. Jaubert (2001), "A bird's-eye view of the health of coral reefs", *Nature*, 413 (6852):36.
- Rees, W. G. (1990), *Physical Principles of Remote Sensing*, Chapter 10, Cambridge University Press, Cambridge
- Rowan, L. C. (1975), "Application of satellites to geologic exploration", *The American Scientist*, 63, pp. 393-403.
- Stumpf, R. P. (1987), "Application of AVHRR satellite data to the study of sediment and chlorophyll in turbid coastal water", *NOAA Technical Memorandum NESDIS AISC-7*, Washington, D. C.
- Sturm, B., V. Barale, D. Larkin, J. H. Andersen and M. Turner (1999), "OCEANcode: the complete set of algorithms and models for level-2 processing of European CZCS historical data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20(7), pp. 1219-1248.
- Swain P. N. and S. M. Davis (1978), *Remote Sensing: the quantitative approach*, McGraw Hill, New York.
- Szekielda, K. H. and McGinnis (1987), "Investigations with satellites on eutrophication of coastal regions, Pt. 4 Characterization of water masses in the Huanghai Sea", *SCOPE/UNEP Sonderband*, vol. 64, pp. 93-112.
- Tada K., K. Sakai, Y. Nakano, A. Takemura and S. Montani (2003), "Size-fractionated phytoplankton biomass in coral reef waters off Sesoko Island, Okinawa, Japan", *Journal of Plankton Research*, vol. 25, no. 8, pp. 991-997(7).
- Tassan, S. and B. Sturm (1986), "An algorithm for the retrieval of sediment content in turbid coastal waters from CZCS data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7(5), pp. 643-655.
- Tucker, C. J. (1979), "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sensing of Environment*, 10, pp. 127-150.