

## Variación espacial y temporal de las características fisicoquímicas del agua y sedimento en la laguna costera Yalahau, Quintana Roo

## Spatial and temporal variations in physicochemical characteristics of water and sediment in the Yalahau coastal lagoon, Quintana Roo

Marco Antonio May-Kú, David Valdés-Lozano y Pedro-Luis Ardisson

Departamento de Recursos del Mar, Cinvestav. Carretera antigua a Progreso, km 6. Apdo. Postal 73-Cordemex. 97310, Mérida, Yucatán  
e-mail: marco.may@cinvestav.mx

May Kú M. A., D. Valdés-Lozano y P. L. Ardisson. 2016. Variación espacial y temporal de las características fisicoquímicas del agua y sedimento en la laguna costera Yalahau, Quintana Roo. *Hidrobiológica* 26 (1): 41-51.

### RESUMEN

Se analizó entre zonas (Externa, Mar-laguna, Sur y Norte) y épocas climáticas (lluvias, nortes y secas) la variación de las características fisicoquímicas del agua y sedimento en la laguna costera Yalahau, Quintana Roo. La salinidad, el silicato reactivo soluble (SiRS) y el tamaño de grano del sedimento fueron las variables que presentaron la mayor variabilidad espacial y temporal: (1) zona Externa, caracterizada por salinidades marinas con escasa variación temporal, concentraciones bajas de SiRS ( $< 11 \mu\text{M}$ ) y predominio de arenas finas; (2) zona Mar-laguna, presentó la salinidad media mínima (35.5 psu) y escasa variación temporal, concentraciones de SiRS de  $\sim 10$  a  $15 \mu\text{M}$  en lluvias y nortes que se incrementaron hasta cuatro veces en secas y predominio de arenas gruesas; (3) zona Sur, caracterizada por condiciones mixoeuhalinas en nortes y hiperhalinas en lluvias, concentraciones de SiRS de  $\sim 15$  a  $20 \mu\text{M}$  en lluvias y nortes que se incrementaron al doble en secas, y predominio de arenas gruesas; y (4) zona Norte, caracterizada por una tendencia permanente a la hiperhalinidad, concentraciones de SiRS  $> 10 \mu\text{M}$  durante las tres épocas climáticas que se incrementaron hasta seis veces en secas, cuando también se observaron concentraciones elevadas de amonio y fósforo reactivo soluble, en esta zona predominaron arenas finas. La condición relativamente prístina de esta área natural protegida sugiere que factores naturales como la presencia de praderas del pasto marino *Thalassia testudinum*, la magnitud de los aportes de agua dulce, la descomposición de materia orgánica y el aporte de nutrientes exógenos (e.g., excretas de aves marinas) ejercen gran influencia sobre la heterogeneidad ambiental de la laguna Yalahau.

**Palabras clave:** Heterogeneidad ambiental, laguna costera, pastos marinos, península de Yucatán.

### ABSTRACT

In the Yalahau coastal lagoon, Quintana Roo, we analyzed spatial (Outer, Sea-lagoon, South, and North zones) and temporal weather-season variations (rainy, *nortes*, and dry), in physicochemical characteristics of water and sediment. The salinity, soluble reactive silicate (SiRS), and sediment grain size were the variables with the highest spatial and temporal variability: (1) The Outer zone is characterized by marine salinity with little temporal variation, low concentrations of SiRS ( $< 11 \mu\text{M}$ ), and predominantly fine sands; (2) The Sea-lagoon zone has the lowest mean salinity (35.5 psu) and little temporal variation, SiRS concentrations of about 10-15  $\mu\text{M}$  in rainy, and *nortes* that increased four times in dry, and predominantly coarse sands. (3) The South zone is characterized by mixoeuhaline conditions in *nortes* and hyperhaline conditions during rains, SiRS concentrations of about 15-20  $\mu\text{M}$  in rains and *nortes* that increased twofold in dry and predominantly coarse sands; (4) The North zone is characterized by a permanent trend to hyperhaline conditions, concentrations of SiRS  $> 10 \mu\text{M}$  during the three seasons that increased up to six times in dry weather, when increased concentrations of ammonium and soluble reactive phosphorus were also observed, and predominantly fine sand. The relatively pristine condition of this protected area suggests that natural factors such as the presence of *Thalassia testudinum* meadows, the magnitude of freshwater inputs, the decomposition of organic matter, and the entry of exogenous nutrients (e.g., seabird droppings) have a great influence on the environmental heterogeneity of the Yalahau lagoon.

**Key words:** Coastal lagoon, environmental heterogeneity, seagrasses, Yucatan peninsula.

## INTRODUCCIÓN

La dinámica espacial y temporal de las características físicas y químicas del agua y sedimento, como por ejemplo: salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, es de gran utilidad para determinar la heterogeneidad ambiental y el estado de salud de los ecosistemas litorales (e.g., de la Lanza-Espino *et al.*, 1998; Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2003; Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010). Esta información es valiosa para la adecuada gestión de los ecosistemas litorales, con el objetivo de mitigar o evitar procesos de deterioro ecológico de los recursos naturales (Comin *et al.*, 1999; Herrera-Silveira *et al.*, 2004).

La laguna costera Yalahau ( $21^{\circ}26' - 21^{\circ}36' N$ ,  $87^{\circ}06' - 87^{\circ}24' O$ ), se localiza en el noreste de la península de Yucatán, en el Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam (sitio Ramsar número 1360). Es la laguna costera más extensa en la región, con longitud de 30 km, anchura de 8 a 10 km y área de  $275 \text{ km}^2$ . El intervalo de marea es micromareal ( $< 1 \text{ m}$ ), la profundidad promedio del agua es de 2 m (intervalo: 0.3 a 4 m) y no existe estratificación de la columna de agua (Tran *et al.*, 2002a). Se encuentra rodeada por bosques de manglar, principalmente *Rhizophora mangle* Linnaeus y *Avicennia germinans* (Linnaeus) Linnaeus (García-Beltrán, 2006). El pasto marino *Thalassia testudinum* Banks & Sol. ex K. D. Koenig es el hábitat bentónico dominante en aguas someras ( $< 2 \text{ m}$ ) de la laguna y la zona marina adyacente (May-Kú *et al.*, 2010). El intercambio de agua entre el mar y la laguna Yalahau ocurre principalmente a través de una boca natural de 5 km de anchura localizada al oeste. La salinidad tiende a incrementarse hacia el interior pasando de condiciones mixoeuhalinas en la boca de comunicación mar-laguna a condiciones hiperhalinas en la zona norte, que presenta una escasa comunicación con el resto de la Laguna, lo que ocasiona menor circulación y alta evaporación (Tran *et al.*, 2002a, 2002b; 2008; Aguilar-Salazar *et al.*, 2003). En sitios cercanos a la boca de comunicación mar-laguna, el sedimento se compone principalmente de arena ( $> 80\%$ ), mientras que en la zona norte, el limo y la arcilla representan hasta un 50% (Tran *et al.*, 2002b).

La laguna costera Yalahau presenta condiciones relativamente prístinas (Tran *et al.*, 2002a; May-Kú *et al.*, 2010; Medina-Moreno *et al.*, 2014). Sin embargo, en Holbox al norte de la laguna, el desarrollo turístico se ha incrementado considerablemente en la última década (Tran *et al.*, 2002c). Las actividades antrópicas relacionadas con el turismo como urbanización, construcción de muelles, natación y buceo tienen el potencial de afectar la variabilidad ambiental natural, por ejemplo alterar el gradiente de salinidad e incrementar la concentración de nutrientes y contaminantes en agua y sedimento, lo que ocasionaría el deterioro de las funciones ecológicas que estos ecosistemas litorales brindan (de Witt, 2011). En el caso de la laguna Yalahau, se ha observado su importancia como área de crianza, alimentación y anidación para fauna acuática de importancia comercial y ecológica como tortugas, tiburones, peces y camarones (Ordóñez-López & García-Hernández, 2005; Hueter *et al.*, 2007; May-Kú *et al.*, 2014).

El análisis de la heterogeneidad espacial en la laguna Yalahau indica la presencia de seis a ocho zonas hidrológicas. En general, se observan condiciones polihalinas (18-30 ups) en el sur, hiperhalinas ( $> 40 \text{ ups}$ ) en el norte y mixoeuhalinas (30-40 ups) en la boca de comunicación mar-laguna (Tran *et al.*, 2002a, 2002b; Aguilar-Salazar *et al.*, 2003). Estas zonas también difieren en temperatura del agua, oxígeno disuelto, nutrientes inorgánicos disueltos (e.g., amonio, fosfato,

silicato), materia orgánica y textura del sedimento. Se ha sugerido que esta variabilidad es resultado de los aportes de agua dulce a través de escorrentías superficiales y manantiales de agua dulce, del grado de exposición a fuerzas hidrodinámicas y de los asentamientos humanos (Tran *et al.*, 2002a, 2002b; Aguilar-Salazar *et al.*, 2003). Sobre el plano temporal, no hay información sobre la variabilidad de las características hidrológicas durante un ciclo climático anual. Muestreos realizados en meses representativos de las tres épocas climáticas típicas de la región (lluvias, nortes y secas), indican diferencias en salinidad y temperatura del agua, oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos disueltos. Se ha sugerido que estas variaciones son resultado de las condiciones ambientales imperantes como la temperatura atmosférica, la precipitación pluvial, la evaporación y la intensidad de los vientos (Tran *et al.*, 2002a, 2002b, 2008; Aguilar-Salazar *et al.*, 2003).

Este estudio analiza las características fisicoquímicas del agua y sedimento en cuatro zonas de la laguna Yalahau (Externa, Mar-laguna, Sur y Norte) durante las épocas climáticas de lluvias, nortes y secas. La información generada contribuye a reforzar el conocimiento de línea de base necesario para la gestión sostenible de los recursos naturales de este importante ecosistema de la península de Yucatán.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó durante un ciclo anual comprendido entre junio de 2001 y mayo de 2002, e incluye las tres principales épocas climáticas en la región: (1) lluvias, junio-octubre; (2) frentes fríos o 'nortes', noviembre-febrero y (3) secas, marzo-mayo. Con base en la heterogeneidad espacial de la laguna Yalahau, definida por Tran *et al.* (2002a) y Aguilar-Salazar *et al.* (2003), se seleccionaron cuatro zonas: (1) Externa, zona marina adyacente a  $< 2 \text{ km}$  de la línea de costa; (2) Mar-laguna, entre la zona externa y la boca de comunicación con el mar; (3) Sur y (4) Norte (Fig. 1). Se establecieron ocho estaciones de muestreo (dos por zona) a una profundidad media de 0.82 m (mínimo = 0.3 m, máximo = 1.8 m) donde el hábitat bentónico dominante fue *T. testudinum*. En cada estación, se determinó quincenalmente la salinidad, la temperatura y el oxígeno disuelto (OD) del agua con un medidor multiparámetro de campo YSI85/50 FT. Para el análisis de los nutrientes inorgánicos disueltos en cada estación se obtuvo mensualmente un litro de agua superficial que se conservó en refrigeración hasta su análisis en laboratorio. Se determinó la concentración de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), fósforo reactivo soluble (FRS), silicato reactivo soluble (SiRS), y clorofila a, de acuerdo con métodos estándar descritos por Strickland y Parsons (1972) y Jeffry y Humphrey (1975).

Para el análisis del tamaño de grano del sedimento en cada estación se obtuvieron mensualmente muestras de sedimento superficial ( $\sim 10 \text{ cm}$ ) con un nucleador. En el laboratorio el análisis granulométrico del sedimento se realizó con un tamizador vibratorio tipo Ro-Tap utilizando tamices de luz de malla de: -1.25, 0, 1, 2, 3 y 4 Ø ( $\phi = -\log_2 d$ , donde  $d$  es el diámetro del grano del sedimento en mm). El tamaño medio de grano del sedimento se calculó por el método gráfico (Folk & Ward, 1957) y fue clasificado de acuerdo con la escala Udden-Wentworth (Udden, 1914; Wentworth, 1922).

Con el fin de identificar las variables ambientales con mayor variabilidad espacial, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando la media anual estandarizada de las diversas variables medidas en cada una de las ocho estaciones de muestreo. El resulta-

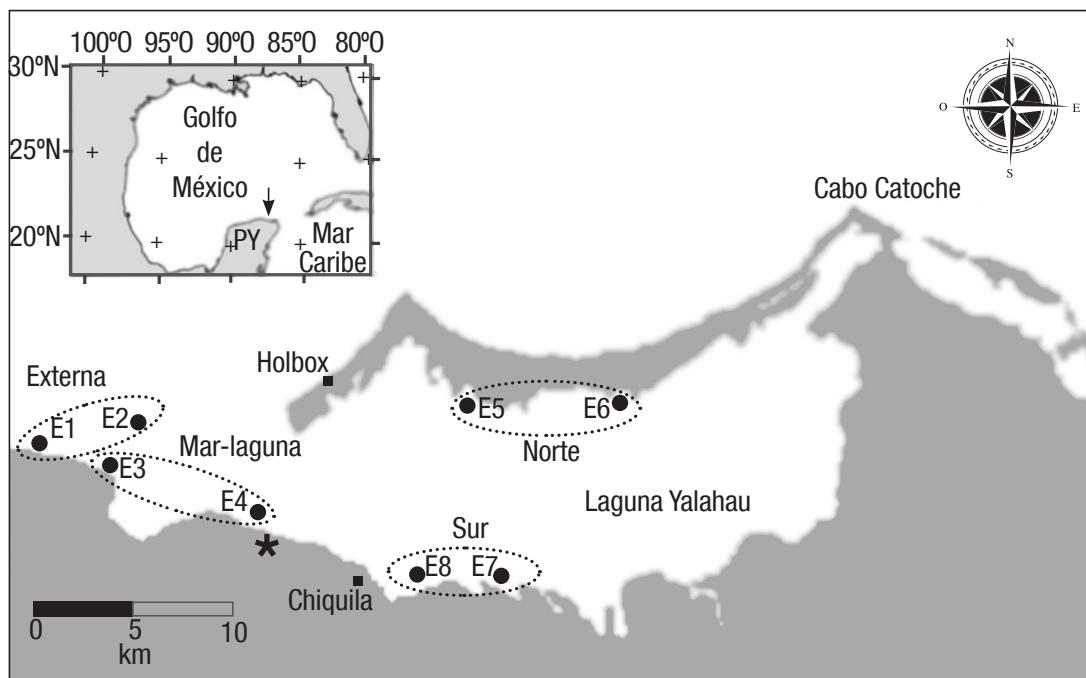


Figura 1. Localización de las cuatro zonas de estudio en la laguna costera Yalahau, Quintana Roo, península de Yucatán (PY). •: Estaciones de muestreo. \*: Manantial de agua dulce.

do de este análisis identifica las variables con mayor poder explicativo de la heterogeneidad espacial observada. Para robustecer el análisis multivariable se realizaron pruebas estadísticas univariante para la comparación de medias (análisis de varianza, ANOVA) o de medianas (Kruskal-Wallis) entre zonas y épocas climáticas.

Las diferencias estadísticas en salinidad, temperatura y OD entre zonas, épocas climáticas y la interacción zona × época climática se evaluaron aplicando a los datos transformados logarítmicamente un ANOVA de dos vías (F). Cuando se detectaron diferencias significativas entre grupos se aplicaron pruebas de comparación múltiple por el método de Bonferroni ( $p < 0.05$ ). Los datos de nitrato, nitrito, amonio, FRS, SiRS, clorofila a y tamaño de grano no cumplieron los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk;  $p < 0.001$ ) y homoscedasticidad (Levene;  $p < 0.001$ ) a pesar de haber sido transformados. Para estas variables se utilizó el análisis de varianza no paramétrico de una vía de Kruskal-Wallis (H) para evaluar diferencias estadísticas entre zonas, épocas climáticas y la interacción zona × época climática. Cuando se detectaron diferencias significativas entre grupos, se aplicaron pruebas de comparación múltiple no paramétricas por el método de Dunn ( $p < 0.05$ ).

Para la representación gráfica de los resultados de comparación entre zonas se utilizaron diagramas de caja y bigote. La mediana es representada por la línea horizontal en la caja y la media por un rombo. La anchura de la muesca representa el intervalo de confianza de la mediana al 95%. Los cuartiles Q1 y Q3 son el límite inferior y superior de la caja, mientras que los extremos del bigote representan los valores mínimo y máximo (hasta 1.5 veces el rango intercuartílico, RIC:  $Q3 - Q1$ ). Los valores atípicos (outliers) se representan por x (atípico leve:  $< Q1 - 1.5 \cdot RIC$  o  $> Q3 + 1.5 \cdot RIC$ ) y asterisco (atípico extremo:  $< Q1 - 3 \cdot RIC$  o  $> Q3 + 3 \cdot RIC$ ).

## RESULTADOS

El ACP indicó que los tres primeros componentes explicaron el 77.2% de la varianza total de las variables originales, siendo las variables con mayor peso ( $\geq 40$ ) la salinidad, la temperatura, el nitrito, el amonio, el SiRS y el tamaño de grano del sedimento (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de componentes principales, indicando el peso de cada variable fisicoquímica en los tres primeros componentes principales.

Variable fisicoquímica	Componente		
	1	2	3
Salinidad (ups)	<b>0.437</b>	0.008	0.387
Temperatura (°C)	-0.077	<b>-0.462</b>	0.237
Oxígeno disuelto (mg/l)	-0.353	-0.347	0.073
Nitrato (µM)	-0.374	0.338	0.299
Nitrito (µM)	0.231	0.350	<b>0.456</b>
Amonio (µM)	0.334	<b>-0.448</b>	-0.171
FRS (µM)	0.256	-0.378	0.161
SiRS (µM)	<b>0.455</b>	0.165	0.089
Clorofila a (mg/m³)	0.274	0.065	-0.148
Tamaño de grano del sedimento (ø)	-0.160	-0.235	<b>0.638</b>
Valor propio (λ)	3.1	2.8	1.8
% de la varianza explicada	31.1	27.9	18.2

En negrillas valores  $\geq 0.40$  (en valor absoluto). Varianza explicada acumulada por los tres primeros componentes = 77.2%.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del agua y sedimento en cuatro zonas de la laguna Yalahau, Quintana Roo, México, durante tres épocas climáticas.

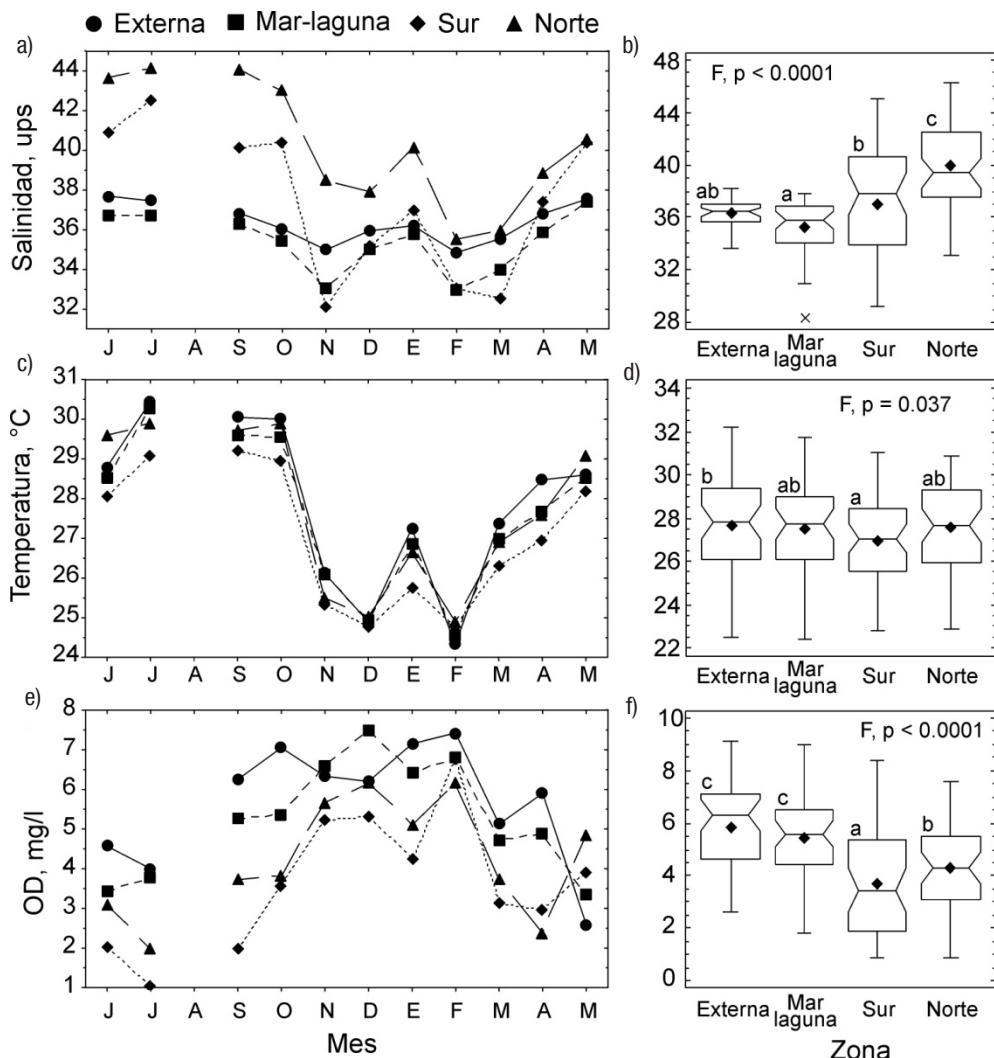
Zona	Época climática	Salinidad (ups) <sup>+</sup>	Temperatura (°C) <sup>+</sup>	OD (mg/l) <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µM)*
Externa	Lluvias	37.2 ± 0.2 <sup>b</sup>	29.8 ± 0.3	5.3 ± 0.4 <sup>cde</sup>	5.59 ± 0.8
	Nortes	35.3 ± 0.2 <sup>ab</sup>	25.5 ± 0.4	6.7 ± 0.3 <sup>e</sup>	8.06 ± 3.04
	Secas	36.6 ± 0.3 <sup>bc</sup>	28.2 ± 0.3	5.2 ± 0.6 <sup>cde</sup>	7.34 ± 2.41
Mar-laguna	Lluvias	36.4 ± 0.2 <sup>b</sup>	29.5 ± 0.2	4.4 ± 0.4 <sup>bcd</sup>	5.67 ± 2.08
	Nortes	33.9 ± 0.5 <sup>a</sup>	25.6 ± 0.4	6.9 ± 0.3 <sup>e</sup>	2.81 ± 0.47
	Secas	35.8 ± 0.5 <sup>abc</sup>	27.7 ± 0.3	4.5 ± 0.3 <sup>bcd</sup>	5.79 ± 3.06
Sur	Lluvias	41.1 ± 0.4 <sup>de</sup>	28.8 ± 0.3	2.0 ± 0.3 <sup>a</sup>	5.29 ± 0.54
	Nortes	33.7 ± 0.6 <sup>a</sup>	25.1 ± 0.3	5.5 ± 0.3 <sup>de</sup>	5.13 ± 3.29
	Secas	36.8 ± 1.1 <sup>bc</sup>	27.2 ± 0.4	3.2 ± 0.5 <sup>b</sup>	5.49 ± 2.35
Norte	Lluvias	43.8 ± 0.4 <sup>e</sup>	29.8 ± 0.2	3.1 ± 0.3 <sup>b</sup>	5.3 ± 1.21
	Nortes	37.8 ± 0.5 <sup>c</sup>	25.4 ± 0.3	5.8 ± 0.2 <sup>de</sup>	3.55 ± 1.04
	Secas	38.5 ± 0.7 <sup>cd</sup>	27.9 ± 0.4	3.4 ± 0.4 <sup>bc</sup>	6.6 ± 3.44
		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)*	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µM)*	FRS (µM)*	SiRS (µM)*
Externa	Lluvias	0.7 ± 0.06	12.68 ± 7.47	1.35 ± 0.62	6.2 ± 0.85 <sup>a</sup>
	Nortes	0.7 ± 0.23	7.72 ± 3.26	2.7 ± 1.23	10.85 ± 5.78 <sup>abc</sup>
	Secas	0.65 ± 0.18	5.8 ± 2.49	2.3 ± 0.13	10.61 ± 2.26 <sup>abc</sup>
Mar-laguna	Lluvias	0.73 ± 0.16	11.85 ± 4.98	1.71 ± 0.31	9.76 ± 1.55 <sup>ab</sup>
	Nortes	0.59 ± 0.17	5.29 ± 0.98	2.93 ± 1.61	15.49 ± 10.61 <sup>abc</sup>
	Secas	0.63 ± 0.11	5.14 ± 3.16	1.89 ± 0.41	44.79 ± 14.46 <sup>de</sup>
Sur	Lluvias	0.65 ± 0.18	8.3 ± 2.02	1.09 ± 0.21	20.42 ± 8.31 <sup>cde</sup>
	Nortes	1.02 ± 0.32	9.27 ± 5.81	3.75 ± 1.23	16.9 ± 4.53 <sup>bcd</sup>
	Secas	0.81 ± 0.16	4.15 ± 0.44	2.1 ± 0.62	36.99 ± 11.6 <sup>de</sup>
Norte	Lluvias	0.62 ± 0.26	5.81 ± 2.57	1.09 ± 0.13	20.8 ± 10.65 <sup>cde</sup>
	Nortes	0.74 ± 0.56	4.7 ± 2.11	2.03 ± 1.21	14.93 ± 3.99 <sup>bcd</sup>
	Secas	0.45 ± 0.1	9.09 ± 6.01	3 ± 1.99	63.24 ± 6.24 <sup>e</sup>
		Clorofila a (mg/m <sup>3</sup> )*	Tamaño de grano del sedimento (Ø)*		
Externa	Lluvias	0.95 ± 0.26	2.58 ± 0.5 <sup>b</sup>		
	Nortes	0.89 ± 0.19	2.39 ± 0.25 <sup>b</sup>		
	Secas	1.54 ± 1.06	2.59 ± 0.17 <sup>b</sup>		
Mar-laguna	Lluvias	0.81 ± 0.25	0.96 ± 0.42 <sup>a</sup>		
	Nortes	3.01 ± 1.45	0.43 ± 0.33 <sup>a</sup>		
	Secas	2.91 ± 1.47	0.24 ± 0.1 <sup>a</sup>		
Sur	Lluvias	0.79 ± 0.42	0.87 ± 0.17 <sup>a</sup>		
	Nortes	1.02 ± 0.13	0.84 ± 0.2 <sup>a</sup>		
	Secas	0.78 ± 0.34	0.77 ± 0.21 <sup>a</sup>		
Norte	Lluvias	1.5 ± 0.72	1.89 ± 0.35 <sup>b</sup>		
	Nortes	1.36 ± 0.46	1.91 ± 0.31 <sup>b</sup>		
	Secas	2.51 ± 1.14	1.66 ± 0.16 <sup>b</sup>		

<sup>+</sup>: Media ( $\pm$  1 EE). <sup>\*</sup>: Mediana ( $\pm$  DAM). Las letras minúsculas en superíndice representan comparaciones múltiples *a posteriori* entre medias por el método de Bonferroni ( $p < 0.05$ ) y entre medianas por el método de Dunn ( $p < 0.05$ ).

La salinidad media mensual varió de 32.2 ups en noviembre en la zona Sur a 44.1 ups en julio y septiembre en la zona Norte (Fig. 2a). El valor mínimo (28.3 ups) se observó en E4 en noviembre y el máximo (46.2 ups) en E6 en septiembre. Se encontraron diferencias significativas entre zonas ( $F_{3,167} = 38.6, p < 0.001$ ), épocas climáticas ( $F_{2,167} = 70.95, p < 0.001$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $F_{6,167} = 7.57, p < 0.001$ ). La salinidad media ( $\pm$  1 EE) mínima (35.3 ± 03 ups) se registró en la zona Mar-laguna y la máxima (40 ± 0.5 ups) en la zona Norte (Fig. 2b). Las diferencias temporales se asociaron con el patrón

climático de la región (lluvias > secas > nortes: prueba de Bonferroni,  $p < 0.05$ ), con la salinidad más baja en la época de nortes en las zonas Mar-laguna y Sur y la más alta en la época de lluvias en la zona Norte (Tabla 2).

La temperatura media mensual varió de 24.3 °C en febrero en la zona Externa a 30.5 °C en julio en la misma zona (Fig. 2c). El valor mínimo (22.4 °C) se observó en E3 en diciembre y el máximo (32.2 °C) en E1 en julio. Se encontraron diferencias significativas entre zonas ( $F_{3,167} = 2.91, p = 0.037$ ), épocas climáticas ( $F_{2,167} = 156.68, p < 0.001$ ), pero



Figuras 2a-f. Variación temporal y espacial de la salinidad (a,b), temperatura (c,d) y oxígeno disuelto (OD) (e,f) en agua en cuatro zonas de la laguna Yalahau, Quintana Roo de junio de 2001 a mayo de 2002. F, prueba de ANOVA. Las letras minúsculas representan comparaciones múltiples *a posteriori* entre medias (datos transformados logarítmicamente) por el método de Bonferroni ( $p < 0.05$ ).

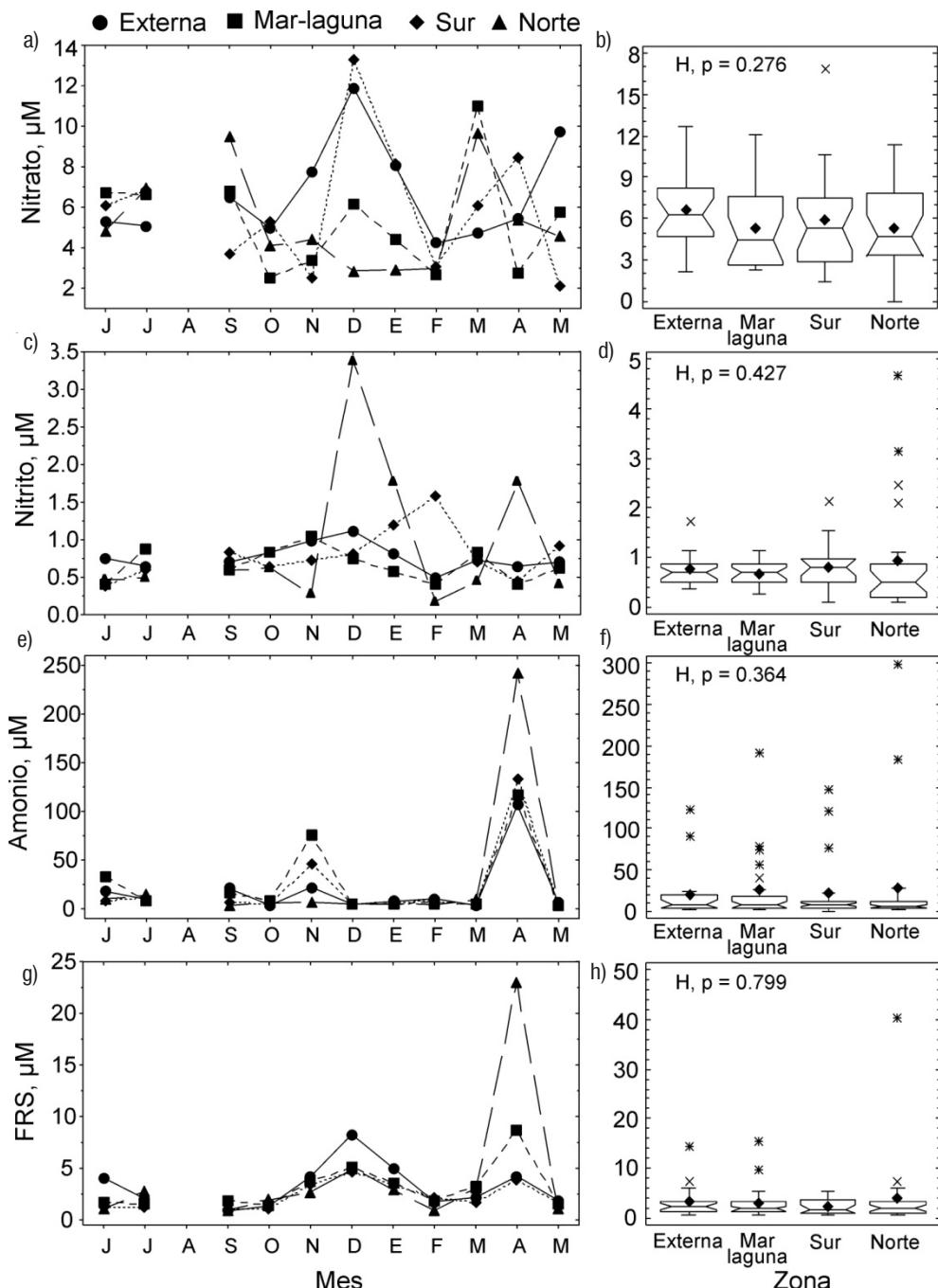
no en la interacción zona  $\times$  época climática ( $F_{6,167} = 0.24, p = 0.964$ ; Tabla 2). La temperatura media mínima ( $26.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ) se registró en la zona Sur y la máxima ( $27.7 \pm 0.4^\circ\text{C}$ ) en la zona Externa (Fig. 2d). Las diferencias entre épocas climáticas indicaron un patrón temporal similar al de la salinidad (lluvias > secas > nortes: prueba de Bonferroni,  $p < 0.05$ ).

La concentración media de OD mensual varió 1.1 mg/l en julio en la zona Sur a 7.5 mg/l en diciembre en la zona Mar-laguna (Fig. 2e). El valor mínimo (0.9 mg/l) se observó en E7 en junio y en E5 y E8 en julio, y el máximo (9.1 mg/l) se observó en E1 en febrero. Se encontraron diferencias significativas entre zonas ( $F_{3,155} = 26.14, p < 0.001$ ), épocas climáticas ( $F_{2,155} = 59.86, p < 0.001$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $F_{6,155} = 4.88, p = 0.0001$ ). La concentración media mínima de OD ( $3.7 \pm 0.3 \text{ mg/l}$ ) se registró en la zona Sur, mientras que en las zonas Externa y Mar-laguna se observaron las concentraciones más altas ( $5.9 \pm 0.3 \text{ mg/l}$  y  $5.4 \pm 0.3 \text{ mg/l}$ , respectivamente), las cuales fueron estadísticamente similares entre ellas (Fig. 2f). Las diferencias entre

épocas climáticas indicaron un patrón temporal de nortes > lluvias = secas (prueba de Bonferroni,  $p < 0.05$ ), con la media más baja en la época de lluvias en la zona Sur y las más altas en la época de nortes en las zonas Externa y Mar-laguna (Tabla 2).

Las concentraciones medianas de nitrato generalmente fueron < 8  $\mu\text{M}$ , variando mensualmente de 2.12  $\mu\text{M}$  en mayo en la zona Sur a 13.29  $\mu\text{M}$  en diciembre en la misma zona (Fig. 3a). El valor mínimo (0.04  $\mu\text{M}$ ) se observó en E5 en abril y el máximo (16.76  $\mu\text{M}$ ) en E8 en diciembre. No se encontraron diferencias significativas en la mediana entre zonas ( $H_{3,88} = 3.87, p = 0.276$ ; Fig. 3b), épocas climáticas ( $H_{2,88} = 2.72, p = 0.257$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 15.09, p = 0.178$ ; Tabla 2).

Las concentraciones medianas de nitrito generalmente fueron < 1  $\mu\text{M}$ , variando mensualmente de 0.19  $\mu\text{M}$  en febrero en la zona Norte a 3.38  $\mu\text{M}$  en diciembre en la misma zona (Fig. 3c). El valor mínimo (0.10  $\mu\text{M}$ ) se observó en E5 en julio y en E7 en junio y abril, mientras que el



Figuras 3a-h. Variación temporal y espacial del nitrato (a, b), nitrito (c,d), amonio (e, f) y fósforo reactivo soluble (FRS) (g, h) en agua en cuatro zonas de la laguna Yalahau, Quintana Roo de junio de 2001 a mayo de 2002. H, prueba de Kruskal-Wallis.

máximo (4.67  $\mu\text{M}$ ) en E6 en diciembre. No se encontraron diferencias significativas en la mediana entre zonas ( $H_{3,88} = 2.77, p = 0.427$ ; Fig. 3d), épocas climáticas ( $H_{2,88} = 3.05, p = 0.217$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 8.01, p = 0.711$ ; Tabla 2).

Las concentraciones medianas de amonio generalmente fueron < 10  $\mu\text{M}$ , variando mensualmente de 2.61  $\mu\text{M}$  en mayo en la zona Mar-laguna a 241.11  $\mu\text{M}$  en abril en la zona Norte. En abril, también se re-

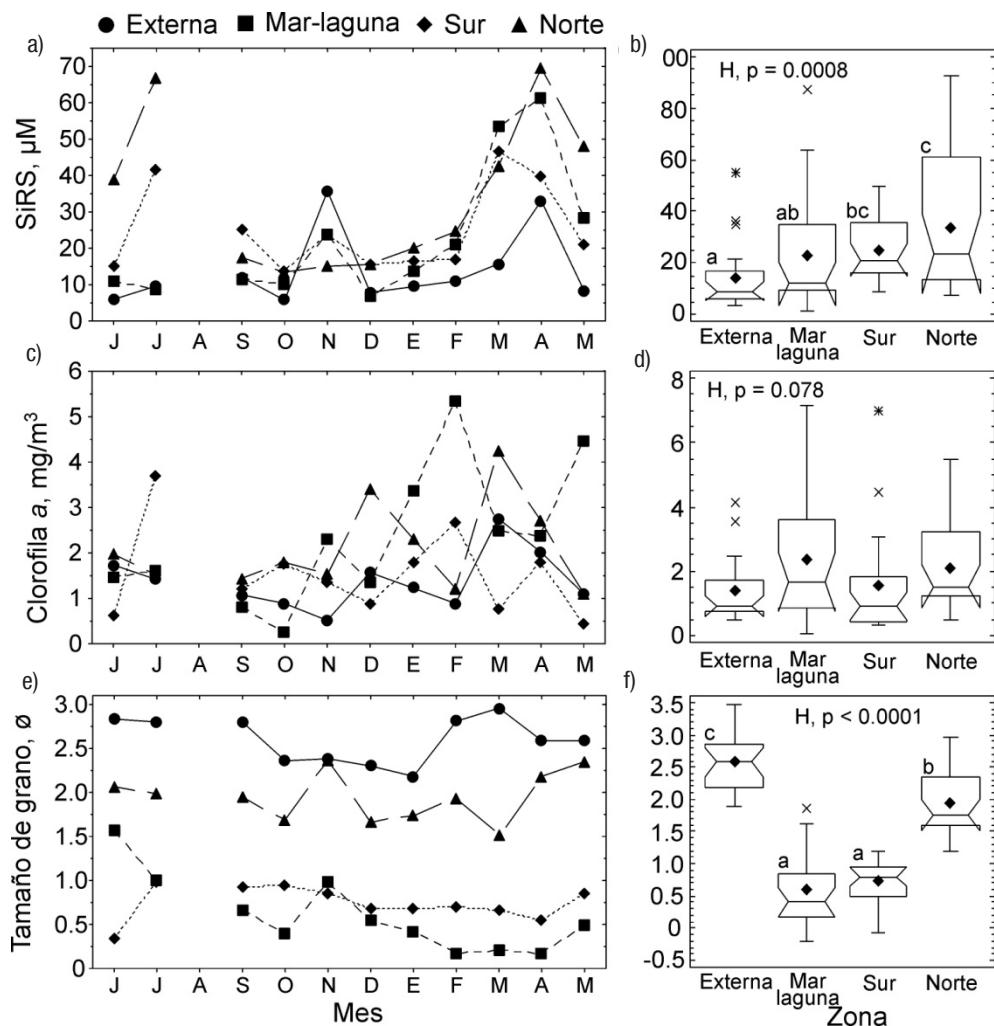
gistraron concentraciones de amonio > 100  $\mu\text{M}$  en las otras tres zonas, mientras que en noviembre se observó otro pico de concentración en las zonas Mar-laguna (76.32  $\mu\text{M}$ ) y Sur (45.98  $\mu\text{M}$ ) (Fig. 3e). El valor mínimo (0.63  $\mu\text{M}$ ) se observó en E8 en diciembre y el máximo (298.62  $\mu\text{M}$ ) en E5 en abril. No se encontraron diferencias significativas en la mediana entre zonas ( $H_{3,88} = 3.19, p = 0.364$ ; Fig. 3f), épocas climáticas ( $H_{2,88} = 1.52, p = 0.467$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 8.49, p = 0.669$ ; Tabla 2).

Las concentraciones medianas de FRS generalmente fueron < 5  $\mu\text{M}$ , variando de 0.86  $\mu\text{M}$  en septiembre en la zona Externa a 23.05  $\mu\text{M}$  en abril en la zona Norte (Fig. 3g). El valor mínimo (0.52  $\mu\text{M}$ ) se observó en E3 y E8 en diciembre y febrero, respectivamente, y el máximo (40.19  $\mu\text{M}$ ) en E5 en abril. Se encontraron diferencias significativas en la mediana entre épocas climáticas ( $H_{2,88} = 14.55, p = 0.0007$ ; nortes = secas > lluvias = nortes: prueba de Dunn,  $p < 0.05$ ), pero no entre zonas ( $H_{3,88} = 1.01, p = 0.799$ ; Fig. 3h) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 18.02, p = 0.081$ ; Tabla 2).

Las concentraciones de SiRS generalmente fueron < 40  $\mu\text{M}$ , variando mensualmente de 5.73  $\mu\text{M}$  en octubre en la zona Externa a 69.48  $\mu\text{M}$  en abril en la zona Norte (Fig. 4a). El valor mínimo (1.31  $\mu\text{M}$ ) se observó en E4 en febrero y el máximo (92.86  $\mu\text{M}$ ) en E5 en julio. Se encontraron diferencias significativas entre zonas ( $H_{3,88} = 16.69, p = 0.0008$ ), épocas climáticas ( $H_{2,88} = 15.96, p = 0.0003$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 38.4, p = 0.0001$ ). La concentración mediana ( $\pm \text{DAM}$ , desviación absoluta de la mediana) mínima

de SiRS ( $9.02 \pm 3.38 \mu\text{M}$ ) se registró en la zona Externa y la máxima ( $23.43 \pm 12.53 \mu\text{M}$ ) en la zona Norte (Fig. 4b). Las diferencias temporales (secas > lluvias = nortes: prueba de Dunn,  $p < 0.05$ ), indicaron que la concentración mediana más baja de SiRS se registró en la época de lluvias en la zona Externa y la más alta en la época de secas en la zona Norte. En la época de secas, las otras zonas también registraron incrementos de dos hasta seis veces en las concentraciones de SiRS en comparación con las otras épocas climáticas (Fig. 4a; Tabla 2).

Las concentraciones medianas de clorofila *a* generalmente fueron < 3 mg/m<sup>3</sup>, variando mensualmente de 0.26 mg/m<sup>3</sup> en octubre en la zona Mar-laguna a 5.36 mg/m<sup>3</sup> en febrero en la misma zona (Fig. 4c). El valor mínimo (0.04 mg/m<sup>3</sup>) se observó en E3 en octubre y el máximo (7.15 mg/m<sup>3</sup>) en E4 en febrero. No se encontraron diferencias significativas en la mediana entre zonas ( $H_{3,88} = 6.8, p = 0.078$ ; Fig. 4d), épocas climáticas ( $H_{2,88} = 3.93, p = 0.14$ ) y en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 19.48, p = 0.053$ ; Tabla 2).



Figuras 4a-f. Variación temporal y espacial del silicato reactivo soluble (SiRS) (a,b) y clorofila a (c,d) en agua y el tamaño de grano del sedimento (e,f) en cuatro zonas de la laguna Yalahau, Quintana Roo de junio de 2001 a mayo de 2002. H, prueba de Kruskal-Wallis. Las letras minúsculas representan comparaciones múltiples *a posteriori* entre medianas por el método de Dunn ( $p < 0.05$ ).

El tamaño medio de grano del sedimento presentó poca variación temporal en cada una de las zonas (Fig. 4e). El diámetro medio mínimo de grano del sedimento ( $3.47 \varnothing = 0.09$  mm) se observó en E1 en julio y el máximo ( $-0.2 \varnothing = 1.15$  mm) en E4 en febrero. Se encontraron diferencias significativas entre zonas ( $H_{3,88} = 66.81, p < 0.0001$ ; Fig. 4f), en la interacción zona  $\times$  época climática ( $H_{11,88} = 69.18, p < 0.0001$ ; Tabla 2), pero no entre épocas climáticas ( $H_{2,88} = 0.68, p = 0.712$ ). Con base en la escala granulométrica de Udden-Wentworth (Udden, 1914; Wentworth, 1922), se identificaron dos grupos: (i) valores  $> 1.5 \varnothing$ , que indican el predominio de arenas finas a muy finas, característico de las zonas Externa y Norte y (ii) valores  $< 1.5 \varnothing$ , que indican el predominio de arenas gruesas a muy gruesas, característico de las zonas Mar-laguna y Sur (Fig. 4f; Tabla 2).

## DISCUSIÓN

En la laguna Yalahau, la salinidad, el silicato reactivo soluble y el tamaño de grano del sedimento presentaron la mayor variabilidad espacial y temporal. Estas variables han sido señaladas, en conjunto o por separado, como indicadoras de ambientes heterogéneos en diferentes tipos de lagunas costeras, siendo principalmente controladas por procesos naturales como la magnitud de los aportes de agua dulce, el tiempo de residencia del agua, la hidrodinámica y la presencia de vegetación acuática sumergida (VAS) (Herrera-Silveira, 1996; Boyer et al., 1997; de la Lanza Espino et al., 1998; Calva-Benítez & Torres-Alvarado, 2011; Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2003).

Las condiciones mixoeuhalinas en las zonas Externa y Mar-laguna y mixoeuhalinas-hiperhalinas en las zonas Sur y Norte, coinciden con lo reportado por Tran et al., (2002a, 2002b, 2008) y Aguilar-Salazar et al. (2003). La salinidad mixoeuhalina relativamente estable en la zona Externa parece ser consecuencia de la mayor influencia marina, tal como se ha observado en la zona costera adyacente a las lagunas Celestún y Dzilam (Herrera-Silveira, 1996; Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2003). La presencia de un manantial de agua dulce y escorrentías superficiales en las zonas Mar-laguna y Sur probablemente sean la causa de las salinidades relativamente bajas y la mayor variabilidad temporal, como resultado del patrón temporal de precipitación que incide en los aportes de agua dulce a través de estas vías. Por su parte, la zona Norte de la laguna Yalahau se caracteriza por un aislamiento relativo donde el intercambio de agua con el mar y el resto de la Laguna es escaso (Tran et al., 2002b, 2008; Aguilar-Salazar, et al., 2003). Estas condiciones, aunado a la baja precipitación (que incluso fue escasa durante la época de lluvias estudiada) y alta evaporación en la región, probablemente sean la causa de que la zona Norte presentara durante todo el periodo de estudio una tendencia a la hiperhalinidad.

En este estudio, las concentraciones de nitrato, nitrito y amonio fueron superiores o similares a las registradas en otras lagunas con condiciones prístinas de la península de Yucatán como Chacmocuk, Dzilam y Río Lagartos, pero fueron inferiores a las de lagunas donde las actividades antrópicas son más altas como Celestún, Nichupté, Bojórquez y Chetumal (revisado por Herrera-Silveira, 2006; Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010). A diferencia de los compuestos nitrogenados, las concentraciones de FRS en la laguna Yalahau fueron de 3 hasta 16 veces más altas que las registradas en todas las lagunas costeras de Yucatán y Quintana Roo (Tran et al., 2002b; Herrera-Silveira, 2006; Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010).

La concentración de nutrientes en la columna de agua frecuentemente es mayor en presencia de VAS que en ausencia de ésta, lo que se ha explicado por la reducción del movimiento del agua y la mayor retención de sedimento por parte del follaje lo que genera un efecto de trampa y sumidero de nutrientes (Koch et al., 2006; Romero et al., 2006). Aunque estos procesos no son la regla (e.g., Mellors et al., 2002), podrían ayudar a explicar las mayores concentraciones de FRS en este estudio, donde predominó *T. testudinum* en los sitios muestreados y otros estudios donde los muestreos se han realizado independiente mente de la presencia de VAS (Herrera-Silveira, 1996; Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2003; Tapia et al., 2008). En la laguna Yalahau es probable que la mayor densidad de *T. testudinum* en la época de secas (May-Kú et al., 2010) disminuya el movimiento del agua, favoreciendo el incremento de nutrientes en el agua somera. Además, las praderas más densas de *T. testudinum* pueden presentar mayor descomposición y lixiviación contribuyendo con nutrientes hacia la columna de agua (Romero et al., 2006; Rosch & Koch, 2009).

El incremento en las concentraciones de amonio y FRS durante la época de secas concuerda con lo observado en la laguna Chelem (Tapia et al., 2008). Pero difiere con lo observado en las lagunas Celestún y Dzilam donde las mayores concentraciones de amonio y FRS han ocurrido en las épocas de lluvias y nortes, estando relacionadas con la mayor precipitación y fuertes vientos que proporcionan una contribución significativa de nutrientes desde el sedimento hacia la columna de agua (Herrera-Silveira, 1996; Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2003; Tapia et al., 2008). Durante la época de secas la salinidad y la temperatura ambiental y del agua se incrementan y la precipitación, la velocidad del viento y el nivel del agua disminuyen. Es probable que en la laguna Yalahau estas condiciones ambientales promuevan la descomposición de la materia orgánica incrementando las concentraciones de amonio y FRS, tal como ha sido sugerido para la laguna Chelem (Tapia et al., 2008).

Es importante mencionar la gran presencia de aves marinas que anidan, se alimentan y descansan en la zona Norte, particularmente en la cercanía de E5, donde se observaron las concentraciones máximas de amonio y FRS en abril. En muestras de sedimento de la misma zona, Tran et al. (2002b) también observaron concentraciones altas de fósforo total ( $> 5 \mu\text{mol/g}$ ) en marzo y agosto. Lo anterior sugiere la influencia de las aves marinas en el incremento de amonio y fosfato mediante la excreción y bioperturbación del sedimento (Comín & Herrera-Silveira, 2000).

Aunque no se observaron diferencias estadísticas significativas en la concentración de nutrientes inorgánicos en la interacción zona  $\times$  época climática, la confluencia en la zona Norte en la época de secas de concentraciones de OD relativamente bajas (abril: E5 = 2.3 mg/l) y valores elevados en la concentración de indicadores de eutrofización como amonio (abril: E5 = 298.62  $\mu\text{M}$ , E6 = 183.6  $\mu\text{M}$ ), FRS (abril: E5 = 40.19  $\mu\text{M}$ ), y clorofila a (marzo: E5 = 3.24 mg/m<sup>3</sup>, E6 = 5.24 mg/m<sup>3</sup>; abril: E5 = 3.63 mg/m<sup>3</sup>), sugieren un riesgo de eutrofización alto en esta zona. Lo anterior pudiera ser favorecido por el tiempo de residencia del agua en la laguna Yalahau (de 200 a 300 d), que comparativamente está entre los más altos para las lagunas costeras de la península de Yucatán (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010). Aunque estudios recientes no detectan en la zona Norte la presencia de hidrocarburos en agua de manantiales (Medina-Moreno et al., 2014) la cercanía de esta zona a los desarrollos turísticos de Holbox indican el riesgo de ingreso

potencial de nutrientes y contaminantes a través de la contaminación antrópica del agua subterránea y las escorrentías superficiales. En las lagunas costeras de la península de Yucatán, la disposición inadecuada de las aguas residuales y residuos sólidos (basureros) provenientes de los centros urbanos y turísticos, es un problema que se ha incrementado en la última década (Herrera-Silveira, 2006).

En la península de Yucatán, la concentración de SiRS en agua de procedencia subterránea es alta (mediana = 66.7  $\mu\text{M}$ , intervalo 4.8 – 439.4  $\mu\text{M}$ ) y varía en relación inversa con la salinidad (Aranda-Cirerol *et al.*, 2006), por lo que es considerado un indicador de aportes de agua dulce hacia las lagunas costeras a través de manantiales (Herrera-Silveira, 2006; Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010). Esto ha sido evidenciado en el sur de la laguna Yalahau, donde Tran *et al.* (2002b) observaron que el agua obtenida directamente de los manantiales presentaba concentraciones de silicato de 97 a 124  $\mu\text{M}$  y salinidades de 0 ups. Sin embargo, en este estudio, las concentraciones altas de SiRS no se asociaron a salinidades bajas. Por ejemplo, la zona Norte que presentó la concentración mediana más alta de SiRS (63.2  $\mu\text{M}$ ) en la época de nortes, así como el valor máximo (92.9  $\mu\text{M}$ ) en julio, registró durante el periodo de estudio una salinidad mínima de 33.1 ups. Por otra parte, la E4, ubicada ca. 2.5 km de un manantial de agua dulce, registró la salinidad mínima (28.3 ups) en noviembre pero una concentración de SiRS de 21.22  $\mu\text{M}$ . En las zonas Mar-laguna y Sur, la distribución horizontal de agua dulce desde su punto de descarga quizás sea dominada por el ambiente mixoeuhalino a hiperhalino, lo que explicaría que no se hayan observado condiciones oligohalinas aún en E4. Sin embargo, las causas de las concentraciones altas de SiRS en la zona Norte, donde no existen manantiales puntuales y tampoco han sido reportadas descargas difusas de agua dulce, son poco claras. Es probable que en la época de secas el nivel del agua mínimo, y temperaturas y salinidades altas, favorezcan la resuspensión y disolución de diatomeas bentónicas y epífitas incrementando la concentración de silicato en la columna de agua (de Jonge & van Beusekom, 1995; Welker *et al.*, 2002). Lo anterior se vería favorecido por la densidad elevada de *T. testudinum* (May-Kú *et al.*, 2010), cuyas hojas sostienen una fauna rica en diatomeas epífitas (Hernández-Almeida *et al.*, 2013). Otros procesos que podrían explicar las concentraciones altas de SiRS son la denudación en las praderas de pastos marinos (Bolthuis *et al.*, 1984) y las escorrentías superficiales de agua dulce desde los bosques de manglar (Tanaka & Choo, 2000), además del carácter relativamente conservativo de este nutriente. Son necesarios más estudios que expliquen el origen del SiRS en la laguna Yalahau, ya que este nutriente es considerado un indicador de la vulnerabilidad de una laguna costera al proceso de enriquecimiento de nutrientes y contaminación por fuentes terrestres (Herrera-Silveira, 1996; Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010; Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Al respecto, Avelar *et al.* (2013) observaron que en la zona Norte de la laguna Yalahau las concentraciones altas de SiRS en la columna de agua coincidieron con concentraciones elevadas de hierro y cadmio en las hojas y rizoma de *T. testudinum*, sugiriendo la existencia de descargas subterráneas de agua dulce contaminada. No obstante, estos autores tampoco registraron salinidades oligohalinas.

La distribución espacial del tamaño de grano del sedimento tiene implicaciones ecológicas y de gestión ambiental, ya que existe una relación estrecha entre esta variable y la distribución y la abundancia de la fauna bentónica y la concentración de contaminantes (Zonta *et al.*, 1994; May-Kú *et al.*, 2014). En este estudio, la consistente heterogeneidad espacial en cuanto el predominio de arenas finas y gruesas en

las zonas Externa y Norte, y Mar-laguna y Sur, respectivamente, sugiere diferencias entre zonas en las condiciones hidrodinámicas (e.g., oleaje, corrientes, mareas) y las características estructurales de la VAS, que son los factores principales que afectan la distribución del tamaño medio de grano del sedimento. Por ejemplo, el predominio de sedimentos finos se ha asociado con áreas geográficamente aisladas donde la energía de los procesos hidrodinámicos es baja, así como con praderas de pastos marinos más densas, ya que las hojas reducen el movimiento del agua y favorecen la deposición y sedimentación, mientras que los rizomas actúan como estabilizadores de éstos en el fondo. Por otra parte, los sedimentos gruesos se han asociado con áreas expuestas donde la energía hidrodinámica es alta (Teeter *et al.*, 2001; Peterson *et al.*, 2004).

Así, la condición relativamente prístina de la laguna Yalahau sugiere que factores naturales como la presencia de praderas del pasto marino *Thalassia testudinum*, la magnitud de los aportes de agua dulce, la descomposición de materia orgánica y el aporte de nutrientes exógenos (e.g., excretas de aves marinas) ejercen gran influencia sobre la heterogeneidad ambiental.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al CONACYT por la beca de doctorado otorgada a May-Kú MA y a Ornelas-Roa Margarita del Laboratorio de Plancton del Cinvestav por su colaboración en el análisis de los nutrientes inorgánicos disueltos y granulometría del sedimento.

## REFERENCIAS

- AGUILAR-SALAZAR, F., J. A. GONZÁLEZ-ITURBE, A. S. GRANADOS, M. RUEDA, J. A. HERRERA-SILVEIRA, I. OLMSTED, F. REMOLINA-SUÁREZ, J. DE D. MARTÍNEZ-AGUILAR, R. FIGUEROA-PAZ & F. FIGUEROA-PAZ. 2003. *Batimetría, variables hidrológicas, vegetación acuática sumergida y peces de la laguna de Yalahau, Quintana Roo, México*. Grupo Editorial Regiomontano. 22 p.
- ARANDA-CIREROL, N., J. H. HERRERA-SILVEIRA & F. A. COMIN. 2006. Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68: 445-454.
- AVELAR, M., B. BONILLA-HEREDIA, M. MERINO-IBARRA, J. A. HERRERA-SILVEIRA, J. RAMÍREZ, H. ROSAS, J. VALDESPINO, J. P. CARRICART-GANIVET & A. MARTÍNEZ. 2013. Iron, cadmium, and chromium in seagrass (*Thalassia testudinum*) from a coastal nature reserve in karstic Yucatán. *Environmental Monitoring and Assessment* 185: 7591-7603.
- BOLTHUIS, D. A., G. W. BRAND & M. C. MOBLEY. 1984. Suspended sediments and nutrients in water ebbing from seagrass-covered and denuded tidal mudflats in a southern Australian embayment. *Aquatic Botany* 20: 257-266.
- BOYER, J. N., J. W. FOURQUREAN & R. D. JONES. 1997. Spatial characterization of water quality in Florida Bay and Whitewater Bay by multivariate analyses: zones of similar influence. *Estuaries* 20: 743-758.
- CALVA-BENÍTEZ, L. G. & R. TORRES-ALVARADO. 2011. Carbono orgánico y características texturales de sedimentos en áreas del pasto marino *Thalassia testudinum* en ecosistemas costeros del sureste del Golfo de México. *Universidad y Ciencia* 27: 133-144.

- COMÍN, F. A., M. MENÉNDEZ, J. A. ROMERO, O. HERNÁNDEZ, M. MARTÍNEZ & A. CHACÓN. 1999. Indicadores ecológicos y herramientas para la gestión de ecosistemas acuáticos en la zona costera. *Limnetica* 16: 61-68.
- COMÍN, F. A., M. MENÉNDEZ, J. A. ROMERO, O. HERNÁNDEZ, M. MARTÍNEZ, A. CHACÓN & J. A. HERRERA-SILVEIRA. 2000. The role of birds on the trophic structure and nutrient cycles of aquatic ecosystems: a review. In: COMÍN, F. A., J. A. Herrera-Silveira & J. Ramírez (Eds.). *Limnology and Aquatic Birds. Monitoring, Modeling and Management*. Universidad Autónoma de Yucatán, México, pp. 205-218.
- DE JONGE, V. N. & J. E. E. VAN BEUSEKOM. 1995. Wind- and tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the Ems estuary. *Limnology and Oceanography* 40: 766-778.
- DE LA LANZA-ESPINO, G., N. SÁNCHEZ-SANTILLAN & A. ESQUIVEL-HERRERA. 1998. Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiológica* 8: 89-96.
- DE WITT, R. 2011. Biodiversity of Coastal Lagoon Ecosystems and Their Vulnerability to Global Change. In: Grillo, O. & G. Venora, (Eds.). *Ecosystems Biodiversity*. InTech. pp. 29-40. Disponible en línea en: <http://www.intechopen.com/books/ecosystems-biodiversity/biodiversity-of-coastal-lagoon-ecosystems-andtheir-vulnerability-to-global-change>. (consultado el 30 de julio de 2014).
- FOLK, R. L. & W. C. WARD. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3-26.
- GARCÍA-BELTRÁN, G. 2006. *Estrategia de conservación de tierras del Norte del estado de Quintana Roo*. Amigos de Sian Ka'an - North American Wetlands Conservation Council. 95 p.
- HERNÁNDEZ-ALMEIDA, O. U., J. A. HERRERA-SILVEIRA & F. MERINO-VIRGILIO. 2013. Nueve nuevos registros de diatomáceas bentónicas de los géneros *Climaconeis*, *Cocconeis*, *Licmophora*, *Talaroneis*, *Oestrupia*, *Petroneis* y *Synedrosphenia* en la costa norte de la Península de Yucatán, México. *Hidrobiológica* 23: 154-168.
- HERNÁNDEZ-TERRONES, L. M. REBOLLEDO-VIEYRA, M. MERINO-IBARRA, M. SOTO, A. LE-COSSEC & E. MONROY-RÍOS. 2011. Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water Air and Soil Pollution* 218: 517-528.
- HERRERA-SILVEIRA, J. A. 1996. Salinity and nutrients in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges to the Gulf of Mexico. *Hydrobiologia* 321: 165-176.
- HERRERA-SILVEIRA, J. A. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotrópicos* 19: 94-108.
- HERRERA-SILVEIRA, J. A., F. A. COMÍN, N. ARANDA-CIREROL, L. TROCCOLI & L. CAPURRO. 2004. Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: management implications. *Ocean and Coastal Management* 47: 625-639.
- HERRERA-SILVEIRA, J. A. & S. M. MORALES-OJEDA. 2010. Subtropical Karstic Coastal Lagoon Assessment, Southeast Mexico. The Yucatan Peninsula Case. In: Kennish, M. J. & H. W. Paerl (Eds.). *Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change*. CRC Marine Science Series, CRC press, Boca Raton, FL, pp. 307-333.
- HUETER, R. E., J. L. CASTILLO-GÉNIZ, J. F. MÁRQUEZ-FARIAS & J. P. TYMINSKI. 2007. The use of Laguna Yalahau, Quintana Roo, Mexico as a primary nursery for the blacktip shark (*Carcharhinus limbatus*). In: McCandless, C. T., N. E. Kohler & H. L. Pratt Jr. (Eds.). *Shark nursery grounds of the Gulf of Mexico and the East coast waters of the United States*. American Fisheries Society. Symposium 50. pp. 345-364.
- JEFFRY, S. W. & G. F. HUMPHREY. 1975. New spectrophotometric equation for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen* 167: 191-194.
- KOCH, E. W., J. D. ACKERMAN, J. VERDUIN & M. VAN KEULEN. 2006. Fluid Dynamics in Seagrass Ecology - from Molecules to Ecosystems. In Larkum, A. W. D., R. J. Orth & C. M. Duarte (Eds.). *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 193-225.
- MAY-KÚ, M. A., P. L. ARDISSON & U. ORDÓÑEZ-LÓPEZ. 2010. Morphological variation of *Thalassia testudinum* in two shallow coastal environments from the southeastern Gulf of Mexico. *Botanica Marina* 53: 449-455.
- MAY-KÚ, M. A., M. CRIALES, J. L. MONTERO-MUÑOZ & P. L. ARDISSON. 2014. Differential use of *Thalassia testudinum* habitats by sympatric Peñaeids in a nursery ground of the southern Gulf of Mexico. *Journal of Crustacean Biology* 34: 144-156.
- MEDINA-GÓMEZ, I. & J. A. HERRERA-SILVEIRA. 2003. Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58: 455-465.
- MEDINA-MORENO, S. A., A. JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, M. GUTIÉRREZ-ROJAS & M. A. LIZARDI-JIMÉNEZ. 2014. Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as a function of tourism development in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13: 509-516.
- MELLORS, J., H. MARSH, T. J. B. CARRUTHERS & M. WAYCOTT. 2002. Testing the sediment-trapping paradigm of seagrass: Do seagrasses influence nutrient status and sediment structure in tropical intertidal environments? *Bulletin of Marine Science* 71: 1215-1226.
- ORDÓÑEZ-LÓPEZ, U. & V. D. GARCÍA-HERNÁNDEZ. 2005. Ictiofauna juvenil asociada a *Thalassia testudinum* en Laguna Yalahau, Quintana Roo. *Hidrobiológica* 15: 195-204.
- PETERSON, C. H., R. A. LUETTICH JR., F. MICHELI & G. A. SKILLETER. 2004. Attenuation of water flow inside seagrass canopies of differing structure. *Marine Ecology Progress Series* 268: 81-92.
- ROMERO, J., K. S. LEE, M. PÉREZ, M. A. MATEO & T. ALCOVERRO. 2006. Nutrients dynamics in seagrass ecosystems. In: Larkum, A. W. D., R. J. Orth & C. M. Duarte (Eds.). *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 227-254.
- ROSCH, K. L. & M. S. KOCH. 2009. Nitrogen and phosphorus recycling by a dominant tropical seagrass (*Thalassia testudinum*) across a nutrient gradient in Florida Bay. *Bulletin of Marine Science* 84: 1-24.
- STRICKLAND, J. D. H. & T. R. PARSONS. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada 167. 311 p.

- TANAKA, K. & C. POH-SZE. 2000. Influences of nutrient outwelling from the mangrove swamp on the distribution of phytoplankton in the Matang Mangrove estuary, Malaysia. *Journal of Oceanography* 56: 69-78.
- TAPIA-GONZÁLEZ, F. U., J. A. HERRERA-SILVEIRA & M. L. AGUIRRE-MACEDO. 2008. Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76: 418-430.
- TEETER, A. M., B. H. JOHNSON, C. BERGER, G. STELLING, N. W. SCHEFFNER, M. H. GARCIA & T. M. PARCHURE. 2001. Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). *Hydrobiologia* 444: 1-23.
- TRAN, K. C., D. VALDÉS-LOZANO, J. A. HERRERA-SILVEIRA, J. EUAN, I. MEDINA-GÓMEZ & N. ARANDA-CIREROL. 2002a. Status of water quality at Holbox Island, Quintana Roo State, Mexico. In: C. A. Brebbia (Ed.). *Coastal Environment*. WIT Press, Ashurst Lodge, Southampton, UK, pp. 331-340.
- TRAN, K. C., D. VALDÉS-LOZANO, J. EUAN, E. REAL & E. GIL. 2002b. Status of water quality at Holbox Island, Quintana Roo State, Mexico. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 5: 173-189.
- TRAN, K. C., J. EUAN & M. L. ISLA. 2002c. Public perception of development issues: impact of water pollution on a small coastal community. *Ocean and Coastal Management* 45: 405-420.
- TRAN, K. C., D. VALDÉS-LOZANO, E. REAL & O. ZAPATA-PÉREZ. 2008. Variaciones del índice de calidad en laguna Yalahau, Quintana Roo, México, basado en las características del agua y sedimentos, en el periodo 1999-2002. Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, Vol. 9. Disponible en línea en: [http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/cte\\_09/art\\_09-04/id49.htm](http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/cte_09/art_09-04/id49.htm). (consultado el 4 de diciembre de 2014).
- UDDEN, J. A. 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America* 25: 655-744.
- WELKER, C., E. SDRIGOTTI, S. COVELLI & J. FAGANELI. 2002. Microphytobenthos in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea): relationship with labile sedimentary organic matter and nutrients. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55: 259-273.
- WENTWORTH, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30: 377-392.
- ZONTA, R., L. ZAGGIA & E. ARGESE. 1994. Heavy metal and grain-size distributions in estuarine shallow water sediments of the Cona Marsh (Venice Lagoon, Italy). *The Science of the Total Environment* 151: 19-28.

**Recibido:** 13 de enero de 2015.

**Aceptado:** 19 de octubre de 2015.