Carbono asociado a la biomasa microbiana de sedimento de manglar en dos sistemas con distinto grado de perturbación, La Paz, Baja California Sur, México

Valeria Villarreal Turriago[1]

(Director) Juan Pablo Hernández Sánchez, PhD[2]; (codirector) Blanca Estela Romero López, PhD[2]

[1]Universidad El Bosque, Programa de Biología; [2]Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), [3]Laboratorio de Microbiología Ambiental.

Resumen

La biomasa microbiana desempeña un papel fundamental en la descomposición de la materia orgánica, lo cual permite la liberación de nutrientes y facilita el almacenamiento de carbono en el suelo. En los manglares, la captura y secuestro de carbono en el sedimento reduce su liberación a la atmósfera y ayuda a mitigar el cambio climático el cual es un servicio ambiental característico de los humedales costeros. En este estudio se determinó el carbono microbiano asociado al sedimento de manglar en dos zonas con distinto grado de perturbación en la Paz, Baja California Sur, México. La primera se caracteriza por tener un buen estado de conservación, en comparación de la zona 2, la cual recibe escurrimientos intermitentes de áreas agrícolas, además del efluente de la planta de tratamiento municipal Aeropuerto-La Paz. Se establecieron 10 puntos de muestreo en cada zona de estudio. En cada zona se tomaron 10 muestras a una profundidad de 4 centímetros y se registraron in situ las siguientes variables

de agua intersticial: salinidad, temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial de oxidorreducción y sólidos totales disueltos. Los resultados indicaron que la zona 1 presentó mayor biomasa de carbono microbiano con un promedio de 66.22 a comparación de la zona 2 que obtuvo un promedio de 53.42, lo cual se explicó por su intervención antrópica. La ordenación de los puntos de muestreo respecto a las variables del agua intersticial permitió diferenciar las zonas de estudio. La zona 1 se caracterizó por valores más altos de salinidad, sólidos totales disueltos, y temperatura, mientras que la zona 2, los más altos fueron: potencial de óxido reducción y pH, lo cual refleja condiciones más oxigénicas y mayor condición de perturbación.

Palabras clave: humedales, microorganismos, perturbación, sedimentos marinos, zonas áridas.

Introducción

Los manglares se caracterizan por ser ecosistemas costeros tropicales y subtropicales conocidos por sus funciones específicas como lo son: transformadores, almacenadores y exportadores de materia orgánica que desempeñan un papel vital en la salud y la resiliencia de las zonas costeras en todo el mundo[1]. En México, los manglares ejercen un papel crucial en la producción de la costa contra la erosión y las tormentas; y en la captura y almacenamiento de carbono, lo que presenta gran interés por su relación con gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4) [2]; y en la provisión de hábitats críticos para la reproducción y alimentación de ejemplares de especies como aves y peces.

El mangle *Avicennia germinans* más conocido como mangle negro, perteneciente a la familia Acanthaceae [3], se caracteriza por ser abundante en regiones áridas y costeras salinas y salobres en áreas pantanosas, características presentes en Estero Zacatecas y Cola de la Ballena, *Avicennia* desarrolla raíces aéreas llamadas neumatóforos que permiten el anclaje del suelo y reducir la velocidad del flujo del agua, olas y mareas [4]; Donde este mangle ayuda a actuar como barrera física protegiendo la costa de la acción erosiva de las olas durante eventos climáticos extremos como los huracanes o tormentas tropicales. Por otro lado, actúan como sumideros de carbono acumulando grandes cantidades de biomasa

ya que durante su crecimiento absorben dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera a través de la fotosíntesis [5]. Este dióxido de carbono capturado se almacena como carbono en diferentes partes del mangle como lo son: en sus hojas, tallos y raíces (biomasa viva) y también en el suelo anegado, donde se descompone lentamente, acumulando más carbono [6].

El carbono de biomasa microbiana ($C - BM$) es la parte de la materia orgánica en los suelos constituida por los microorganismos vivos, con tamaños desde 5 y 10 $\mu m3$ [7]. La biomasa microbiana es el indicador más importante de la actividad microbiana en combinación con un parámetro de actividad como lo es la producción de CO_2 [8]. Según [9], el ($C - BM$) regula funciones ecológicas importantes como lo son el ciclo de carbono (C) al descomponer materia orgánica; el ciclo de nitrógeno (N) al transformar el nitrógeno en formas disponibles para las plantas y el ciclo de fósforo (P), al liberar y movilizar fósforo que se encuentra en el suelo.

El carbono orgánico es fundamental en el ciclo del carbono en el sedimento de manglares y es influenciado directamente por los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial y el sedimento [10]. Parámetros como el pH, salinidad y el potencial redox influyen en la actividad y la abundancia de la biomasa microbiana lo que significa que esto determina cuánto carbono se secuestra o se libera en el ecosistema [11]. De esta manera es importante evaluar estos factores debido a que es esencial para entender cómo las condiciones ambientales promueven o limitan la capacidad de los mangles de almacenar carbono [10]. En la Paz, Baja California Sur, los parámetros fisicoquímicos afectan el metabolismo y la composición de las comunidades microbianas en el sedimento, las cuales contribuyen a la descomposición de materia orgánica y a la formación de carbono estable en el suelo.

Método

Zona de estudio

El estudio fue realizado en La Paz, Baja California Sur, México (Figura 1). Se establecieron dos zonas de manglar; la primera se denomina Estero Zacatecas (Zona 1) (24°10.359 N, 110°26.080 O), se

caracteriza por ser un ecosistema de gran importancia ecológica y biológica [12], por presentar aguas tranquilas y su biodiversidad la cual incluye especies marinas como: aves acuáticas, peces, crustáceos y plantas acuáticas [13]. Esta zona sirve como refugio y hábitat crucial para numerosas especies de aves migratorias y residentes convirtiendo en un lugar de gran interés como su red en los manglares creando un mosaico de hábitat que sustentan una rica comunidad de vida silvestre; gracias a su valor ecológico Estero Zacatecas desempeña un papel importante en la vida de las comunidades locales proporcionando recursos naturales como pesca y turismo ecológico, sin embargo, se tiene presente que también enfrenta desafíos como la pérdida de hábitat, contaminación y presión humana [14] no obstante su estado de conservación se considera relativamente bueno.

La segunda zona fue Aeropuerto-La Paz (Zona 2) (24°08′02″N, 110°22′54″O), se ubica en las periferias de la cuidad [15]. Zona de alto crecimiento urbanístico y por consiguiente de alto impacto antrópico debido a la presencia de sedimento agrícola los cuales por procesos de escorrentía inducidos por las lluvias transportan nutrientes y contaminantes que afectan la calidad de agua de los arroyos al momento de desembocar en la zona [16].

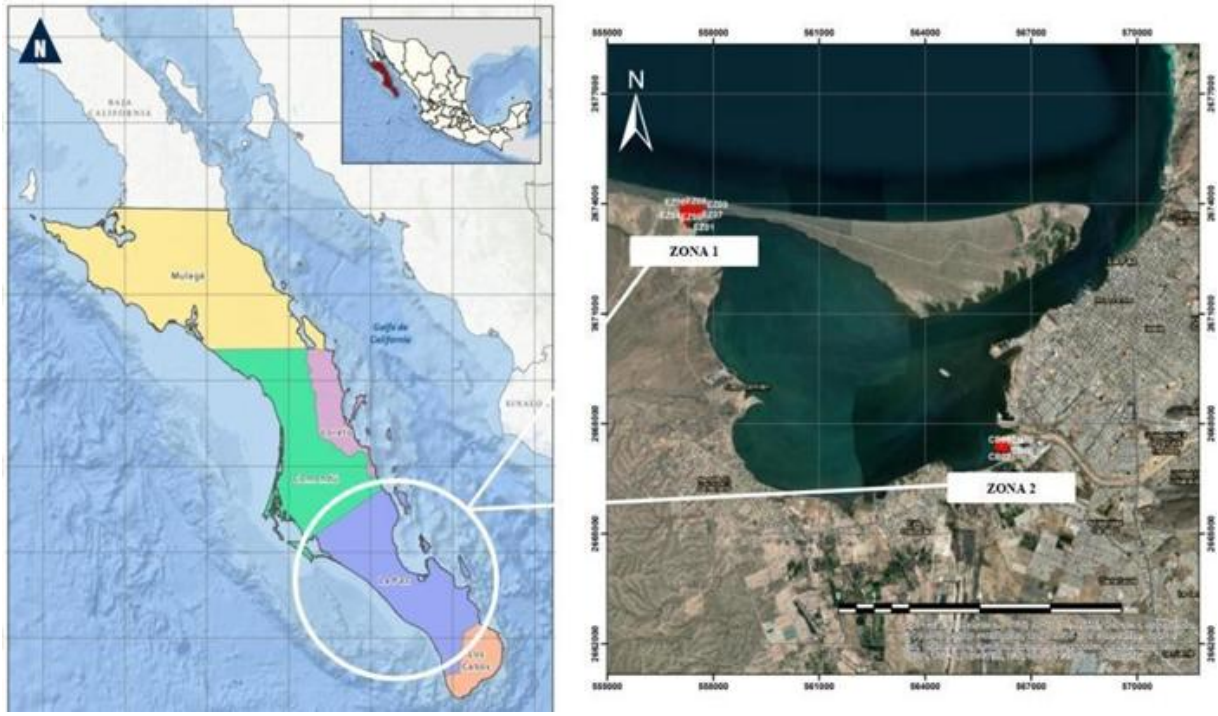

Figura 1. Zonas de muestreo Estero Zacatecas (Zona 1) y Cola de la Ballena (Zona 2), La Paz, Baja California Sur, México.

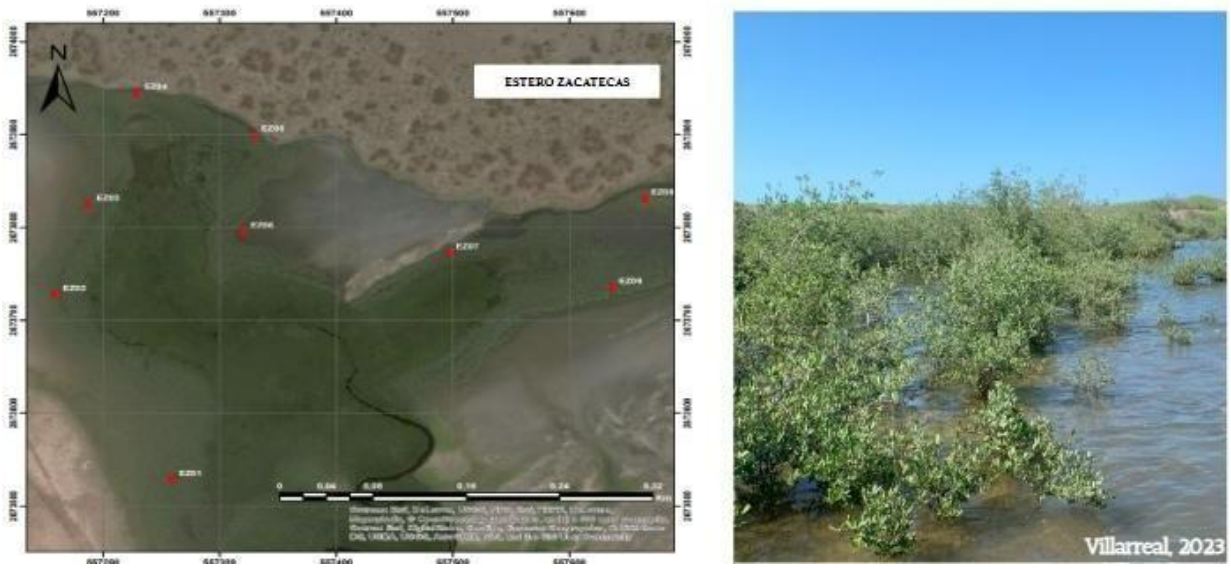

Figura 2. Zonas de muestreo (Zona 1) Estero Zacatecas, La Paz, Baja California Sur, México.

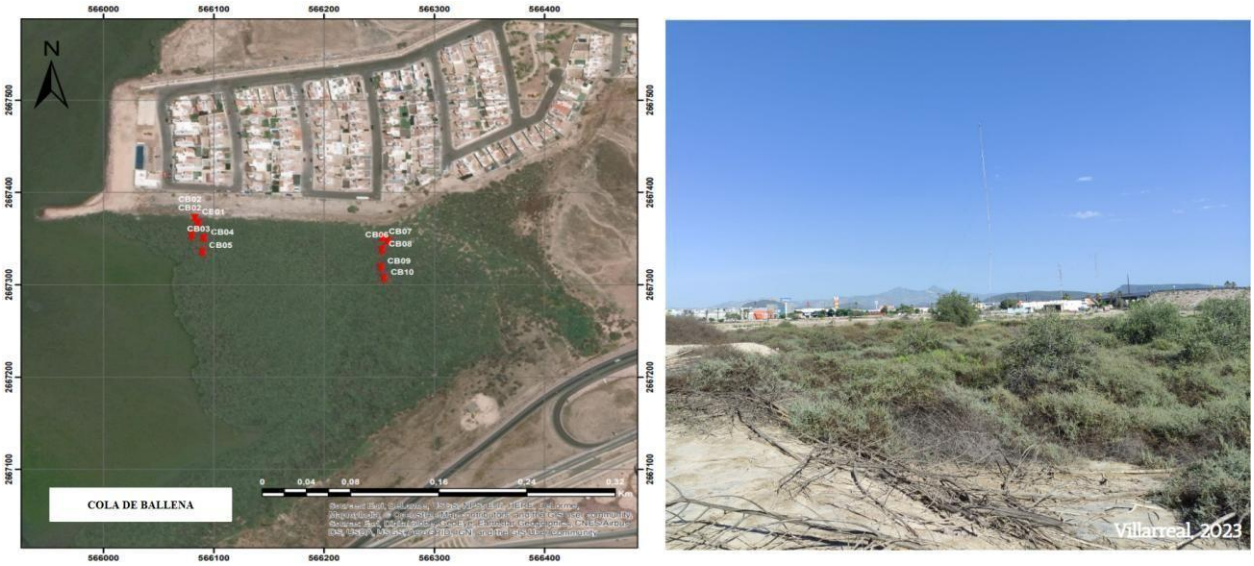

Figura 3. Zonas de muestreo (Zona 2) Cola de la Ballena, La Paz, Baja California Sur, México.

Colectas de muestras de suelo

Se tomaron muestras de 10 puntos en cada zona, considerando tres réplicas en cada punto con ayuda de un nucleador de suelo (Figura 4). Se removió la materia orgánica usando un transecto en forma de Z.

Las muestras se tomaron con una profundidad de 4 centímetros con el nucleador, para posteriormente luego de haber obtenido todas las muestras, se almacenaban en bolsas plásticas resellables debidamente marcadas y refrigeradas a una temperatura de 4°C. Una vez obtenidas se tamizaron usando un tamiz con un diámetro de poro de 2 mm. El contenido resultante se almacenó en bolsas plásticas resellables nuevas para posteriormente realizar la técnica de carbono microbiano.

Figura 4. Toma de muestras del suelo con ayuda de un nucleador cilíndrico

Se extrajo agua de los intersticios del sedimento mediante una sonda de acrílico (Figura 5). Al ser extraída se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos: salinidad con el refractómetro (Vee Gee Scientific STX-3 Handheld Refractometer), pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), potencial de óxido reducción (ORP) y sólidos totales disueltos (TDS) con una sonda multiparamétrica (ULTRAMETER II ™ 6 PFC E). De esta manera estos parámetros ambientales nos permiten evidenciar si las condiciones del sedimento de cada zona estudiada eran diferentes.

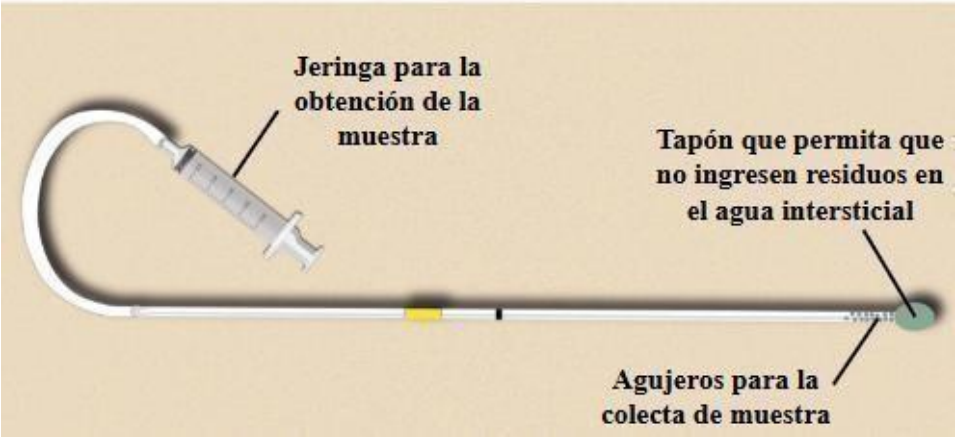

Figura 5. Diseño del equipo para la obtención de agua intersticial

Técnica de carbono en biomasa microbiana

El carbono de biomasa microbiana (C_BM) se determinó siguiendo el método propuesto por: [17] y modificado por [18]. Para esta técnica se manejaron tres tipos de muestras; las muestras fumigadas con cloroformo líquido, las muestras control no fumigadas sin cloroformo y las muestras blancas sin suelo. Para las muestras fumigadas se pesaron 15 g de suelo y se pusieron en frascos de 200 ml, se agregaron 0.6 ml de cloroformo y se agitaron en vortex por 20 segundos. Se colocaron en un desecador y se incubaron en oscuridad a temperatura ambiente por 24 horas en la campana de extracción. Al transcurrir las 24 horas, se pesaron otros 15 g de suelo húmedo correspondiente a las muestras control (no fumigadas). A la totalidad de muestras junto a las blancas sin suelo, se les agrego 40 ml de sulfato de potasio al 0.5M y se les sometió en la placa de agitación 30 minutos a 200 Rpm.

Se utilizaron frascos de vidrio de 100 ml y filtros Whatman grado 42 para separar el sobrenadante de cada muestra luego de ser agitadas, se transfirieron 5 ml de filtrado, 2 ml de dicromato de potasio y 15 ml de solución ácida 2:1 en tubos de 50 ml para cada muestra y se agitaron en un vortex. Se calentaron las muestras a 100°C por 30 minutos, se dejaron enfriar en una gradilla por 15 minutos. El contenido de los tubos se transfirió a matraces de 125 ml realizando un lavado al tubo con 28 ml de agua desionizada con la finalidad de utilizar la totalidad de la muestra, posteriormente adicionando al matraz 7 gotas de ferroína. Para las titulaciones se utilizó una bureta de 50 ml con una solución sulfato ferroso amoniacal

hexahidratado 0.01M hasta obtener una coloración roja oscura. Previo a la titulación de las muestras, se utilizaron muestras blancas que fueron utilizadas para el cálculo exacto de la concentración del titulante.

Adicionalmente, se realizó la determinación de la humedad del suelo para posteriormente utilizarla en el cálculo de la biomasa asociada al carbono microbiano. Para ello, se secaron 10 g de suelo fresco a 100°C por 48 horas. La diferencia entre el peso húmedo y peso en seco permitió obtener el porcentaje de humedad de cada muestra.

El carbono microbiano se calculó usando la siguiente fórmula para las muestras fumigadas y no fumigadas:

Calculo carbono de la biomasa microbiana

$$C - BM = \frac{\left[\frac{(Lectura\ de\ blancos) - (Lectura\ de\ muestra) * molaridad\ de\ titulante}{Molaridad\ de\ K_2Cr_2O_7}\right] * \left(1200\ * \left(\frac{ml\ K_2SO_4}{ml\ filtrado}\right)\right)}{W}$$

Dónde, Lectura de blancos corresponde a (muestras que no contenían materia orgánica y pasaron por todo el proceso para ayudar al cálculo), Lectura de muestra (cada muestra del titulante) y W (peso de suelo seco) obtenido en la determinación de humedad.

Calculo de biomasa en carbono microbiano de cada muestra

$$Biomasa\ = \frac{(Carbono\ de\ muestra\ fumigada) - (Carbono\ de\ muestra\ no\ fumigada)}{Factor\ de\ corrección}$$

La biomasa se expresa como µg de C por gramo de suelo seco o también mg de carbono por kilogramo de suelo.

Análisis estadístico

Se confirmó la homogeneidad de varianzas y normalidad de datos para poder realizar un análisis de varianza y comparación de las medidas de los datos de carbono asociado a la biomasa microbiana entre la Zona 1 y la Zona 2, realizando la gráfica con el programa Sigmaplot V.10. Y pruebas PCA usando el programa R studio para los parámetros ambientales.

Resultados y discusión

Se evidencia en la figura 6 la comparación de los valores de la biomasa en carbono microbiano (μg de C/g de suelo seco) entre los diferentes puntos de muestreo dentro de las zonas: Estero Zacatecas y Cola de la Ballena. Posteriormente a esto, se evidencia que los valores de carbono microbiano son más altos en los puntos correspondientes a la zona 1 en comparación a la zona 2, evidentemente en los puntos 1,2 y 3 donde se presentan los máximos valores en la siguiente figura, alcanzando una aproximación de 150 (μg de $C/$ g de suelo seco) en el punto 2. Esto nos da a entender que una mayor o alta actividad microbiana posiblemente se dé por una mejor calidad ambiental del sedimento que se encontraba en Zacatecas, ya que esta zona se caracterizaba por presentar aguas tranquilas y un mejor comportamiento tanto ecológico como biológico, lo que esto favorece a una mayor retención de materia orgánica. A comparación de la zona 2 que los valores fueron mucho más bajos, con excepción en los puntos 7 y 8 donde se aproximan a los niveles de la zona 1. Y que pues esto relativamente nos indica una mayor intervención antropogénica posiblemente debido a que se pueda estar limitando el desarrollo y la actividad de la biomasa en carbono microbiano.

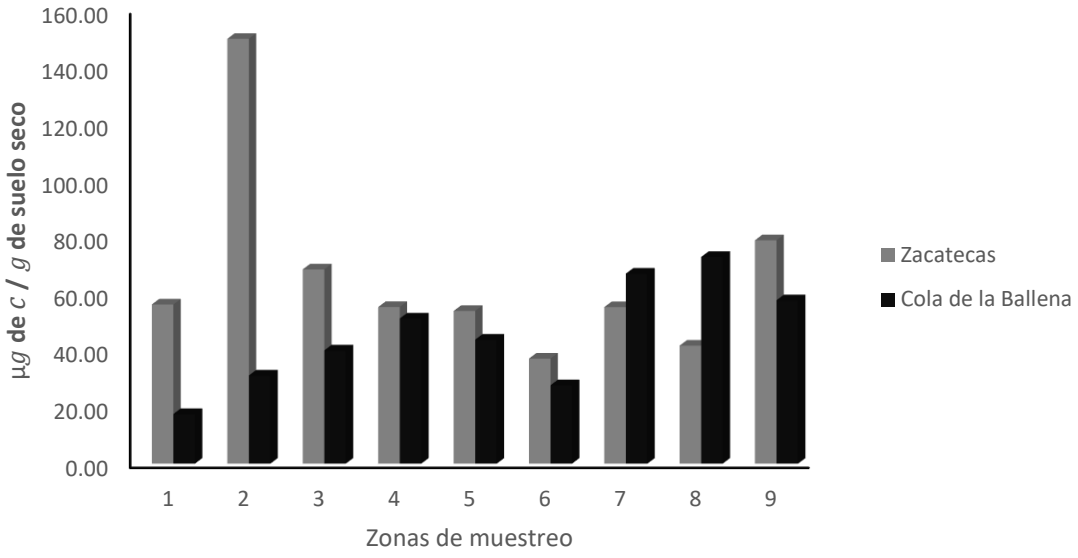

Figura 6. Comparación de los valores de la biomasa en carbono microbiano por punto de muestreo en las zonas comprendidas A) Estero Zacatecas, B) Cola de la Ballena (Aeropuerto La Paz).

Para el carbono de biomasa microbiano se observan diferencias estadísticamente significativas entre las dos zonas de muestreo, siendo mayor en la Zona 1 menos intervenida (Figura 7).

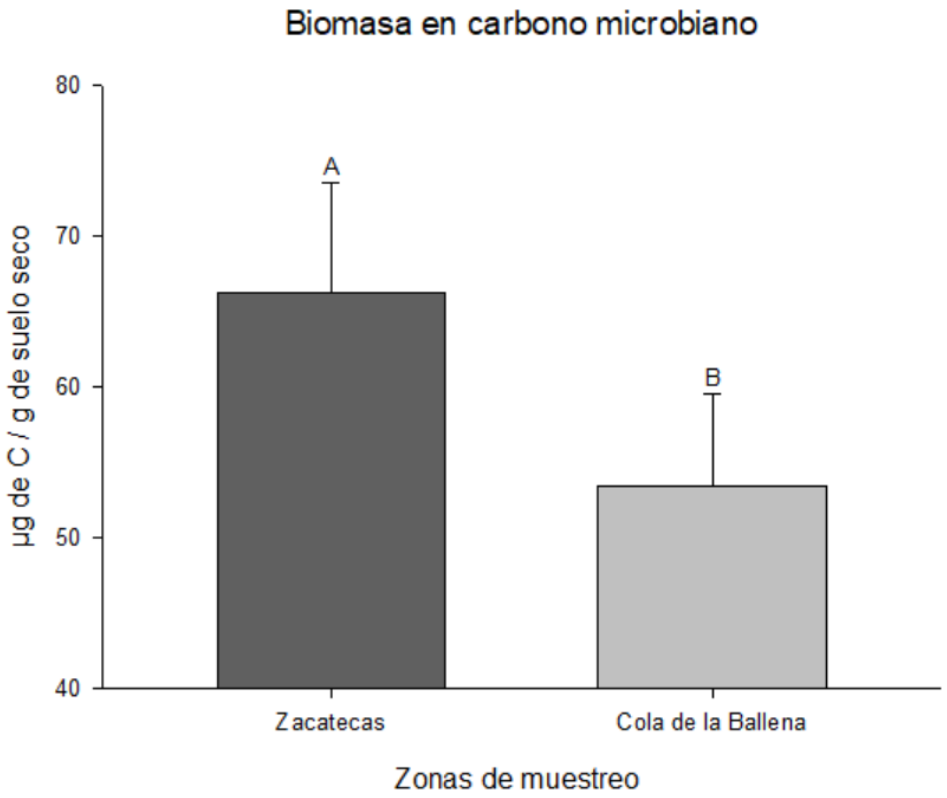

Figura 7. Comparación de la biomasa en carbono microbiano en las zonas comprendidas A) Estero zacatecas, B) Cola de la ballena (Aeropuerto La Paz). Las letras indican las diferencias a una $p<0,05$.

La zona 1 presentó un valor más alto de carbono asociado a la biomasa microbiana, superando los 65 µg C/g de suelo seco, indicando una presencia de mayor actividad microbiana y microorganismos en el sedimento, favorecida por condiciones ambientales más estables, posiblemente debido a una menor perturbación antrópica [19], las comunidades microbianas mantienen un balance en la descomposición

de materia orgánica y la regulación de los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo [7], y la formación de carbono estable [20]. Además, es posible que la presencia de raíces contribuye a un suelo más rico en nutrientes, a la estabilización del carbono y al mantenimiento de la fertilidad edáfica; procesos esenciales para la productividad del manglar y su capacidad de resiliencia frente a perturbaciones ambientales [2].

De tal manera que la alta biomasa microbiana que se presenta en la zona indica que se mantienen procesos ecológicos más conservados, como el reciclaje de nutrientes y una mayor acumulación de carbono en el suelo. El $C - BM$ es reconocido como un indicador del estado ecológico de los ecosistemas terrestres y costeros, ya que refleja la calidad del suelo, la cantidad de nutrientes y las condiciones físicas del suelo [21].

Por otro lado, la zona 2 presentó valores más bajos de carbono microbiano, alrededor de 55 µg C/g de suelo seco. Esto puede estar relacionado a la cercanía con la zona urbana y a la entrada de sedimentos, en épocas de lluvia, producto de las zonas agrícolas [16]; los cuales normalmente están cargados de nutrientes y contaminantes que afecten la calidad del agua [20]. Por otro lado, los ciclos de los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo pueden alterarse por la adición de contaminantes o por la extracción de recursos, ya que el nitrógeno es fundamental para el crecimiento de las plantas y otros organismos en el ecosistema; y el fósforo es fundamental para la fotosíntesis y la producción de energía en las plantas. Esta alteración que se presenta en los nutrientes afecta a las comunidades microbianas cambiando la disponibilidad de elementos esenciales para su crecimiento y para la acumulación de carbono en la biomasa [22]. Donde los manglares ayudan a regular cómo se acumulan, transforman y fluyen estos nutrientes dentro del ecosistema teniendo en cuenta que esto es crucial para mantener el equilibrio en el ambiente [23].

La entrada de nutrientes provenientes de fuentes externas puede enriquecer artificialmente el ecosistema de manglar, alterando el equilibrio natural de los ciclos biogeoquímicos. En lugar de depender únicamente de la materia orgánica generada in situ como lo es la descomposición de hojas, el sistema

comienza a reducir los nutrientes, lo que puede desencadenar efectos negativos sobre la biodiversidad y el funcionamiento general del ecosistema [2].

Posteriormente a esto, los manglares enfrentan diversas perturbaciones derivadas de actividades humanas, como el aumento de la sedimentación y los aportes excesivos de nutrientes, causados principalmente por la deforestación y los cambios en el uso del suelo. Estas presiones han contribuido a la perdida de cobertura de manglar, lo cual reduce su capacidad para proteger las costas frente a fenómenos climáticos extremos, como los huracanes, aumentando así la vulnerabilidad de las comunidades humanas [24]. A esto se suma el impacto del cambio climático, que intensifica las tormentas, eleva las temperaturas y contribuye al aumento de los niveles de CO_2 atmosférico, lo que puede acelerar la degradación de los ecosistemas de manglar [24].

La medición de parámetros fisicoquímicos de agua intersticial proporciona información adecuada sobre los procesos biogeoquímicos del sedimento, ya que está directamente relacionada con la solución del suelo que llena espacios porosos y que interactúa con las raíces y microorganismos. En la Tabla 1 se evidencian los valores registrados en campo para los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial, incluyendo los promedios y errores estándar. Teniendo en cuenta que estos parámetros fisicoquímicos son relevantes porque influyen directamente en la actividad microbiana y, por lo tanto, en la cantidad de carbono asociado a la biomasa de carbono microbiano.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos evaluados en las muestras de agua intersticial, con su respectico valor promedio y su error estándar.

Puntos de muestreo		Salinidad	Conductividad eléctrica [CE]	Solidos totales disueltos [TDS]	Temperatura (°C)	Potencial óxido-reducción [ORP]	pH
Estero Zacatecas	EZ1	1.025	58.82	65.14	35.3	-150	7.53
	EZ2	1.03	38.21	64.4	33.4	-151	6.78
	EZ3	1.039	57.52	62.78	36	-81	7.3
	EZ4	1.05	93.26	128.5	32.8	-150	6.69
	EZ5	1.046	98.35	139	32.3	-217	6.55
	EZ6	1.045	88.31	117	33.3	-292	6.8
	EZ7	1.069	116.6	183.5	32.6	-89	6.47
	EZ8	1.038	73.12	88.12	33	-255	6.54
	EZ9	1.48	92.6	126.3	35.3	-264	6.87
	EZ10	1.06	105.7	158.8	34.3	-44	6.56
	Prom	1.088	82.249	113.354	33.83	-169.3	6.809
	SE	0.0437	7.773	13.321	0.413	26.805	0.11
Cola de la Ballena	CB1	1.028	55.2	59.43	32.4	150	6.95
	CB2	1.045	87	116	30.8	-78	6.35
	CB3	1.034	62.7	72.19	30.3	-104	6.48
	CB4	1.025	57.3	63.5	30.1	-38	6.8
	CB5	1.031	64.88	75.5	30.3	-82	6.42
	CB6	1.03	59.51	66.36	33.3	56	7.65
	CB7	1.034	65.55	76.5	30.5	84	6.7
	CB8	1.033	66.76	78.5	29.1	-29	6.56
	CB9	1.028	57.55	64.02	30.5	28	7.35
	CB10	1.016	55.84	61.9	30.3	-46	7.36
	Prom	1.03	63.229	73.39	30.76	-5.9	6.862
	SE	0.00234	2.956	5.185	0.382	26.067	0.143

Como se evidencia en la siguiente tabla, el potencial de oxido reducción se identificó como factor de mayor influencia en el comportamiento microbiológico, lo cual se analizó con mayor detalle mediante un análisis de componentes principales PCA que se evidencia en la Figura 8.

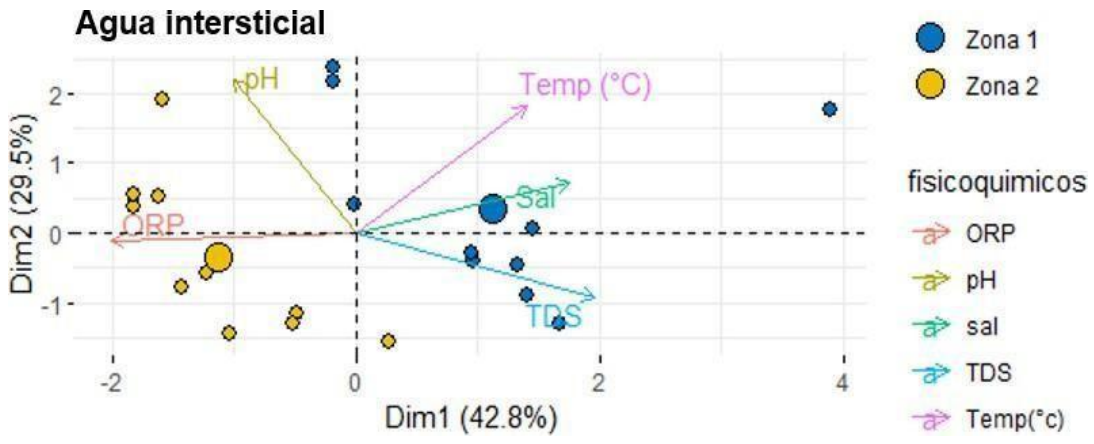

Figura 8. Gráfico PCA de comparación de fisicoquímicos de ambas zonas de muestreo Zona 1: Estero Zacatecas, Zona 2: Cola de la ballena (Aeropuerto-La Paz)

El agua intersticial puede mostrar el grado de contaminación de un área de acuerdo a sus características físicas y químicas, las cuales pueden indicar un impacto ambiental [25]. Donde los parámetros fisicoquímicos influyen directamente en el comportamiento del carbono asociado a la biomasa microbiana ($C - BM$), ya que los parámetros determinan las condiciones del hábitat en el sedimento y, por lo tanto, afectan la actividad y la composición de las comunidades microbianas [26].

El orden de los puntos de muestreo respecto a las variables del agua intersticial permitió diferenciar las zonas de estudio trabajadas (Figura 8). En la zona 1, se evidencian valores más altos de salinidad con (1.08), sólidos totales disueltos con (113.35) y temperatura de (34°C), mientras que la zona 2 tuvo un alto grado de perturbación ya que los valores de potencial de óxido reducción (-5,9) fueron más altos y un pH de 6,86. Además, en la Zona 1 (Estero Zacatecas) se evidenció que la temperatura es uno de los principales factores que influyen en los procesos biogeoquímicos del agua (Figura 8) [14]. Por otro lado, se sabe que la temperatura, en sistemas costeros, tiene un efecto en la actividad microbiana, la descomposición de materia orgánica y los procesos de oxigenación [27], en este caso como la temperatura fue de 34°C esto contribuye a una mejor actividad microbiana ya que se encuentra dentro de un rango óptimo para comunidades microbianas en ambientes áridos cálidos, de igual manera este

rango térmico promueve procesos metabólicos como la descomposición de materia orgánica y la síntesis de biomasa microbiana. En relación con la salinidad para este punto, se da a entender que, en cuerpos de agua más confinados y poco profundos, la salinidad tiende a ser más alta en climas áridos como lo es La Paz, donde la evaporación en este lugar puede ser mayor [24].

Posteriormente a esto, cabe resaltar que esta variable es demasiado importante para los manglares ya que se ha demostrado que fluctúa según la conectividad con el océano, las lluvias estacionales y la evaporación [28]. De igual manera diversos estudios han demostrado que los esteros más cerrados tienden a presentar una mayor salinidad, lo que afecta tanto a la composición de la fauna y flora como a la actividad microbiana del sedimento [2].

De acuerdo con [20], en las zonas de manglar con baja perturbación, los parámetros fisicoquímicos se mantienen constantes, lo que proporciona condiciones favorables para el crecimiento de diversos organismos. Por ejemplo, el pH y salinidad, a valores de 6.8 rango ligeramente ácido y 1.08 de salinidad, contribuyen a que los microorganismos puedan descomponer la materia orgánica mucho más eficiente, contribuyendo a una mayor acumulación de carbono microbiano en el suelo. En cambio, las zonas con mayor intervención antrópica, según [14], genera un aumento de la salinidad y la presencia de contaminantes que pueden reducir la actividad microbiana, alterar el ciclo del agua afectando la estructura del suelo y el almacenaje del carbono.

Según [20], mencionan que la estabilidad de parámetros fisicoquímicos es clave para la actividad microbiana y el almacenamiento de carbono en manglares. Por otro lado, [29] sugieren que los manglares menos impactados muestran una mayor capacidad de almacenamiento de carbono ya que los efectos del estrés fisiológico por cambios de pH o salinidad, se ven reducidos en estos entornos. De igual manera, la actividad biológica como la descomposición de materia orgánica puede variar debido a la respiración microbiana y la acumulación de productos de descomposición que modifican el pH en el agua [14], esto se evidencia en Estero Zacatecas al ser un sistema cerrado que presenta poca circulación y mayor retención de agua.

Por otro lado, en la zona Aeropuerto- La Paz, los niveles altos de potencial óxido reducción (ORP) con un valor de -5,9 indican condiciones más oxigénicas en el sedimento, asociadas a un mayor intercambio de agua característico en esta zona, donde estas condiciones favorecen la presencia y actividad de organismos aerobios, a comparación con los niveles bajos de ORP registrados en la zona 1 (-169.3 mV), donde predominan por condiciones anaerobias que pueden favorecer la proliferación de microorganismos potencialmente patógenos o dañinos [30]. En zonas áridas y perturbadas se presentan condiciones extremas como la falta de agua que es un factor clave que limita la actividad microbiana y la escasez de nutrientes que hacen que la microbiota del suelo sea menos activa [31]. Posteriormente a esto, Aeropuerto-La Paz presenta una alteración hidrodinámica, ya que los sistemas acuáticos sufren cambios en sus patrones hídricos, la modificación de estuarios y cuerpos de agua para actividades agrícolas. Que alteren el nivel de agua subterránea y la disponibilidad de oxígeno en los sedimentos, lo que genera alteraciones en el ORP debido a la poca disponibilidad de oxígeno favoreciendo condiciones reductoras u oxidantes. De igual manera en esta zona, al realizarse prácticas agrícolas se genera un cambio en la dinámica de la materia orgánica en el suelo produciendo una afectación en la actividad microbiana y esto hace que cuando la materia orgánica se descomponga, se produzca un mayor consumo de oxígeno generando condiciones de reducción [16].

Conclusiones

El análisis del carbono en biomasa microbiana evidenció diferencias entre las dos zonas de estudio, lo que confirma que el grado de perturbación influye directamente en la capacidad de los manglares para almacenar carbono microbiano. Ya que esto resalta la utilidad de C-BM como indicador ecológico en ecosistemas con diferente presión antrópica.

La implementación de técnicas para la estimación de carbono microbiano en sedimento de manglar resulto afectiva ya que permitió obtener resultados relevantes sobre la actividad microbiana y su relación

con la presión antrópica. Este método se confirma como una herramienta útil e importante para evaluar el estado ecológico en el que se encuentra los manglares.

Los resultados evidenciaron que existe una relación inversa entre el carbono en biomasa microbiana y el grado de presión antrópica. La zona con menor intervención humana presento valores más altos de C-BM, lo que sugiere que la actividad antrópica puede afectar negativamente la capacidad de los microorganismos del suelo para contribuir al almacenamiento de carbono en *Avicennia germinans*.

Los parámetros fisicoquímicos ambientales del agua intersticial reflejaron diferencias notorias entre cada zona, asociadas al grado de perturbación, evidenciando que Estero Zacatecas presento condiciones más salinas, calidad y con mayores TDS, mientras que Aeropuerto-La Paz evidenció valores de pH y ORP más elevados, relacionados a un ambiente de baja perturbación. Esto confirma que los parámetros si permiten distinguir el nivel de perturbación entre ambos sistemas.

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a Dios, a la Universidad el Bosque y al programa de Biología por permitirme culminar este gran proceso y logro en mi vida.

Al Doctor Juan Pablo Hernández que siempre confió en mí y me escuchaba todas las tardes en el

laboratorio de INBIBO. De igual manera agradecerle por darme la enorme oportunidad de poder realizar mi trabajo de grado junto a él y poder obtener muchos conocimientos.

A la Doctora Blanca Romero, por permitirme participar en este gran trabajo que logramos con mucho esfuerzo y dedicación, por brindarme ese gran cariño desde el primer día que la conocí, gracias infinitas por acompañarme en cada paso logrado. Y por compartirme sus conocimientos tanto en el laboratorio como en salidas de campo.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C. (CIBNOR) y al laboratorio de Microbiología Ambiental por abrirme sus puertas y permitir llevar a cabo mi proceso en sus instalaciones y poder brindarme todo el material para la realización de este grandioso trabajo de grado.

A Leslie Palomo por guiarme desde el primer día de trabajo, por enseñarme tantas cosas y que así no las entendiera, me las volvía a explicar, gracias por tu enorme compañía y por tu grandiosa amistad, créeme que sin ti no lo hubiera logrado.

Al Biólogo Aldey Forero, más que Biólogo mi compañero de vida ya que sin ti nada de esto hubiera sido posible, no me alcanzan las palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí y lo más importante gracias por no dejarme rendir en cada momento que me sentía triste o derrumbada y enseñarme que SI SE PUEDE. Siempre me guiaste por el camino correcto TE AMO.

A mi hermana Juliana Villarreal por nunca dejarme sola y siempre darme apoyo en cada momento que lo necesitara, que todos tus regaños me sirvieron para poder culminar todo lo que me propongo y créeme que, así como tú me ayudaste, yo te ayudare toda la vida hermana, nunca te voy a dejar sola, TE AMO.

Finalmente, y lo más importante, Agradecer a mis papas Rafael Villarreal y Aydee Turriago por permitirme estudiar lo que más me gusta y hacer todo lo posible para que nunca me falte nada, de verdad que esto no hubiera sido posible sin ustedes, gracias por tenerme tanta paciencia en todo el transcurso de esta gran meta y logro, porque nunca olviden que este logro también es de ustedes. No olviden que son lo mejor que me ha pasado en mi vida, agradezco a Dios por tenerlos y porque nunca me dejan sola. LOS AMO.

Bibliografía

1. Mitsch WJ, Gosselink JG. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. Ecol Econ. 2000;35(1):25–33.

2. Kauffman JB, Donato DC. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. CIFOR; 2012.

3. Tomlinson PB. The Botany of Mangroves. Cambridge: Cambridge University Press; 1986.

4. Hogarth PJ. The biology of mangroves and seagrasses. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press; 2015.

5. Alongi DM. Carbon sequestration in mangrove forests. Carbon Manag. 2012;3(3):313–22.

6. Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdés L, De Young C, Fonseca L, et al., editores. Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal; 2009.

7. Alef K. Anaerobic microbial activities in soil. In: Alef K, Nannipieri P, editors. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. San Diego: Academic Press; 1995. p. 271–310.

8. Anderson TH, Domsch AK. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. Soil Biol Biochem. 1993;25(3):393–5.

9. Paul EA. Soil microbiology, ecology and biochemistry. 4th ed. San Diego: Academic Press; 2014.

10. Agraz-Hernández CM, Chan-Keb CA, Chávez-Barrera J, Osti-Sáenz J, Expósito-Díaz G, Alonso-Campos VA, et al. Reserva de carbono en un ecosistema de manglar al norte de México: cambios ambientales durante 35 años. Rev Mex Biodivers. 2020;91:e912910. doi:10.22201/ib.20078706e.2020.91.2910.

11. Kauffman JB, Donato DC, Adame MF. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Bogor: CIFOR; 2013. Vol. 117.

12. Méndez R, Gonzales A. Caracterización ecológica y biológica del estero Zacatecas, La Paz, Baja California Sur, México. La Paz: Universidad Autónoma de Baja California Sur; 2013.

13. Vázquez R, Sánchez J. Biodiversidad y ecología de estuarios en Baja California Sur. Rev Mex Biodivers. 2012;83(1):45–56.

14. Alongi DM. A biogeochemical perspective of mangrove forest. Aquat Bot. 2009;91(1):14–20.

15. Aguilar Gallegos N, Olvera Martínez JA, González Martínez EG, Aguilar-Ávila J, Muñoz Rodríguez M, Santoyo Cortés H. La intervención en red para catalizar la innovación agrícola. Redes. 2017;28(1):9–31.

16. López S, Fernández R. Impacto de la escorrentía agrícola en la calidad del agua de las bahías costeras: Análisis en la Bahía de La Paz. Bol Cienc Marinas. 2016;34(2):123–35.

17. Margesin R, Schinner F, Joergensen RG, Brookes PC. Quantification of soil microbial biomass by fumigation-extraction. Biol Fertil Soils. 2005;41(6):353–61.

18. Witt C, Gaunt JL, Galicia CC, Ottow JC, Neue HU. A rapid chloroform fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon and nitrogen in flooded rice soils. Biol Fertil Soils. 2000;30:510–9.

19. Adame MF, Kauffman JB, Medina I, Gamboa JN, Torres O, Caamal JP, et al. Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. PLoS One. 2013;8(2):e56569.

20. Bashan Y, de-Bashan LE, Holguín G. Mangrove ecosystems: A study of microbial communities and their roles in biogeochemical cycles. Environ Microbiol Rev. 2009;23(1):56–70.

21. Anderson JPE, Domsch KH. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. Soil Sci. 1980;130(4):211–6. doi:10.1097/00010694-198010000-00008.

22. Rodríguez Zúñiga MT, Villeda Chávez E, Vázquez-Lule AD, Bejarano M, Cruz López MI, Olguín M, et al., coordinadores. Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; 2018. 272 p.

23. Sanders CJ, Eyre BD, Santos IR, Machado W, Luiz-Silva W, Smoak JM, et al. Elevated rates of organic carbon, nitrogen, and phosphorus accumulation in a highly impacted mangrove wetland. Geophys Res Lett. 2014;41(7):2475–80.

24. Alongi DM. The Energetics of Mangrove Forests. Dordrecht: Springer; 2008.

25. Hernández-Quiroz M, Ruiz-Meza D, Rojo-Callejas F, Ponce de León-Hill C. Determinación de la distribución de contaminantes emergentes en agua intersticial en sedimentos de humedal mediante la optimización y validación de un método analítico. Rev Int Contam Ambient. 2019;35(2):407–19.

26. Alongi DM. Carbon cycling and storage in mangrove forests. Annu Rev Mar Sci. 2014;6:195–219.

27. Middelburg JJ, Levin LA. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences. 2009;6(5):815–31.

28. García M, Sánchez P, Rivas C. Dinámica de los sistemas de manglar en el Golfo de California. Rev Cienc Marinas. 2019;45(3):150–67.

29. Velázquez-Pérez C, Tovilla-Hernández C, Romero-Berny EI, Jesús-Navarrete AD. Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. Madera Bosques. 2019;25(3).

30. IconProCon. Entendiendo el ORP [Internet]. 2025 [citado 2025 Jun 4]. Disponible en: https://iconprocon.com/spanish_blogs/entendiendo-el-orp/

31. Schnecker J, Meeden DB, Calderon F, Cavigelli M, Lehman RM, Tiemann LK, et al. Microbial activity responses to water stress in agricultural soils from simple and complex crop rotations. Soil. 2021;7(2):547–61.