

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



**CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POR  
DISPERSIÓN DE LOS SEDIMENTOS DRAGADOS EN LA  
ZONA SURESTE DEL ESTERO DE SAN CARLOS, BAJA  
CALIFORNIA SUR MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN  
MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

**PRESENTA**

**DIANA ACOSTA GUARDIOLA**

**LA PAZ, B.C.S., 14 DE DICIEMBRE DE 2018**



SIP-14 BIS

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S. siendo las 12:00 horas del día 28 del mes de Noviembre del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

"CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POR DISPERSIÓN DE LOS SEDIMENTOS DRAGADOS  
EN LA ZONA SURESTE DEL ESTERO DE SAN CARLOS, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO"

Presentada por el alumno:

**ACOSTA**

Apellido paterno

**GUARDIOLA**

materno

**DIANA**

nombre(s)

Con registro:

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 7 | 0 | 8 | 4 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|

Aspirante de:

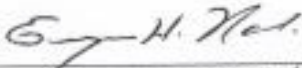
**MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

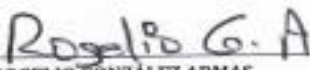
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Directores de Tesis

  
DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE  
Director de Tesis

  
DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ  
2º. Director de Tesis

  
DR. ROGELIO GONZÁLEZ ARMAS

  
DRA. ANA JUDITH MARÍN OLEA RODRÍGUEZ

  
DRA. JANETTE MAGALLÁN MURILLO JIMÉNEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO



I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 04 del mes de Diciembre del año 2018

El (la) que suscribe GEOG. DIANA ACOSTA GUARDIOLA Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A170846 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. RAFAEL CERVATNES DUARTE y DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ

y cede los derechos del trabajo titulado:

"CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POR DISPERSIÓN DE LOS SEDIMENTOS DRAGADOS

EN LA ZONA SURESTE DEL ESTERO DE SAN CARLOS, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: acostaguardiola@gmail.com - rcduartt@gmail.com - epaconava@gmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

GEOG. DIANA ACOSTA GUARDIOLA

*Nombre y firma del alumno*

## *DEDICATORIA*

### *A mi Madre*

*Ha sido un ejemplo de vida de arduo trabajo y perseverancia, su interminable amor, sacrificios y consejos han sido fundamentales en mi vida. Gracias por proporcionarme un maravilloso ejemplo e inculcarme muchas de las virtudes y pasiones que te caracterizan.*

### *A mis abuelos*

*Porque donde quiera que estén siempre he sentido su apoyo incondicional y su buena vibra, los amo.*

### *A mi familia*

*Por creer en mí y por estar siempre allí cuando lo necesitaba para ayudarme a lograr mis sueños (Joaquinado, tíos Ariel y Aylema, mis abuelas Digna y Esther y principalmente mis primis bellos Anthony Guardiola y Michael Guardiola). Quienes me han apoyado a lo largo de mi vida y me han enseñado desde siempre la importancia del trabajo duro para conseguir las metas.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A los profesores-investigadores Dr. Rafael Cervantes Duarte y Dr. Enrique Hiparco Nava, por su dedicación al desarrollo de mi tesis de maestría, lo cual me motivó a mejorar cada día para avanzar en la misma. Agradezco a los dos la revisión del escrito y las aportaciones para que esta se cumpliera en tiempo y forma.

A los profesores que forman mi comité tutorial por dedicarle un minuto de su tiempo a mi tesis y realizarle las correcciones pertinentes para su entrega formal.

Al Dr. Guillermo Martínez Flores, por ayudarme en el procesamiento de mis datos para su posterior desarrollo en Matlab y a Gerardo Williams Jara por su ayuda incondicional en el trabajo con el dron en nuestra área de estudio.

Dra. Jannette Murillo por haberme motivado a desarrollar este trabajo con sus valiosos comentarios, consejos, su comprensión y por estar siempre dispuesta a apoyarme cuando lo necesité.

Dra. Ana Judith Marmolejo por su dedicación y paciencia en los temas de geoquímicas de la tesis cuando pensábamos que era difícil llevarlas a cabo por cuestiones de tiempo.

Al Dr. Raúl Miranda investigador-académico y a todo su equipo técnico de la Facultad de Minas, Universidad de Guanajuato por su sencillez y amabilidad a la hora de llevar a cabo el trabajo en equipo y obtener el objetivo deseado.

A mi novio Miguel Cordero Domínguez por su apoyo incondicional y su paciencia en estos años para continuar esta travesía.

A mis amigos de condominio Aylin, Emilio, Isa, Ailet y Yalén (aunque estés lejitos), que de una manera u otra me escucharon, me apoyaron y contribuyeron al desarrollo de esta tesis.

Así mismo, a todas aquellas personas con las que conviví muchos momentos agradables: Martín, Humberto H. Ceseña Amador, César C. Casas Núñez, a

todos los compañeros del laboratorio de química, en fin, a todos los que hicieron posible que mi estadía en el centro fuera la mejor.

Agradezco el apoyo brindado para la realización de este trabajo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI).

# Índice.

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción.....</b>                                                    | <b>1</b>  |
| <b>1. Antecedentes.....</b>                                                 | <b>2</b>  |
| <b>2. Justificación .....</b>                                               | <b>6</b>  |
| <b>3. Hipótesis.....</b>                                                    | <b>6</b>  |
| <b>4. Objetivos.....</b>                                                    | <b>6</b>  |
| 4.1. Objetivo General .....                                                 | 6         |
| 4.2 Objetivos Específicos:.....                                             | 6         |
| <b>5. Área de estudio.....</b>                                              | <b>8</b>  |
| 5.1 Descripción del área de estudio .....                                   | 8         |
| 5.2 Geología .....                                                          | 9         |
| 5.3 Geomorfología .....                                                     | 10        |
| 5.4 Clima.....                                                              | 10        |
| 5.5 Flora y Fauna. ....                                                     | 11        |
| <b>6. Materiales y Métodos .....</b>                                        | <b>11</b> |
| 6.1. Recolección de muestras de sedimento .....                             | 11        |
| 6.2. Estimación del volumen y área del depósito de sedimento dragado.....   | 14        |
| 6.3. Determinación del tamaño de grano y parámetros texturales.....         | 15        |
| 6.4. Análisis Químico .....                                                 | 15        |
| 6.4.1. Determinación de elementos traza (ET) y elementos mayores.....       | 15        |
| 6.4.2. Validación de los métodos de elementos químicos.....                 | 16        |
| 6.4.3. Factor de Enriquecimiento Normalizado (FEN).....                     | 16        |
| 6.5 Análisis estadístico y sistemas de información geográfico (SIG).....    | 18        |
| 6. 6 Procesamiento de datos de marea, viento y precipitación.....           | 18        |
| 6.6.1. Marea. ....                                                          | 18        |
| 6.6.2. Viento y Precipitación. ....                                         | 18        |
| <b>7. Resultados .....</b>                                                  | <b>19</b> |
| 7.1. Estimación del área y volumen del depósito de sedimentos dragados..... | 19        |
| 7.1.1. Obtención de ortofotos del área de estudio. ....                     | 19        |
| 7.1.2. Morfometría.....                                                     | 19        |
| 8.2. Determinación del tamaño de grano. ....                                | 22        |
| 8. 2.1. Frecuencia de tamaño de grano.....                                  | 22        |
| 8. 2.1.3 Desviación estándar del tamaño de grano en las muestras .....      | 25        |
| 8.3 Mineralogía .....                                                       | 27        |
| 8.4 Elementos traza elementos mayores.....                                  | 28        |

|            |                                                                                                    |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.4.1      | Porcentaje de recuperación. ....                                                                   | 28 |
| 8.5        | Efecto de la marea y viento en el depósito de sedimentos dragados. ....                            | 37 |
| 8.5. 1     | Variación de la Marea. ....                                                                        | 37 |
| 8.5.2      | Variación del viento.....                                                                          | 41 |
| 8.6.       | Dispersión de sedimentos dragados. ....                                                            | 45 |
| 8.6.1.     | Modificación o cambio del depósito de sedimentos dragados. ....                                    | 45 |
| 8.6.2      | Efecto del depósito de sedimentos dragados sobre las áreas circundantes .....                      | 46 |
| <b>9.</b>  | <b>Discusión</b> .....                                                                             | 49 |
| 9.1        | Origen de los sedimentos dragados. ....                                                            | 49 |
| 9.2        | Características texturales de los sedimentos dragados. ....                                        | 50 |
| 9.3        | Análisis de elementos traza y mayores. ....                                                        | 52 |
|            | Fósforo (P). Elemento Mayor. ....                                                                  | 52 |
|            | Arsénico (As). ....                                                                                | 52 |
|            | Azufre (S).....                                                                                    | 53 |
| 9.4        | Posible efecto de la marea, viento y precipitaciones sobre el depósito de sedimentos dragados..... | 54 |
| 9.4.1.     | Efecto de la Marea. ....                                                                           | 54 |
| 9.4.2      | Efecto del viento. ....                                                                            | 55 |
| 9.4.3      | Efecto de la precipitación.....                                                                    | 55 |
| 9.5        | Dispersión de sedimentos dragados y su impacto sobre las áreas circundantes. ....                  | 60 |
| <b>10.</b> | <b>Conclusiones</b> .....                                                                          | 63 |
| <b>11.</b> | <b>Recomendaciones</b> .....                                                                       | 64 |
| <b>12.</b> | <b>Referencias</b> .....                                                                           | 65 |
| <b>13.</b> | <b>Anexos</b> .....                                                                                | 69 |



## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Ambientes de depósitos de sedimentos dragados en la sureste del estero de San Carlos.....                                                                             | 12 |
| Tabla. 2 Estándares de referencia MESS-3 para los elementos analizados con los porcentajes de recuperación, el valor certificado y el valor obtenido. ....                     | 16 |
| Tabla 3. Valores de la media por tipo de sedimento en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos. ....                                 | 24 |
| Tabla 4. Valores de sesgo por tipo de sedimento en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos. ....                                    | 25 |
| Tabla 5. Valores de desviación estándar y grados de clasificación en los sedimentos en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos..... | 26 |
| Tabla 6. Mineralogía de los sedimentos con tamiz de 120 mm en la región Sureste del estero de San Carlos.....                                                                  | 28 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 Representación esquemática de la integración de las variables (modificado de Brasil, 2008).....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 3  |
| Fig. 2 Esquema de localización del área de estudio (Zona Sureste de estero de San Carlos) Cuadro rojo (Área de depósito). ....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 8  |
| Fig. 3 Se muestran las ubicaciones de los sitios, con las fechaciones de termoluminiscencia (TL) del material eólico y la racemización de aminoácidos y C14 (AAR) de las conchas de moluscos, dentro de la porción central de la cuenca Purísima-Iray Magdalena (tomado de Murillo- Jiménez <i>et al.</i> , 1999). El recuadro rojo corresponde a la superficie donde se encuentra el dragado..... | 9  |
| Fig. 4 Sitios de muestreos. (Obtenido de datos del INEGI y CONABIO). M = Mangle, D = Dunas, T = Cima, P= Pendiente de Talud.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 14 |
| Fig. 5 Ortofotos obtenidas a través del programa Pix4D. a) muestreo del 10/08/2017 y b) muestreo del 07/12/2017. ....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 19 |
| Fig. 7 Perfil de la morfometría en la sección C-D del depósito dragado.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 21 |
| Fig. 8 Frecuencia del tamaño de grano (%) respecto a las unidades phi ( $\Phi$ ) en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos.....                                                                                                                                                                                                                        | 22 |
| En el área de estudio se obtuvo un predominio de arenas en casi todas las muestras, cabe destacar la presencia de limos y arcillas en las muestras M9 y M10 (Fig.9). ....                                                                                                                                                                                                                          | 22 |
| Fig. 9 Porcentaje de Arena, Limo y arcillas en muestras de sedimento del área de estudio.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Fig. 10 Diagrama de dispersión de las características texturales (selección y tendencia de tamaño de grano) de los sedimentos muestreados en el área de estudio.....                                                                                                                                                                                                                               | 27 |
| Fig. 11 Porcentaje de recuperación de los elementos analizados en la región sureste del estero de San Carlos. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29 |
| Fig. 12 Valores máximos y promedios de los factores de enriquecimiento normalizado con el Ga. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 30 |
| Fig. 13 Factor Enriquecimiento Normalizado de Fósforo (P) en sedimentos dragados. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 31 |

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 14 Factor Enriquecimiento Normalizado de Azufre (S) en sedimentos dragados. ....                                                                                                                           | 32 |
| .....                                                                                                                                                                                                           | 32 |
| Fig. 15 Factor de Enriquecimiento Normalizado de Arsénico (As) en sedimentos dragados. ....                                                                                                                     | 32 |
| Fig. 17 Amplitud o Rango de Mareas (mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM correspondiente de enero - junio, estación de San Carlos, BCS en 2016. ....                                                        | 38 |
| Fig.18 Amplitud o Rango de Mareas(mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM de julio -diciembre, estación San Carlos, B.C.S, 2016. ....                                                                          | 39 |
| Fig. 19 Amplitud o Rango de Mareas (mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM enero - junio a la estación de San Carlos, BCS en 2017 .....                                                                       | 40 |
| .....                                                                                                                                                                                                           | 41 |
| Fig. 20 Amplitud o Rango de Mareas (mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM julio - diciembre la estación de San Carlos, BCS en 2017.....                                                                      | 41 |
| Fig. 21 Dirección y velocidad de los vientos tomamos de la estación de Puerto Cortés 2016. (enero -junio).....                                                                                                  | 42 |
| Fig.22 Dirección y velocidad de los vientos tomamos de la estación de Puerto Cortés 2016. (julio -diciembre). ....                                                                                              | 43 |
| Fig. 23 Valores de precipitación pluvial (mm) mensual acumulada registrados en la estación Puerto San Carlos, B.C.S., durante 2015.....                                                                         | 44 |
| .....                                                                                                                                                                                                           | 45 |
| Fig. 24 Valores de precipitación pluvial (mm) mensual acumulada registrados en la estación Puerto San Carlos, B.C.S., durante 2016.....                                                                         | 45 |
| Fig. 25 Imágenes del área de estudio mostrando el antes y después del dragado en el canal de acceso al Estero San Carlos. a) 2014; b) 2016. Polígono rojo representa la zona de depósito antes del dragado..... | 46 |
| Fig. 26 Áreas circundantes al depósito de sedimentos dragados en el Estero San Carlos.....                                                                                                                      | 47 |
| Fig. 27 Área del humedal. a) Antes del depósito de sedimentos dragados en 2014; b) Área impactada en 2016, c) Área impactada en 2017. ....                                                                      | 48 |
| Fig. 28 Trayectoria de los huracanes y tormentas para la primera parte de la temporada de ciclones del año 2016 en la península de Baja California Sur tomado del Centro de Huracanes Nacional.....             | 57 |

Fig. 29 Trayectoria de los huracanes y tormentas para la segunda parte de la temporada de ciclones del año 2016 en la península de Baja California Sur tomado del Centro de Huracanes Nacional..... 58

Fig. 30 Trayectoria de los huracanes y tormentas para la segunda parte de la temporada de ciclones del año 2017 en la península de Baja California Sur tomado del Centro de Huracanes Nacional..... 59

Fig. 31 Mapa conceptual donde se observa las principales vías de transporte de los sedimentos dragados indicado por las flechas delgadas indican el viento y las gruesas muestran el transporte de sedimento por marea en el canal del esterito. .... 61

## **Glosario**

Dragado: Es el proceso que consiste en la remoción de lodo de fondo de los cuerpos de agua por la caída de presión mediante dispositivos mecánicos especiales. Esto altera el ecosistema y pueden desaparecer los organismos acuáticos que se encuentran en el sedimento, exponiéndolos a los metales pesados y otros tóxicos.

Dispersión: Acción de poderse desplazar de un sitio a otro para poder establecerse en una mayor superficie o en otro lado.

Disposición final: Es depósito permanente de residuos sólidos en un sitio en condiciones adecuadas y controladas para evitar daños a ecosistemas.

Elemento traza u oligoelemento: es un elemento químico que se necesita en cantidades pequeñas para asegurar un crecimiento y un desarrollo adecuados. Su ausencia o concentración por encima del nivel tolerable puede ser perjudicial para el organismo, llegando a ser incluso tóxicos si se toman en cantidades excesivas de 1000 partes por millón.

Deflación: Levantamiento y removilización del material suelto de pequeño tamaño generado por la turbulencia del viento.

Saltación: Partícula relativamente grandes (aproximadamente de 60 a 1000  $\mu\text{m}$ ) que se mueven a favor del viento en una serie de saltos o rebotes.

Suspensión: Partículas muy pequeñas (< 60 a 70  $\mu\text{m}$ ) son mantenidas en distancias relativas largas por el flujo turbulento del aire.

Impacto ambiental: Efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad, a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base (medio ambiente), debido a la acción antrópica o a eventos naturales.

Humedal: Zona de la superficie terrestre que está temporal o permanentemente inundada, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan.

## Resumen

El dragado es una actividad de excavación con alto impacto en los ambientes costeros donde generalmente se lleva a cabo. En el año 2015 debido al asolvamiento del canal de acceso al estero San Carlos se realizó un dragado para facilitar el transporte de las embarcaciones menores que transitan en el área. El sedimento dragado fue depositado sobre un campo de dunas antiguas y parte de un humedal. La presente investigación plantea que el depósito constituye un impacto sobre las áreas circundantes. Para comprobar esta hipótesis se tomaron 15 muestras en diferentes sitios representativos del depósito y de las áreas impactadas. Además, se realizó un levantamiento topográfico mediante el distanciómetro Leica D810 y el dron PHANTOM 4 utilizando el programa PiX4D, para conocer la morfometría del mismo. Para obtener la granulometría del sedimento (media, desviación estándar, sesgo) se emplearon las técnicas de tamizado Ro-Tap (Fracción  $> 2$  mm) y la difracción láser (Fracción  $< 2$  mm). Así mismo, se determinaron 19 elementos mayores y traza en las muestras los cuales fueron analizados por el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Para determinar las posibles vías de transporte de sedimentos se analizaron los datos de mareas, de precipitación y viento de la zona cercana al área de estudio. Los resultados obtenidos mostraron que el depósito tiene un volumen de  $196,877 \text{ m}^3$  y un área estimada de  $45,177.4 \text{ m}^2$ . El depósito de sedimentos dragados presentó un tamaño medio en las arenas finas; una tendencia a los tamaños de granos de arena gruesa y estuvieron pobremente y moderadamente clasificados. El mineral predominante en el tamiz de 120 mm en el área de depósito fue el cuarzo. Se registró un marcado impacto en el humedal más próximo estimado en 3.8 ha de un total de 7.8 ha, correspondiente a aproximadamente un 49 %. El análisis de los elementos traza y mayores mostró que los factores de enriquecimiento más altos presentes en las 15 muestras fueron el Arsénico (As) y Azufre (S), con un Factor de Enriquecimiento Normalizado moderado, y el Fósforo (P) con un Factor de Enriquecimiento Normalizado severo. Durante 2016 los vientos predominantes fueron del Noroeste, alcanzando intensidades máximas promedio de 5 m/s. Las mareas como otra vía de transporte de sedimentos contribuyen a que el material fino se desplace hacia las zonas no impactadas (humedal y planicie de marea). Las precipitaciones para el año 2016 fueron escasas, por lo que para ese año se considera un impacto nulo.

## **Abstract**

Dredging is an excavation activity with high impact in the coastal environments where it is usually carried out. In 2015, dredging was carried out to facilitate the transit of small boats in the access channel to the San Carlos estuary area. The dredged sediment was deposited on a field of ancient dunes and part of a wetland. The present investigation proposes that the deposit constitutes a possible impact on the surrounding areas. To test this hypothesis, 15 samples were taken at different sites representative of the deposit and the impacted areas. In addition, a topographic survey was carried out using the Leica D810 distance meter and the PHANTOM 4 drone using the PiX4D program, to know its morphometry. To obtain the granulometry of the sediment (mean, standard deviation, skewness) the Ro-Tap sieving techniques (Fraction > 2 mm) and laser diffraction (Fraction < 2 mm) were used. Likewise, 19 major and trace elements were determined in the samples, which were analyzed by the X-Ray Fluorescence (FRX) method. To determine the possible transport routes, the tide, precipitation and wind data of surroundings of the study area were analyzed. The obtained results showed that the deposit has a volume of 196,877 m<sup>3</sup> and an estimated area of 45,177 m<sup>2</sup>. Dredged sediments presented a mean size in the fine sands; a skewness to coarse sand and were poorly and moderately classified. The predominant mineral in the 120 mm sieve in the deposit area was quartz. There was a marked impact on the wetland estimated at 3.8 ha from a total of 7.8 ha, corresponding to approximately 49%. Analysis of trace and major elements showed that the highest enrichment factors present in the 15 samples were for Arsenic (As) and Sulfur (S), with a moderate Normalized Enrichment Factor, and Phosphorus (P) with a Factor of severe normalized enrichment. During 2016, the prevailing winds were from the northwest, reaching maximum average intensities of 5 m / s. Tides as another way of transporting sediments contribute to the thin material moving them towards the non-impacted areas (wetland and tidal plain). Precipitations for the year 2016 were scarce, reason for which this year it is considered of a null impact.

## Introducción

Las actividades de dragado y la descarga de esos materiales extraídos fueron consideradas como una actividad inofensiva para el ambiente. Con la llegada del movimiento conservacionista en la década de los 60's, esas operaciones comenzaron a considerarse como causantes de muchos problemas ambientales y provocando directa o indirectamente impactos negativos y trayendo consigo cambios en las características físicas, químicas y biológicas en el ambiente (Landeta, 2010).

Los impactos relacionados con las actividades de dragado son numerosas y diversas, de corto y largo plazo, y pueden afectar el ambiente principalmente durante la fase de ejecución, con el transporte del material y la disposición final de los sedimentos.

Un trabajo de dragado involucra dos grandes actividades principales: la extracción del material de fondo y el depósito de estos materiales en un sitio previamente seleccionado. Landeta, (2010) menciona que cada una de estas actividades tiene características propias, para la cual se tiene que considerar.

La composición textural del material que será extraído, la calidad bioquímica de los sedimentos, el volumen que se va a extraer, las condiciones físicas del sitio de dragado, la existencia de un sitio para el depósito del material desalojado, la distancia entre los sitios de dragado y de depósito, el tipo de draga que se debe utilizar y las condiciones ambientales del entorno.

Uno de los principales temas en impacto ambiental es el dragado. Esto se debe a que grandes cantidades de sedimento son dragadas del fondo marino para diferentes usos en la línea de costa o para evitar el asolvamiento de canales de navegación, y algunos de ellos son regresados al fondo marino en diferentes sitios de donde provienen. Además, algunos son sólidos industriales que son vertidos al mar y tienen efectos sobre las comunidades existentes en la zona (Brasil, 2008).

Los materiales de dragado portuarios son actualmente preocupantes para diferentes sectores de la sociedad y la biota que se encuentra en o cercana a la disposición final de estos sedimentos dragados, pues estos pudieran estar contaminados. Constituyen una amenaza para el paso de muchos puertos comerciales y a los componentes bióticos de un ecosistema, a través de la



imposición de restricciones en las operaciones de dragado y disposición final del material dragado. Por ejemplo, en Brasil, fueron suspendidas las actividades de dragado en el Puerto de Santos (el dragado más grande de América Latina) por motivo de la disposición inadecuada de los sedimentos contaminados de la zona del puerto y el canal de acceso. Las operaciones fueron liberadas tres años después, en el año 2005 (Codesp, 2005).

Los esteros y bosques de manglar son de gran importancia ya que estos ecosistemas se destacan por su alta productividad y producción de materia orgánica. Promueven la biodiversidad pues sus raíces sumergidas proveen hábitculo y refugio para una fauna rica de peces, mamíferos e invertebrados. Tienen un alto valor ecológico y económico porque actúan como criaderos para muchos peces y moluscos, por lo que son fundamentales para el hombre, ya que en algunos casos aseguran la sustentabilidad de la actividad pesquera. Albergan y proveen áreas de anidación a un número considerable de especies de aves residentes y migratorias, vulnerables o en peligro de extinción. Protegen las costas contra la erosión y las marejadas ocasionadas por los huracanes. Estos además atrapan sedimento y ayudan a rellenar y recuperar terreno. Son usados para la recreación y actividades turísticas, por lo que se hace necesario la educación ambiental e investigación científica para su cuidado y protección (Rosales, 2004).

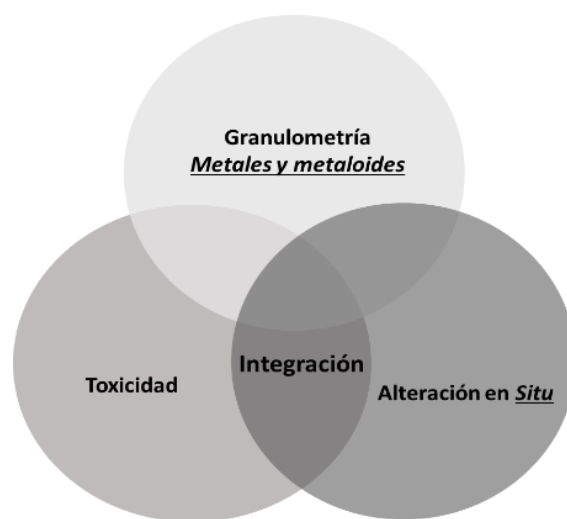
En 2015 se realizó un dragado en el canal de navegación que comunica el Estero San Carlos con la laguna Bahía Magdalena. Debido a que esta actividad se llevó a cabo sin una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) (comunicación personal con el delegado de la PROFEPA 2017), se desconoce si estaban contemplados el efecto del depósito de los sedimentos dragados sobre las dunas y la planicie del humedal.

## **1. Antecedentes**

Uno de los componentes clave en las herramientas de toma de decisión para el manejo de sedimentos y materiales de dragado es el proceso de caracterización de estos materiales. Referente a este tema se han realizado varios estudios.

Brasil (2008) propone el uso de un modelo basado en el “Peso de la Evidencia” (WOE, del inglés weight of evidence), el cual consiste en la integración de diferentes métodos de evaluación de la calidad del sedimento (líneas de evidencia – LOE), la cual fue inicialmente propuesta por Long y Chapman (1985). Este concepto surge de la necesidad de integrar toda información que pudiera proporcionar una visión completa del estado de los sistemas acuáticos, y así establecer su grado de calidad ambiental. Este tipo de modelo ofrece la posibilidad de responder a las tres preguntas principales que se plantean en los estudios de evaluación de calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos (Fig.1, Riba *et al.*, 2004; Brasil, 2008).

1. ¿Qué contaminantes están presentes en la zona de estudio, y en qué concentraciones?
2. ¿Están los contaminantes disponibles para la biota?
3. ¿Qué efectos biológicos están asociados a estos contaminantes?



**Fig. 1** Representación esquemática de la integración de las variables (modificado de Brasil, 2008).

Pulido *et al.* (2016) realizaron una caracterización de los sedimentos del muelle de carga de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos" y en el área IX de la zona portuaria 2, del recinto portuario de la Bahía de Cienfuegos, Cuba. Los resultados demostraron que la concentración de los elementos mayores y traza analizados en los sedimentos fueron similares a las concentraciones reportadas en zonas no contaminadas, por lo que no se consideró en riesgo.

Sin embargo, los autores proponen que, ante la ausencia de normativas cubanas en la temática, estos resultados y la metodología aplicada en este estudio pudieran ser utilizados como parte de los procesos de autorización y regulación de actividades de dragado en otras dársenas, zonas de atraque, canales de navegación y recintos portuarios de Cuba.

Para evaluar los impactos a largo plazo de las operaciones de dragado de arena en los Estados Unidos, Nairn *et al.* (2004) realizaron un programa de monitoreo biológico y físico. Este análisis de los parámetros tanto físicos como biológicos indicó los posibles impactos significativos del dragado en la plataforma continental exterior, así como también el diseño de un modelo de dispersión para optimizar las dragas y definir mejor estos impactos para futuros proyectos. El estudio además contribuyó al desarrollo en el diseño de estos equipos de manera espacial en los sedimentos y muestreos bentónicos.

Tovilla-Hernández *et al.* (2011) realizaron una gestión de cuencas costeras donde relacionan el aprovechamiento, conservación y preservación de los recursos naturales y planean, orientan, dan seguimiento y evalúan los procesos de manejo en estos espacios geográficos, mediante la toma de decisiones entre todos los participantes. En Chiapas se estudió el impacto sobre los humedales de la Reserva de la Biosfera la Encrucijada. Estos autores mencionan la gran cantidad de actividades humanas que se desarrollan en las cuencas, dentro de ellas el dragado que se realizó desde la cuenca alta hasta el mar y las modificaciones que pueden ser provocadas por el mal uso de recursos y sus repercusiones sobre todo el sistema. Estas actividades de dragado se realizaron sin estudios previos de Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) realizándose en una primera fase un dragado en enero 2006 en el Río Suchiate con un volumen extraído de 411,305 m<sup>3</sup> de un área de 4.8 km x 216 m. En el mismo año se llevó a cabo un dragado en el Río Cintalapa, Acapetahua donde se dragaron 506,854 m<sup>3</sup> de sedimentos de una extensión de 7.5 km x 156 m. Los resultados obtenidos mostraron que, a partir de la cota de 2 m, se produce el azolvamiento de pantanos y manglares producto del dragado, por la carga de sedimentos finos transportados por los ríos. Se calculó que de 2005-2009 se perdieron en el estado de Chiapas 2278 ha de pantanos en los municipios de Huixtla, Villa Comaltitlán, Acapetahua y Mapastepec debido a esta actividad.

En México existen una serie de leyes y normas que regulan la protección del medio ambiente marino, sin embargo, es responsabilidad de los gobiernos su cabal aplicación, más allá de los intereses particulares. Por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana (NOM-022-SEMARNAT-2003), establece las especificaciones para la reserva, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en las zonas de manglar.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010) determina la protección ambiental de especies nativas de flora y fauna silvestres de México, así como las categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio en la lista de especies en riesgo.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. La presente ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

Asimismo, la Ley de vertimientos en Zonas Marinas Mexicanas la cual es de jurisdicción federal; y sus disposiciones son de orden público y tienen por objeto el control y la prevención de la contaminación o alteración del mar por vertimientos en las zonas marinas mexicanas. En su Artículo 2, fracción II. Dragado. Se refiere al retiro, movimiento o excavación de suelos cubiertos o saturados por agua, incluyendo la acción de ahondar y limpiar para mantener o incrementar las profundidades de puertos, vías navegables o terrenos saturados por agua; sanear terrenos pantanosos, abriendo zanjas que permitan el libre flujo de las aguas, eliminar los suelos de mala calidad en las zonas donde se proyecta la instalación de estructuras.

## **2. Justificación**

En agosto de 2015 se realizó el dragado del canal de acceso al Estero San Carlos, Baja California Sur, aledaño al poblado de Puerto San Carlos. El sedimento dragado fue depositado en un campo de dunas antiguas y en parte de una planicie de mareas de un humedal cercano, provocando una alteración evidente en las áreas circundantes al depósito que deben ser estudiadas desde diferentes perspectivas.

## **3. Hipótesis**

Los sedimentos dragados en el canal de acceso del muelle turístico de Puerto San Carlos, que fueron desechados sobre dunas antiguas colindantes al estero San Carlos, representan un alto riesgo ambiental para las áreas circundantes al depósito.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo General**

Conocer las características del depósito de sedimentos de dragado y su impacto en el ambiente circundante de la zona sureste del Estero San Carlos, Baja California Sur, México.

### **4.2 Objetivos Específicos:**

1. Determinar el volumen y área que ocupa el depósito de sedimentos dragados, a través de la revisión de fotografías aéreas y mediciones en campo para identificar el área de impacto del depósito y el volumen dragado.
2. Caracterizar la composición mineralógica y textural del depósito de sedimentos dragados mediante las técnicas de difracción láser y de conteo respectivamente, para conocer el origen y la dinámica del sedimento dragado.

3. Determinar la concentración de elementos mayores y elementos traza en los sedimentos dragados, mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, para conocer el origen y toxicidad del sedimento dragado.
4. Identificar las principales vías de transporte que intervienen en la migración del desecho de sedimentos dragados y su posible impacto hacia las áreas circundantes, mediante el análisis de la dirección de viento, registros de precipitación y ciclos de marea.

## 5. Área de estudio

### 5.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza al sureste del Estero San Carlos, el cual se encuentra en la porción noroeste de la laguna Magdalena, ubicada en la porción media de la costa pacífica del estado de BCS. El poblado de San Carlos se ubica en el margen oeste del Estero San Carlos. La laguna Magdalena laguna es el cuerpo de agua más grande de la costa occidental de la península, con un área de 565 km<sup>2</sup> y un volumen total de agua (marea alta-baja) de 6.8 a 8.1 km<sup>3</sup> (Sánchez-Montante et al. 2007). Se conecta con el océano Pacífico mediante una boca principal de 5.6 km de amplitud y 40 m de profundidad, por la cual se transportan aproximadamente 0.02 km<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> por ciclo en mareas vivas y 0.01 km<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de agua en mareas muertas (Cervantes-Duarte et al. 2014). El tipo de mareas del complejo lagunar es mixto-semidiurno donde se observa regularmente a dos pleamares y dos bajamares (en 24.8 h). La pleamar media superior es de 0.83 m y cerca de 1.5 m en la pleamar máxima, de acuerdo a la predicción de mareas para Puerto San Carlos. (Sánchez-Montante 2004)

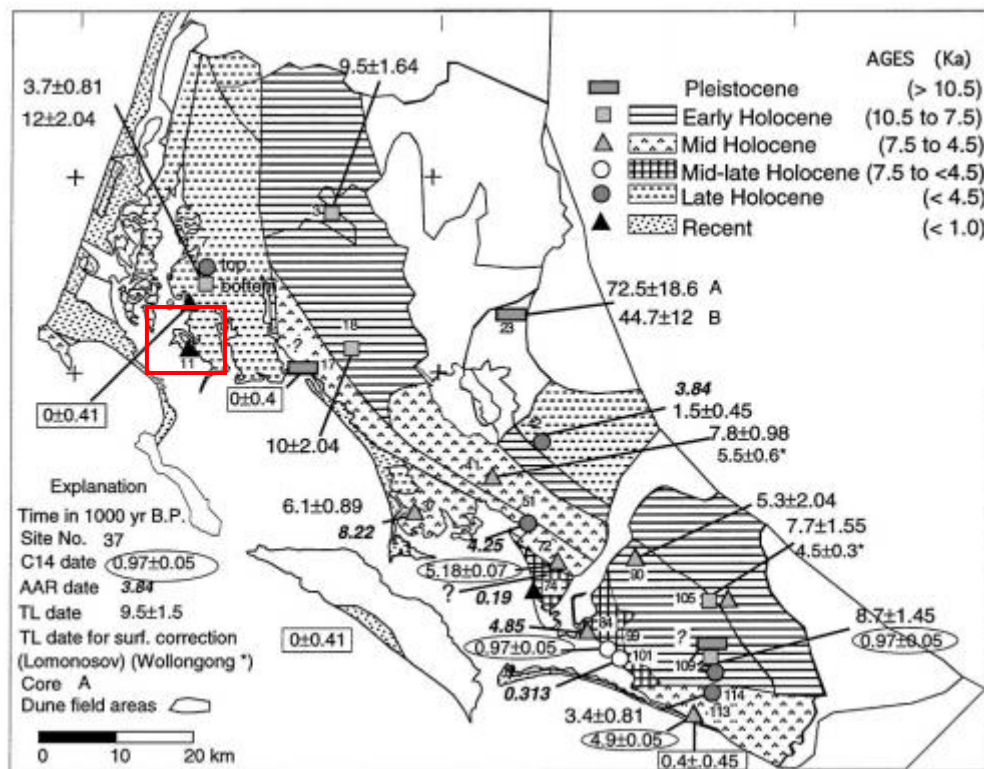


**Fig. 2** Esquema de localización del área de estudio (Zona Sureste de estero de San Carlos) Cuadro rojo (Área de depósito).

## 5.2 Geología

La geología de la zona en estudio presenta un basamento de secuencia estratigráfica con una edad desde el Paleoceno (65 millones de años) al Pleistoceno (1.8 millones de años) de rocas marinas, vulcano-sedimentarias y depósitos fluviales. Le sobreyacen depósitos eólicos del Holoceno (10 000 años) en la superficie (Murillo- Jiménez *et al.*,1999).

El área costera sumergida tiene un buen desarrollo de sistema lagunar, que incluye islas tectónicas de rocas metamórficas, graníticas y barreras sedimentarias. La costa está formada por acantilados rocosos y escarpes de material sedimentario, así como vegetación de manglares y playas a lo largo de la costa. (Murillo- Jiménez *et al.*, 1999)



**Fig. 3** Se muestran las ubicaciones de los sitios, con las fechaciones de termoluminiscencia (TL) del material eólico y la racemización de aminoácidos y C14 (AAR) de las conchas de moluscos, dentro de la porción central de la cuenca Purísima-Iray Magdalena (tomado de Murillo- Jiménez *et al.*, 1999). El recuadro rojo corresponde a la superficie donde se encuentra el dragado.



### 5.3 Geomorfología

Las geoformas de la cuenca Purísima-Iray Magdalena, incluyen escarpes, cerros, valles, terrazas y dunas costeras. Hacia el noreste la morfología incluye montañas altas y pronunciadas de la provincia fisiográfica La Giganta. La secuencia estratigráfica de la cuenca incluye rocas marinas y vulcanosedimentarias del Paleoceno al Pleistoceno, depósitos fluviales Pleistocenos y depósitos eólicos Holocenos en la superficie (Raisz, 1964), material fluvial, eólico y caliche (una capa delgada compacta de bloques planos, cantos rodados, gravas y guijarros) se encuentran como basamento en muchas áreas de los campos de dunas, y están aflorando en capas de arroyos en la porción sureste de la cuenca de drenaje de la planicie de inundación Hiray, en contacto con dunas lineares y con una capa entre las dunas del área de Rancho Bueno y la Formación marina Tepetate.

La zona de canales al noroeste del sitio de estudio presenta una geomorfología irregular, conformada por numerosos esteros y canales someros con una profundidad promedio de 3.5 m bordeados por bosques de mangle en la costa Este y por dunas elevadas de arena al Oeste, en la Isla Magdalena (Rodríguez-Meza, 2004).

El depósito de sedimentos dragados, en estudio, se encuentra depositado sobre dunas paralelas antiguas, las cuales de acuerdo a fotografías aéreas habían sido lotificadas y además modificadas por la instalación de una granja camaronera cerca del estero San Carlos formando parte de una zona de inundación. Tanto las dunas antiguas (13,427m<sup>2</sup>) como la instalación camaronera y parte de la planicie de inundación (45,177.4 m<sup>2</sup>) fueron cubiertas por el desecho de dragado.

### 5.4 Clima

El clima es seco, semi-cálido, con temperatura del aire promedio anual superior los 18° C, con una temperatura mínima en enero de 14.5° C y máxima en agosto-septiembre de 32° C. El complejo lagunar presenta condiciones anti-estuarinas como resultado de una reducida tasa de precipitación y escasa afluencia de agua dulce, así como de una elevada tasa de evaporación (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975). Sus principales recursos hídricos continentales son de origen lótico (arroyos temporales, estuarios y canales). Este complejo

presenta una precipitación anual promedio que fluctúa entre 48.5 y 153.0 mm por año, con variaciones estacionales de 71 mm entre otoño e invierno y 54 mm entre primavera y verano (Rodríguez-Meza, 2004).

#### 5.5 Flora y Fauna.

Su flora es escasa y con una macrofauna relativamente reducida. Presentan extensos bosques de manglar que en conjunto cubren un área cercana a las 17000 ha de superficie. Los bosques están conformados principalmente por tres especies de mangle: rojo (*Rhizophora mangle*), negro (*Avicenia germinans*) y blanco (*Laguncularia racemosa*). La fauna está compuesta por moluscos, crustáceos, reptiles y anfibios, aves regionales y migratorias (Rodríguez-Meza, 2004)

Las zonas de manglar contribuyen de forma importante, en la producción total de la materia orgánica depositada en los sedimentos y en la producción de follaje que es transportada por las corrientes marinas ( $1094 \text{ g m}^2 \text{ año}^{-1}$ , con un máximo en verano de  $\sim 6 \text{ g m}^2 \text{ d}^{-1}$ ) (Rodríguez-Meza, 2004).

## 6. Materiales y Métodos

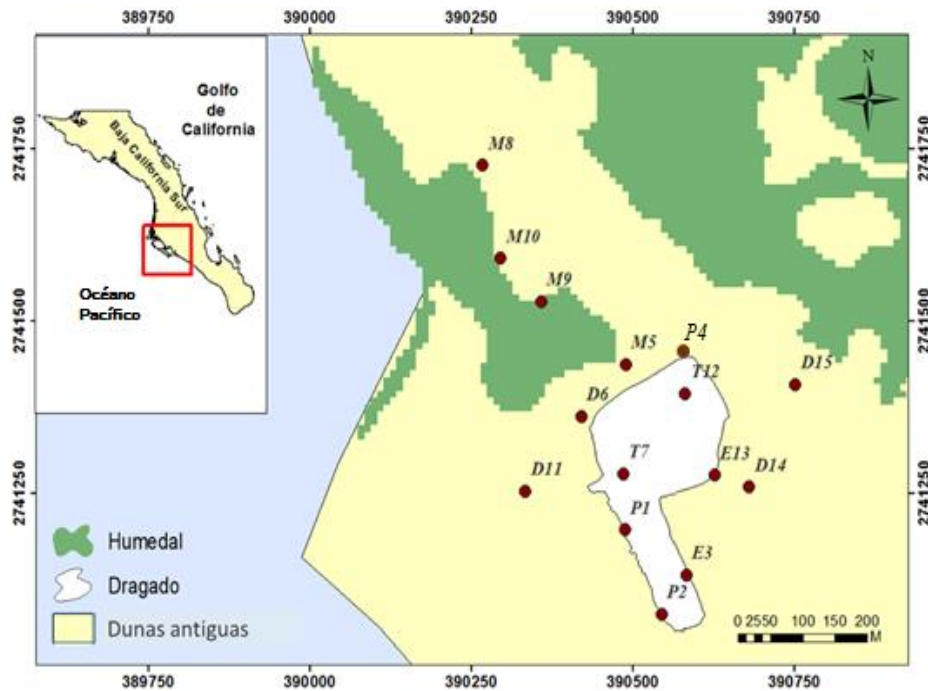
### 6.1. Recolección de muestras de sedimento

El muestreo se llevó a cabo en dos campañas, una en el mes de agosto de 2017 y otra en noviembre de 2017. Las muestras fueron tomadas en 15 sitios dentro y fuera del depósito (Fig. 4), buscando que fueran representativas de los diferentes ambientes y geoformas, lo cual incluyó la zona de dunas antiguas y del manglar (Tabla 1). Las muestras fueron colectadas con una espátula de plástico y transferidas en bolsas de plástico estériles. Se colocaron en una hielera y fueron transportadas al laboratorio para su tratamiento.

**Tabla 1.** Ambientes de depósitos de sedimentos dragados en la sureste del estero de San Carlos.

|                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>P1:</b> Pendiente de talud del depósito<br/>N 24.46894°<br/>W -112.04997°</p>            |  <p><b>P2:</b> Pendiente de talud del depósito<br/>N 24.46828°<br/>W -112.04963°</p>             |  <p><b>P4:</b> Pendiente de talud del depósito<br/>N 24.783625°<br/>W -112.082612°</p>          |
|  <p><b>E3:</b> Eólico redepositado del depósito<br/>N 24.46828°<br/>W -112.04963°</p>          |  <p><b>E3:</b> Eólico redepositado del depósito<br/>N 24.46828°<br/>W -112.04963°</p>           |  <p><b>D14:</b> Dunas antiguas circundantes al depósito<br/>N 24.78215°<br/>W -112.08139°</p>  |
|  <p><b>D15:</b> Dunas antiguas circundantes al depósito<br/>N 24.78350°<br/>W -112.08070°</p> |  <p><b>D6:</b> Dunas antiguas circundantes al depósito<br/>N 24.783057°<br/>W -112.083973°</p> |  <p><b>D11:</b> Dunas antiguas circundantes al depósito<br/>N 24.78207°<br/>W -112.08482°</p> |

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>T7:</b> Cima del depósito<br/> <b>N 24.782305°</b><br/> <b>W-112.083322°</b></p>       |  <p><b>T12:</b> Cima del depósito<br/> <b>N 24.78337°</b><br/> <b>W -112.08239°</b></p>              |  <p><b>M8:</b> Planicie de Marea<br/> <b>N 24.78634°</b><br/> <b>W -112.08551°</b></p>                                         |
|  <p><b>M9:</b> Mangle no<br/> impactado<br/> <b>N 24.78456°</b><br/> <b>W -112.08460°</b></p> |  <p><b>M10:</b> Zona de manglar<br/> impactada<br/> <b>N 24.78512°</b><br/> <b>W -112.08523°</b></p> |  <p><b>M5:</b> Planicie de marea y<br/> zona de manglar<br/> impactada<br/> <b>N 24.783744°</b><br/> <b>W -112.083295°</b></p> |



**Fig. 4** Sitios de muestreos. (Obtenido de datos del INEGI y CONABIO). M = Mangle, D = Dunas, T = Cima, P= Pendiente de Talud.

#### 6.2. Estimación del volumen y área del depósito de sedimento dragado

Para el cálculo del volumen y el área que ocupa el depósito de dragado en la zona se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) modelo Phantom 4Pro. Las imágenes aéreas se tomaron por medio de una cámara de 20 Mp. Se realizaron dos recorridos con el VANT en doble “S” con un traslape de 75%, ya que este tipo de trayectoria garantiza la mayor sobreposición en las imágenes. El primero con la cámara en cenit y el segundo con una inclinación de 45°. Previamente al vuelo se colocaron marcas de control de 1 m<sup>2</sup> alrededor y sobre el depósito geo-referenciadas con un navegador satelital marca (Garmin, modelo GPS map 76CSx).

Las fotografías y los datos del GPS fueron descargados en una PC. Posteriormente mediante el software Pix4D mapper, se aplicó un proceso fotogramétrico, a partir del cual se generó un mosaico de imágenes y una ortofoto del área de estudio (Fig. 5).

Para el cálculo del volumen y área se utilizó el módulo del software Pix4D “Volúmenes” y el “Área”, el cual consiste en digitalizar el área de interés a partir

de la cual el software calcula el volumen y el área del depósito de los sedimentos dragados.

Para obtener los perfiles morfométricos de la zona de depósito se utilizó el distanciómetro Leica D810, tomando en cuenta el nivel medio del mar en la tabla de mareas del CICESE y se hizo una corrección a los datos considerando la marea más alta.

### 6.3. Determinación del tamaño de grano y parámetros texturales

El análisis del tamaño de grano se llevó a cabo en el Laboratorio de Geología Marina del CICIMAR. Con el fin de obtener las distintas clases de tamaño de sedimento en las muestras, se utilizó la técnica de Rotap con una serie de tamices W. S. Tyler con diferencia de abertura de  $\frac{1}{4} \phi$  (0.25 phi) entre cada tamiz, de acuerdo con la escala de tamaños de Wenworth (1922), desde el tamiz 8, 10 y 12 respectivamente. Las partículas menores de 2 mm fueron analizadas con un Autoanalizador láser Beckman Coulter (LS133320) donde las muestras se procesaron a cada cuarto de phi para obtener tamaños entre 2 mm y 0.04  $\mu\text{m}$ .

Los resultados obtenidos con el tamizado para la distribución de tamaño de grano (% de las clases de tamaño) y el analizador láser, ambas técnicas se combinaron mediante un análisis estadístico en el programa de Excel, y se calcularon los parámetros texturales (media, clasificación o desviación estándar y sesgo o asimetría) basándose en el método de Folk y Ward (1957) y en el Método de los Momentos (Krumbein and Pettijohn, 1938).

### 6.4. Análisis Químico

#### 6.4.1. Determinación de elementos traza (ET) y elementos mayores

Se analizaron 15 muestras tomadas en el depósito de sedimentos dragados, en la Porción Sureste del Estero de San Carlos (Fig. 4). Para la preparación de la muestra primero los sedimentos fueron secados dentro de un horno de madera, hasta alcanzar los 65°C; posteriormente se separó la fracción < a 2mm, con ayuda de un tamiz Tyler No. 10. Esta fracción fina fue macerada en un mortero de ágata hasta obtener tamaños menores a 100 micras.



En el Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales (LICAMM) de la Universidad de Guanajuato se determinaron los elementos traza y mayores, por el método de fluorescencia de rayos X (FRX), la cual es una técnica analítica instrumental no destructiva que mide la composición elemental de una sustancia generalmente sólida al ser expuesta a una radiación de rayos-X.

#### 6.4.2. Validación de los métodos de elementos químicos

Los métodos fueron validados con el uso de materiales de referencia certificado de sedimento marino, MESS-3 National Research Council Canada Institute for National Measurement Standards, en donde el porcentaje de recuperación esperado es alrededor de 100% (80 a 120%).

**Tabla. 2** Estándares de referencia MESS-3 para los elementos analizados con los porcentajes de recuperación, el valor certificado y el valor obtenido.

| Elementos | Certificado | Valor Certificado (MESS 3) | Obtenido(M) | Promedio | Desv. Estandar |
|-----------|-------------|----------------------------|-------------|----------|----------------|
| Si        | 27          | 30.4598                    | 33.4916     | 31.9757  | 2.14           |
| Al        | 8.59        | 12.1589                    | 13.1276     | 12.64325 | 0.68           |
| Fe        | 4.34        | 4.9126                     | 5.3936      | 5.1531   | 0.34           |
| Mg        | 1.6         | 2.3138                     | 2.4679      | 2.39085  | 0.11           |
| S         | 0.19        | 0.2224                     | 0.2558      | 0.2391   | 0.02           |
| P         | 0.12        | 0.061                      | 0.0585      | 0.05975  | 0.00           |
| K         | 2.6         | 3.0592                     | 3.2892      | 3.1742   | 0.16           |
| Ca        | 1.47        | 1.8049                     | 1.9353      | 1.8701   | 0.09           |
| Ti        | 0.44        | 0.5479                     | 0.5851      | 0.5665   | 0.03           |
| V         | 243         | 347                        | 326         | 336.5    | 14.85          |
| Cr        | 105         | 122                        | 136         | 129      | 9.90           |
| Mn        | 324         | 429                        | 454         | 441.5    | 17.68          |
| Ni        | 46.9        | 58.7                       | 63.5        | 61.1     | 3.39           |
| Cu        | 33.9        | 54.8                       | 59.8        | 57.3     | 3.54           |
| Zn        | 159         | 168                        | 197         | 182.5    | 20.51          |
| Ga        | 20.95       | 21.8                       | 25.1        | 23.45    | 2.33           |
| As        | 21.2        | 23.4                       | 24.9        | 24.15    | 1.06           |
| Sr        | 129         | 99.3                       | 139         | 119.15   | 28.07          |

#### 6.4.3. Factor de Enriquecimiento Normalizado (FEN).

Para la normalización de las concentraciones de los ET y mayores, se utilizó un elemento de referencia en este caso se escogió el Galio (Ga). Este

procedimiento permite distinguir los elementos con enriquecimientos bajos, moderados, severamente o extremadamente severos en el ambiente sedimentario.

Las concentraciones de ET y mayores en los sedimentos son normalizadas calculando sus factores de enriquecimiento (FEN) como se observa en la siguiente ecuación (Romero, 2011):

$$FE = \frac{\left[ \frac{Me}{Ga} \right]_{sed}}{\left[ \frac{Me}{Ga} \right]_{Corteza}}$$

Donde  $Me_{sed}$  es la concentración del elemento en la muestra

$Al_{sed}$  y  $Li_{sed}$  son las concentraciones de Al y Li en la muestra

$Me_{corteza}$  es la concentración del elemento en la corteza superior

$Al_{corteza}$  y  $Li_{corteza}$  son las concentraciones de Al y Li en la corteza

Superior tomados de Wedepohl (1995).

Para este trabajo se consideró la siguiente escala de FEN propuestas por Marmolejo-Rodríguez *et al.* (2011) y González-Soto (2017), quienes trabajaron en áreas cercanas al área de estudio:

Factor de enriquecimiento bajo (0 - 3)

Factor de enriquecimiento moderado (3 – 10)

Factor de enriquecimiento severo (10 – 25)

Factor de enriquecimiento extremadamente severo (> 25)



## 6.5 Análisis estadístico y sistemas de información geográfico (SIG).

A los datos obtenidos por Fluorescencia de Rayos X se les aplicó análisis estadísticos básicos como son promedios, desviación estándar, máximos, mínimos y correlaciones. Para este fin se utilizaron programas como el Excel, Sigmaplot 11.0, el QGIS y el Statistical para procesar los datos y obtener las gráficas y mapas correspondientes a las distribuciones de los elementos en el área de depósito y sus áreas circundantes.

## 6. 6 Procesamiento de datos de marea, viento y precipitación.

### 6.6.1. Marea.

Para la obtención de la información de mareas, se emplearon los datos del pronóstico para el año 2016 y 2017, publicados en la página oficial del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE, <http://predmar.cicese.mx/programa>), datos con los cuales se realizó una comparación entre los 24 meses, con el propósito de conocer el efecto de las amplitudes máximas de flujo y reflujo y su posible influencia en el transporte de sedimento en el área de depósito.

### 6.6.2. Viento y Precipitación.

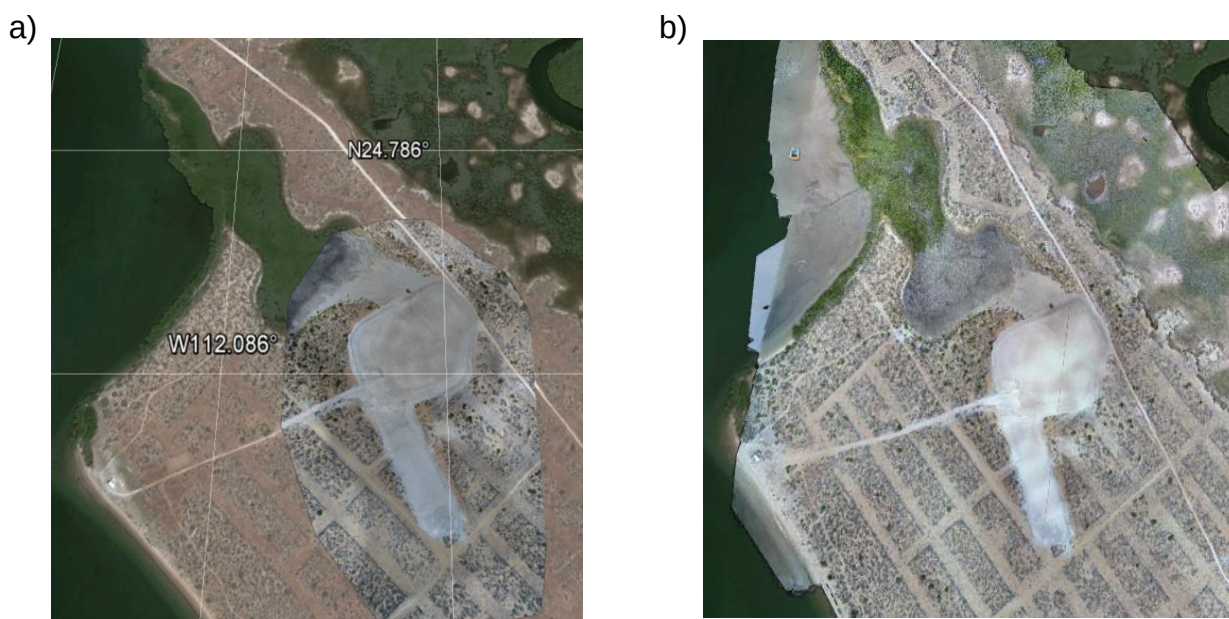
Se utilizaron los datos de viento y precipitación del año 2016, proporcionados por la Secretaría de Marina de la estación de Puerto Cortés, B.C.S. Los datos fueron depurados en el programa Microsoft Excel y procesados mediante una rutina en el software Matlab.

## 7. Resultados

### 7.1. Estimación del área y volumen del depósito de sedimentos dragados.

#### 7.1.1. Obtención de ortofotos del área de estudio.

Las ortofotos se obtuvieron a partir de las imágenes tomadas por el VANT el 10/08/2017 (primer muestreo) y 7/12/2017 (segundo muestreo) de acuerdo a la metodología antes descrita (Fig. 5).



**Fig. 5** Ortofotos obtenidas a través del programa Pix4D. a) muestreo del 10/08/2017 y b) muestreo del 07/12/2017.

El cálculo del área y volumen del depósito de los sedimentos dragados se realizó de acuerdo a la metodología antes descrita. De acuerdo a estos cálculos, se estima que la zona de depósito posee un área y volumen de 45,177m<sup>2</sup> y 196,877 m<sup>3</sup>, respectivamente.

#### 7.1.2. Morfometría

Los perfiles morfométricos realizados en el desecho (secciones A-B y C-D), obtenidos a partir del Nivel Medio del Mar (NMM) y considerando el punto más bajo en 1.3 m de acuerdo a las tablas de probabilidades de mareas CICESE sobre el NMM, se muestran en las figuras No. (6 y 7).

10/agosto/2017

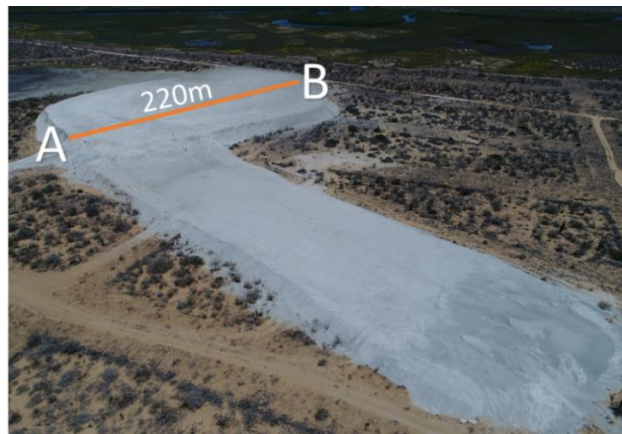
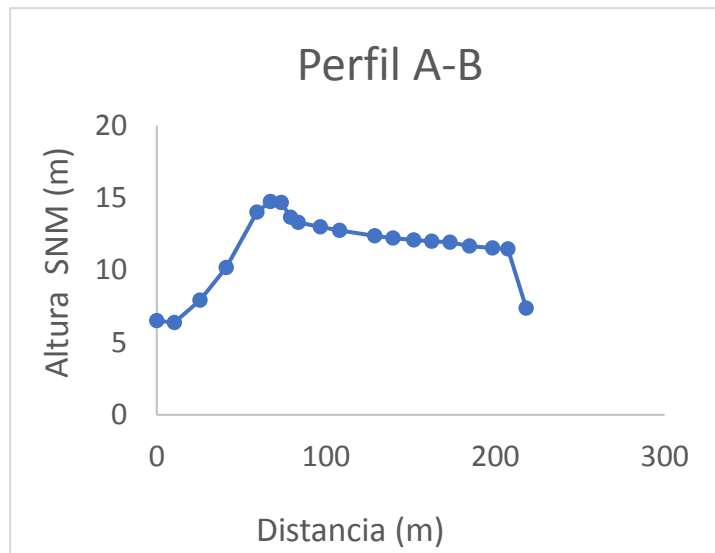
### PERFIL A-B

**FECHA Y HORA:** 10/agosto/2017;  
11:36AM.

**POSICIÓN:** 24 46 925°N; 112 05 031°W

### WP 319

| BN-PV | Distancia (m) | Altura (m) |
|-------|---------------|------------|
| 0     | 0             | 6.5        |
| 0-1   | 10.38         | 6.38       |
| 1-2   | 25.61         | 7.92       |
| 2-3   | 40.98         | 10.18      |
| 3-4   | 59.2          | 14.02      |
| 4-5   | 67.18         | 14.75      |
| 5-6   | 73.62         | 14.68      |
| 7-8   | 78.98         | 13.66      |
| 8-9   | 83.54         | 13.3       |
| 9-10  | 96.65         | 13         |
| 10-11 | 107.91        | 12.75      |
| 11-12 | 128.85        | 12.37      |
| 12-13 | 139.59        | 12.21      |
| 13-12 | 151.77        | 12.08      |
| 13-14 | 162.45        | 12         |
| 14-15 | 173.19        | 11.93      |
| 15-16 | 184.67        | 11.66      |
| 16-17 | 198.28        | 11.54      |
| 17-18 | 207.36        | 11.46      |
| 18-19 | 218.29        | 7.38       |



**Fig. 6** Perfil de la morfometría en la sección A-B del depósito dragado.

10/agosto/2017

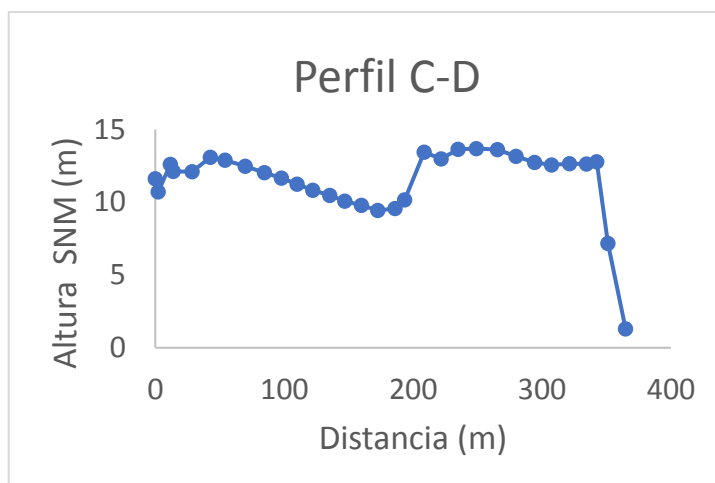
PERFIL C-D

FECHA Y HORA: 10/agosto/2017; 11:36AM.

POSICIÓN: 24 46 925°N; 112 05 031°W

WP 319

| BN-PV | Distancia<br>(m) | Altura<br>(m) |
|-------|------------------|---------------|
| 0     | 0                | 11.62         |
| 0-1   | 2.38             | 10.72         |
| 1-2   | 11.79            | 12.6          |
| 2-3   | 13.96            | 12.11         |
| 3-4   | 28.48            | 12.1          |
| 4-5   | 42.62            | 13.08         |
| 5-6   | 54.14            | 12.88         |
| 7-8   | 69.72            | 12.47         |
| 8-9   | 84.6             | 12.03         |
| 9-10  | 97.81            | 11.65         |
| 10-11 | 110.13           | 11.25         |
| 11-12 | 122.19           | 10.82         |
| 12-13 | 135.45           | 10.46         |
| 13-12 | 147.1            | 10.07         |
| 13-14 | 160.04           | 9.78          |
| 14-15 | 172.53           | 9.43          |
| 15-16 | 186.12           | 9.57          |
| 16-17 | 193.46           | 10.16         |
| 17-18 | 208.7            | 13.44         |
| 18-19 | 221.86           | 12.98         |
| 19-20 | 234.85           | 13.63         |
| 20-21 | 248.99           | 13.69         |
| 21-22 | 265.47           | 13.61         |
| 23-24 | 279.78           | 13.15         |
| 24-25 | 294.21           | 12.74         |
| 25-26 | 307.55           | 12.57         |
| 26-27 | 321.45           | 12.65         |
| 27-28 | 334.57           | 12.63         |
| 28-29 | 342.6            | 12.78         |



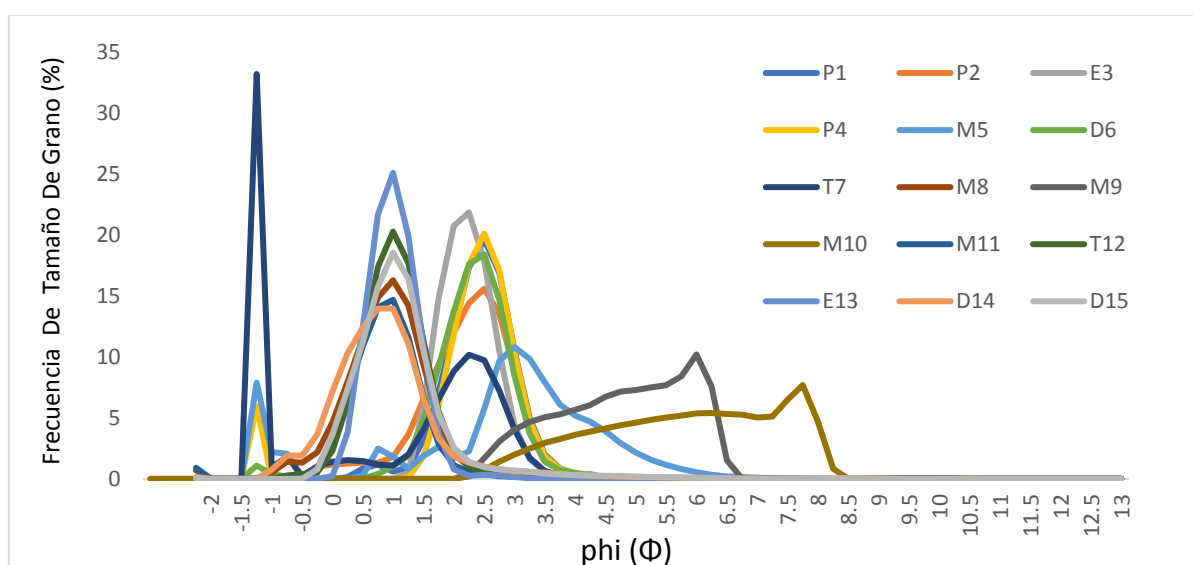
**Fig. 7** Perfil de la morfometría en la sección C-D del depósito dragado.

## 8.2. Determinación del tamaño de grano.

### 8. 2.1. Frecuencia de tamaño de grano.

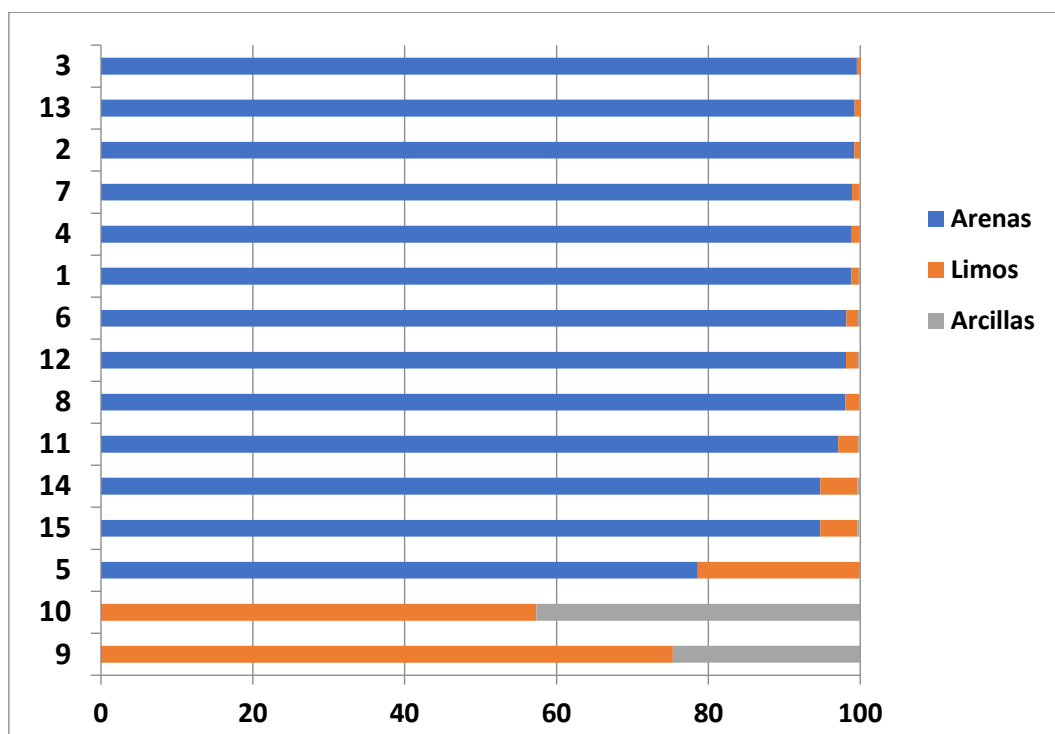
Los resultados del análisis granulométrico de los sedimentos se muestran mediante histogramas de frecuencia de tamaño de grano (%) con respecto a las unidades phi ( $\Phi$ ) en que fueron medidos (Fig.8).

Los datos mostraron que la tendencia de la mayoría de las muestras es en los tamaños de arenas medias y gruesas, con excepción de las muestras T7 con tamaños de gránulos, por la presencia de conchas, la muestra M5 con tamaños de arena fina y la muestras M9 y M10 por la presencia de limos y arcillas.



**Fig. 8** Frecuencia del tamaño de grano (%) respecto a las unidades phi ( $\Phi$ ) en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos.

En el área de estudio se obtuvo un porcentaje de arenas en casi todas las muestras, cabe destacar la presencia de limos y arcillas en las muestras M9 y M10 (Fig.9).



**Fig. 9** Porcentaje de Arena, Limo y arcillas en muestras de sedimento del área de estudio.

#### 8. 2.1.1 Media del tamaño de grano en las muestras

Los valores de la media de los 15 sitios donde se realizó el muestreo van de 2.2 a 2.5 unidades phi ( $\Phi$ ), lo que equivale a arena fina según la escala Wenworth. La muestra M5 (planicie cercana al humedal presentó un tamaño de grano de 3.2 ( $\Phi$ ), lo que corresponde a arenas muy finas, la muestra M9 con tamaño de grano 7.9 ( $\Phi$ ) perteneciente a los limos y seguidamente la muestra M10 con 8.9 ( $\Phi$ ) representando a las arcillas (Tabla 3).

**Tabla 3.** Valores de la media por tipo de sedimento en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos.

| Muestra | Ambiente de depósito        | Media ( $\Phi$ ) | Tipo de sedimento |
|---------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| P1      | Pendiente de talud          | 2.5              | Arena Fina        |
| P2      | Pendiente de talud          | 2.2              | Arena Fina        |
| E3      | Eólico redepositado         | 2.2              | Arena Fina        |
| P4      | Pendiente de talud          | 2.3              | Arena Fina        |
| M5      | Planicie y Mangle impactado | 3.2              | Arena muy Fina    |
| D6      | Duna antigua                | 2.4              | Arena Fina        |
| T7      | Cima                        | 0.9              | Arena Gruesa      |
| M8      | Planicie de área            | 2.2              | Arena Fina        |
| M9      | Mangle impactado            | 7.9              | limos             |
| M10     | Mangle no impactado         | 8.9              | Arcillas          |
| D11     | Duna impactada              | 1.5              | Arena Media       |
| T12     | Cima                        | 2.5              | Arena Fina        |
| E13     | Eólico redepositado         | 2.5              | Arena Fina        |
| D14     | Duna Impactada              | 2.3              | Arena Fina        |
| D15     | Duna                        | 2.6              | Arena Fina        |

#### 8. 2.1.2 Sesgo del tamaño de grano en las muestras

En la mayoría de las muestras el valor del sesgo representa una tendencia bien marcada hacia los tamaños de grano gruesos, excepto en las muestras P1, D6, T7, E13, D14 y D15; donde predominan un mayor porcentaje de tamaño de grano fino. Esto es correspondiente con el tamaño de grano medio del total de las muestras (Tabla 4).

**Tabla 4.** Valores de sesgo por tipo de sedimento en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos.

| Muestra | Ambiente de depósito    | Tamaño medio   | Sesgo ( $\Phi$ ) | Tendencia                         |
|---------|-------------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|
| P1      | Pendiente de talud      | Arena fina     | 2.6              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| P2      | Pendiente de talud      | Arena fina     | -0.4             | Fuertemente sesgada a los gruesos |
| E3      | Eólico redepositado     | Arena fina     | 0.1              | Cercano a la Simetría             |
| P4      | Pendiente de talud      | Arena fina     | -2.1             | Fuertemente sesgada a los gruesos |
| M5      | Planicie                | Arena muy fina | -0.4             | Fuertemente sesgada a los gruesos |
| D6      | Duna antigua            | Arena fina     | 1.2              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| T7      | Sima                    | Arena gruesa   | 0.0              | Simetría                          |
| M8      | Planicie de área        | Arena Fina     | -0.5             | Fuertemente sesgada a los gruesos |
| M9      | Mangle impactado        | Arena muy fina | 0.3              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| M10     | Mangle no impactado     | Arena muy fina | 0.3              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| D11     | Duna impactada          | Arena Fina     | -0.3             | Fuertemente sesgada a los gruesos |
| T12     | Sima                    | Arena Fina     | 1.7              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| E13     | Eólico redepositado     | Arena Fina     | 2.0              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| D14     | Duna Impactada          | Arena Fina     | 1.1              | Fuertemente sesgada a los finos   |
| D15     | Duna /Planicie de marea | Arena Fina     | 2.7              | Fuertemente sesgada a los finos   |

#### 8. 2.1.3 Desviación estándar del tamaño de grano en las muestras

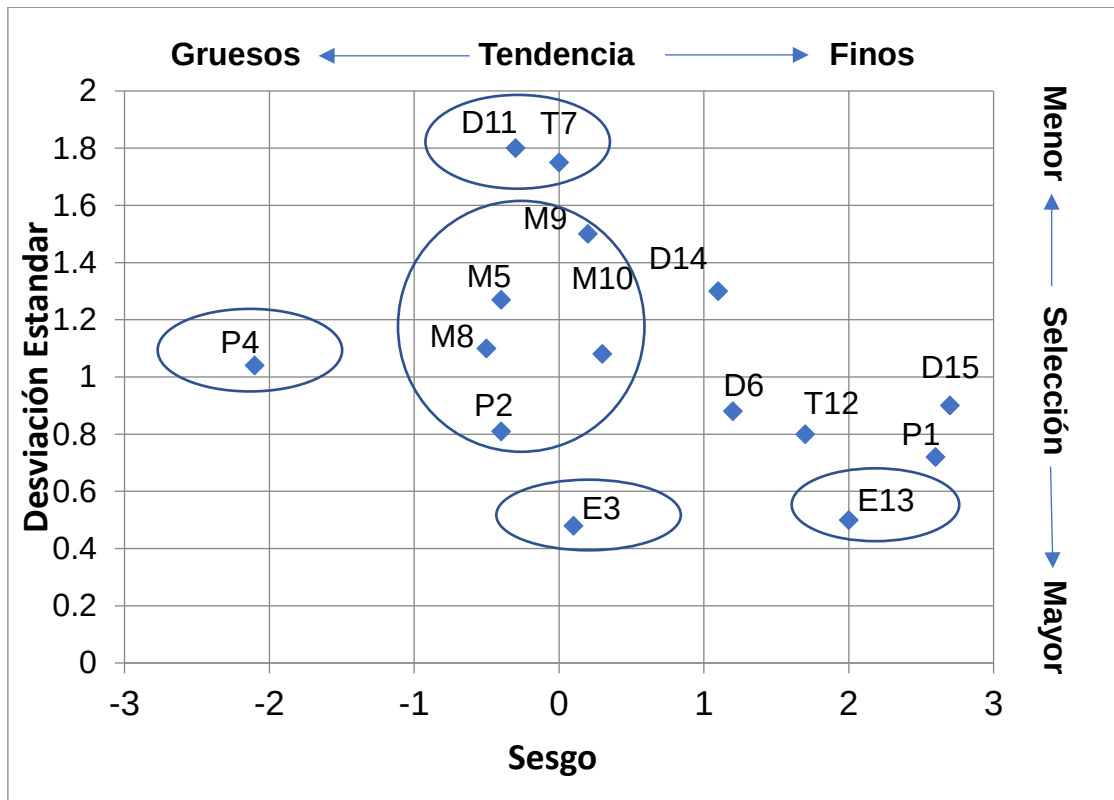
La desviación estándar mostró una buena selección únicamente para la muestra E3 (eólico redepositado) pues se encuentra expuesta a la redeposición de sedimentos por la acción eólica. El resto de las muestras se encontraron moderadas o pobremente seleccionadas (Tabla 5)



**Tabla 5.** Valores de desviación estándar y grados de clasificación en los sedimentos en los diferentes ambientes de depósito en la región sureste del estero de San Carlos.

| Muestra | Ambiente de depósito    | Desviación Estándar ( $\Phi$ ) | Grado Clasificación             |
|---------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| P1      | Pendiente de talud      | 0.7                            | Moderadamente seleccionada      |
| P2      | Pendiente de talud      | 0.6                            | Moderadamente seleccionada      |
| E3      | Eólico redepositado     | 0.5                            | Moderadamente bien seleccionada |
| P4      | Pendiente de talud      | 1.0                            | Pobrementemente seleccionada    |
| M5      | Planicie                | 1.3                            | Pobrementemente seleccionada    |
| D6      | Duna antigua            | 0.9                            | Moderadamente seleccionada      |
| T7      | Cima                    | 1.8                            | Pobrementemente seleccionada    |
| M8      | Planicie de área        | 1.1                            | Pobrementemente seleccionada    |
| M9      | Mangle impactado        | 1.5                            | Pobrementemente seleccionada    |
| M10     | Mangle no impactado     | 1.0                            | Pobrementemente seleccionada    |
| D11     | Duna impactada          | 1.8                            | Pobrementemente seleccionada    |
| T12     | Cima                    | 0.8                            | Moderadamente seleccionada      |
| E13     | Eólico redepositado     | 0.5                            | Moderadamente bien seleccionada |
| D14     | Duna Impactada          | 1.3                            | Pobrementemente seleccionada    |
| D15     | Duna /Planicie de marea | 0.9                            | Moderadamente seleccionada      |

Los datos obtenidos en el diagrama de dispersión muestran una tendencia hacia los tamaños finos de todas las muestras excepto las muestras P4 con una tendencia hacia los tamaños gruesos, además cabe destacar la mayor selección que muestran las muestras E3 y E13, no siendo así con las muestras T7 y D11 las cuales presentan una menor selección.



**Fig. 10** Diagrama de dispersión de las características texturales (selección y tendencia de tamaño de grano) de los sedimentos muestreados en el área de estudio.

### 8.3 Mineralogía

El material retenido en el tamiz 120 mm mostró un porcentaje significativo de minerales opacos, así como de fragmentos de rocas y cuarzo. No obstante, existe una dominancia del cuarzo de casi un 90 % en todas las muestras (Tabla 5).

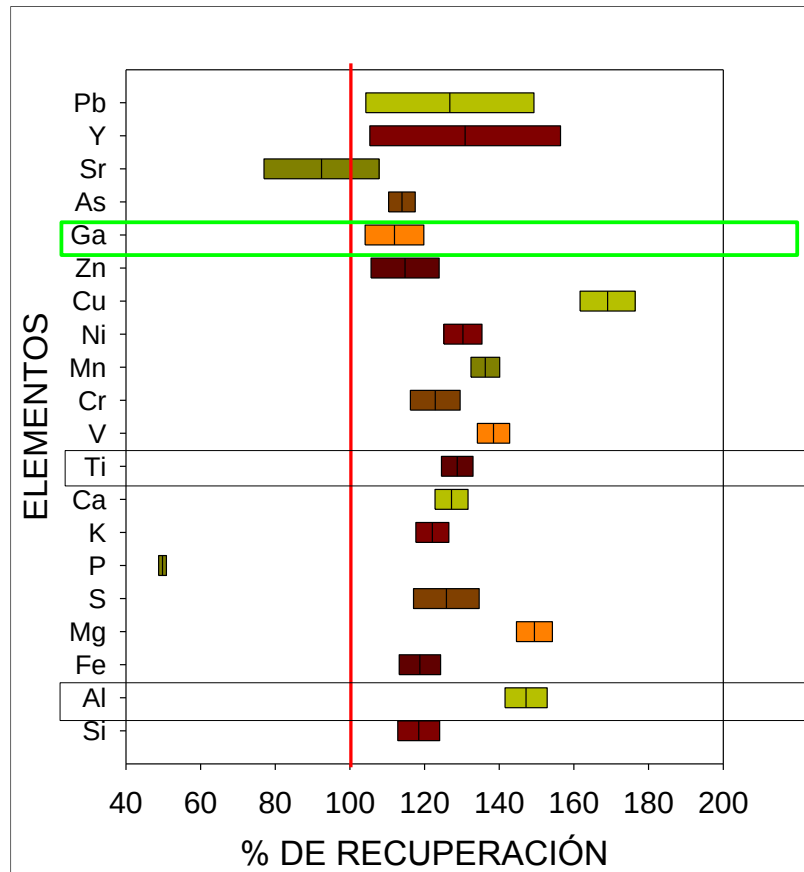
**Tabla 6.** Mineralogía de los sedimentos con tamiz de 120 mm en la región Sureste del estero de San Carlos.

| <b>Muestra</b> | <b>Ambiente de depósito</b> | <b>Cuarzo (%)</b> | <b>Fragmento de Roca (%)</b> | <b>Opacos (%)</b> |
|----------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| P1             | Pendiente de talud          | 89.93             | 6.71                         | 3.36              |
| P2             | Pendiente de talud          | 91.00             | 3.33                         | 5.67              |
| E3             | Eólico redepositado         | 91.67             | 4.33                         | 4.00              |
| P4             | Pendiente de talud          | 89.67             | 7.00                         | 3.33              |
| M5             | Planicie                    | 96.83             | 0.00                         | 3.17              |
| D6             | Duna antigua                | 89.86             | 8.78                         | 1.35              |
| T7             | Cima                        | 90.00             | 2.33                         | 7.67              |
| M8             | Planicie de área            | 87.33             | 0.33                         | 12.33             |
| M9             | Mangle impactado            | 96.81             | 0.00                         | 2.15              |
| M10            | Mangle no impactado         | 89.67             | 4.33                         | 4.00              |
| D11            | Duna impactada              | 89.67             | 7.00                         | 3.33              |
| T12            | Cima                        | 81.33             | 0.00                         | 18.67             |
| E13            | Eólico redepositado         | 88.00             | 8.33                         | 3.67              |
| D14            | Duna Impactada              | 93.00             | 7.00                         | 0.00              |
| D15            | Duna /Planicie de marea     | 94.33             | 4.67                         | 1.00              |

#### 8.4 Elementos traza elementos mayores.

##### 8.4.1 Porcentaje de recuperación.

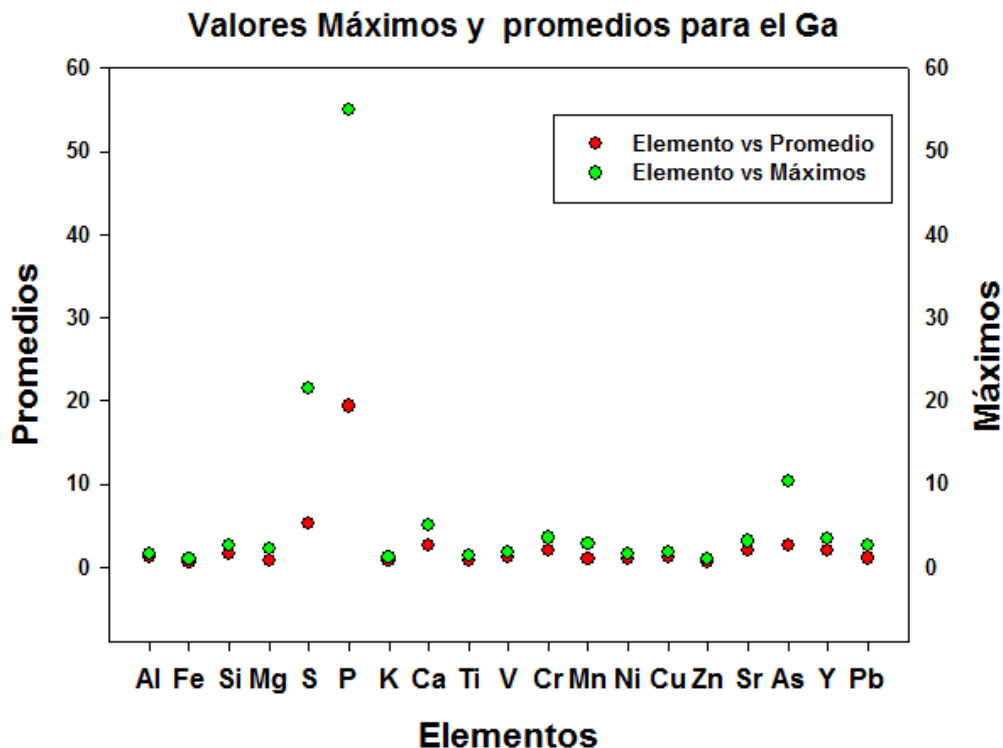
Los porcentajes de recuperación fueron contrastados con métodos de validación que presentan los estándares de referencia certificados conformados por el material del National Research Council Canada, para el MESS-3 siendo estos materiales de referencia para sedimento marino. Se observó para el Al (141 %) y el Ti (126 %) presentaron valores por arriba del 100 % de recuperación, siendo estos elementos de referencia frecuentemente utilizados para la normalización de las concentraciones de los ET (Romero-Guadarrama, 2011). Sin embargo, el valor más cercano al 100% lo presentó el Ga (104%), por lo que se considera el mejor elemento normalizador para el área de estudio (Fig. 9).



**Fig. 11** Porcentaje de recuperación de los elementos analizados en la región sureste del estero de San Carlos.

#### 8.4.2 Factor de enriquecimiento normalizado con el elemento Galio.

Como se observa en la figura 12, los factores de enriquecimiento normalizados con el Ga mostraron que los tres elementos más enriquecidos en el estudio fueron el Fósforo(P), Azufre (S) y el Arsénico (As). Los puntos verdes son los Factores de Enriquecimiento Normalizado promedios y los puntos rojos los valores máximos del Factor de Enriquecimiento Normalizado (Fig. 12)



**Fig. 12** Valores máximos y promedios de los factores de enriquecimiento normalizado con el Ga.

Al analizar el FEN de los sedimentos del área de estudio, de acuerdo con la clasificación utilizada por Marmolejo-Rodríguez (2011) y González-Soto (2017) se observó que los elementos como el Al, Fe, Si, Mg, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Pb presentaron un FEN bajo (0-3). Los elementos S y As presentaron un factor de enriquecimiento normalizado moderado (3-10) y el P mostró un FEN severo (10-25). Esto corrobora el análisis anterior donde el S, el P y el As fueron los elementos más enriquecidos.

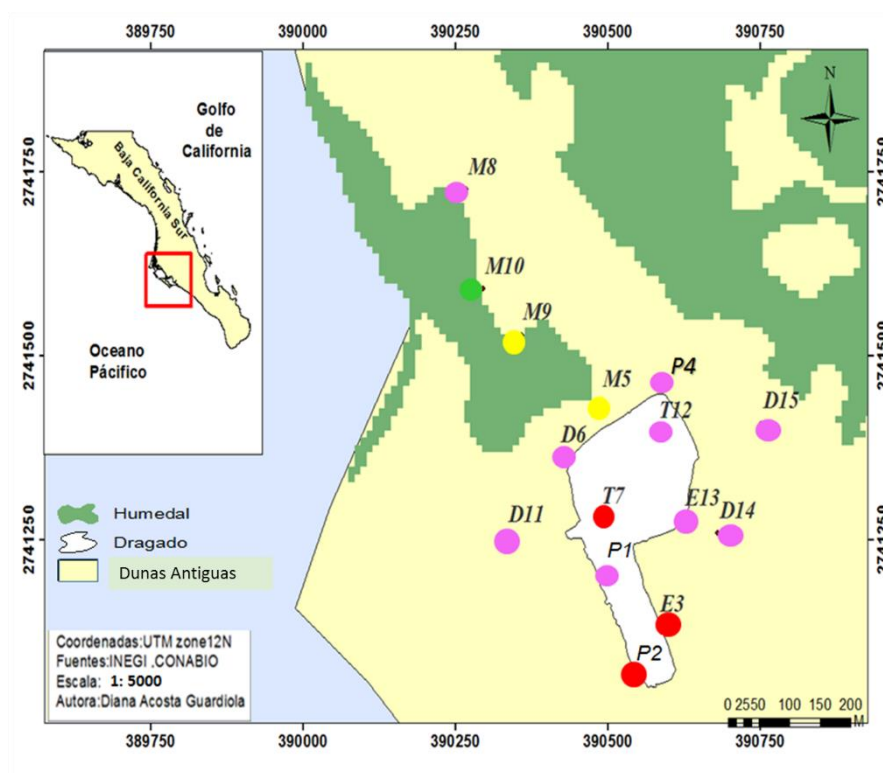
La distribución geográfica de los elementos con factor de enriquecimiento normalizado de moderado a severo en el área de estudio (P, S, As) se presenta esquemáticamente, de acuerdo a la explicación siguiente:

El primer mapa (Fig. 13) muestra el factor de enriquecimiento para el Fósforo (P) donde se observa que para la zona del humedal solo hay una muestra que presenta una clasificación de baja (M10) que pertenece al mangle no impactado, mientras que las muestras T7, E3 y P2 tienen un comportamiento

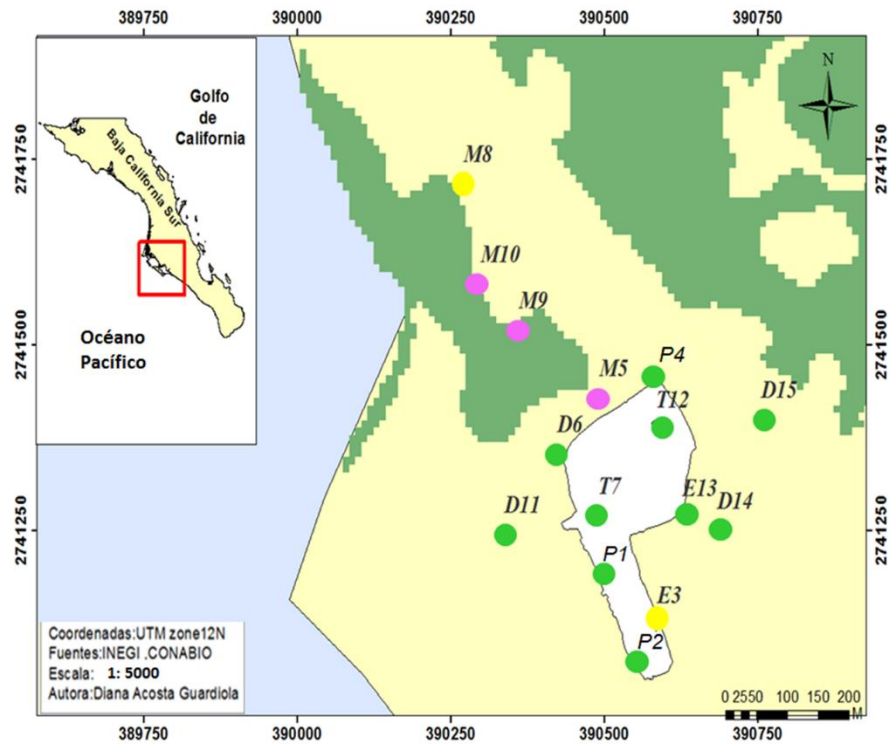
extremadamente severo no siendo así en el resto de las muestras que presentan un comportamiento severo.

El segundo mapa (Fig. 14) muestra el factor de enriquecimiento para el Azufre (S). En este caso presenta un comportamiento de factor de enriquecimiento bajo para gran parte del depósito destacándose la muestra M5, M9 y M10 pertenecientes al mangle impactado y a la planicie de mareas donde presentaron un factor de enriquecimiento de severo.

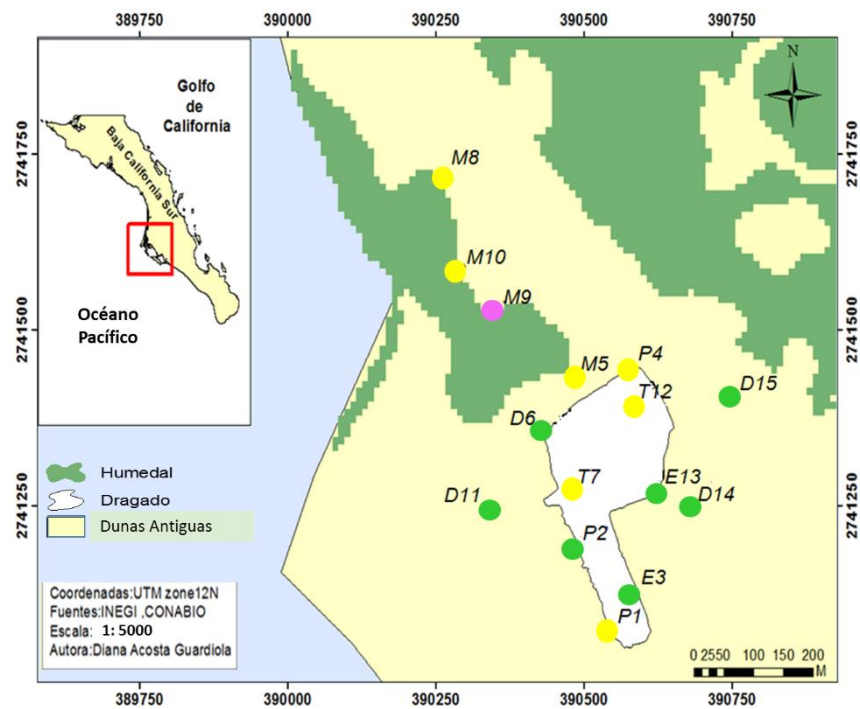
En el tercer mapa (Fig. 15) se muestra el factor de enriquecimiento para el Arsénico (As) en donde se pudo observar que alrededor del depósito de sedimentos dragados existe la presencia de un factor enriquecimiento moderado y bajo excepto la M9 que pertenece al mangle impactado y presenta un factor de enriquecimiento severo en zona de estudio.



**Fig. 13** Factor Enriquecimiento Normalizado de Fósforo (P) en sedimentos dragados.



**Fig. 14** Factor Enriquecimiento Normalizado de Azufre (S) en sedimentos dragados.



**Fig. 15** Factor de Enriquecimiento Normalizado de Arsénico (As) en sedimentos dragados.

En la tabla 7 se presentan los factores de enriquecimientos normalizados en el depósito y sus áreas circundantes, donde muestra que existe un enriquecimiento del Fósforo (P), el Arsénico y el Azufre con respecto a los valores corteza terrestre Wedepohl (1995) y los valores de fondos regionales sugeridos por González -Soto (2017).

En la tabla 8 se presentan los elementos obtenidos en el depósito y sus áreas circundantes, se observa que los valores no sobrepasan las normas mexicanas por tanto no se considera que los elementos estén en concentraciones tóxicas para el área de estudio.



**Tabla 7.** Comparación de valores de los elementos obtenidos en los sedimentos dragados con corteza terrestre Wedepohl (1995) y los valores de fondo regionales sugeridos por González -Soto (2017).

| Elementos | Valores de Fondo Sugeridos González-Soto (2017) | Wedepohl - 1995 (mg/kg) Corteza Continental Superior (UC) | Valores de Factor de Enriquecimiento Normalizado obtenidos para los elementos en las 15 muestras de sedimentos dragados. |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |                                                 |                                                           | T1                                                                                                                       | T2    | E3    | P4    | M5    | D6    | T7    | M8   | M9    | M10   | D11   | T12   | E13   | D14   | D15   |
| Arsénico  | 1.3                                             | 2.0                                                       | 0                                                                                                                        | 3.87  | 0     | 3.13  | 3.69  | 1.54  | 3.14  | 3.38 | 10.27 | 8.05  | 1.92  | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Mercurio  | -                                               | 0.056                                                     | 2.09                                                                                                                     | 2.78  | 2.19  | 1.6   | 1.88  | 1.31  | 3.52  | 1.87 | 3.01  | 2.19  | 1.61  | 1.33  | 1.33  | 1.81  | 1.17  |
| Níquel    | 21.3                                            | 18.6                                                      | 0.90                                                                                                                     | 1.03  | 1.10  | 0.69  | 0.94  | 0.77  | 1.14  | 0.74 | 1.63  | 1.18  | 1.02  | 0.80  | 0.80  | 1.32  | 1.12  |
| Plomo     | 11.4                                            | 17                                                        | 1.34                                                                                                                     | 0.85  | 2.66  | 0.66  | 0.76  | 0.96  | 0.95  | 0.61 | 0.60  | 0.68  | 0.81  | 1.19  | 1.19  | 1.34  | 1.61  |
| Vanadio   | 83.0                                            | 53                                                        | 1.22                                                                                                                     | 1.87  | 1.84  | 0.99  | 1.15  | 0.96  | 1.37  | 1.14 | 1.25  | 1.20  | 1.09  | 1.27  | 1.27  | 1.48  | 0.61  |
| Fósforo   | 1415.4                                          | 665                                                       | 14.98                                                                                                                    | 32.21 | 54.97 | 13.79 | 3.25  | 15.83 | 28.13 | 20.5 | 7.65  | 2.19  | 17.29 | 14.50 | 14.50 | 27.06 | 23.41 |
| Azufre    | 0.0                                             | 53                                                        | 1.83                                                                                                                     | 2.56  | 3.27  | 2.31  | 17.45 | 0.68  | 2.80  | 3.31 | 11.58 | 21.51 | 0.68  | 2.68  | 2.68  | 2.75  | 2.13  |

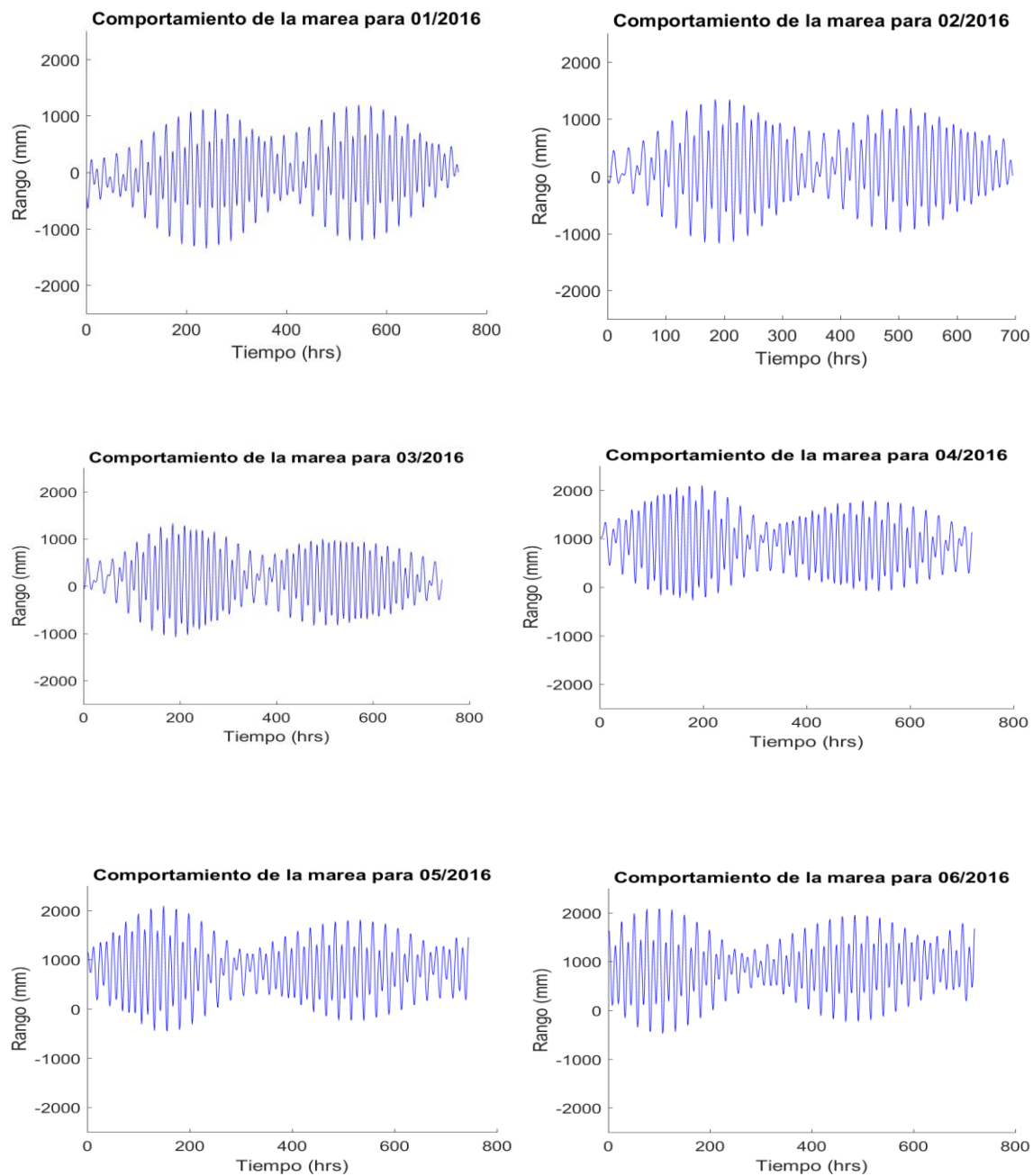
**Tabla 8.** Comparación de valores de los elementos obtenidos en los sedimentos dragados con corteza terrestre Wedepohl (1995) y los valores referenciados en la NOM-147 de SEMARNAT 2004.

| Concentraciones de referencias totales (CRT) por tipo de uso de suelo. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. |                                                     | Valores obtenidos para los elementos en las 15 muestras de sedimentos dragados. |       |       |      |       |        |       |      |      |       |      |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------|-------|--------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Contaminante                                                                                       | NOM. 147 uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg) | T1                                                                              | T2    | E3    | P4   | M5    | D6     | T7    | M8   | M9   | M10   | D11  | T12   | E13   | D14   | D15   |
| Arsénico                                                                                           | 22                                                  | 0                                                                               | 4.1   | 0     | 4.48 | 5.6   | 2.1022 | 3.93  | 4.44 | 15.2 | 13.8  | 2.42 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Mercurio                                                                                           | 23                                                  | 0                                                                               | 0     | 0     | 0    | 0     | 0      | 0     | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Níquel                                                                                             | 1 600                                               | 8.95                                                                            | 10.23 | 8.99  | 9.25 | 13.3  | 9.83   | 13.3  | 9.14 | 22.5 | 18.9  | 12   | 9.62  | 9.62  | 12.3  | 12.2  |
| Plomo                                                                                              | 400                                                 | 12.21                                                                           | 7.66  | 19.83 | 7.97 | 9.79  | 11.19  | 10.08 | 6.76 | 7.56 | 9.94  | 8.72 | 12.98 | 12.98 | 11.42 | 16.1  |
| Vanadio                                                                                            | 78                                                  | 34.6                                                                            | 52.7  | 42.9  | 37.9 | 46.1  | 34.7   | 45.4  | 39.5 | 49   | 54.7  | 36.3 | 43.2  | 43.2  | 39.2  | 18.96 |
| Fósforo                                                                                            | -                                                   | 5323                                                                            | 11336 | 16031 | 6562 | 1637  | 7168   | 11693 | 8949 | 3765 | 1251  | 7226 | 6173  | 6173  | 9009  | 9130  |
| Azufre                                                                                             | -                                                   | 933                                                                             | 1289  | 1367  | 1581 | 12595 | 443    | 1670  | 2076 | 8169 | 17571 | 411  | 1632  | 1632  | 1312  | 1192  |

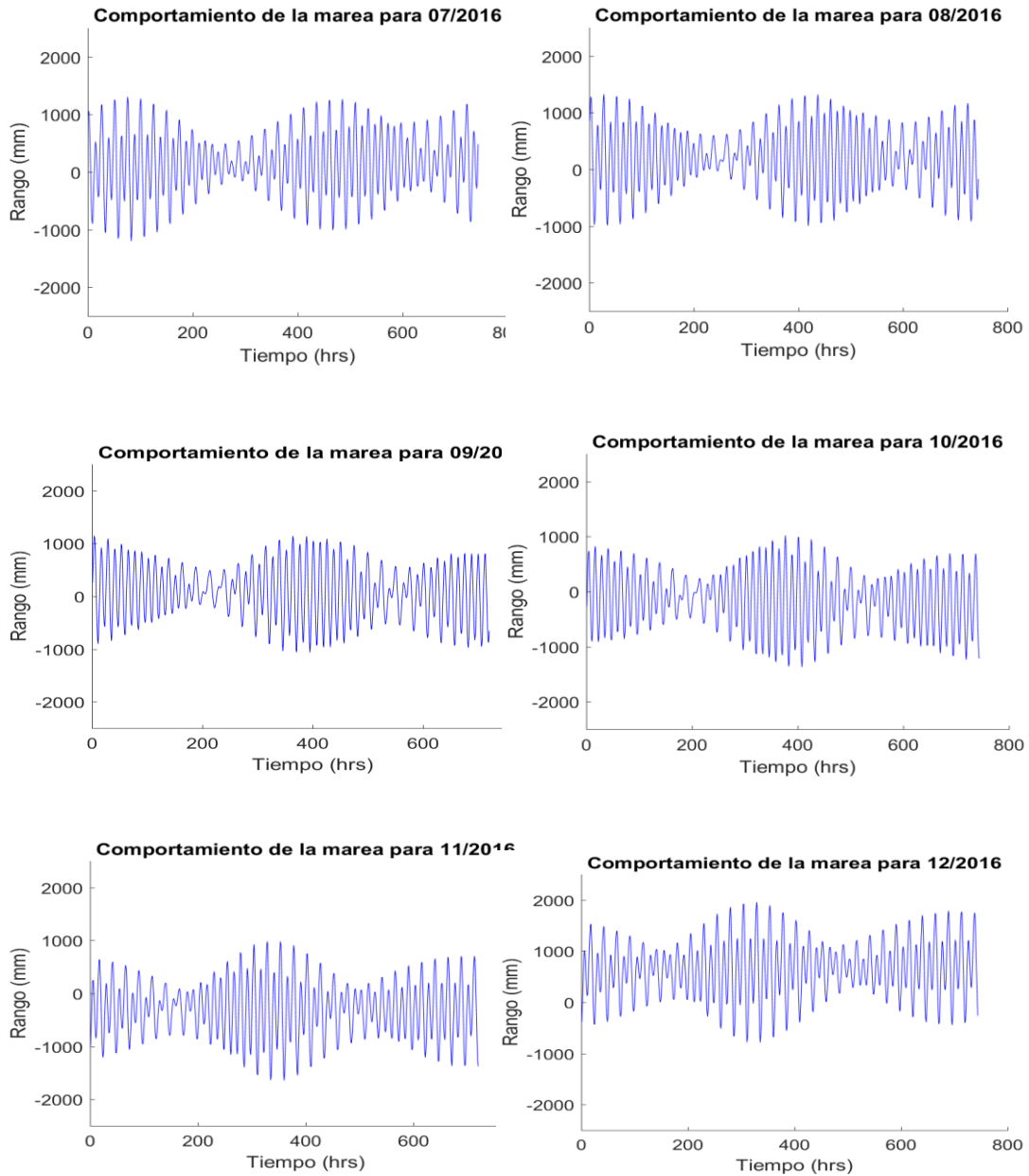
## 8.5 Efecto de la marea y viento en el depósito de sedimentos dragados.

### 8.5. 1 Variación de la Marea.

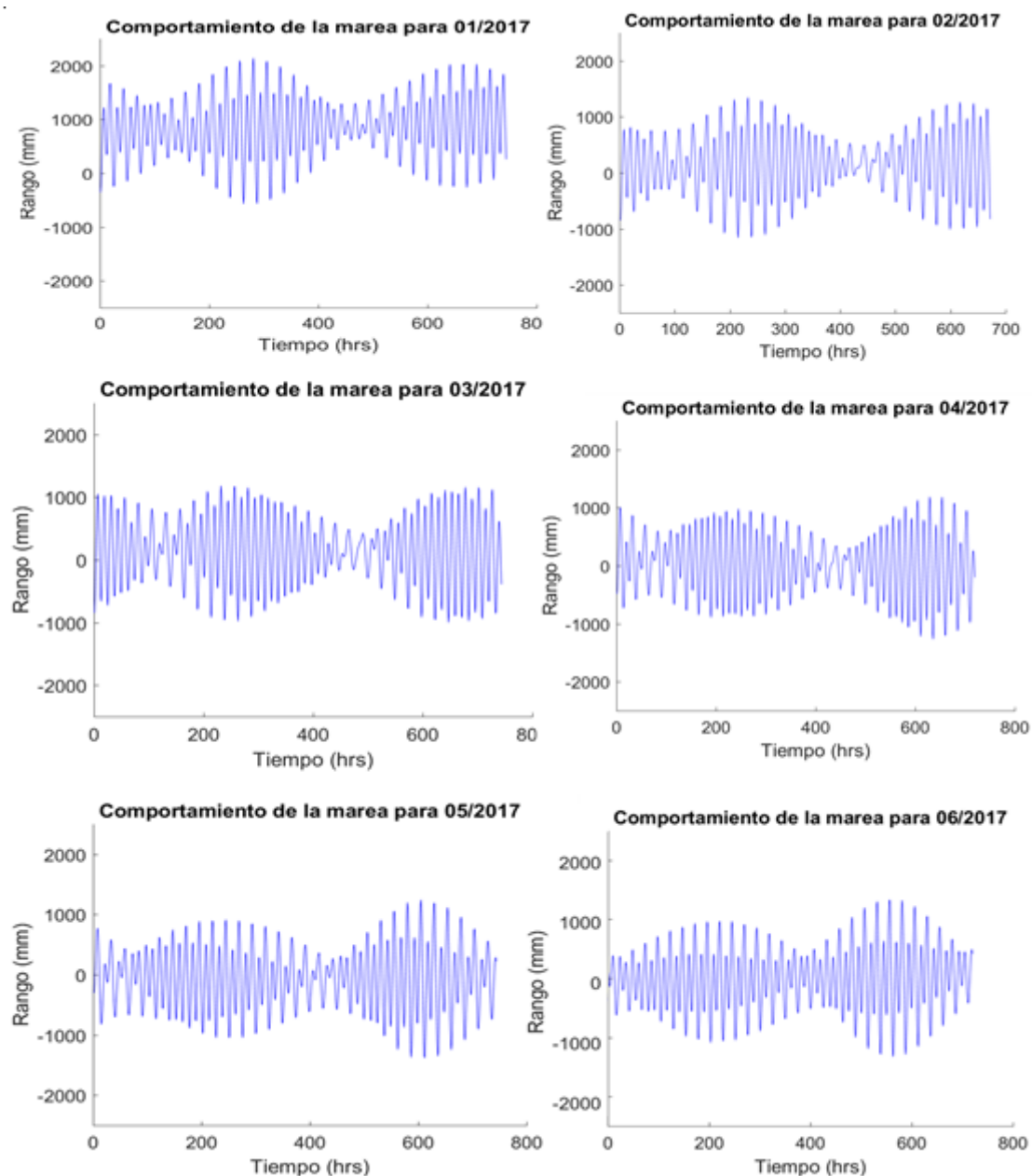
Los datos de mareas de la estación mareográfica San Carlos para el año 2016 mostraron que en los meses de enero a marzo y de julio a octubre, los valores de variación máxima oscilan entre -1.3 m a 1.2 m, en los meses de agosto a junio de -0.3 m a 2 m, en noviembre entre -1.8 m a 1.0 m y en diciembre de -0.9 a 2 m. Para el año 2017 en los meses de enero a marzo y en diciembre los valores máximos oscilaron entre -1 m a 1 m, a diferencia del resto de los meses, en donde se presentan mareas cuyas variaciones oscilan entre -0.4 m a 2 m.



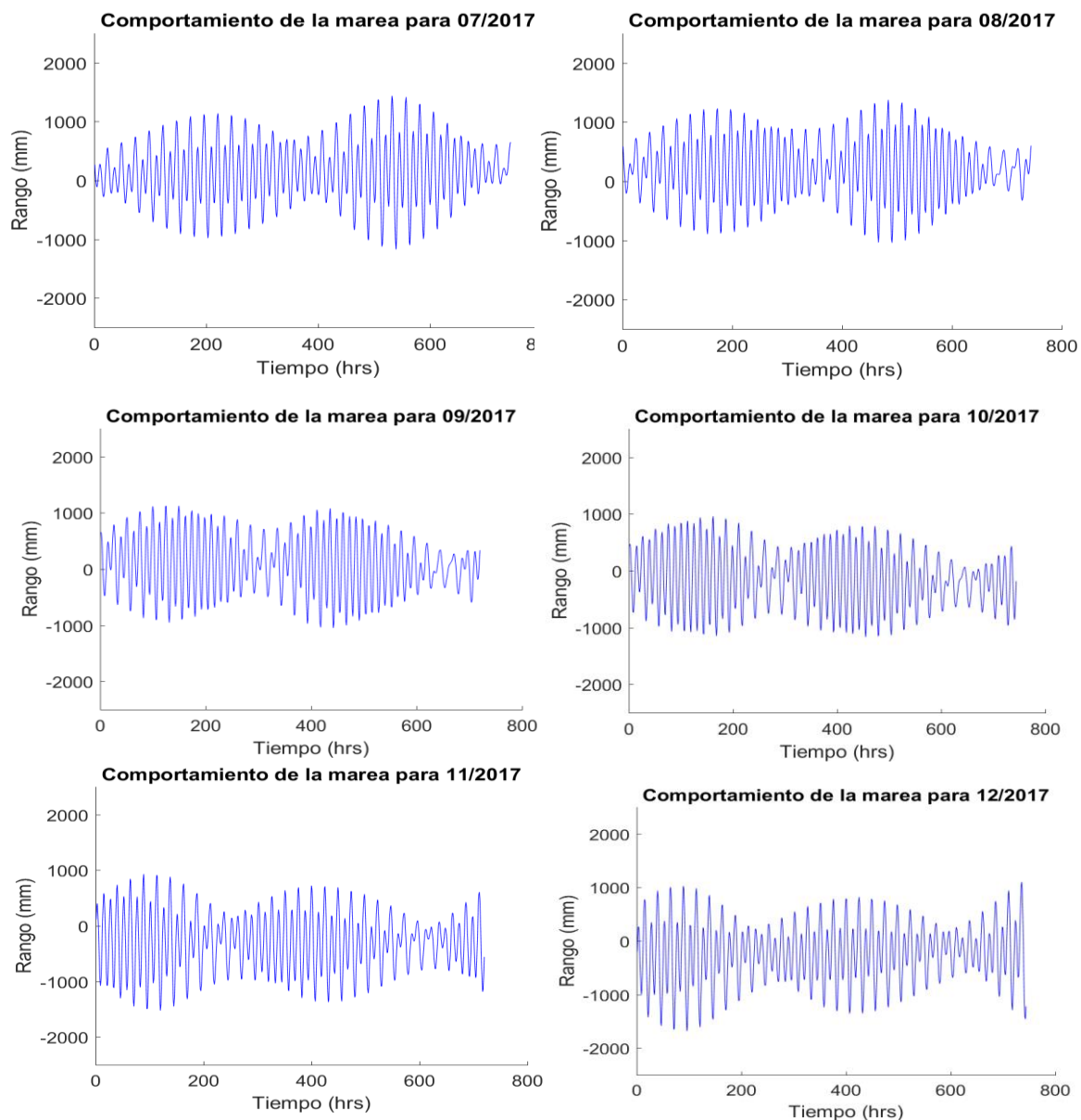
**Fig. 17** Amplitud o Rango de Mareas (mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM correspondiente de enero - junio, estación de San Carlos, BCS en 2016.



**Fig.18** Amplitud o Rango de Mareas(mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM de julio -diciembre, estación San Carlos, B.C.S, 2016.



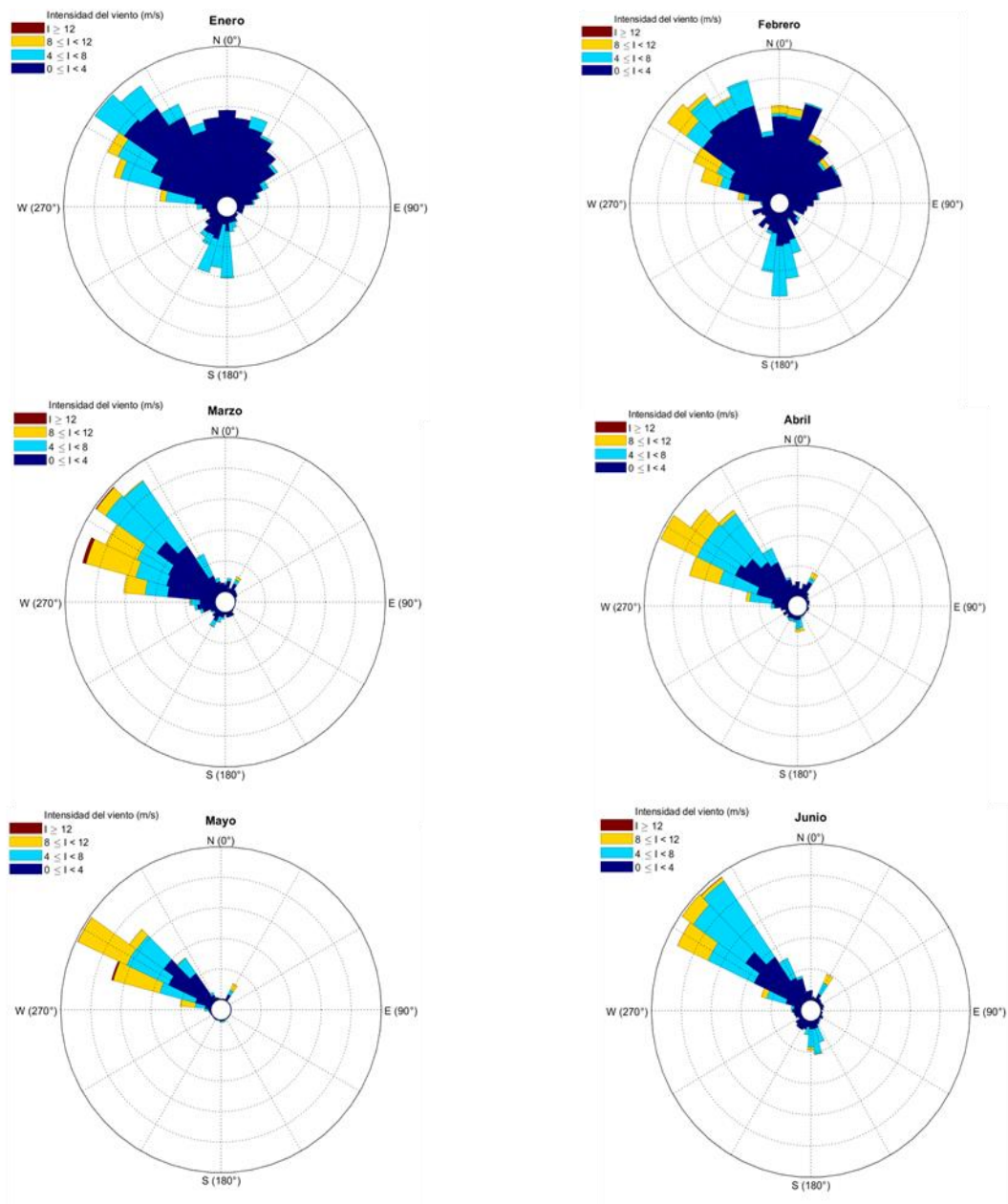
**Fig. 19** Amplitud o Rango de Mareas (mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM enero - junio a la estación de San Carlos, BCS en 2017



**Fig. 20** Amplitud o Rango de Mareas (mm) con respecto al tiempo (hrs) del NMM julio - diciembre la estación de San Carlos, BCS en 2017.

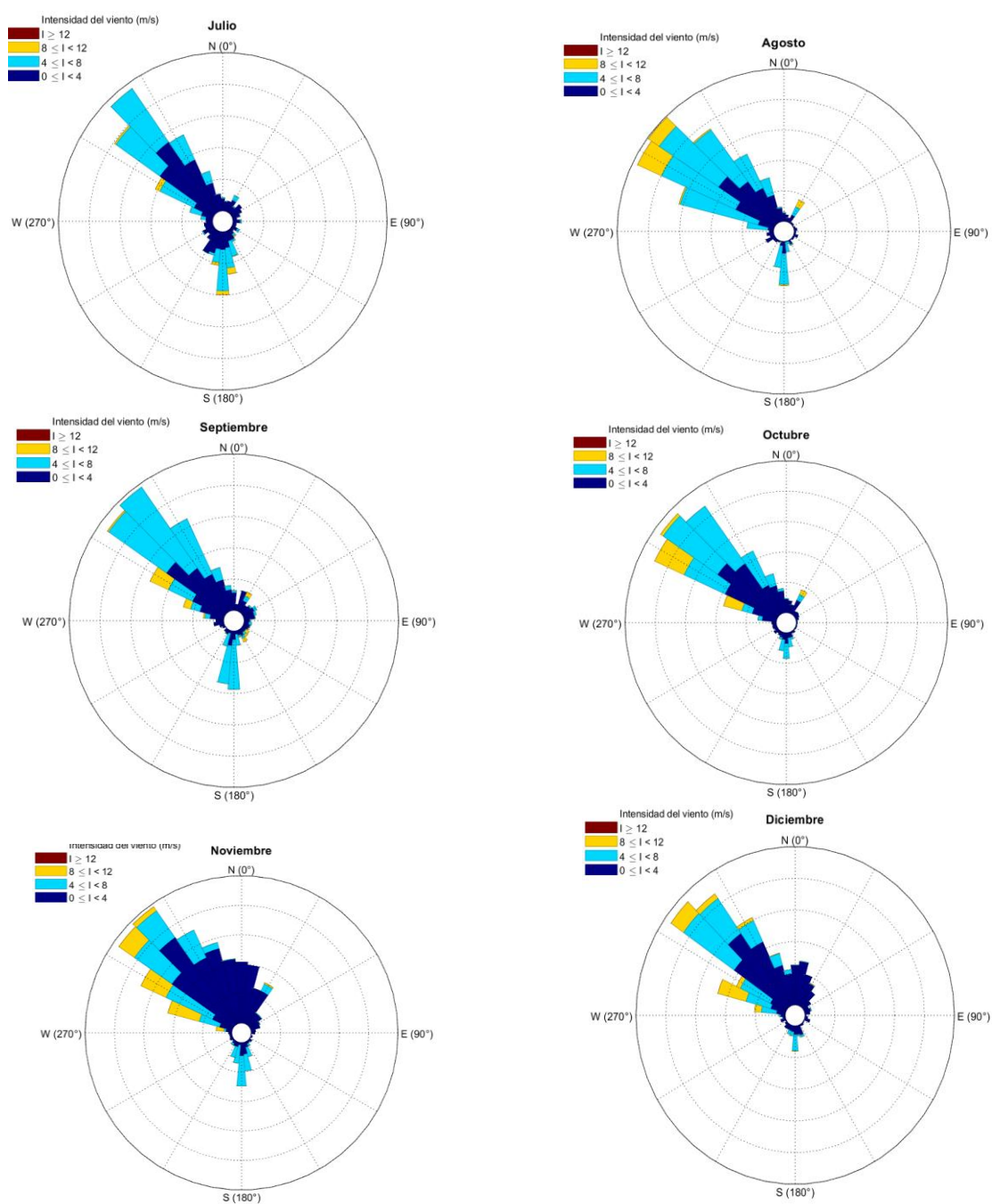
#### 8.5.2 Variación del viento.

El análisis mensual de los datos de vientos para el año 2016 mostró una dominancia de los vientos del Noroeste en el área de estudio con velocidades máximas de 12 m/s predominando velocidades de 4 a 8 m/s.



**Fig. 21** Dirección y velocidad de los vientos tomados de la estación de Puerto Cortés 2016. (enero -junio).

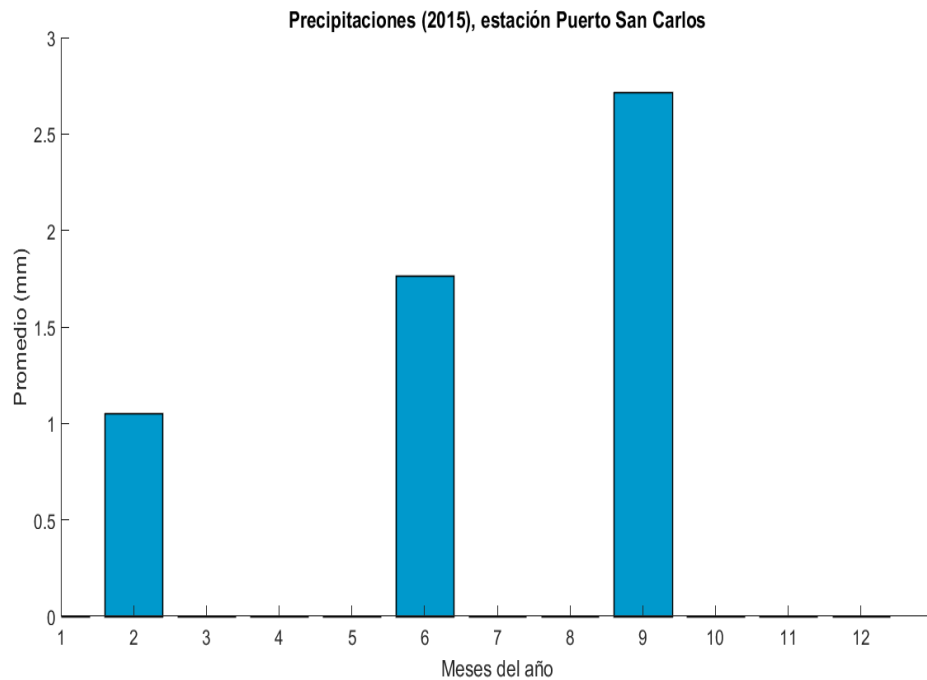




**Fig.22** Dirección y velocidad de los vientos tomados de la estación de Puerto Cortés 2016. (julio -diciembre).

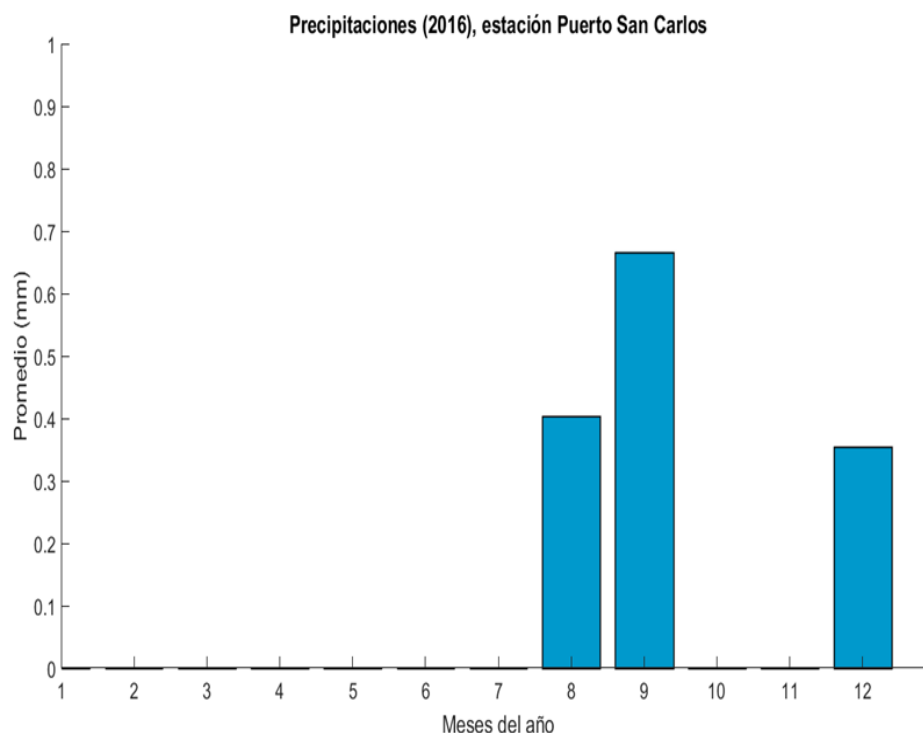
### 8.5.3 Variación de la precipitación.

La precipitación en el área de estudio para el 2015 estuvo entre 0 y 3 mm correspondiente al mes de septiembre. La escasa o nula presencia de lluvia se registró en la zona en los meses de enero, marzo, abril, mayo, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre (Fig. 23).



**Fig. 23** Valores de precipitación pluvial (mm) mensual acumulada registrados en la estación Puerto San Carlos, B.C.S., durante 2015.

La precipitación en el área de estudio para el 2016 estuvo entre 0 y 0.7 mm correspondientes a los meses de agosto y septiembre. La escasa presencia de lluvia se registró en la zona en los meses de enero a julio, noviembre y diciembre (Fig. 24).

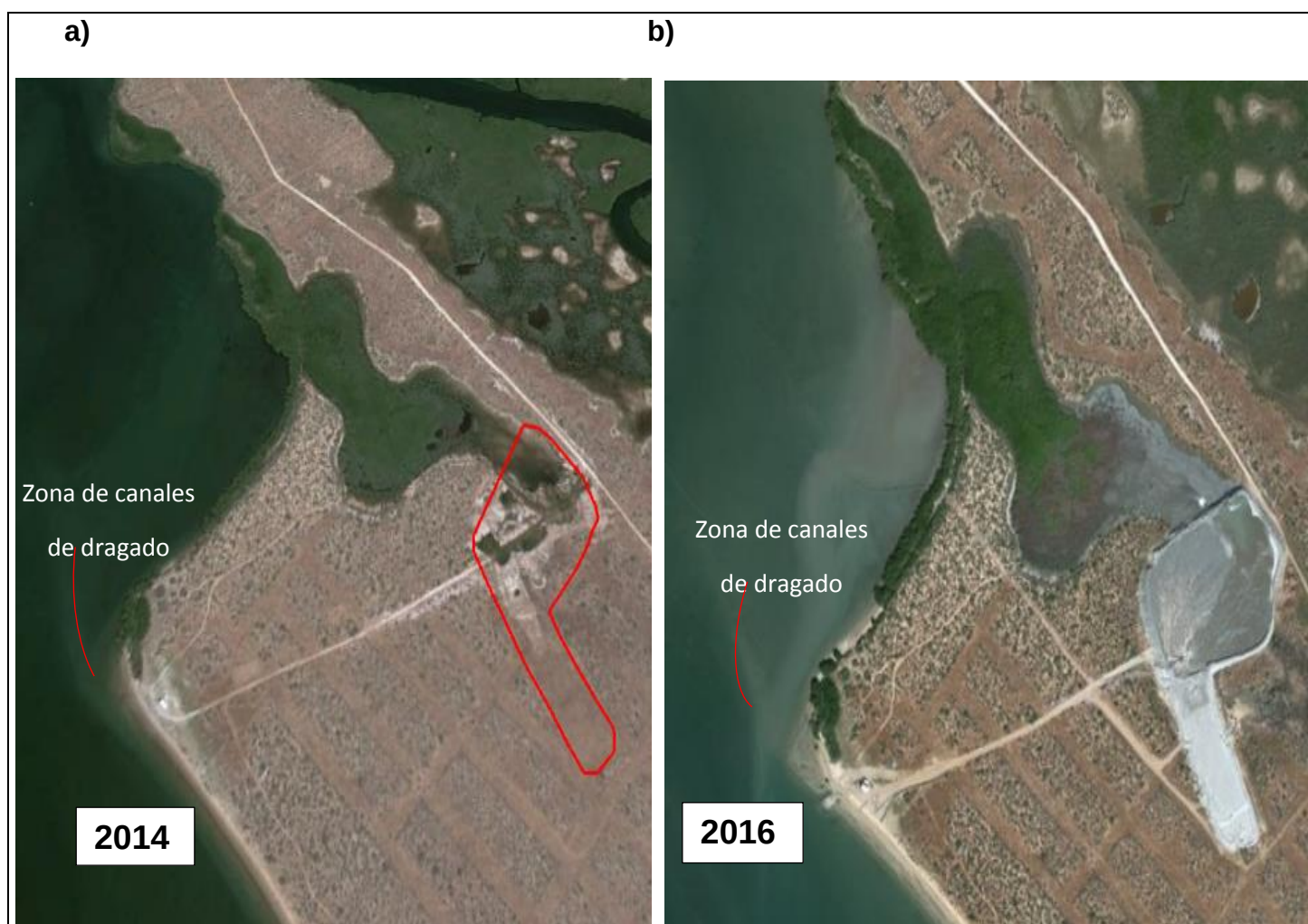


**Fig. 24** Valores de precipitación pluvial (mm) mensual acumulada registrados en la estación Puerto San Carlos, B.C.S., durante 2016.

## 8.6. Dispersión de sedimentos dragados.

### 8.6.1. Modificación o cambio del depósito de sedimentos dragados.

A partir de las imágenes obtenidas en Google Earth se puede observar el estado en que se encontraba el Estero San Carlos en 2014, antes del dragado de sedimentos en el canal de acceso (Fig. 25a). Posteriormente, en 2016 se observa el área de estudio aproximadamente unos meses después de haberse llevado a cabo el dragado en el canal y depositado en la zona sureste del estero (Fig. 25b).



**Fig. 25** Imágenes del área de estudio mostrando el antes y después del dragado en el canal de acceso al Estero San Carlos. a) 2014; b) 2016. Polígono rojo representa la zona de depósito antes del dragado.

#### 8.6.2 Efecto del depósito de sedimentos dragados sobre las áreas circundantes

Los diferentes ambientes que se encuentran alrededor del depósito de sedimentos que podrían estar siendo afectados directamente por la dispersión de estos sedimentos en el área de estudio (Fig. 26) son: la planicie de marea, el manglar, el cual es un pequeño subsistema del estero San Carlos y el estero mismo, las dunas antiguas y una porción del manglar localizado al este del depósito. Se puede observar un efecto directo del depósito de sedimentos en las áreas circundantes. En el caso del humedal se pudo constatar, mediante

observación directa, el efecto negativo de la dispersión de sedimentos sobre el área total del humedal.

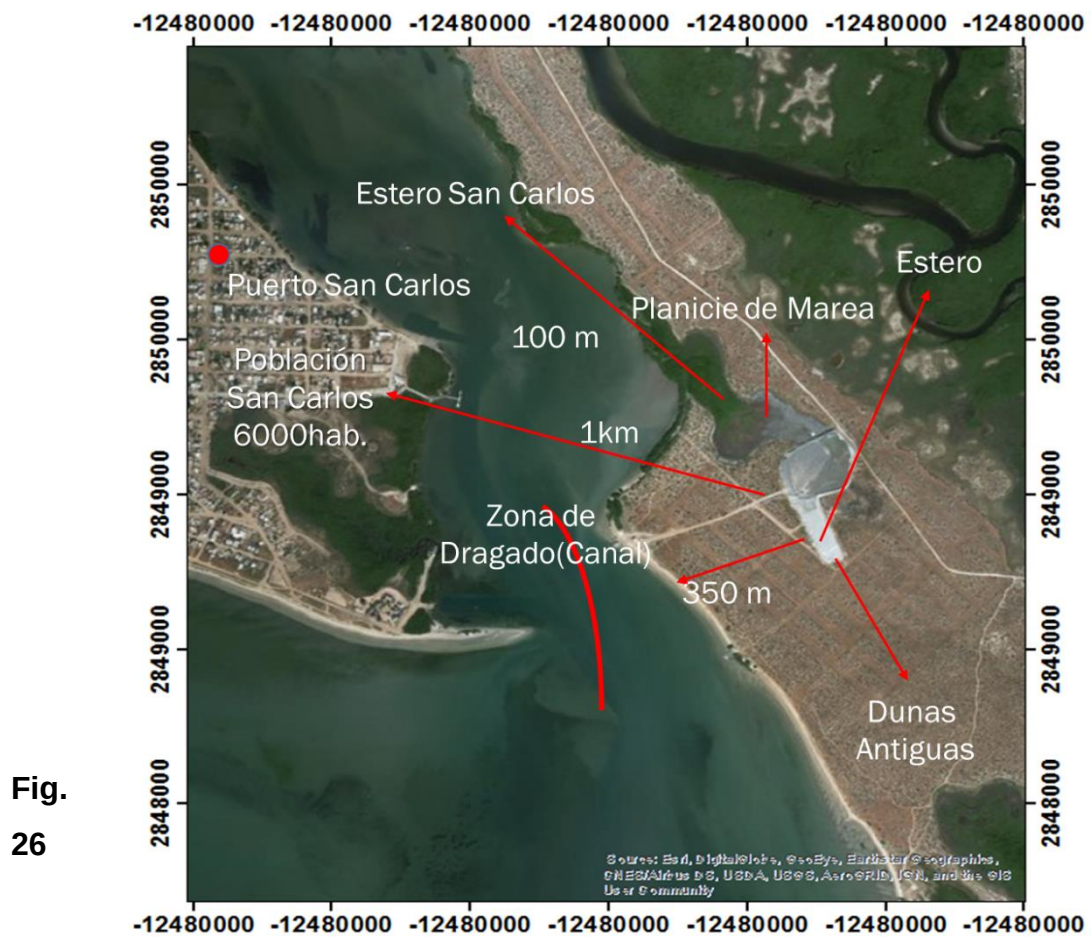
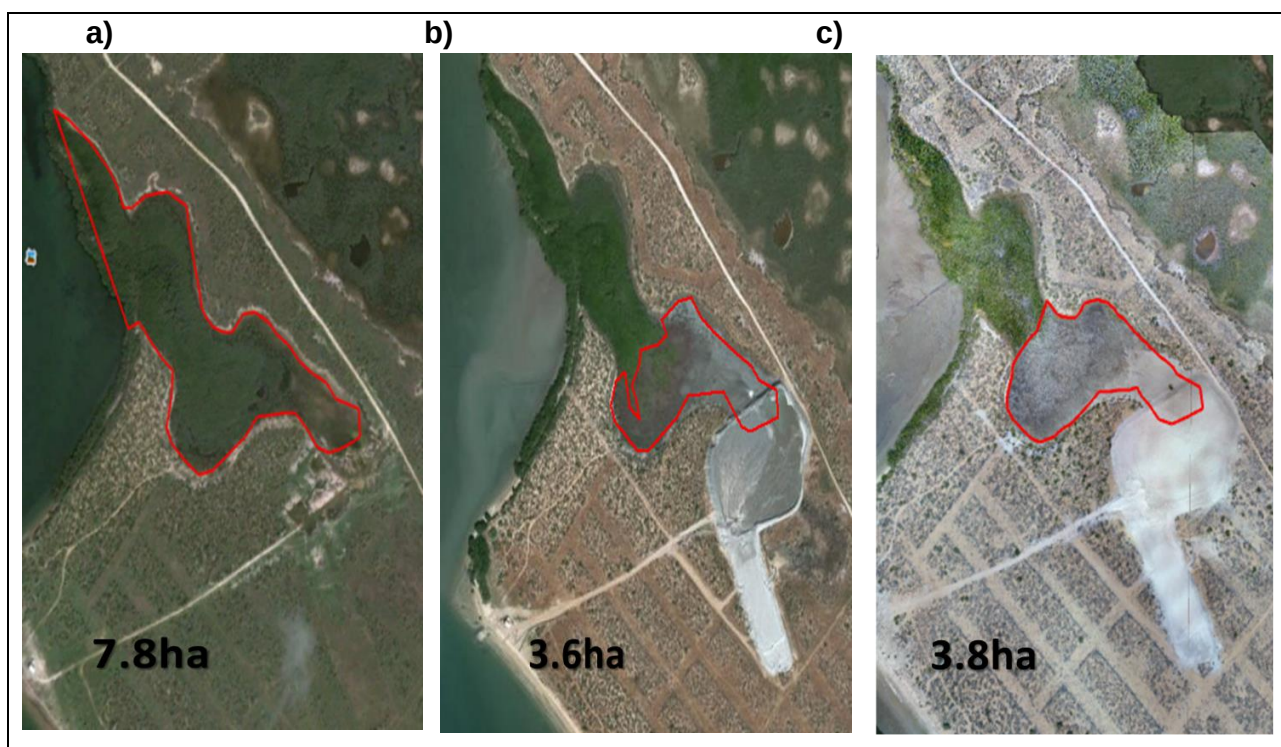


Fig.  
26

Áreas circundantes al depósito de sedimentos dragados en el Estero San Carlos.





**Fig. 27** Área del humedal. a) Antes del depósito de sedimentos dragados en 2014; b) Área impactada en 2016, c) Área impactada en 2017.

De acuerdo a los cálculos realizados (ver metodología) en 2016 la dispersión de sedimentos provocó la pérdida de 3.6 ha con respecto al área total del humedal (pantano de manglar y planicie de mareas), mientras que en 2017 la afectación observada fue de 3.8 ha, lo que representa un aumento de 0.2 ha con respecto al año anterior (Fig.27).

## 9. Discusión

Conocer los volúmenes y áreas de los sedimentos dragados en una zona determinada, así como el destino del mismo se ha hecho primordial en diferentes zonas portuarias, por lo que las autoridades de diferentes países como España utilizan términos específicos del dragado e indican el volumen según las distintas alternativas de gestión ambiental para optimizar dicha actividad (Ministerio de Fomento Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino y Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007). La actividad de dragados adquiere un papel fundamental en el sector marítimo y portuario, así como en el turismo, con la regeneración de playas (Martínez, 2006). En este trabajo el área estimada del desecho de dragado es de  $45,177\text{m}^2$ , con un volumen aproximado de  $196,877\text{ m}^3$ , lo que equivale a rellenar 20000 camiones de  $10\text{ m}^3$  cada uno y cubrir una extensión de 9 campos de fútbol ( $45\text{m} \times 90\text{m}$ ). A pesar de que se desconocen las afectaciones reales en el ambiente por la depositación del desecho de dragado en estudio, se puede inferir que, la modificación del hábitat llevó a la pérdida parcial o total de la flora y la fauna existente en esa zona.

Debido al impacto que puede ocasionar al ambiente el sedimento dragado por su naturaleza, es extremadamente importante considerar varios factores y usar tecnologías apropiadas, antes y durante de la disposición de ese material, ya sea en el ambiente marino o terrestre. La información solicitada a las autoridades, no arrojó ninguna información sobre algún estudio o consideración que mostrara haber seguido un lineamiento para evitar la afectación al ambiente. En el caso del dragado en el estero de San Carlos los trabajos llevaron al menos 6 semanas y con una draga con tubería de bombeo sumergible.

### 9.1 Origen de los sedimentos dragados.

El estero San Carlos, ubicado en la parte continental de bahía Magdalena, está delimitado por campos de dunas paralelas que se encuentran sobre la planicie costera Purísima-Iray-Magdalena. De acuerdo con Murillo *et al.* (1999) las diferentes geoformas de los sistemas de dunas costeras en la región,

obedecen a cambios de nivel del mar, a la descarga de sedimentos de las cuencas hidrológicas aledañas y a la reactivación de sedimentos por acción eólica. De acuerdo a este contexto, se infiere que los sedimentos presentes en los canales del estero San Carlos, son abastecidos principalmente de sedimentos, producto de la erosión de dunas antiguas (material eólico de grano fino) y por sedimentos biogénicos, generados por la alta productividad en esta zona, y que debido a que se comercializa una gran cantidad de moluscos, sus conchas son desechadas en el mar y en la playa, en donde la acción del oleaje, las fragmenta y poco a poco son transportadas al lecho marino.

## 9.2 Características texturales de los sedimentos dragados.

Pulido en el 2016, encuentra que, en la bahía de Cienfuegos, Cuba el sedimento es de tamaño finos y eventualmente azolva áreas que requieren mayor profundidad. De acuerdo con Landeta (2010), la actividad de dragado provoca alteraciones en los ecosistemas, cambiando la estratificación natural de los sedimentos.

Clasificación textural: El depósito de dragado presentó tamaños de arena fina (2.2 a 2.5  $\Phi$ ), exceptuando las muestras M9 y M10 pertenecientes a las áreas circundantes al depósito, las cuales presentaron tamaños de limo-arcillas (7.9 a 8.9  $\Phi$ ). De acuerdo a Rodríguez-Meza *et al.* (2007) el tamaño de grano de los sedimentos de los canales del estero San Carlos, corresponden a tamaños de arena fina (2 - 3  $\Phi$ ) y en Bahía Magdalena los tamaños variaban entre -0.33 a 3.26  $\Phi$ , indicando que los sedimentos en el interior del complejo lagunar varían de arenas muy finas a arenas muy gruesas. Estos resultados son consistentes con lo planteado por Sánchez *et al.* (2010) en Bahía Magdalena, donde el análisis granulométrico demostró que la bahía es relativamente homogénea con un tamaño medio de grano entre 2,5 a 3,5  $\Phi$ .

Tendencia de tamaño de grano: Los valores de sesgo de los sedimentos dragados muestran una tendencia hacia los tamaños de granos finos, no siendo así en las muestras P1, P4, M8, M11 con una tendencia hacia los tamaños gruesos, cabe destacar que la muestra T7 (en la cima del depósito) tuvo un comportamiento simétrico con la presencia de sedimentos finos y



gruesos de conchas. Se infiere que la superficie del depósito dragado está siendo sujeto a procesos de remoción mediante transporte por tracción, saltación y suspensión (cuando la acción del viento golpea el suelo y produce turbulencias haciendo que las partículas se muevan provocando variaciones en el tamaño de grano superficial, humedad del suelo y la vegetación de una zona). La remoción diferencial por tamaño de sedimento, equivale a procesos de deflación (en donde grandes volúmenes de sedimento fino, que no se encuentra consolidado es removido quedando principalmente material grueso en la superficie), lo que incrementa, la presencia de conchas en la cima del depósito.

Grado de selección: Estudios previos como el de Sánchez *et al.* (2010) muestran que el grado de selección de los sedimentos en Bahía Magdalena, fluctúa de buena a muy buena selección (0 a 1), registrándose una disminución en la selección (pobrementemente seleccionados > 2) hacia zonas con tamaños de grano medio. De acuerdo a los valores de la desviación estándar de los sedimentos dragados del área de estudio, la selección va de moderada a pobrementemente seleccionada (0.5 a 1.8), lo cual se atribuye a que el canal dragado tiene aporte de sedimentos de los diferentes ambientes a su alrededor, por ejemplo, transportados por arroyos, dunas, viento y la acción antropogénica; por lo que el material sedimentario en los canales no presenta una buena selección. No obstante, la muestra E3, sedimento eólico redepositado abastecido por el desecho de dragado, ubicado al sotavento del depósito del dragado, presenta buena selección. La generación de este depósito eólico, puede estar relacionado a la acción de los vientos del Noroeste con respecto al área de depósito. En relación a la muestra T7 ubicada en la cima del depósito, presentó una selección de moderadamente seleccionada a pobrementemente seleccionada, lo cual se relaciona al proceso de deflación en la superficie del depósito. Las dunas antiguas presentaron una selección de moderadamente seleccionada a pobrementemente seleccionadas, por lo que estas clasificaciones en la zona de depósito y sus áreas circundantes puede estar dado a que estos sedimentos fueron dragados en un canal de navegación donde los sedimentos son provenientes diferentes ambientes a su alrededor como puede ser arroyos, dunas entre otras fuentes de alimentación.

### 9.3 Análisis de elementos traza y mayores.

La normalización del contenido de metales respecto a un elemento químico puede determinar si existe contaminación antropogénica local. La mayoría de los estudios utilizan elementos mayoritarios en la corteza terrestre como el Al, Sr o Fe como normalizadores. Sin embargo, en el presente estudio se eligió al Ga como normalizador, debido a que constituyó un elemento mayoritario en las muestras y presentó el mejor porcentaje de recuperación.

#### Fósforo (P). Elemento Mayor.

Este elemento fue clasificado con FEN “severo”, seguido del Azufre (S) y el Arsénico (As), presentando un FEN moderado; por lo que se comportan como los elementos más enriquecidos en el depósito y áreas circundantes.

El alto enriquecimiento del P puede deberse a la presencia de fosforita en la zona González-Soto (2017). La fosforita puede estar enriquecida, además, con otros elementos como Cd, Zn, Se, U y lantánidos, así como los antes mencionados (Clark 1984, Álvarez-Arellano 1995, Boggs 1995). Estos mismos elementos fueron determinados como los más enriquecidos, con valores de  $FEN > 10$  (Moderadamente enriquecidos) para el complejo lagunar Magdalena-Almejas por Shumilin et al. (2005). El principal aporte de fosforita se debe a dos factores fundamentales: a las rocas sedimentarias marinas como siliciclásticas, lutitas, silíceas y fosfáticas que afloran en la parte continental de la región contenidas en la Formación San Gregorio (Galli-Olivier 1993); y al transporte de este mineral desde los afloramientos de dicha Formación debido a la influencia de las lluvias estacionales y los eventos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes que ocurren principalmente en el verano con su aporte directo a los arroyos que desembocan en la zona (Rodríguez-Meza *et al.*, 2007).

#### Arsénico (As).

El arsénico fue el segundo elemento con valores de FEN de 3-10, por lo que se clasifica como un FEN “moderado”. Según Emsley (2001) y Gillispie *et al.*, (2015) el arsénico es un elemento de fácil dispersión, por lo que puede presentarse en el aire, el agua y el suelo a través de tormentas de polvo y

aguas de escorrentía, provocando cambios en el ambiente donde se deposite. Esto a su vez, genera un riesgo potencial para las áreas circundantes del depósito provocando contaminación. Shumilin *et al.* (2005) encontró un alto factor de enriquecimiento de As (FEN = 19) en muestras de sedimentos marinos de Bahía Magdalena. Otros elementos como Se, Sb y Cd también se encontraron enriquecidos en el complejo lagunar Magdalena- Almejas. En el presente estudio estos elementos se encontraron en el depósito dragado y en sus áreas circundantes, en cantidades muy bajas. Rodríguez–Meza *et al.* (2007) plantea que la presencia de estos elementos puede ser producto de la influencia natural de minerales como fosforita y magnetita y a las características hidrodinámicas del complejo lagunar.

#### Azufre (S)

El azufre presentó un FEN “moderado” en el área de estudio. En muchos casos el As se encuentra sustituyendo al S en la estructura química de algunos minerales, pues las mayores concentraciones de arsénico aparecen en los sulfuros, como arsenopirita, pirita, calcopirita, galena y marcasita. En estos minerales el contenido de As puede ser mayor que el 10% en peso del mineral (Baur & Onishi, 1969). Debido a la baja correlación que presentaron estos elementos en el área de estudio es de suponer que la presencia de azufre esté asociado a la presencia de la termoeléctrica, la cual es una fuente de Azufre importante cercana a la zona de estudio, sin dejar de mencionar los aportes antropogénicos ya sea por la quema de combustibles debido a la presencia de vehículos y el importante flujo de lanchas en el estero de San Carlos, influyendo ambas condiciones probablemente a la hora de llevar a cabo la acción de dragado en la zona.

La presencia de los sulfuros en bajas concentraciones no resulta nociva para los humedales, pero cuando se encuentra en grandes concentraciones si produce efectos tóxicos. Estos compuestos pueden ser tóxicos para especies de plantas y animales, así como para la productividad, y en ocasiones inhibir la absorción de nutrientes por los organismos autótrofos. No obstante, en bajas concentraciones estos tienden a ser reguladores de los ecosistemas, ya que su presencia afecta o limita el crecimiento vegetal y animal de las especies. Es por ello que el área de estudio podría encontrarse grandemente afectada por las

altas concentraciones de azufre, provocando efectos nocivos en sus ecosistemas.

Las correlaciones entre la mayoría de los elementos traza estudiados, resultaron significativas, por lo que podemos inferir que en el área de estudio los aluminosilicatos son los minerales predominantes (Anexo.1). Resultados similares fueron encontradas por Rodríguez–Meza *et al.* (2007) para el complejo lagunar Magdalena-Almejas, donde la concentración y distribución espacial de los elementos traza en los sedimentos probablemente son el resultado de la contribución advertida de agua de la plataforma continental (eventos de surgencias) y el aporte continental (oxihidróxidos de hierro, aluminosilicatos y fosforita).

#### 9.4 Posible efecto de la marea, viento y precipitaciones sobre el depósito de sedimentos dragados.

##### 9.4.1. Efecto de la Marea.

La amplitud de marea para ambos años fue mayor de Julio a Diciembre, esto es que el refluo resultó mayor que el flujo; provocando un mayor transporte de sedimentos finos hacia las áreas circundantes del depósito como el humedal y la planicie de marea, lo que implica un impacto evidente sobre estas áreas. En el resto de los meses el rango de marea fue menor, por lo que se infiere que el transporte de sedimentos fue menor. Morales *et al.* (2006) plantea que para la zona de San Carlos la velocidad media y máxima de las corrientes de marea fue mayor, comparados con otras dos zonas de estudio del sistema lagunar Bahía Magdalena – Almejas. Esto refuerza la idea de que el acarreo de sedimentos finos hacia las áreas circundantes al depósito es elevado en el sitio de estudio.

La porción más al norte del sedimento dragado fue depositada sobre el ambiente de planicie de marea en el estero, en donde a su vez existía un canal que alimentaba una zona de cultivo camaronero, esta condición ha hecho que el sedimento de dragado que relleno este canal, esté en contacto con el agua y que sus componentes ya sean partículas o soluciones intersticiales estén siendo removidas del depósito por interacción de la marea, ya que parte del depósito está bajo el nivel del mar. Se tiene un video en donde se colectó la muestra M10, el 7 de diciembre 2017 (segundo muestreo, Tabla 1), ubicada

como aproximadamente 150 m al noroeste del depósito, en donde se observa una capa del sedimento del depósito, el mangle está impactado y en donde también se observa como la marea está interactuando con esta capa. Por lo que se concluye que las partículas más finas del depósito, están migrando físicamente a través de las corrientes de marea en el área de estudio, impactando el humedal.

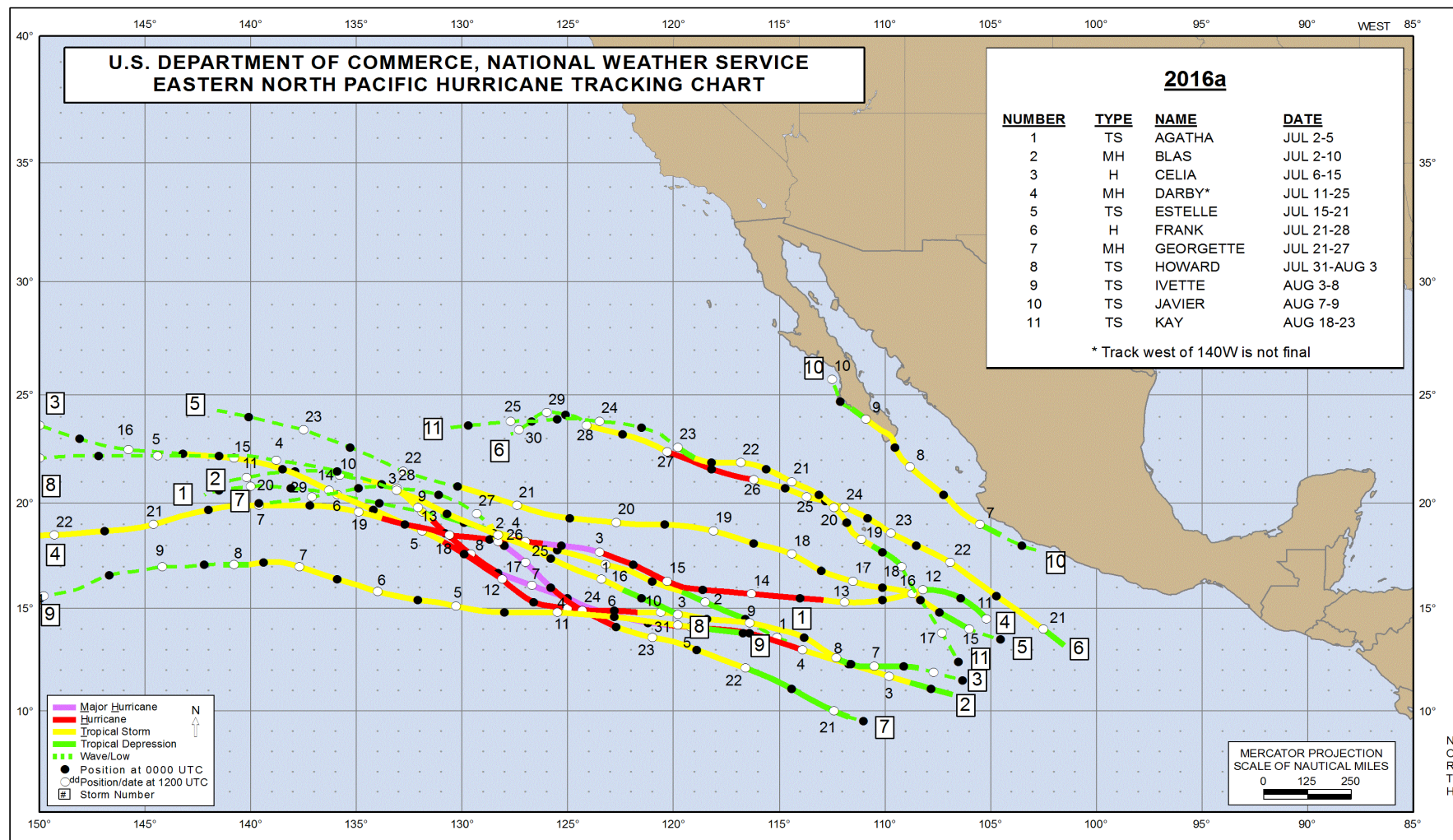
#### 9.4.2 Efecto del viento.

En el área de depósito se registraron vientos predominantes del noroeste y su influencia desde los sedimentos dragados hacia las áreas circundantes al depósito de sedimentos dragados ya sea, esteros cercanos, planicie de marea o dunas antiguas, donde a través de las imágenes obtenidas con el dron PHANTOM 4PRO se pudo observar la presencia del sedimento más fino en la zona sureste del estero de San Carlos. Además de la clasificación de pobremente y moderadamente selección en la zona de depósito y sus áreas circundantes debido a la presencia de este sedimento dragado en las dunas antiguas y esteros cercanos. Además, se puede evidenciar en los contenidos de los elementos que geoquímicamente se reportaron en el área de depósito y sus alrededores. Sánchez- Montante (2004) analizó el patrón de vientos para el área de estudio obteniendo que de julio a septiembre prevalecen los vientos del Sur mientras que el resto del año predominan los vientos del Noroeste con un 67% de incidencia en la zona, con intensidades de 5 m/s a 15 m/s.

#### 9.4.3 Efecto de la precipitación.

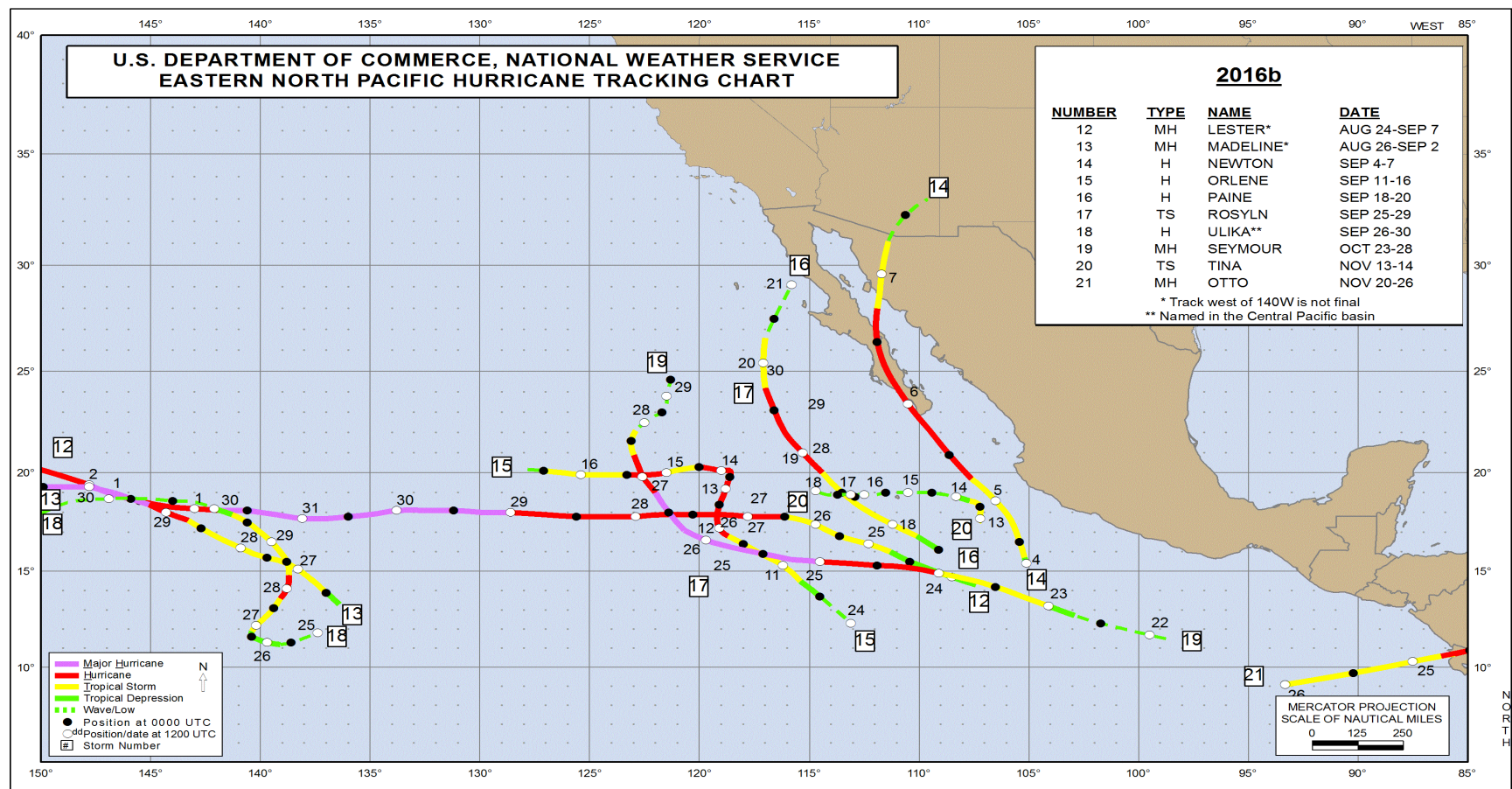
Las precipitaciones en el área de estudio no fueron abundantes para el 2016 por lo que esto se puede atribuir a las características geográficas que presenta la zona de un clima desértico del sur de la península. Rodríguez–Meza *et al.* (2007) reportan que el régimen de precipitaciones en el área de estudio presenta lluvias comúnmente torrenciales y asociadas con chubascos y los ciclones tropicales que se mueven en las costas del Océano Pacífico mexicano y que impactan en B.C.S. en los meses de agosto y septiembre; aunque en el área de estudio la precipitación pluvial es escasa alcanzando pocos centímetros.

Cabe destacar que en la zona Sureste de estero de San Carlos donde se encuentra ubicado el depósito de sedimentos dragados para el año 2016 se encontró influenciada por el huracán Newton cercano al área de estudio y la tormenta tropical Javier (Fig. 28 y 29). Para el año 2017 la presencia de la tormenta tropical Lidia en la zona que probablemente trajo consigo grandes cantidades de precipitaciones en el área de estudio (Fig. 30). El comportamiento de la precipitación en la zona, debe tenerse en cuenta debido a que en años pasados ha habido lluvias importantes y si en el futuro se presentarán lluvias de esta magnitud, entonces la remoción de sedimentos y su transporte hacia las zonas bajas sería mucho más importante provocando el transporte de sedimentos dragados por erosión o escorrentía hacia a las áreas bajas circundantes al depósito.



**Fig. 28** Trayectoria de los huracanes y tormentas para la primera parte de la temporada de ciclones del año 2016 en la península de Baja California Sur tomado del Centro de Huracanes Nacional.





Fig

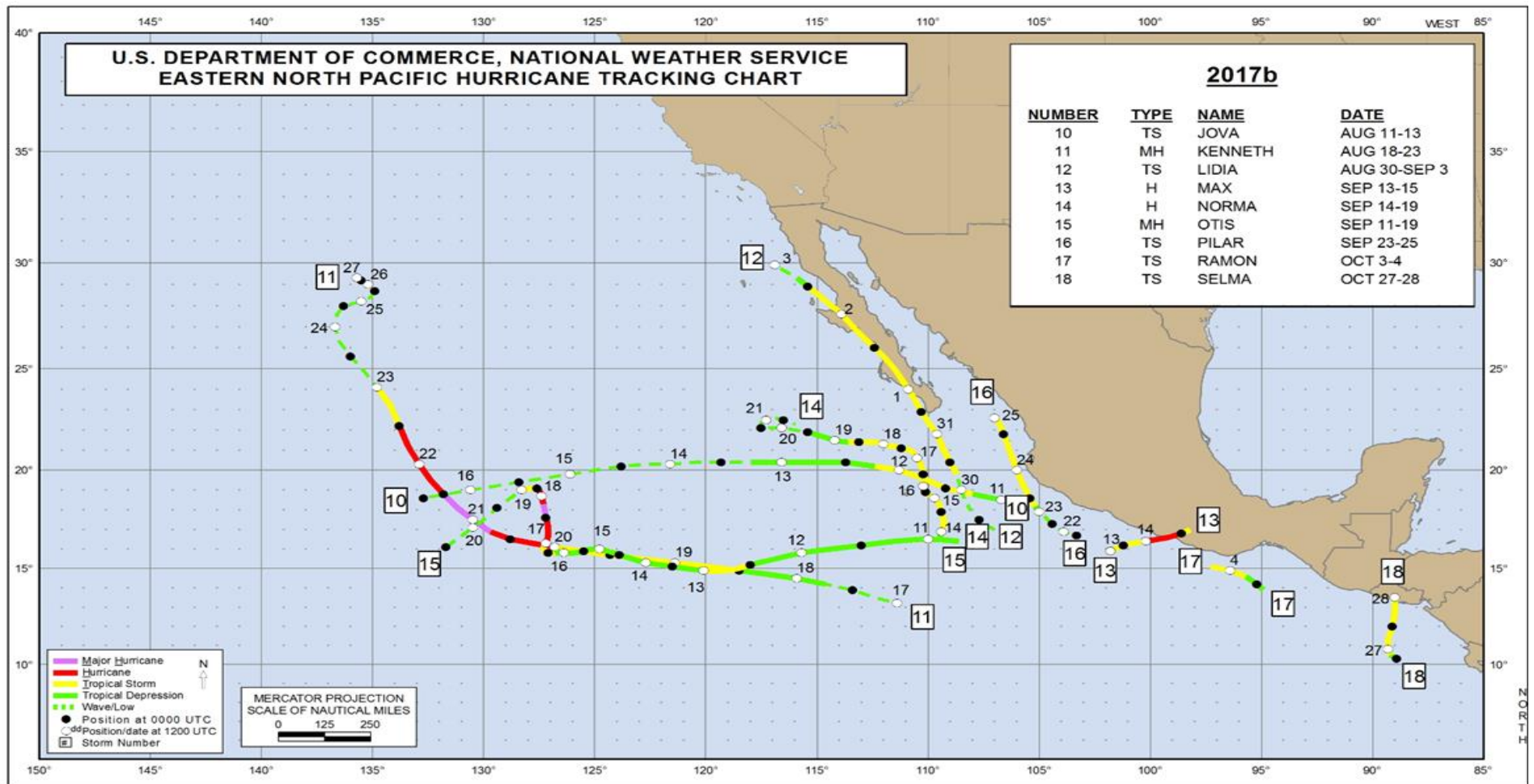
. 29

Tra

yec

toria de los huracanes y tormentas para la segunda parte de la temporada de ciclones del año 2016 en la península de Baja California Sur tomado del Centro de Huracanes Nacional.





**Fig. 30** Trayectoria de los huracanes y tormentas para la segunda parte de la temporada de ciclones del año 2017 en la península de Baja California Sur tomado del Centro de Huracanes Nacional.

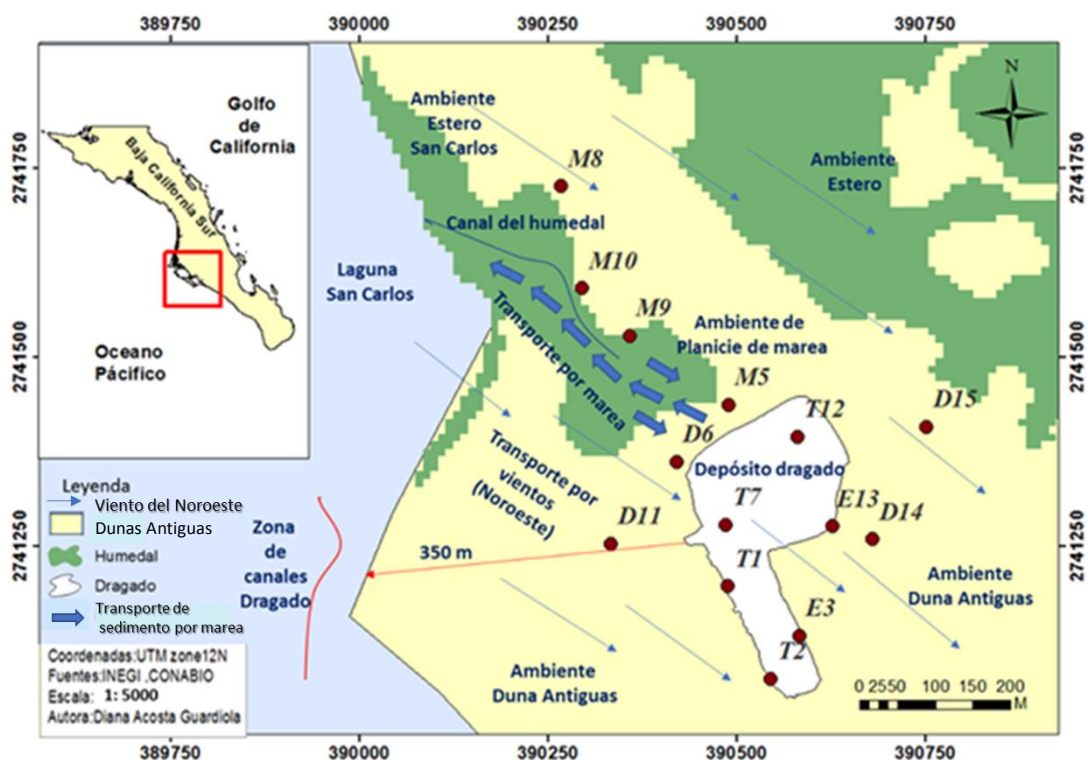
## 9.5 Dispersión de sedimentos dragados y su impacto sobre las áreas circundantes.

Para llevar a cabo una actividad de dragado es necesario un estudio preliminar del área donde se pretende dragar, el tipo de equipo a utilizar, el tiempo, la época del año, entre otras y de esta manera mitigar los posibles impactos a las áreas circundantes que esta actividad antropogénica pueda causar. Un caso muy evidente es nuestra área de estudio que se encuentra ubicada en la zona Sureste de estero de San Carlos, la cual estuvo expuesta a cambios o modificaciones debido a esta actividad y no quedó exenta a esta disposición final de los sedimentos dragados produciendo estos un impacto sobre la misma.

Al llevar a cabo el dragado del canal de acceso al estero San Carlos estos sedimentos fueron depositados sobre dunas antiguas, manglar y planicie de marea donde el impacto es evidente. Al analizar los parámetros que son indispensables antes de que se produzca la actividad de dragado se obtuvo que después del año 2015 hubo un cambio evidente en la zona Sureste del estero de San Carlos. Esto trajo consigo consecuencias negativas para las áreas circundantes al depósito (dunas antiguas, manglar, esteros próximos y planicie de marea). Una de las áreas evidentemente impactadas es la planicie de marea y el manglar cercano. Para este último se observó una afectación acumulada en el periodo de 2016 y 2017 respecto al área total del humedal (7.8 ha) de 3.8 ha, lo que representa un aumento de 0.2 ha respecto a la afectación observada hasta el 2016 (3.6 ha, Fig. 20).

Es importante destacar que en el área de depósito predominan los vientos del noroeste por lo que se hace necesario resaltar que con el paso de los huracanes la dispersión de los sedimentos puede estar dada en todas direcciones, debido a que estos soplan en distintas direcciones. Además, la presencia de la marea en la zona es un factor importante ya que el refluo en la zona es mayor que el flujo lo cual puede provocar el transporte de sedimentos hacia la zona de manglar y parte de la planicie de marea. Sin dejar de mencionar la importancia que tiene en la zona las precipitaciones, que, aunque sean escasas, estas juegan un papel fundamental en temporadas ciclónicas, pues el manglar es la parte baja del depósito de sedimentos

dragados, por lo que fuertes precipitaciones transportan los sedimentos hasta el mismo provocando su azolvamiento (Fig. 31).



**Fig. 31** Mapa conceptual donde se observa las principales vías de transporte de los sedimentos dragados indicado por las flechas delgadas indican el viento y las gruesas muestran el transporte de sedimento por marea en el canal del esterito.

A nivel mundial los ecosistemas de manglar están valorados en 1 648 billones de dólares (Aburto-Oropeza *et al.* 2008), para el caso de México debido a la aportación de servicios ambientales que prestan estos ecosistemas se ha estimado un valor económico del orden de los 37.500 US por hectárea (Aburto-Oropeza *et al.* 2008), contrastando este valor con lo estimado por la CONAFOR-SEMARNAT (abril de 2006) de \$11,295.08 pesos o aproximadamente 825 US dólares por hectárea (tipo de cambio 1US dólar = 13.70 pesos mexicanos para julio de 2009), sirviendo como valor de referencia para efectos de compensación y multas establecidas por la autoridad ambiental por cambios de uso de suelo o de pago de delitos ambientales relacionado con actividades no aptas sobre el mangle, por lo que conservarlos y preservarlos en buen estado es de vital importancia.

Se registró la presencia de elementos traza y mayores con un Factor de Enriquecimiento Normalizado (FEN) moderado como el Arsénico (As) y Azufre (S) y severo como el Fosforo (P) en el depósito de sedimentos dragados y sus áreas circundantes. Los elementos traza en concentraciones elevadas son considerados potencialmente tóxicos, sin embargo, en las zonas posiblemente impactadas no sobrepasaron los valores establecidos para suelos de la Norma Oficial Mexicana NOM- 147 -SEMARNAT /SSAI – 2004. Cabe resaltar la importancia del Azufre y los sulfuros en sitios de manglar, pues su evaluación se considera una variable básica en trabajos de rehabilitación de manglares para su identificación y control de su origen, ya sea por fuentes antropogénicas o naturales, además de que brinda información trascendental sobre la salud del sistema y los datos que proporciona sobre la recuperación del mismo. (Rodríguez- Zuñiga *et al*, 2018).

Las Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA's) son un requisito obligatorio en aquellos sitios donde potencialmente se vayan a realizar actividades de dragado y otro tipo de modificaciones al entorno natural. Esto es de vital importancia, puesto que conocer las características tanto físicas como económicas permite realizar una mejor evaluación del sitio y mitigar los impactos que esta actividad pueda ocasionar, así como realizar un manejo sustentable en la disposición final de los sedimentos producto del dragado. En nuestra área de estudio no existió una Manifestación de impacto ambiental (MIA) que sirviera de base para la realización del dragado, trayendo como consecuencias un impacto negativo en las áreas circundantes donde se realizó el depósito, el cual continuará avanzado en los próximos años. Este estudio podría constituir la base sobre la cual se definan posibles áreas de protección ecológica y particularmente para el uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en la laguna San Carlos.

## **10. Conclusiones**

1. El depósito de dragado ocasionó la afectación directa de dunas antiguas y parte de la planicie de marea del estero San Carlos, al quedar enterradas bajo este depósito, calculando un área impactada de aproximadamente 45,177.4 m<sup>2</sup>.
2. El área circundante más próxima al depósito de dragado, fue impactada debido a que el tamaño de sedimento en el depósito de dragado es principalmente arenas finas la cual es fácilmente transportada en el ambiente por el agua, por el aire y por la marea.
3. De acuerdo a las concentraciones de EPT presentes en el depósito de dragado (As, Ni, Pb y V), se encuentran bajo LMP (NOM147) sin embargo quedaron sujetos a procesos de erosión e intemperismo poniendo en riesgo las áreas circundantes.
4. De acuerdo a la composición textural y geoquímica del depósito de dragado, y a los factores que están influyendo en su dispersión en el ambiente (Viento, marea, lluvia), este depósito está principalmente impactando al estero San Carlos, con la pérdida del humedal.
5. Debido a que no se contemplaron medidas de protección, preservación y conservación del ambiente en la zona en que fue depositado el sedimento dragado, este ocasionó un gran impacto, el cual se infiere continuará afectando a largo plazo.

## **11. Recomendaciones**

1. Antes de realizar una actividad de dragado se recomienda realizar un estudio detallado de la zona para determinar la disposición final de los sedimentos dragados.
2. La autoridad debe tener en cuenta este tipo de actividad antropogénica y darle seguimiento para de esta manera aplicar la legislación en caso de que no se cumplan las normativas requeridas en el área donde se pretende dragar.
3. Se recomienda estabilizar el depósito dragado para reducir la migración del sedimento a los esteros aledaños en riesgo (Esteros: San Carlos, El Puente).
4. Debido a las características de toxicidad que representan los sedimentos dragados, existe una legislación para su disposición final, la cual debe ser respetada, de lo contrario se seguirá impactando de forma irreversible el ambiente.

## 12. Referencias

- Aburto Oropeza O., Ezcurra E., Danemann G., Váldez V., Murray J. & Sala E. (2008). Mangroves in the Gulf of California increase fishery yields. *Nat. Acad. Sci.* 105: 10456-10459.
- Álvarez-Arellano A. (1995). Estudio geoquímico y de procedencia de arenas fosfáticas. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- Álvarez-Borrego S., Galindo-Bect L. & Chee-Barragan A. (1975). Características hidroquímicas de Bahía Magdalena, B. C. S. *Ciencias Marinas*. 2(2): 94-110 baja california sur, México: análisis de fourier para forma de grano. *Ciencias Marinas*, Vol. 20, No. 2.
- Baur W., Onishi, B., (1969). Arsenic. In: Wedepohl, K.H. (Ed.), *Handbook of Geochemistry*. Springer Verlag, Berlin, pp. A1–A33.
- Boggs S. (1995) *Principles of sedimentology and stratigraphy*, Prentice Hall, New Jersey.
- Brasil (2008). Armonización del protocolo de evaluación de calidad de sedimentos y materiales dragados en zonas de estuarios y portuarias del Atlántico. Cádiz, España.
- Cervantes-Duarte, R. (2014). Análisis del agua litoral en San Carlos, Baja California Sur, México. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur, México.
- Clark R. (1984). Mineralogy of the rare earth elements. En: Henderson P (ed) *Rare earth element geochemistry. Development in geochemistry 2*, Elsevier, Amsterdam, p 33-61.
- Crowe S., Bergquist D., Sanger D., & Van Dolah R. (2016). Physical & biological alterations following dredging in two beach nourishment borrow areas in South Carolina's coastal zone. *Journal of Coastal Research*, 32(4), 875–889. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Emsley, J. (2001). *Nature's building blocks: An A-Z guide to the elements*. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Felix-Pico E., Serviere–Zaragoza E., Riosmena-Rodríguez & León de la Luz J., (2011). *Los Manglares de la península de Baja California*. Primera Edición. ISBN 978- 607-7634-06-5.

- Galli-Olivier C. (1993). Fosforita de San Juan de la Costa (Bahía de La Paz), Baja California Sur, México: 17 años de investigaciones. *Rev. Inv. Cient.* 4:115-135.
- Gillispie E. C., Sowers T. D., Duckworth O. W., & Polizzotto M. L. (2015). Soil pollution due to irrigation with arsenic-contaminated groundwater: Current state of science. *Curr. Pollut. Rep.* 1: 1-12.
- González-Soto E. (2017). Geoquímica de los elementos mayores y traza en sedimentos de la cuenca hidrográfica Las Bramonas, Baja California Sur México. Tesis de diploma para obtener el grado de maestría. La Paz, BCS, México.
- Kaldy J., Dunton K., Kowalski J., Lee K. (2004). Factors controlling seagrass revegetation onto dredged material deposits: a case study in Lower Laguna Madre, Texas. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 292–300. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Kalloul S, Hamid W., Maanan M., Robin M., Sayouty E., & Zourarah B. (2012). Source contributions to heavy metal fluxes into the Loukous estuary (Moroccan Atlantic Coast). *Journal of Coastal Research*, 28(1), 174–183. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Krumbein, W.C. & Pettijohn, F.J. (1938) *Manual of Sedimentary Petrography*. D. Appleton-Century, New York, 549 p.
- Landeta (2010). Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga del material dragado. Instituto Nacional de Canalizaciones. Caracas, Venezuela.
- López-Fuerte F. & Siqueiros-Beltrones, D. (2006). Distribución y estructura de comunidades de diatomeas en sedimentos de un sistema de manglar. *Hidrobiológica*, 16(1), 23-33.
- Marmolejo-Rodríguez A., Sánchez -Martínez M., Romero- Guadarrama J., Sánchez -González A. & Magallanes-Ordoñez V. (2011). Migration of As, Hg, Pb, and Zn in arroyo sediments from a semiarid coastal system influenced by the abandoned gold mining district at El Triunfo, Baja California Sur, México, *Journal of environmental Monitoring*, 13 (8) 2182 a 2189.
- Morales-Zárate M., Aretxabaleta A., Werner F. & Lluch-Cota S. (2006) Modelación de la circulación invernal y la retención de partículas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur, México). *Ciencias Marinas* 32:631–647.



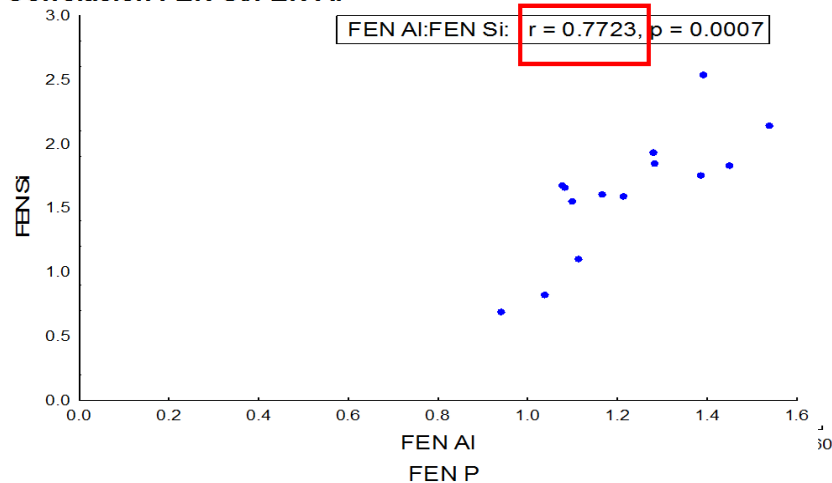
- Mukhopadhyay R., Rosen B., Phung L., & Silver S. (2002). Microbial arsenic: from geocycles to genes and enzymes. *FEMS Microbiol. Rev.* 26: 311-325.
- Murillo-Jiménez, J. Gorsline D.S., Goodfriend G.A., Vlasov V.K. & Cruz-Orozco R. (1999) Evidence of Holocene climatic changes from Aeolian deposits in Baja California Sur, México. *Quaternary International* 56 (1999) 141—154.
- Murillo-Jimenez, J. & Gorsline, D. (2000). Holocene and modern dune morphology for the Magdalena Coastal Plain and Islands, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 16, 915–925.
- Nairn, R., Johnson, J.A., Hardin, D. & Michel, J. (2004). A biological and physical monitoring program to evaluate long-term impacts from sand dredging operations in the United States Outer Continental Shelf. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 126–137. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- ONG e instituciones que trabajan en la reserva Natural de Iberá (2010). “En Defensa de la Integridad de la Reserva del Iberá”. *Boletín de los Esteros Edición Especial*. No.6
- Paganelli D., Nonnis O., Finoia M.G. & Gabellini M. (2013). The role of sediment characterization in environmental studies to assess the effect of relict sand dredging for beach nourishment: the example of offshore sand deposits in Lazio (Tyrrhenian Sea) In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O’Hare, T.J. (eds.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1015- 1020, ISSN 0749-0208.
- Parson, L.E. & Swafford, R. (2012). Beneficial use of sediments from dredging activities in the Gulf of Mexico. In: Khalil, S.M., Parson, L.E., and Waters, J.P. (eds.), *Technical Framework for the Gulf Regional Sediment Management Master Plan (GRSMMP)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 60, 45–50.
- Pulido-Caraballe A., Diaz-Asencio, M.; Diaz-Asencio, L. & Alonso-Hernández, C. (2016). Evaluación de la contaminación en sedimentos objeto de dragado en el recinto portuario de la bahía de Cienfuegos, Cuba., vol.43, n.2, pp.12-23.
- Raisz E. (1964). *Landforms of Mexico*. Prepared for the Geographic Branch of the Naval Research, scale Map 1: 4,000,000.

- Rodríguez-Meza D. (2004). Caracterización geoquímica por componentes mayores y elementos traza de sedimentos de los ambientes marinos costeros adyacentes. (Tesis de maestría)
- Rodríguez-Zúñiga M. T., E. Villeda-Chávez, A. D. Vázquez-Lule, Bejarano M., Cruz-López M. I., Olguín M., Villela- Gaytán S. A. & Flores R. (2018). Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescalar. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. 272 pp.
- Rodríguez-Meza D., Choumiline E., Méndez-Rodríguez L., Acosta-Vargas B. & Sapozhnikov D. (2007) Composición química de los sedimentos y macroalgas del complejo lagunar Magdalena-Almejas. En: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds) Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. CICIMAR-IPN, La Paz, Baja California Sur, México, p 61-81.
- Romero-Guadarrama J. A. (2011). Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del distrito minero el triunfo, B.C.S., México. (Tesis de maestría)
- Rosales-Villa, A. R. (2004). Dinámica de nutrimentos en Bahía Magdalena, BCS, México. (Tesis de maestría)
- Sánchez-Montante O. (2004) Hidrodinámica y transporte de masa en el sistema lagunar de Bahía Magdalena-Bahía Almejas, Baja California Sur, México: Modelación y experimentación. La Paz, BCS, México. (Tesis Doctoral)
- Shumilin E., Rodríguez-Meza G.D., Sapozhnikov D., Lutsarev S. & Murrillo-Jiménez J. (2005) Arsenic concentrations in the surface sediments of the Magdalena-Almejas Lagoon complex, Baja California Peninsula, Mexico. Bull Environ Contam Toxicol 74:493-50.
- Tovilla-Hernández C. (2011). Gestión de cuencas costera en Chiapas e impacto sobre los humedales de la Reserva de Biosfera la Encrucijada. Colegio de la frontera del Sur. Chiapas, México.
- Wedepohl, K.H. (1995). The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59, 1217-1232.
- Zaitsev O., Sánchez-Montante O. & Saldivar-Reyes M. (2007). Condiciones hidrofísicas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas. En: Funes-Rodríguez R, Gómez Gutiérrez J, Palomares-García R (eds) Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. CICIMAR-IPN, La Paz, B. C. S., México.

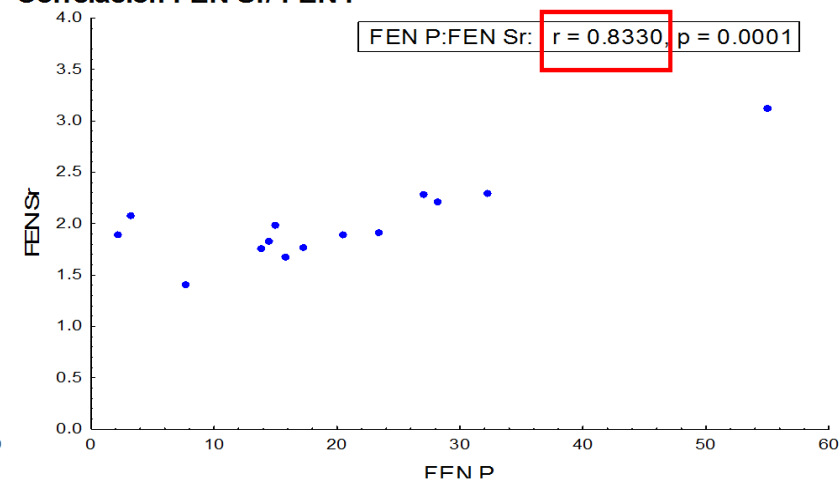
# 13. Anexos

## Anexo 1. Correlaciones.

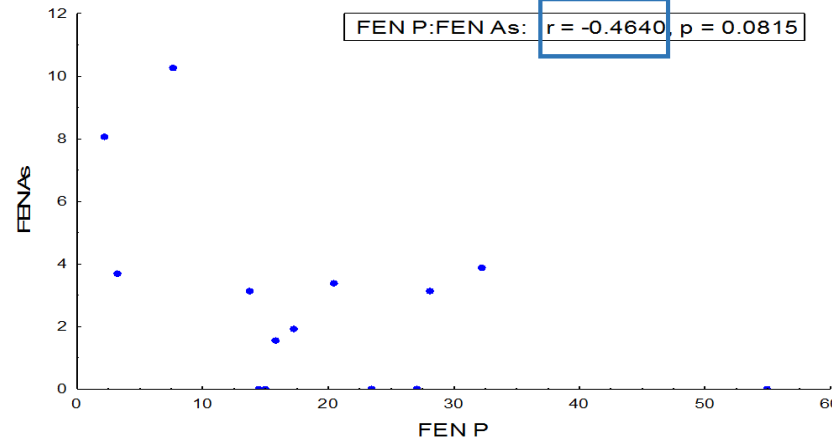
Correlación FEN Si/FEN AI



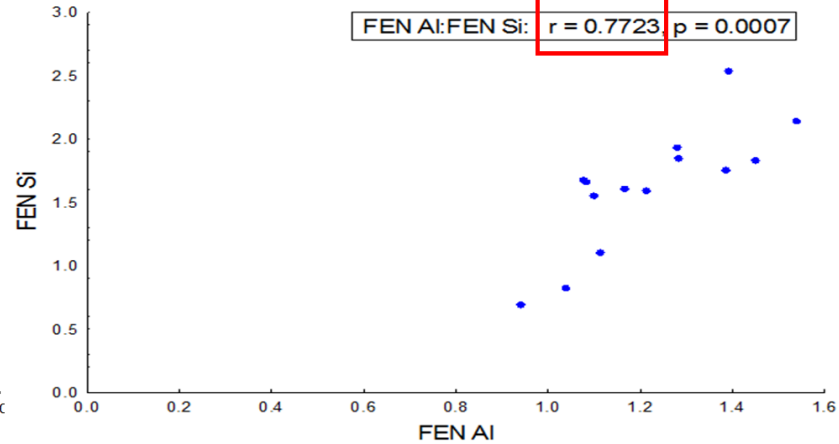
Correlación FEN Sr/ FEN P



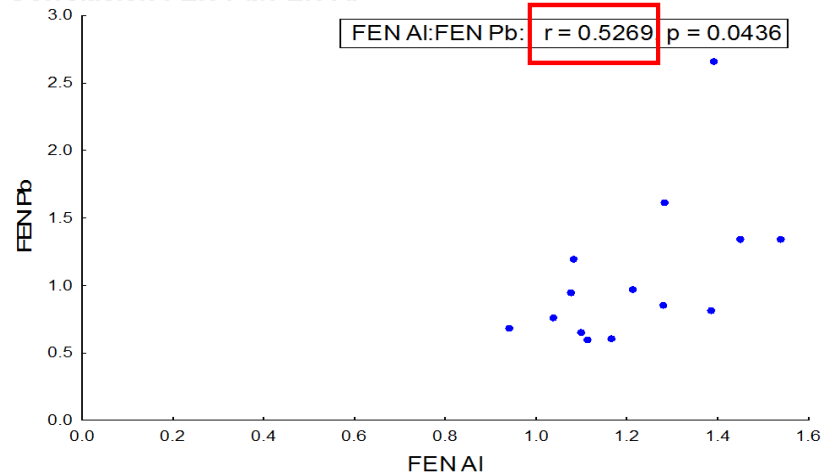
Correlación FEN As/FEN P



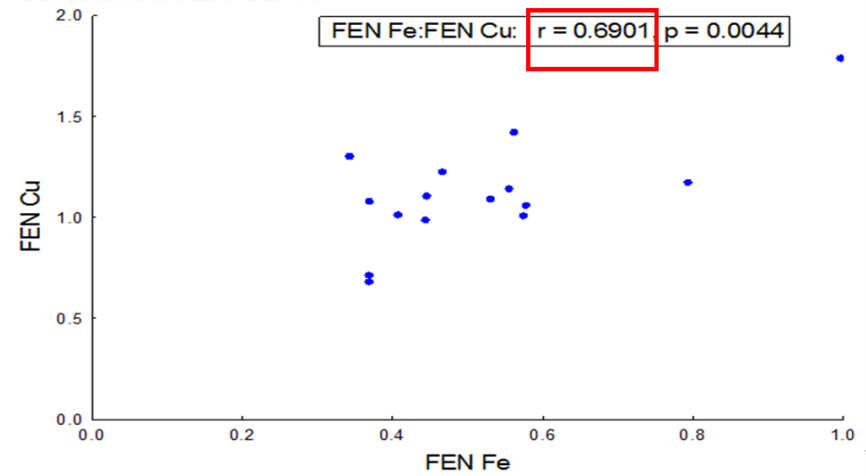
Correlación FEN Si/FEN AI



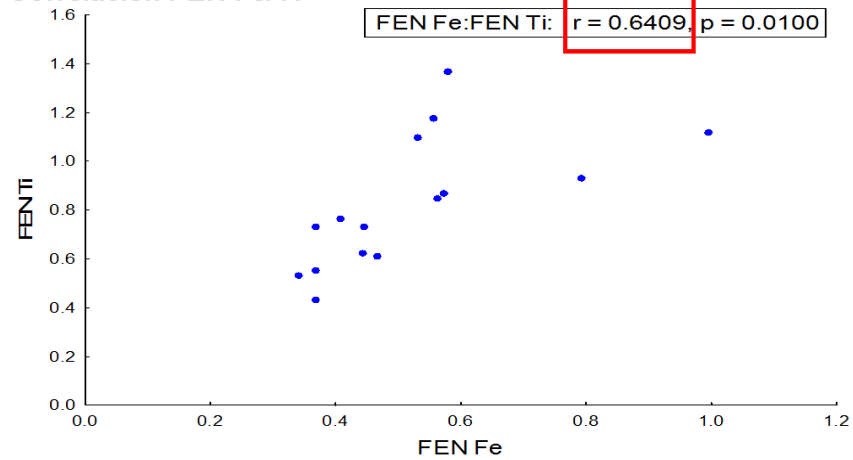
**Correlación FEN Pb/FEN Al**



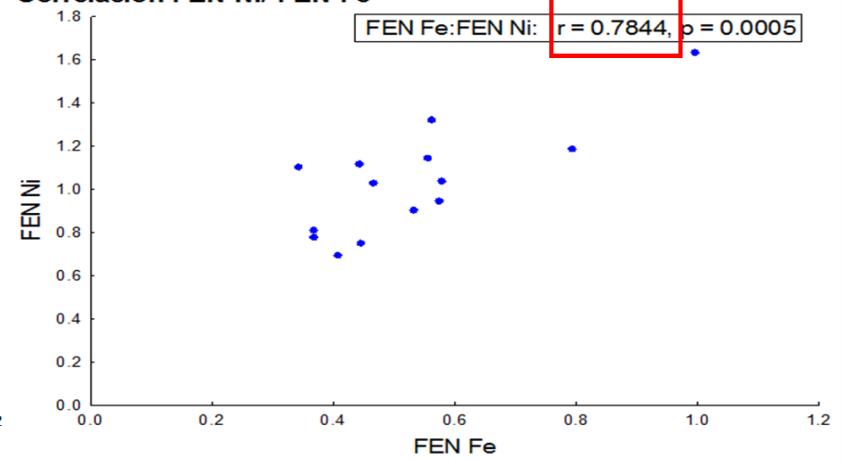
**Correlación FEN Cu/ Fe**



**Correlación FEN Fe/Ti**



**Correlación FEN Ni/ FEN Fe**





**Anexo 2.** Imágenes de evidencia de las áreas impactadas por el depósito de sedimento dragado.



**Anexo 3.** Concentraciones de metales con respecto a la NOM-147 en la zona de depósito sus áreas circundantes.

