

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**METALES TRAZA EN SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES DEL
ALTO GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA

BRIANDA JANNYN VALENZUELA SUÁREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. MAYO DEL 2019

RESUMEN.

El Alto Golfo de California se localiza en el extremo norte del Golfo de California y en ella desemboca el Río Colorado. En esta zona se encuentra la denominada “Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado”, área que es reconocida como un sitio de importancia ambiental debido a su abundancia de vida silvestre. Entre las especies que destacan se encuentran *Phocoena sinus* y *Totoaba macdonaldi*, las cuales son endémicas de la zona y están catalogadas en peligro de extinción. Algunos de los factores que pueden alterar el medio marino es la presencia de metales traza, tanto en columna de agua o en sedimentos marinos. Típicamente las concentraciones naturales de metales están relacionadas con la actividad volcánica, meteorización de rocas y los procesos de erosión de los suelos. El enriquecimiento de estos en un área determinada puede atribuirse a actividades antropogénicas como la minería, escurrimiento de los suelos naturales, fertilizantes y precipitaciones atmosféricas, entre otras fuentes. A pesar de que la zona del Alto Golfo es de gran interés, son escasos los estudios sobre la concentración y distribución de metales traza en el área. Es por esto por lo que el objetivo principal de este estudio es determinar la distribución de las concentraciones de metales traza (Cu, Cr, Hg, Pb, Cd, Mn, Ni y Zn) y obtener su línea base con la finalidad de identificar aquellas estaciones con enriquecimiento de metales en sedimentos superficiales de la zona. En octubre del 2017 se colectaron 22 muestras de sedimentos superficiales en el Alto Golfo, a los cuales se analizaron parámetros granulométricos y la

concentración de metales traza. El análisis de metales traza se realizó mediante Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma por Microondas (MP-AES), Espectrometría de Absorción Atómica y mediante el Analizador de Mercurio Directo (DMA). Para la evaluación de los sitios enriquecidos por metales traza se utilizó el Fe_2O_3 como normalizador. El rango de concentración obtenida para cada uno de los metales fue de 3.60 a 15.34 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Cu, 7.55 a 44.65 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Cr, 0.005 a 0.024 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Hg, 6.92 a 26.31 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Pb, 0.39 a 1.01 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Cd, 62.69 a 669.39 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Mn, 4.53 a 23.80 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Ni y 81.49 a 444.07 $\mu\text{g/g}$ d.w. en Zn. De los 22 sitios analizados solo 4 estaciones presentaron un enriquecimiento por al menos un metal. Se observó enriquecimiento por Cobre en un sitio cercano a la desembocadura del Río Colorado con una concentración de 15.34 $\mu\text{g/g}$, el Plomo lo presentó en la estación cercana al Puerto de San Felipe con una concentración de 26.31 $\mu\text{g/g}$, en el caso del Zinc se presentó en dos zonas, cerca de San Felipe con una concentración de 444.07 $\mu\text{g/g}$ y en el Golfo de Santa Clara cercana a la costa con una concentración de 281.91 $\mu\text{g/g}$, en esta última zona también se presentó el Cadmio con una concentración de 0.84 $\mu\text{g/g}$. En este trabajo, la tendencia general demuestra que no existe enriquecimiento por metales traza en el área, a excepción de 4 sitios localizados en zonas cercanas a la costa.

Palabras clave: metales traza, sedimentos marinos, Alto Golfo de California.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

METALES TRAZA EN SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES DEL
ALTO GOLFO DE CALIFORNIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA

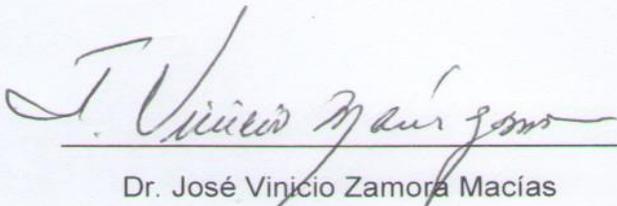
BRIANDA JANNYN VALENZUELA SUÁREZ

Aprobada por:



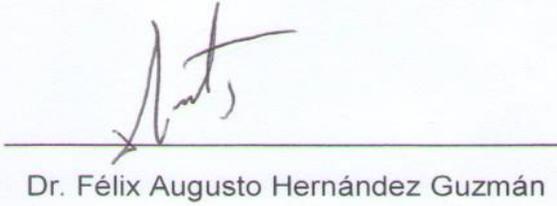
Dr. Nancy Ramírez Álvarez

Directora de tesis



Dr. José Vinicio Zamora Macías

Sinodal



Dr. Félix Augusto Hernández Guzmán

Secretario

DEDICATORIA.

A mis padres Brenda Suárez y Noé Valenzuela que han estado conmigo en todo momento. Gracias mamá y papá por todo su amor, apoyo, trabajo, sacrificio durante estos años y sobre todo por creer en mí, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado. Sin duda alguna es gracias a ustedes que he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy hoy en día. No existen palabras suficientes para expresarles lo agradecida que estoy con ustedes por siempre apoyarme en todo momento y darme ánimos para cumplir cada una de mis metas. Este trabajo es para ustedes, solamente les estoy regresando un poquito de lo mucho que me han dado. Los quiero con todo mi corazón mis chatones.

A mi hermano Aarón Valenzuela por ser mí compañero de aventuras y cómplice. Gracias hermano por siempre estar ahí para mí, por apoyarme en todo momento, por siempre darme ánimos para que no me diera por vencida cuando sentía que ya no podía y sobre todo por siempre aguantar mi mal genio. Te quiero con todo mi corazón mi flaco.

A mi abuelo Gustavo, que aunque hace varios años que ya no está físicamente conmigo, estoy segura que donde quiera que se encuentre esta feliz de verme cumplir con una de las cosas que le prometí que cumpliría aquella ultima vez que hablamos. Por siempre en mi corazón tata.

AGRADECIMIENTOS.

A mi directora de tesis la Dra. Nancy Ramírez Álvarez por confiar en mí y permitirme trabajar con ella durante estos últimos años, por sus consejos, su valiosa guía, asesoramiento y sobre todo por el gran apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Al Dr. José Vinicio Macias Zamora por los consejos y observaciones recibidas en la realización de este trabajo

Al Dr. Félix Augusto Hernández Guzmán por su apoyo, sus valiosas sugerencias en la realización de este trabajo, y por su gran apoyo en el trabajo de laboratorio.

Al Dr. Arturo Alvarez Aguilar por sus consejos, asesoramiento y por su gran apoyo en el trabajo de laboratorio.

A mis abuelos por todo el apoyo y cariño que me dan. Los quiero mucho.

A mi mejor amiga Cindy por ser la hermana que nunca tuve, mi compañera y cómplice de vida. Gracias amiga por siempre darme ánimos y estar conmigo en las buenas y en las malas. Te quiero mucho.

A mis amigos Caro Ferman, Laura, Paulina, Caro Félix, Diana, Ramiro, Caraveo y Daryl por cada platica y risa que compartimos, por su apoyo y sobre todo por su gran amistad durante toda la carrera. Sin duda alguna forman parte muy importante de vida.

CONTENIDO.

1	Introducción	1
2	Antecedentes	5
3	Hipótesis	7
4	Objetivos	8
	4.1 Objetivo General	8
	4.2 Objetivos Específicos	8
5	Área de Estudio	9
6	Materiales y Métodos	13
	6.1 Protocolo de Muestreo	13
	6.2 Trabajo de Laboratorio	14
	6.2.1 Limpieza de Material y Secado de Muestras	14
	6.2.2 Tamaño de Grano	14
	6.2.3 Carbono Orgánico	15
	6.2.4 Análisis y Cuantificación Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni y Zn	16
	6.2.5 Análisis y Cuantificación Hg	17
	6.2.6 Enriquecimiento por Metales Traza	17
7	Resultados	19
	7.1 Tamaño de Grano	19
	7.2 Carbono Orgánico	21
	7.3 Concentraciones de Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg	22

7.4	Normalización de Metales Traza	23
7.5	Enriquecimiento por Metales Traza	26
7.5.1	Enriquecimiento por Cobre (Cu)	26
7.5.2	Enriquecimiento por Cadmio (Cd)	28
7.5.3	Enriquecimiento por Zinc (Zn)	30
7.5.4	Enriquecimiento por Plomo (Pb)	32
8	Discusiones	33
9	Conclusiones	40
10	Literatura	41

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Estadística (promedio, mediana, máxima y mínima) de las fracciones (4, 16, 40 y 63 μ m) de tamaño de grano de los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.	19
Tabla 2. Estadística (promedio, desviación estándar, mínima y máxima) de las concentraciones de metales traza (Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg) encontradas en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California	23
Tabla 3. Número de estaciones evaluados mediante valores de referencia	39

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Fuentes potenciales de Metales Traza hacia el Alto Golfo de California	2
Figura 2. Mapa del área de estudio	11
Figura 3. Ubicación de las estaciones de muestreo de sedimentos en el Alto Golfo de California	13
Figura 4. Ejemplo del procedimiento realizado para determinar los sitios enriquecidos	18
Figura 5. Distribución de tamaño de grano de $\geq 63\mu\text{m}$ en el Alto Golfo de California	20
Figura 6. Distribución de carbono orgánico (%CO) en el Alto Golfo de California	21
Figura 7. Normalización de metales traza para la determinación de sitios enriquecidos	24
Figura 8. Normalización de metales traza para la determinación de sitios enriquecidos	25
Figura 9. Distribución de Cobre (Cu) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California	26
Figura 10. Distribución de Cadmio (Cd) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California	28

Figura 11. Distribución de Zinc (Zn) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California	30
Figura 12. Distribución de Plomo (Pb) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California.	32
Figura 13. Distribución de tamaño de grano de $\geq 63\mu\text{m}$ en el Alto Golfo de California	34
Figura 14. Patrón de circulación en el Alto Golfo de California propuesto por Carriquiry y Sánchez, 1999	35

1 INTRODUCCIÓN.

Muchos de los contaminantes que ingresan al medio marino, ya sea por una fuente natural o antropogénica, quedan retenidos en los sedimentos superficiales, algunos de los cuales tienen el potencial de ocasionar efectos tóxicos sobre los organismos expuestos.

En general los depósitos de los sedimentos marinos conservan un registro del tipo de contaminación que ha tenido lugar en las zonas próximas a su recorrido, estos pueden interactuar con las corrientes de agua y poner en circulación los contaminantes retenidos (Mariani y Pompêo, 2008).

Un ejemplo de este tipo de contaminantes son los metales traza, los cuales están generalmente presentes en bajas concentraciones y se pueden liberar por procesos naturales (erupciones volcánicas, transporte eólico, meteorización de rocas y minerales, etc.) o por actividades antropogénicas (minería, agricultura y actividades de la población), afectando al medio marino y teniendo efectos tóxicos en los organismos que habitan en el área (Figura 1).

Aunque los metales pueden ser esenciales (o no esenciales), aún aquellos esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y seres humanos, en altas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos. Por lo anterior, son considerados como uno de los contaminantes ambientales más peligrosos, y esto se debe a que no pueden ser eliminados del medio a través de procesos naturales. Entre los metales que destacan por su toxicidad y su mayor presencia

en el medio ambiente se encuentra el mercurio, el cadmio y el plomo (Orozco-Berrenetxea *et al.*, 2011).

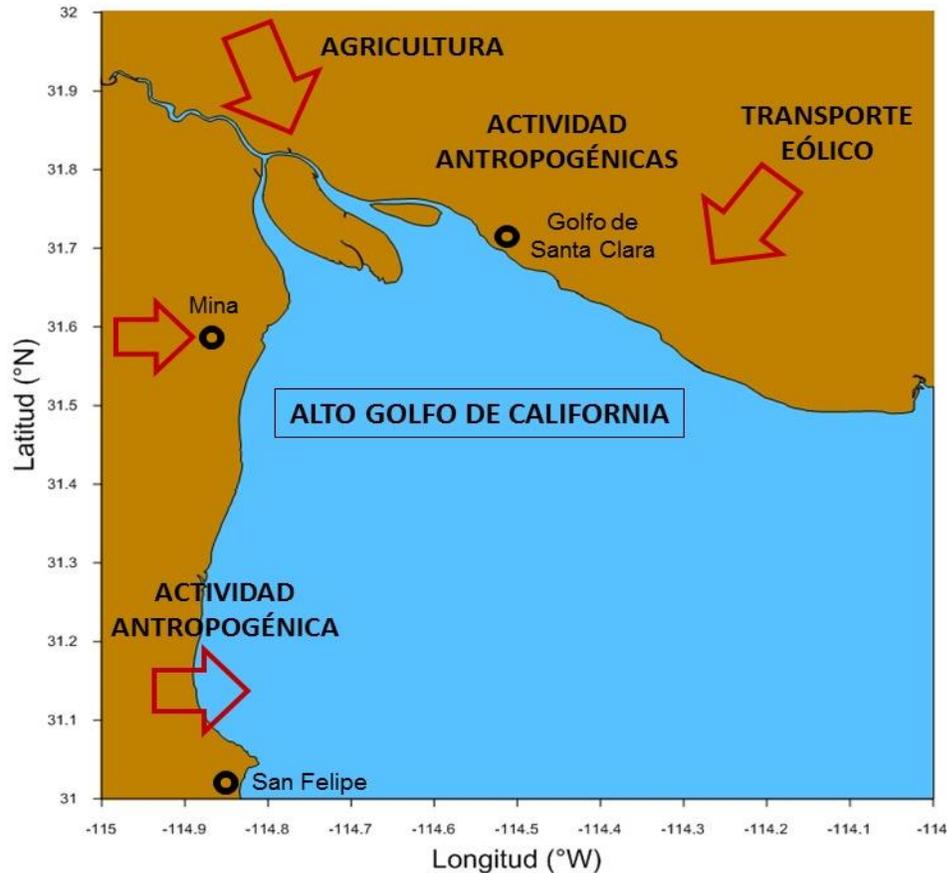


Figura 1. Fuentes potenciales de metales traza hacia el Alto Golfo de California.

Los metales traza se pueden clasificar en esenciales y no esenciales, los esenciales (zinc, cobre, magnesio y manganeso) aunque son benéficos, pueden llegar a ser tóxicos para el hombre o la biota cuando las concentraciones de estos se encuentran por arriba de las concentraciones naturales. Los no esenciales (mercurio, cadmio, plata, cromo y aluminio) son tóxicos a concentraciones mucho más pequeñas que los esenciales. Estos elementos esenciales y no esenciales

se encuentran distribuidos en la atmósfera, agua y sedimentos por mecanismos naturales (erosión, vulcanismo), y por mecanismos antropogénicos (desechos industriales, domésticos, así como por la utilización de combustibles fósiles) (Lantzy, y Mackenzie, 1979). El desarrollo industrial ha desarrollado, en un porcentaje bastante significativo, en las riberas de ríos, estuarios y bahías, descargando allí los efluentes de desechos que contienen grandes cantidades de sustancias nocivas (Martínez, *et al.*, 2002), dentro de estas sustancias se encuentran los ya mencionados metales traza, los cuales una vez depositados en el medio marino permanecen en este sin sufrir prácticamente ningún cambio.

Muchos de los contaminantes que ingresan a un cuerpo de agua superficial, por vía natural o antropogénica, quedan retenidos en los sedimentos que se depositan en el fondo (Herrera, *et al.*, 2013), es por esto que conocer la distribución de los metales traza en los sedimentos marinos es de gran importancia. La mayoría de los metales traza en el medio marino se encuentran en concentraciones en el orden de $\mu\text{g/L}$ o menores (Ponce-Vélez y Botello, 1992). Cuando hablamos del incremento de las concentraciones de metales traza, podemos decir que el aporte continental probablemente podría ser la principal ruta de entrada a la zona costera, en donde las fuentes antropogénicas provenientes de desechos domésticos, agrícolas e industriales han contribuido al incremento de las concentraciones de algunos metales traza, los cuales son peligrosos para la biota marina. Los metales traza presentan concentraciones relativamente elevadas en los sedimentos superficiales de las zonas costeras

alteradas por el hombre y generalmente guardan una relación de su concentración con el tamaño de las partículas y la cantidad de materia orgánica sedimentarias (Sadiq, 1992). La determinación de los metales traza en los sedimentos marinos superficiales resulta ser un buen indicador para conocer el origen de este tipo de contaminante y de los posibles impactos que puede presentar en la biota marina. La biodisponibilidad de metales traza en los sedimentos tiene una acción directa sobre algunas especies acuáticas, muchas de las cuales acumulan altas concentraciones con efectos crónicos en sus poblaciones (Acosta, *et al.*, 2002).

La eliminación de los metales traza en las aguas costeras y su acumulación en las cadenas alimenticias marinas ha creado la necesidad de monitorear la contaminación de metales traza en las áreas costeras (Brix, *et al.*, 1983). Es por esto por lo que el interés por realizar investigaciones respecto a los niveles de concentración de metales traza que se pueden encontrar en el ambiente, comenzó a ser de gran importancia a partir del descubrimiento de sus efectos en la salud humana. En el ser humano han sido documentados efectos neurotóxicos (Hg y Pb), osteomalacia (Cd), osteodistrofia (Al), renales (Cd), cancerígenos (Ni, Cr y Cd), inmunológicos (Hg, Ni y Cr), así como de degeneración hepatolenticular (Cu) (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1990).

2 ANTECEDENTES.

Para los pescadores de las zonas aledañas al Alto Golfo de California existe una gran preocupación por la disminución de los recursos pesqueros y el deterioro ambiental que ocurre en la zona, por lo que ellos atribuyen este tipo de problemáticas a la presencia de altas concentraciones de metales traza que tiene el Alto Golfo de California. Desde los años 40's, la agricultura se ha desarrollado como la principal actividad desarrollada alrededor del Delta del Río Colorado. En esta área se encuentra un drenaje agrícola que se extiende hasta el cauce del Delta del Alto Golfo, en torno al cual se ha formado un corredor ripario. En este ambiente, se localiza el Río Hardy, donde este último es el principal dren colector de los valles de Mexicali y San Luis Río Colorado. Adicionalmente, este sistema, recibe vertidos de aguas de usos antropogénicos (Cadena-Cárdenas, 2010). Aunque el Golfo de California (GC) es de gran importancia ecológica y económica, no existe un gran conocimiento sobre las concentraciones y distribuciones de los metales traza en esta área.

La mayoría de los estudios realizados en el GC sólo reportan concentraciones de metales traza en aguas superficiales como lo es el caso de los estudios realizados por Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2000), Díaz-Rodríguez *et al.* (2008) y Domínguez-Rosas *et al.* (2008), que demuestran que el agua superficial del GC está enriquecida por metales traza, entre ellos Cd, Ni y Mn. Sin embargo, de acuerdo al estudio realizado por Segovia-Zavala *et al.* (2009) el enriquecimiento en el GC por los metales Cd, Ni y Mn no puede ser atribuido a fuentes

antropogénicas debido a que la población costera y el desarrollo industrial que rodea al GC son incipientes, por lo que este autor considera que el enriquecimiento observado está asociado principalmente a fuentes y procesos naturales.

Debido a la falta de conocimiento sobre los niveles de concentración y distribución superficial de los metales traza en el Alto Golfo de California, así como la posible influencia de fuentes de aporte agrícolas y mineras entre otras de origen antropogénico, en este trabajo se plantea determinar la línea base y la distribución superficial de los metales traza (plomo, cobre, níquel, manganeso, cadmio, cromo, zinc y mercurio) con el objetivo de identificar aquellos sitios en donde los sedimentos presenten enriquecimientos por estos metales traza, esto utilizando la normalización con el contenido de hierro procedimiento descrito por Schiff y Weisberg, (1999) o el tamaño de grano descrito por Kersten y Foppe, (2002). Sin embargo, el hecho de que los metales traza se pueden encontrar de manera natural en el medio marino, hace complicado el determinar si los sedimentos marinos presentan un enriquecimiento por procesos naturales o antropogénicos.

3 HIPÓTESIS.

Se espera que la distribución de los metales traza se encuentre principalmente influenciada por el régimen de mareas prevalente en la zona, siendo en las zonas de menor energía donde se acumulen sedimentos más finos (zona de mayor depositación) y en donde se encuentren las mayores concentraciones de metales traza. Sin embargo, es posible que el intenso transporte de partículas debido a la dinámica de corrientes de la zona favorezca una menor acumulación de los metales traza en el AGC y por ello, no sea posible diferenciar en el medio la contribución de las fuentes antropogénicas (minería, agricultura y actividades de la población) en los sedimentos superficiales del área de estudio.

4 OBJETIVOS.

4.1 OBJETIVO GENERAL.

Determinar la distribución de los metales traza (Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg) y Fe en sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California, e identificar la posible existencia de sitios enriquecidos por estos metales.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Cuantificar las concentraciones de los metales traza Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn, Hg, además del Fe en sedimentos marinos superficiales.
- Determinar la distribución de los metales traza en el sedimento superficial del Alto Golfo de California e identificar los sitios donde existe mayor acumulación de ellos
- Determinar los sitios enriquecidos de cada uno de estos metales traza en los sedimentos superficiales del Alto Golfo de California mediante la normalización con Fe_2O_3 o parámetros granulométricos.
- Determinar si existen sitios en las cuales las concentraciones de metales traza en sedimentos superficiales pudieran representar algún riesgo en los organismos que ahí habitan expuestos.

5 ÁREA DE ESTUDIO.

El Golfo de California (GC) es un mar marginal el cual se encuentra separado del Océano Pacífico por la Península de Baja California. Esta característica hace que las condiciones climáticas en el Golfo puedan ser diferentes a las de las costas occidentales de la Península (Merifield, y Winant, 1989), siendo un sitio con alta productividad primaria, y en consecuencia hay una gran diversidad de especies (Thomson, *et al.*, 1979). El GC tiene forma de un rectángulo alargado, el cual se extiende desde los 23° hasta los 32° latitud Norte. Su longitud aproximada es de 1,100 km y cuenta con una anchura que varía de entre los 108 y 234 km. Este mar se encuentra orientado con dirección noroeste-sureste, el cual está limitado por la península de Baja California en dirección al oeste y al este colinda con las costas de Sonora y Sinaloa. Típicamente, en el GC se presenta un patrón estacional de surgencias: localizadas en el oeste durante el verano y en el este durante el invierno.

El GC se suele dividir en cinco regiones de acuerdo con su fisiografía y circulación: la entrada del Golfo, el Golfo Sur, la región del Archipiélago Central, el Golfo Norte y el Alto Golfo (Lavín y Marinone, 2003). El patrón de corrientes superficiales tiene una estructura anticiclónica de otoño a primavera, mientras que en verano cambia a un flujo ciclónico (Ruvalcaba, 2013). Esto se ve influenciado principalmente por el patrón monzónico de vientos (Lavín y Marinone, 2003). El clima en la región es del tipo muy seco con temperaturas medias de 18° a 20°C y oscilaciones anuales de temperatura mayores de 14°C

(Ríos, 2012). El GC, que por acuerdo internacional se considera como Mar Patrimonial Mexicano, es un área de gran importancia debido a sus peculiares características hidrológicas, geológicas, biológicas y pesqueras en general (Castro-Aguirre *et al.*, 1995). Las pesquerías comerciales como sardina, anchoveta, camarón y calamar, así mismo como la pesca deportiva que hay en esta zona tienen una gran influencia en la economía nacional. Es por esto que el GC es considerado como uno de los sistemas de agua más productivos del mundo (Diario Oficial de la Federación, 2007).

En el GC se encuentra ubicada un área de gran prioridad debido a su gran importancia ecológica y económica, a esta área se le denomina Alto Golfo de California (AGC) área de estudio de este trabajo (Figura 2). El AGC forma parte de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, que fue decretada así el 10 de junio de 1993. Desde esa fecha las comunidades de Puerto Peñasco y Golfo de Santa Clara, Sonora, y San Felipe, Baja California, están vinculadas con esta reserva. Esta reserva fue creada con la finalidad de proteger especies endémicas de la zona como lo es la vaquita marina (*Phocoena sinus*) y la Totoaba (*Totoaba macdonaldi*), ambas especies en peligro de extinción. El AGC está localizado al norte del Golfo de California; latitud (31° 45' N - 31° 00' N) y longitud (115° 00' W – 113° 30' W) (Hernández-Azcúnaga, 2005). La parte marina de la reserva presenta un clima más continental que oceánico, caracterizada por dos estaciones, la fría en los meses de noviembre a mayo y la calida en los meses de junio a octubre (Monsiño y García, 1974).

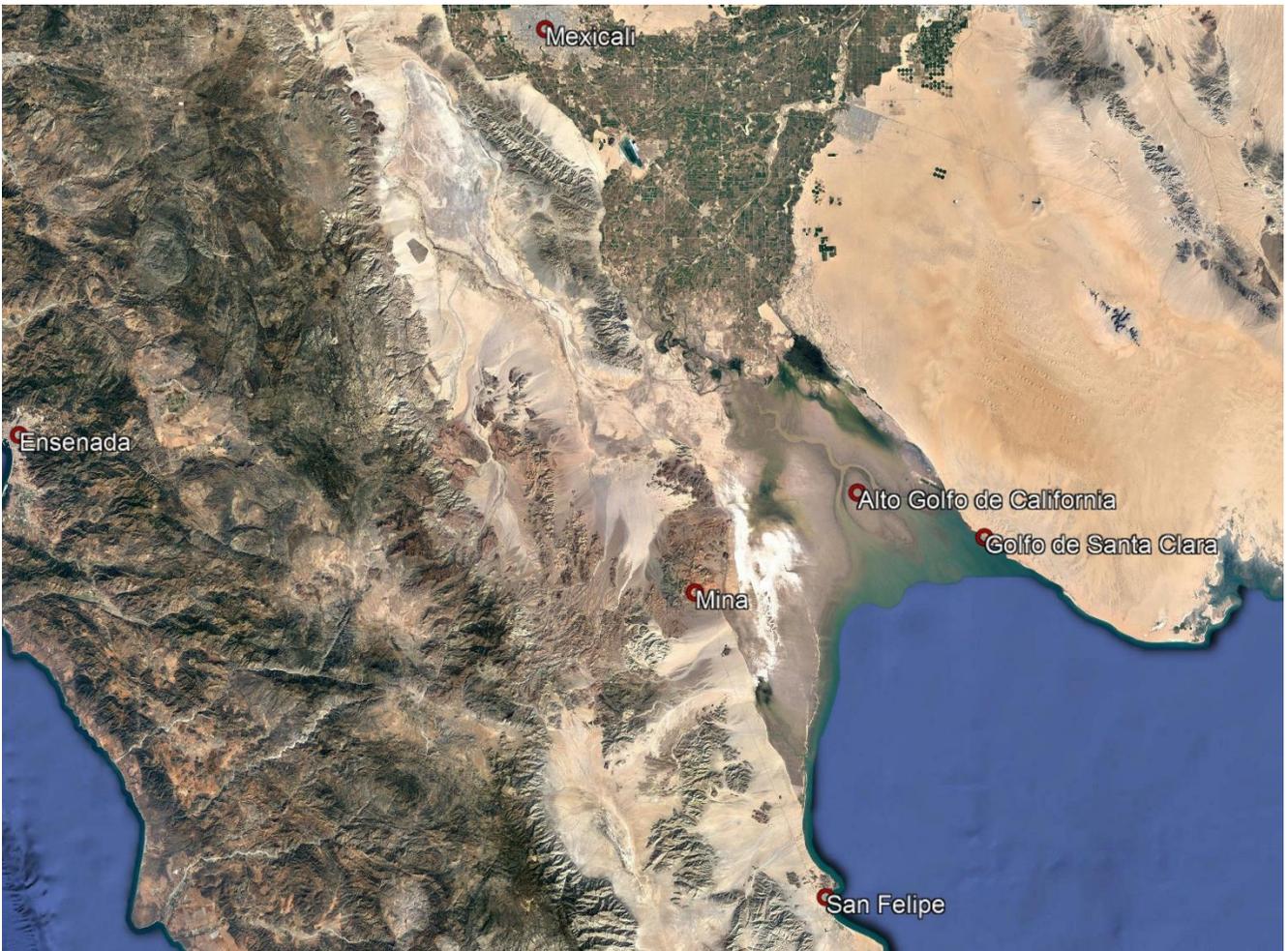


Figura 2. Mapa del área de estudio.

El ambiente marino presenta ciclos de mareas diurnas y semidiurnas con amplias variaciones en el nivel del mar que van de 6.95 m en San Felipe hasta cerca de 10 m en el Delta del Río Colorado (Filloux, 1973). En el caso de los componentes diurnos estos aumentan ligeramente en la boca del Golfo en dirección hacia el norte, mientras que en el caso de los componentes semidiurnos estos disminuyen. Esto origina corrientes de mareas con velocidades de 0.2 y 0.9 m s^{-1} a lo largo de las costas de Sonora y Baja California y de hasta 3 m s^{-1} en los canales ubicados en el Delta del Río Colorado (Hernández-Azcúnaga, 2005).

El fondo del AGC tiene una topografía muy irregular, con una serie de canales y bajos con dirección noroeste-sureste, mejor desarrollados hacia lo que fue la boca del Río Colorado (Alvarez-Borrego *et al.*, 1975). Su profundidad media es de 59 m, en esta zona se localizan formaciones de crestas que van desde los 10 a 30 km de longitud con alturas que pueden llegar hasta los 8 y 10 m, las cuales pueden ser identificadas como bancos de arena. En esta región, la dispersión, transporte y deposición de sedimentos están condicionados por la circulación de mareas (Montaño, 2003). Antes de que la presa Hoover fuera construida, el sedimento que se acumulaba en el fondo marino era de depósitos no consolidados de origen aluvial. En la actualidad el sedimento que cubre el fondo marino está predominantemente clasificado en tres grupos: limo-arcilla, arena-limo-arcilla y arena; aunque puntualmente se pueden localizar sustratos rocosos (Hernández-Azcúnaga, 2005). El tipo limo-arcilla se localiza en la zona noroccidental del AGC (Thompson, 1968). Como tendencia general, los sedimentos más finos predominan en la región occidental del AGC, mientras que los más gruesos predominan al este.

6 MATERIALES Y MÉTODOS.

6.1 PROTOCOLO DE MUESTREO.

En octubre del 2017 se obtuvieron muestras de sedimentos marinos superficiales en 22 estaciones mediante el uso de una draga Petite Ponar (Figura 3). Brevemente, en cada sitio se colectó el sedimento superficial (primeros 2 centímetros) en tubos de polipropileno para el análisis de metales traza y para parámetros granulométricos (tamaño de grano y carbono orgánico). Cabe señalar que se evitó coleccionar sedimentos cercanos a las paredes de la draga metálica, esto con la finalidad de evitar la contaminación cruzada de las muestras colectadas.

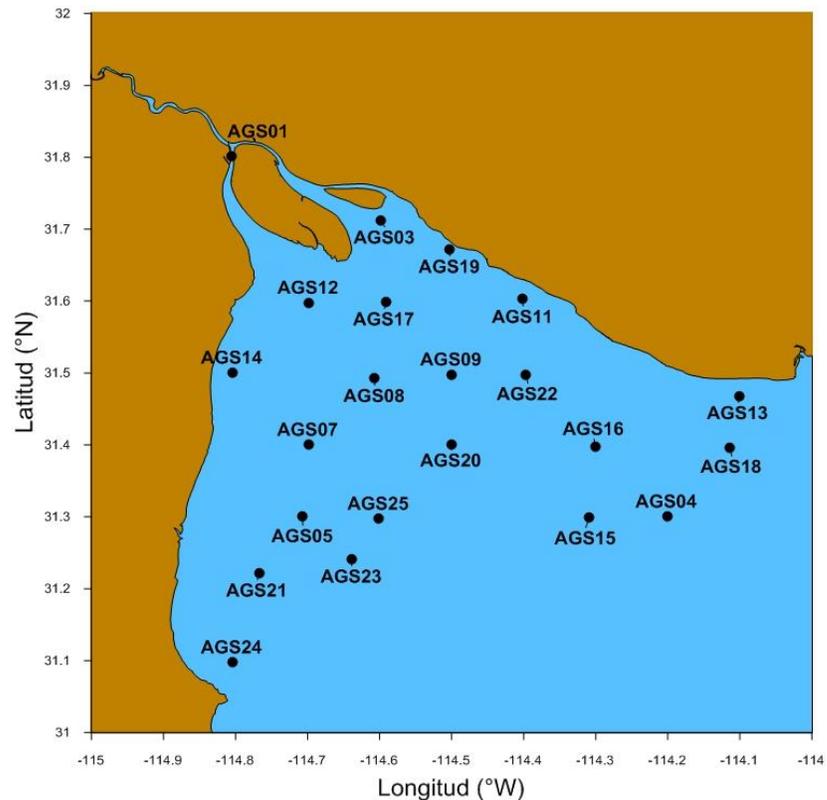


Figura 3. Ubicación de las estaciones de muestreo de sedimentos en el Alto Golfo de California.

6.2 TRABAJO DE LABORATORIO.

6.2.1 LIMPIEZA DE MATERIAL Y SECADO DE MUESTRAS.

El material utilizado para el análisis de metales traza se sometió a través de un proceso de limpieza con la finalidad de eliminar la posibilidad de contaminación cruzada por metales. El material de cristal y plástico se sumergió durante 24 horas en jabón micro al 2% (v/v), para posteriormente transferir la cristalería a una solución de HNO₃ al 30% (v/v), y en el caso del material de plástico a una solución de HCl al 5% (v/v). Para ambos casos, el material se dejó reposar durante todo un día, para finalmente ser enjuagado con agua desionizada y secado a la intemperie. Una vez completamente seco, todo el material se guardó en bolsas plásticas cerradas hasta su uso.

Previo al análisis, las muestras de sedimentos superficial fueron secadas en una estufa a $40 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y homogenizadas mediante un mortero.

6.2.2 TAMAÑO DE GRANO.

Para determinar las fracciones de tamaño de grano, se trabajó con submuestras del sedimento colectado de aproximadamente 10 g. en peso seco (d.w.) para cada una de las muestras. Debido a las especificaciones del equipo utilizado, previamente se tamizaron las muestras de sedimentos para remover las partículas mayores a 1000 μm . Dicho dato fue registrado para ser considerado al realizar la corrección de los tamaños de partículas. El análisis del tamaño de partícula se realizó mediante un analizador de distribución de tamaño de

partículas por difracción laser marca HORIBA LA910, siguiendo el método descrito por Daesslé *et al.* (2002), el cual utiliza ortofosfato de sodio como agente dispersante y en el cual se determinan las fracciones finas de tamaño de grano menores a 4, 16, 40 y 63 μm a través de un analizador láser de distribución de tamaño de partículas marca HORIBA LA910.

6.2.3 CARBONO ORGÁNICO.

Para el análisis de carbono orgánico (CO), se pesó aproximadamente 1.0 g. de sedimento marino y se le adiciono 2 ml de HCl al 0.1 M hasta asegurarse de remover completamente el contenido de carbonatos presentes en las muestras. Una vez terminado este proceso, se removi6 el ácido mediante lavados con agua desionizada y las muestras fueron nuevamente secadas en una mufla a $40 \pm 5^\circ\text{C}$ y sucesivamente homogenizadas para su análisis.

Posteriormente, se pesaron 3 mg de las muestras en capsulas de estaño, para determinar el porcentaje de carbono orgánico (%CO) en un analizador elemental LECO modelo CHNS-932.

6.2.4 ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Fe y Zn.

Para el análisis de los metales traza se pesó aproximadamente 1.0 g. de cada muestra, en vasos de precipitados de 30 mL. Se agregaron 9 mL de HNO_3 concentrado y 3 mL de HCl concentrado y los vasos fueron cubiertos con vidrios de reloj para dejarse reposar a temperatura ambiente durante toda la noche

("overnight") como procedimiento de predigestión. Para llevar a cabo la digestión las muestras fueron colocadas en planchas de calentamiento a una temperatura de $95 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 5 horas, para posteriormente retirar el vidrio de reloj y evaporar las muestras casi a sequedad. Finalmente, las muestras fueron transferidas a tubos de polipropileno mediante enjuagues de HNO_3 al 5% (v/v) hasta un volumen final de 20 mL.

El análisis de los metales traza Cu, Mn, Ni, Pb y Fe se realizó a través de un Espectrómetro de Emisión Atómica de Plasma por Microondas (Agilent MP-AES 4100), mientras que el Cr, Zn y Cd fueron analizados a través de un Espectrómetro de Absorción Atómica (Agilent 240FS).

Como control de calidad se analizaron dos blancos de procedimiento y dos materiales de referencia certificados para sedimentos por cada lote de 10 muestras analizadas. El material de referencia certificado utilizado en este trabajo fue PACS-2 (Marine sediment Reference Material for trace metals and other constituents-National Research Council of Canada NRC-CNRC) con el cual se evaluaron los porcentajes de recuperación de los diferentes metales traza analizados.

6.2.5 ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE Hg.

Para el análisis de mercurio fue necesario pesar 0.2 gr. de cada muestra seca en navcillas de níquel. Finalmente, para la cuantificación del metal se realizó a través de un Analizador de mercurio directo marca Millestone DMA-80.

Como control de calidad se analizaron dos blancos y dos materiales de referencia por cada 10 muestras. El material de referencia utilizado fue PACS-2 (Marine sediment Reference Material for trace metals and other constituents-National Research Council of Canada NRC-CNRC), del cual se pesaron 0.3 g. para su análisis.

6.2.6 ENRIQUECIMIENTO POR METALES TRAZA.

Para determinar los sitios enriquecidos por metales traza fue necesario realizar el procedimiento de normalización descrito por Schiff y Weisberg, (1999), el cual consistió en obtener la línea base Fe-metal a través de dos criterios. El primer criterio excluyó a los sitios que se encontraban cercanos a fuentes conocidas de alguna entrada de metales traza, como lo pueden ser salidas de aguas residuales arroyos o ríos, puertos, entre otros. El segundo criterio consistió en eliminar los datos extremos “outliers” de los sitios restantes. Para ello se utilizó el análisis de regresión entre cada uno de los metales analizados y el normalizador (Fe_2O_3). Los residuales que se obtuvieron en la regresión fueron evaluados a través de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. En los casos en los que no se obtuvo una distribución normal de los residuales de la regresión, se procede a eliminar los datos extremos y recalcular la regresión. Se considera datos extremos a aquellos que poseen valores mayores a dos veces la desviación estándar (positiva o negativa). Se repitió hasta que se logró alcanzar una distribución normal.

Una vez obtenida la línea base de cada metal se delimita la variación que se considera normal. Para ello se gráfica la línea de tendencia de regresión lineal entre el normalizador (Fe) y el metal que forma la línea base del metal, así como su intervalo de predicción (95%) de la línea base. Todo valor del metal obtenido en muestras de sedimento que este por arriba del intervalo de predicción (95%) se consideran un sitio enriquecido (Figura 4).

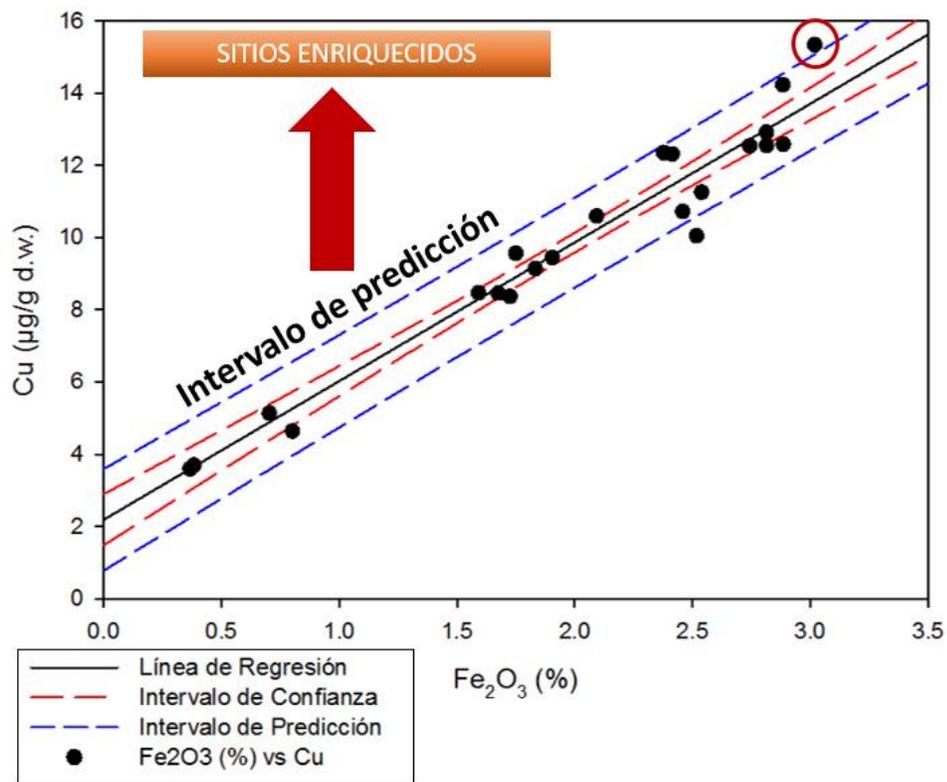


Figura 4. Ejemplo del procedimiento realizado para determinar los sitios enriquecidos.

7 RESULTADOS.

7.1 TAMAÑO DE GRANO.

En la Tabla 1 se muestra la estadística descriptiva de los resultados obtenidos de las cuatro fracciones de sedimento analizadas (4, 16, 40 y 63 μm) en el Alto Golfo de California. La mayoría de los sedimentos del AGC tienen características limo-arcillosas, con una predominancia de la fracción limosa (4 a 64 μm), la cual presenta hasta casi un 70% de su composición en los sitios evaluados (ver Anexo 1).

Los sedimentos de la zona se encuentran distribuidos de manera homogénea a excepción de algunas estaciones en las que se presentaron una fracción de tamaño de grano más gruesa (de tipo arena), principalmente en las estaciones adyacentes a la costa de Sonora (Figura 5).

Tabla 1. Promedio, mediana, máxima y mínima de las fracciones (4, 16, 40 y 63 μm) de tamaño de grano de los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

	Fracción			
	4 μm	16 μm	40 μm	63 μm
Prom	17.03	46.46	59.13	67.08
Me	19.82	47.84	62.07	75.49
Min	0.32	1.34	2.28	4.23
Max	37.93	90.20	97.65	98.00

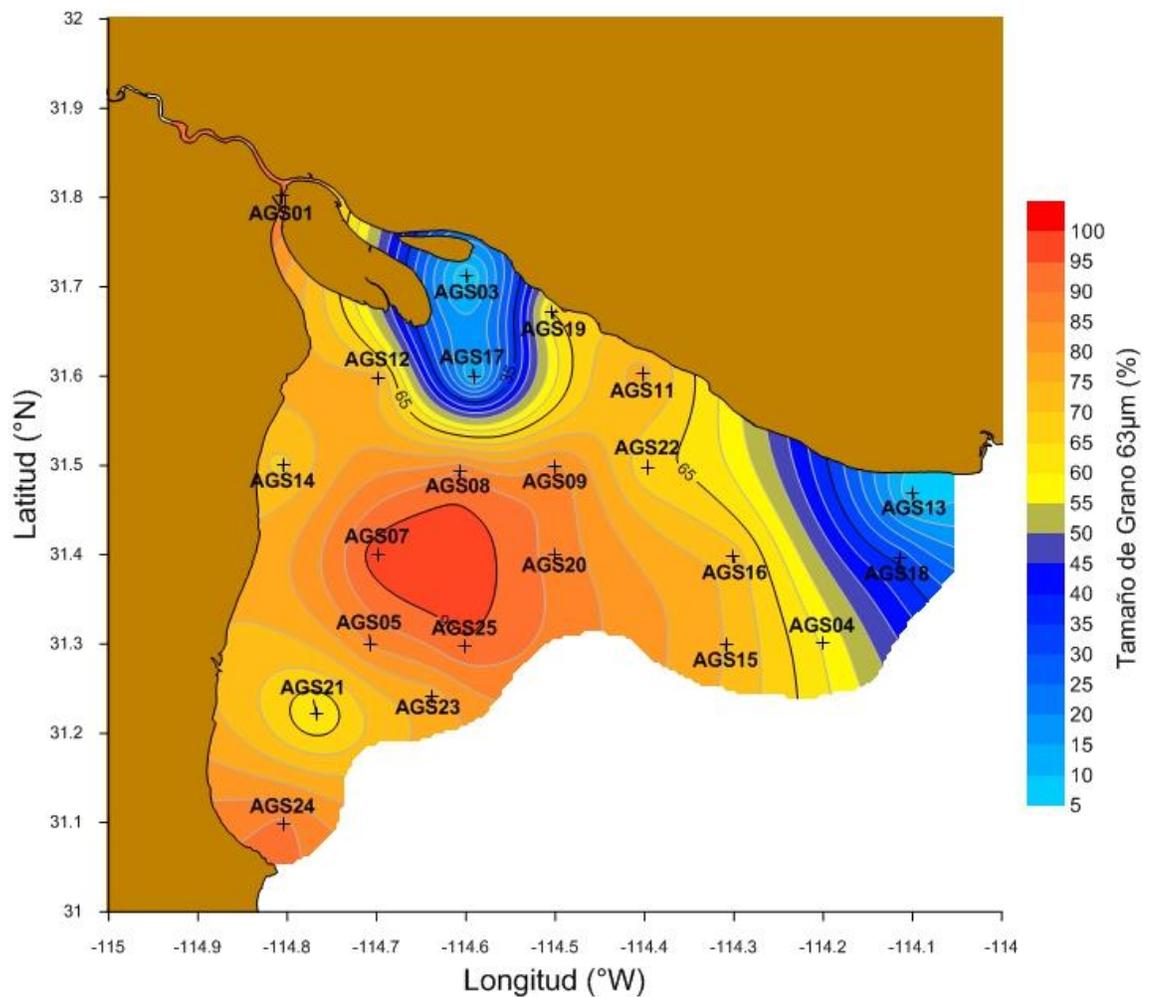


Figura 5. Distribución de tamaño de grano < 63μm en el Alto Golfo de California.

7.2 CARBONO ORGÁNICO.

El valor promedio de carbono orgánico en sedimentos del AGC fue de 1.2 %, (mediana de 1.3 %), con valores mínimos y máximos de 0.33 y 1.89 % respectivamente (ver Anexo 2). Las estaciones donde se observaron los porcentajes más bajos de CO se localizaron cerca del Golfo de Santa Clara y Bahía Adair (adyacentes a la costa de Sonora), mientras que el resto de las

estaciones se presentaron porcentajes más altos de CO, como se puede observar en la Figura 6.

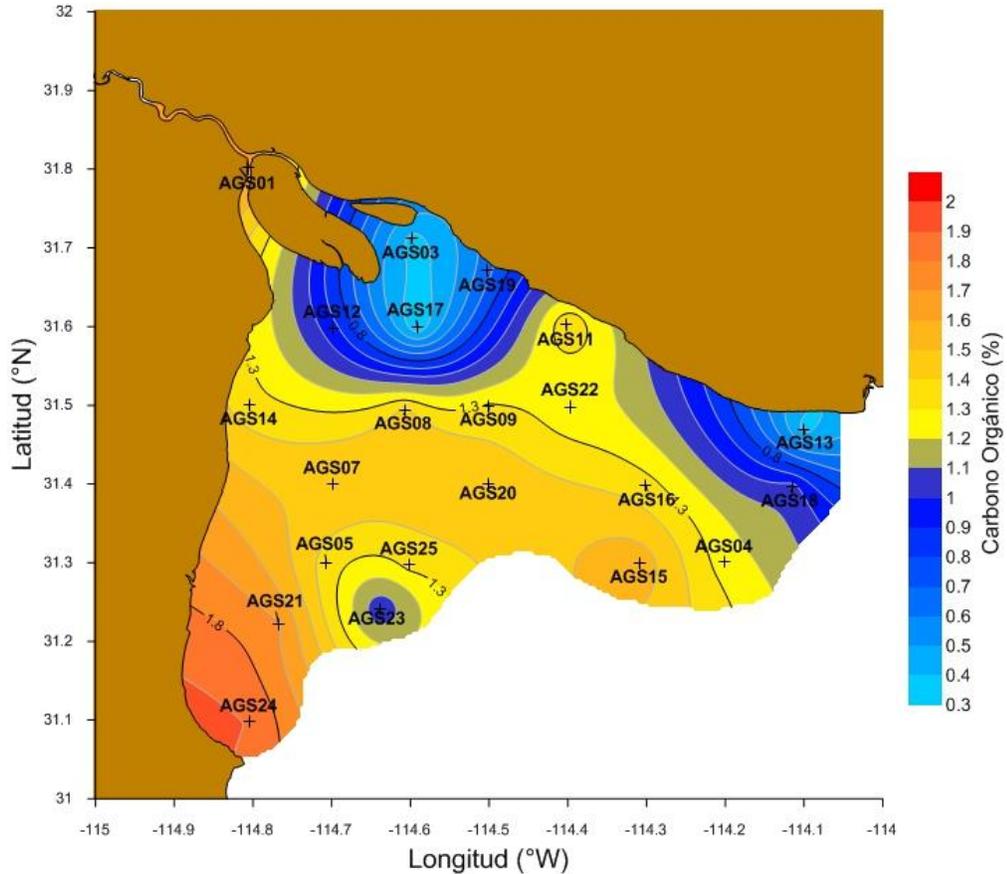


Figura 6. Distribución de carbono orgánico (%CO) en el Alto Golfo de California.

Al evaluar la relación entre la distribución del carbono orgánico (%CO) y el tamaño de grano (%TG <63 μ m) se observa una moderada correlación ($r^2=0.66$) en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

7.3 CONCENTRACIONES DE Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg.

En la Tabla 2 se resume las concentraciones de los metales traza (Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg) encontradas en sedimentos superficiales del AGC. La concentración del Cd fue de 0.8 ± 0.2 $\mu\text{g/g d.w.}$, la de Cu fue de 9.91 ± 3.31 $\mu\text{g/g d.w.}$, para el Cr la concentración promedio estuvo en 28.8 ± 11.3 $\mu\text{g/g d.w.}$, la de Hg fue de 0.015 ± 0.005 $\mu\text{g/g d.w.}$, para el Mn la concentración promedio fue de 390.6 ± 168.0 $\mu\text{g/g d.w.}$, la del Ni fue de 16.3 ± 5.8 $\mu\text{g/g d.w.}$, mientras que en el Pb la concentración promedio fue de 16.9 ± 4.7 $\mu\text{g/g d.w.}$, y para el Zn la concentración promedio fue de 185.4 ± 75.5 $\mu\text{g/g d.w.}$

Tabla 2. Estadística (promedio, desviación estándar, mínima y máxima) de las concentraciones de metales traza (Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg) encontradas en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

	Concentración ($\mu\text{g/g d.w.}$)							
	Cd	Cu	Cr	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Prom	0.81	9.91	28.84	0.015	390.65	16.32	16.9	185.45
DS	0.18	3.31	11.3	0.005	168.04	5.85	4.68	75.51
Min	0.39	3.6	7.55	0.005	62.69	4.53	6.92	81.49
Max	1.01	15.34	44.65	0.024	669.39	23.8	26.31	444.07

7.4 NORMALIZACIÓN DE METALES TRAZA.

Al realizar la normalización de los metales traza analizados (Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg) con base a los criterios descritos por Schiff y Weisberg (1999) solo el Cu, Cd, Pb y Zn presentaron estaciones situadas por arriba del intervalo de predicción (Figura 7 y 8), es decir presentan un enriquecimiento por estos metales traza en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

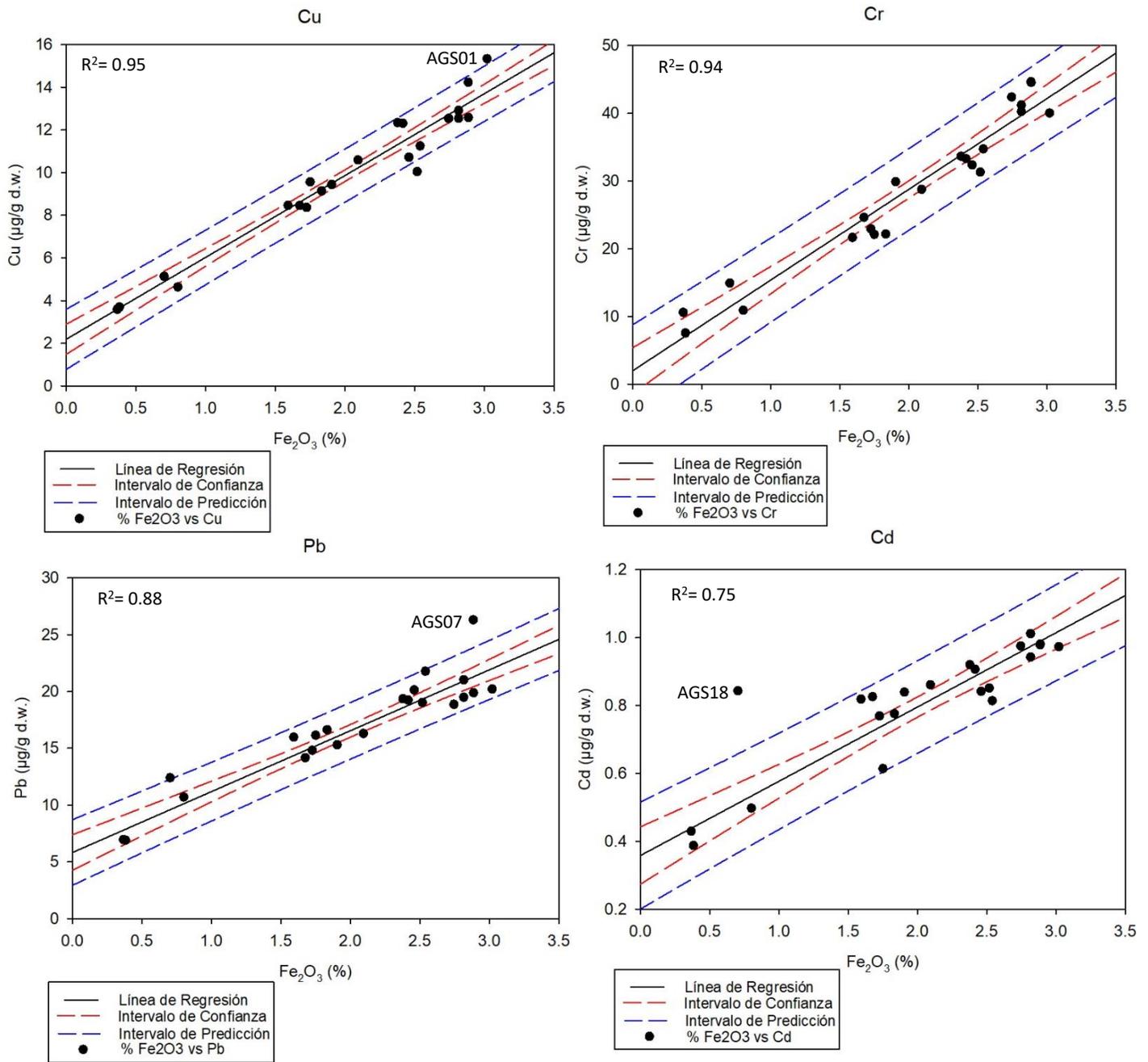


Figura 7. Normalización de metales traza para la determinación de sitios enriquecidos.

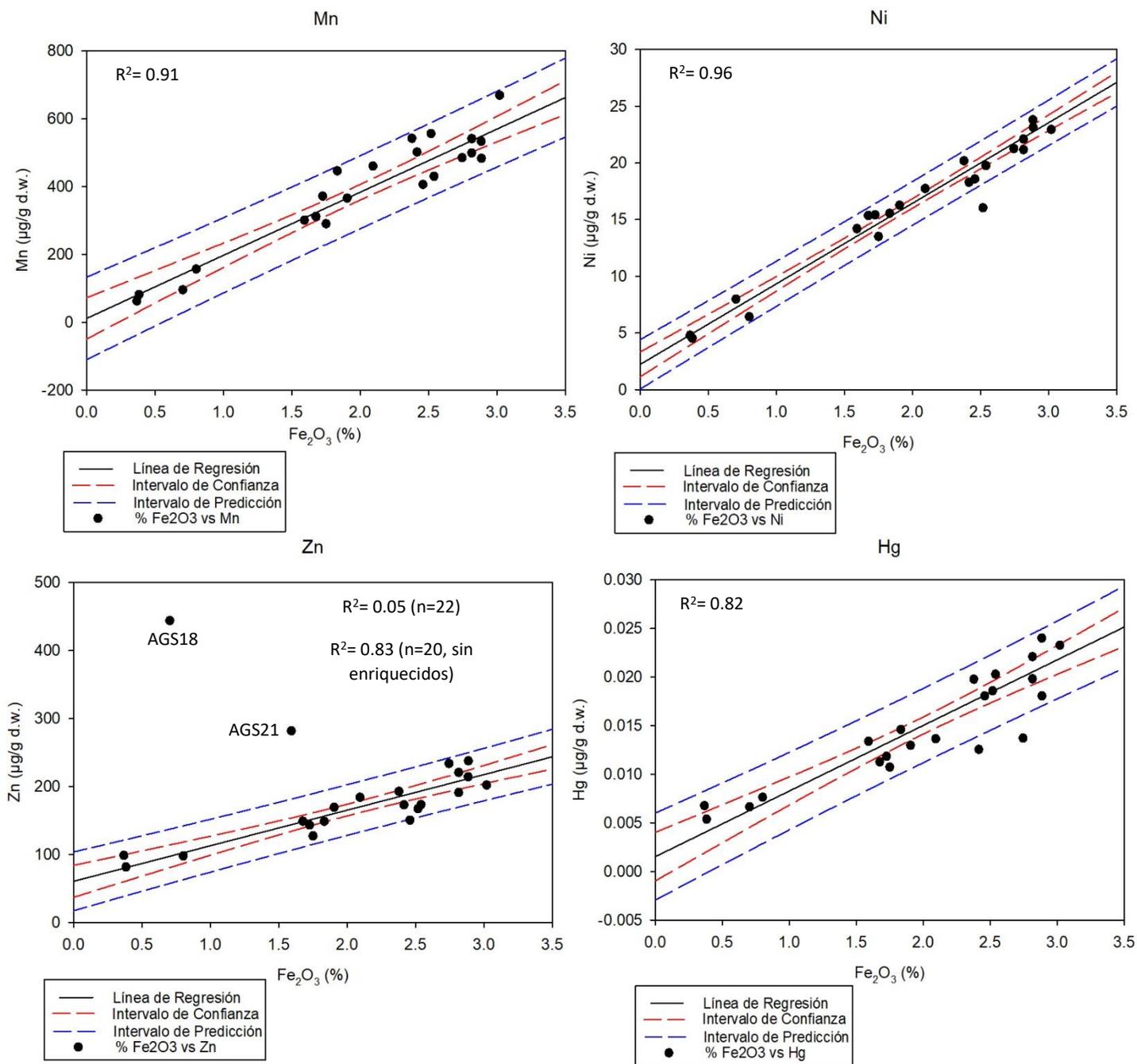


Figura 8. Normalización de metales traza para la determinación de sitios enriquecidos.

7.5 ENRIQUECIMIENTO POR METALES TRAZA.

A continuación, se describen sitios enriquecidos por algún metal traza encontrados en el Alto Golfo de California.

7.5.1 ENRIQUECIMIENTO POR COBRE (Cu).

La distribución del Cobre (Cu) en el Ato Golfo de California se encuentra en un intervalo de 3.5 a 15.34 $\mu\text{g/g}$ d.w. De las 22 estaciones analizadas únicamente una estación (AGS01) fue la que presentó un enriquecimiento por este metal traza, como se puede observar en la Figura 9.

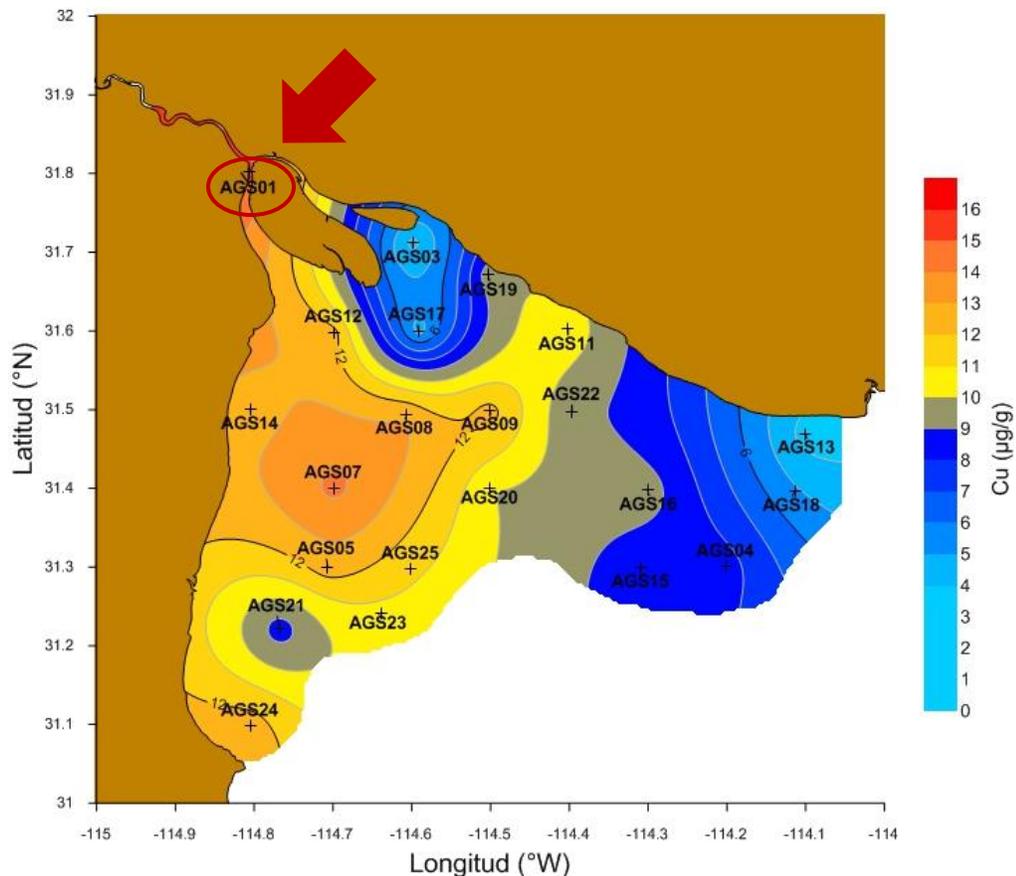


Figura 9. Distribución de la concentración de Cobre (Cu) en sedimentos del Alto Golfo de California. En círculo rojo se indica la estación que presentó enriquecimiento por Cu.

Esta estación se encuentra ubicada en la desembocadura del Río Colorado y presento la mayor concentración de Cu encontrada en el área de estudios (15.34 $\mu\text{g/g}$ d.w.). El enriquecimiento de este metal podría estar asociado a las actividades antropogénicas (drenes agrícolas y aguas residuales) que se llevan a cabo en las zonas cercanas al AGC, debido a la ubicación en la que se encuentra esta estación.

Los drenes agrícolas provenientes del Valle de Mexicali, Baja California y el Valle Imperial de California, Estados Unidos llegan hasta el Río Colorado, así como las cuales pudieran estar aportando concentraciones de metales traza hasta ingresar al medio marino y depositándose así en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

7.5.2 ENRIQUECIMIENTO POR CADMIO (Cd).

La distribución concentración del Cadmio (Cd) en sedimentos superficiales del Ato Golfo de California se encuentra en un intervalo de 0.38 a 1.01 $\mu\text{g/g}$ d.w. De las 22 estaciones analizadas únicamente una estación (AGS018) fue la que presentó un enriquecimiento por este metal traza, como se puede observar en la Figura 10.

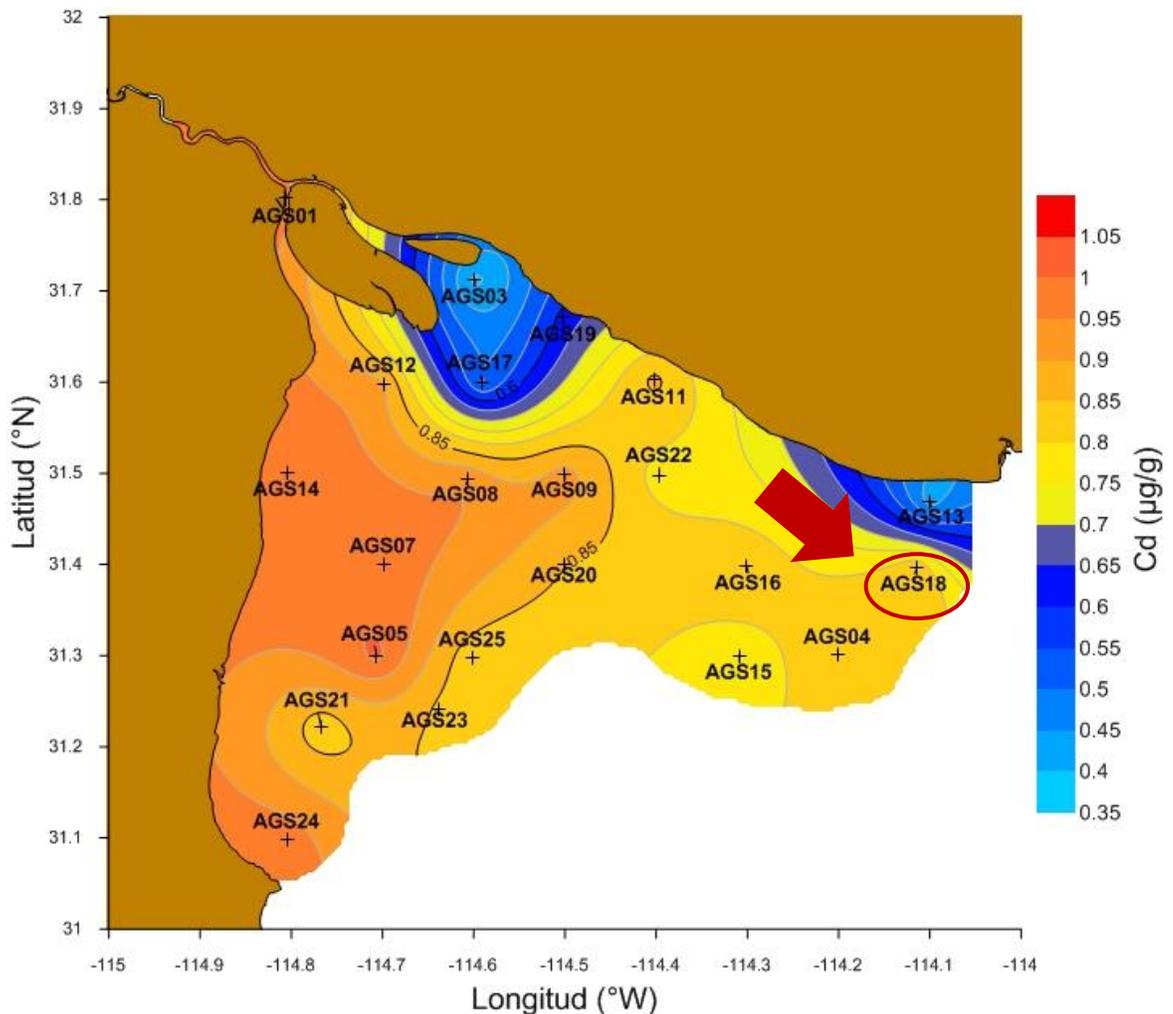


Figura 10. Distribución de Cadmio (Cd) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California. En círculo rojo se indica la estación que presentó enriquecimiento por Cd.

Esta estación se encuentra cercana a la Bahía Adair, la cual presentó una concentración de 0.84 µg/g. El enriquecimiento de este metal en este sitio se puede asociar a eventos de surgencias y/o por el transporte de sedimentos litoral del sur del Golfo de California.

Aunque es posible que algunas de las actividades humanas pueden generar desecho de Cd. El sulfato de cadmio se usa en medicina como astringente. El sulfuro de cadmio (CdS) y seleniuro de cadmio (CdSe) son utilizados como pigmento. Debido a que el cadmio rebaja el punto de fusión de los metales con los que forma aleaciones; se usa con Pb, Sn y Bi en la fabricación de fusibles para sistemas automáticos, alarmas contra incendios y fusibles eléctricos. Sin embargo, debido a que el poblado cercano en Bahía Adair es pequeño, además que es un lugar designado como sitio Ramsar desde el 2009 (formado por humedales y con un área 42,430 ha), es poco probable que en esta zona se estén llevando a cabo actividades que estén repercutiendo en el enriquecimiento de Cd en el medio. Por lo antes mencionado, este enriquecimiento encontrado en ese sitio podría estar asociado a fuentes naturales, como los fenómenos de surgencias, los cuales son comunes en el Golfo de California (Roden, 1964).

7.5.3 ENRIQUECIMIENTO POR ZINC (Zn).

La distribución del Zinc (Zn) en sedimentos superficiales del Ato Golfo de California se encuentra en un intervalo de 81.5 a 444.1 $\mu\text{g/g}$ d.w. De las 22 estaciones analizadas únicamente dos estaciones (AGS18 y AGS22) fueron las que presentaron un enriquecimiento por este metal traza, como se puede observar en la Figura 11.

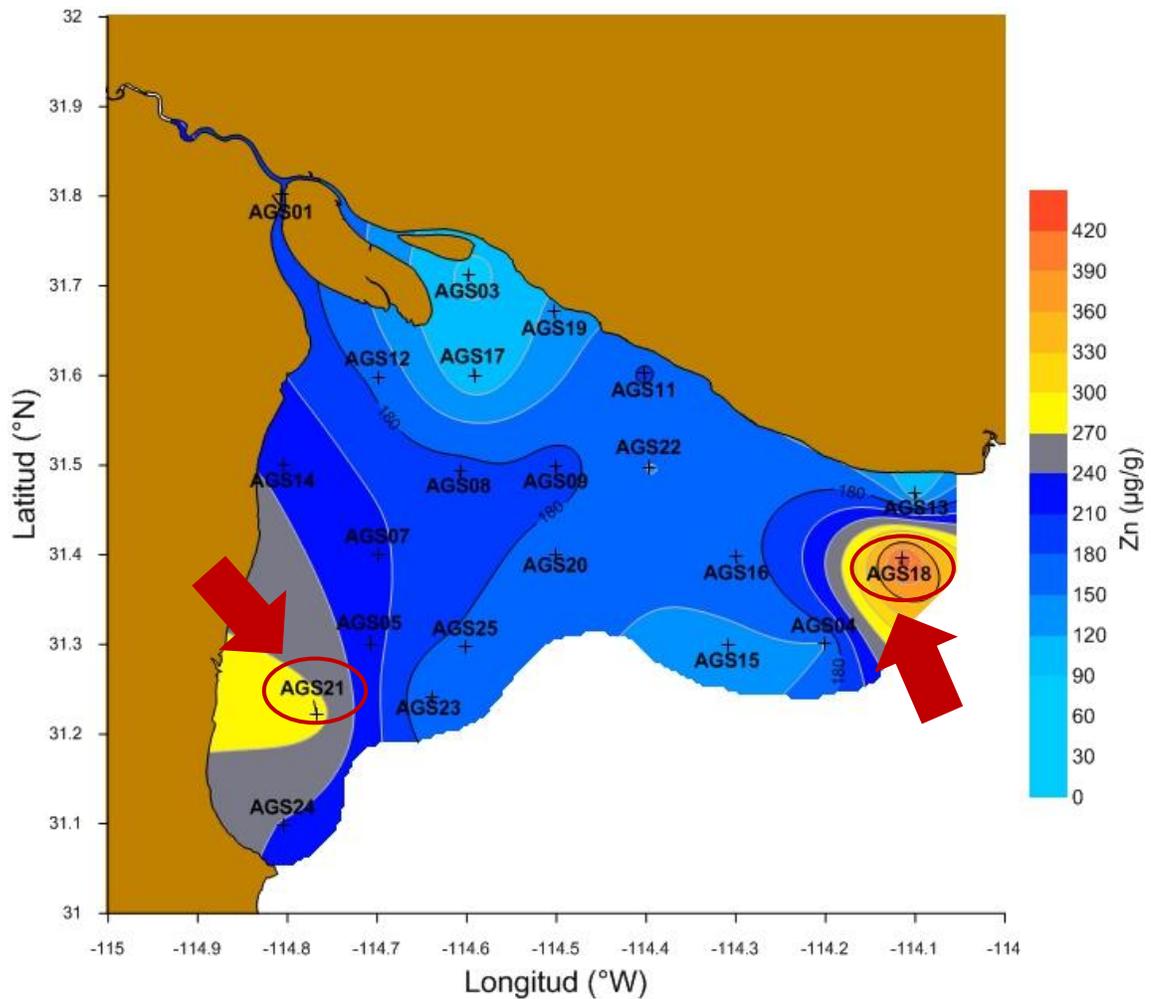


Figura 11. Distribución de Zinc (Zn) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California. Los círculos rojos indican los sitios que presentan enriquecimiento por Zn.

Estas estaciones se encuentran ubicadas en Bahía Adair y en el Puerto de San Felipe, las cuales presentaron una concentración de 444.1 $\mu\text{g/g}$ para el caso de la estación ubicada en Bahía Adair, mientras que para el caso de la estación ubicada en el Puerto de San Felipe presentó una concentración de 281.9 $\mu\text{g/g}$. El enriquecimiento de este metal se puede asociar a las actividades antropogénicas (portuarias) que se llevan a cabo en las zonas cercanas al AGC, debido a la ubicación en la que se encuentran ambas estaciones.

Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente para el caso de la estación ubicada en Bahía Adair en donde también se observa enriquecimiento por Cd, existe una posibilidad de que el enriquecimiento por Zn este asociado principalmente a fuentes naturales. Mientras que para el caso de la estación ubicada en el Puerto de San Felipe su enriquecimiento si puede estar asociada a las actividades antropogénicas (portuarias) que se llevan a cabo en San Felipe.

7.5.4 ENRIQUECIMIENTO POR PLOMO (Pb).

La distribución del Plomo (Pb) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California se encuentra en un intervalo de 6.9 a 26.3 $\mu\text{g/g}$ d.w. De las 22 estaciones analizadas únicamente una estación (AGS07) fue la que presentó un enriquecimiento por este metal traza, como se puede observar en la Figura 12. Esta estación se encuentra ubicada al Norte del Puerto de San Felipe, la cual presentó una concentración de 26.3 $\mu\text{g/g}$.

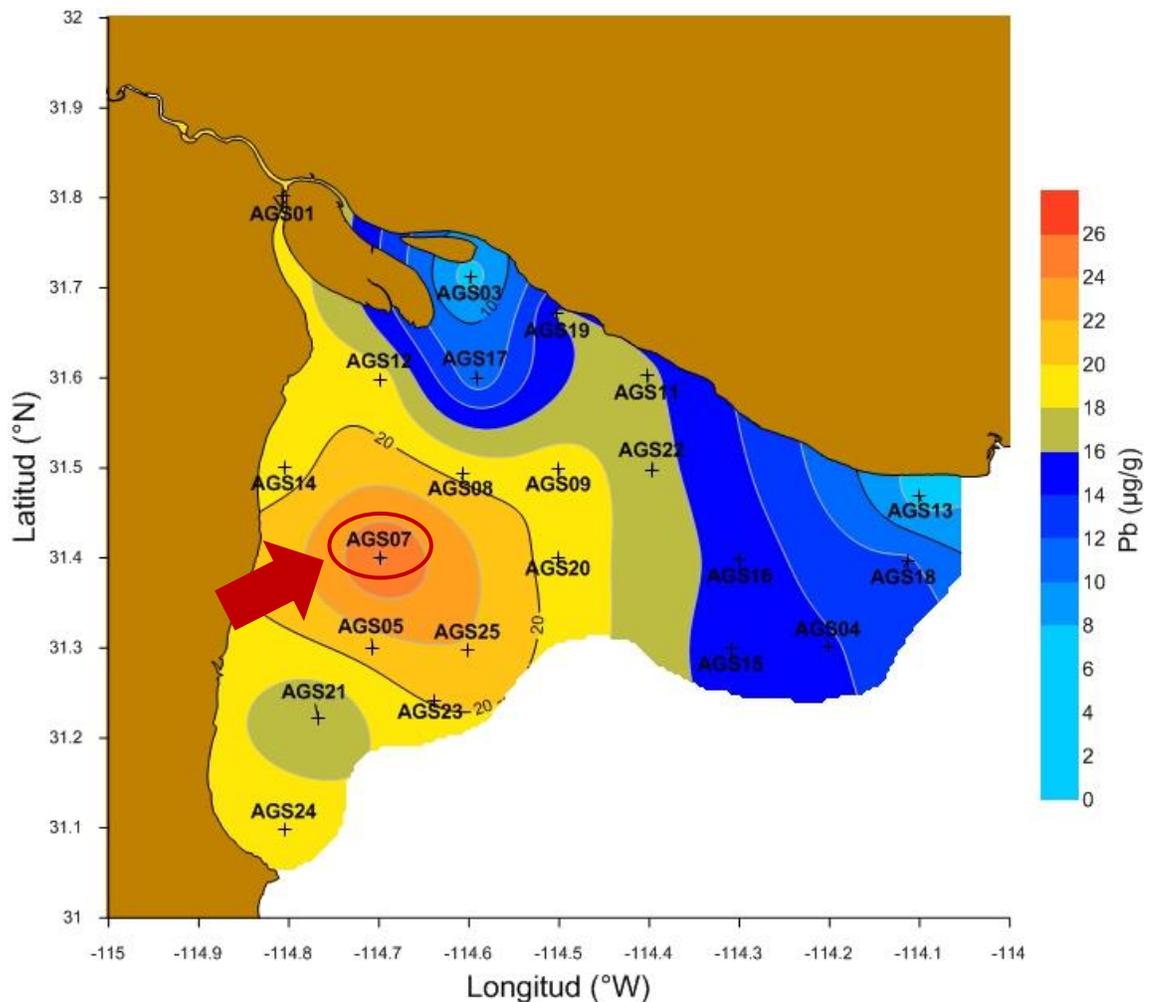


Figura 12. Distribución de Plomo (Pb) en sedimentos superficiales del Alto Golfo de California. El círculo rojo indica la estación donde se observa enriquecimiento por Pb.

8 DISCUSIONES.

El tamaño de grano y el carbono orgánico suelen tener una alta correlación, ya que aquellas zonas en las que se presenta sedimentos finos tienden a contener altos niveles de carbono orgánico. De las fracciones de sedimento analizadas (4, 16, 40 y 63 μ m) la fracción que presentó una mejor correlación con el porcentaje de tamaño de grano (TG%) fue la de 63 μ m. No obstante, esta fracción presentó una moderada correlación ($r^2=0.66$). En este caso, podría ser debido a la dinámica del lugar, en donde la distribución de los sedimentos se rige principalmente por la circulación debido a los intensos regímenes de marea, predominando así sedimentos limo-arcillosos (70-90%), como se puede ver en la Figura 13. Esta tendencia coincide con lo reportado por Carriquiry y Sánchez (1999). Ellos proponen un patrón de circulación (Figura 14) para el Alto Golfo de California en donde se observa una gran zona de acumulación de sedimentos finos (adyacentes a la costa de Baja California) y con sedimentos más arenosos en zonas adyacentes a la costa de Sonora, lo cual coincide con la distribución de tamaño de grano encontrada en este estudio.

Las zonas en las que se presentan sedimentos más gruesos corresponden a aquellas zonas en las que se presentan corrientes de gran intensidad (principalmente en los sedimentos adyacentes a la costa de Sonora) mientras que las zonas con sedimentos más finos se depositan debido a la predominancia de corrientes de menor intensidad (en este caso en los sedimentos adyacentes a la costa de Baja California).

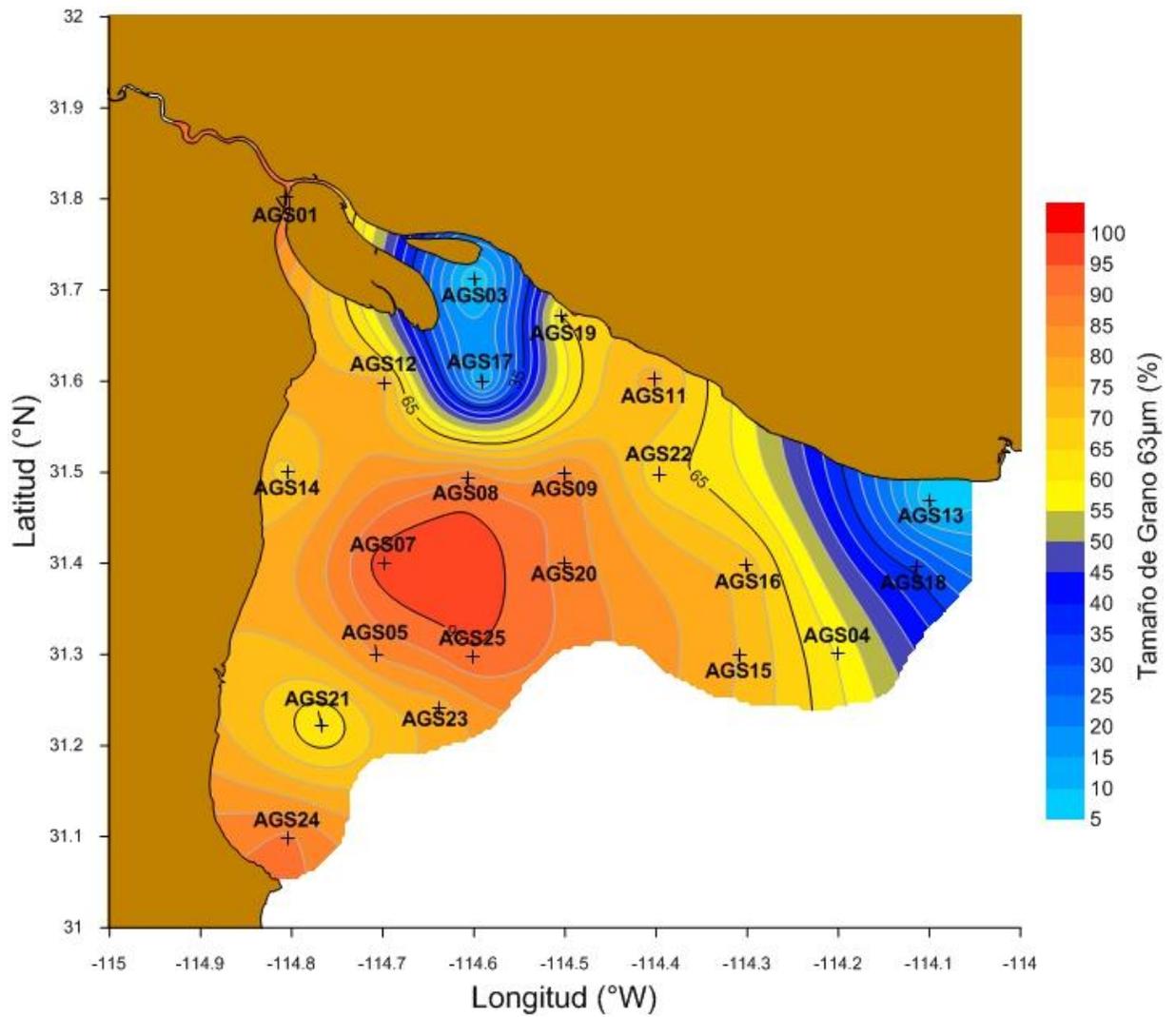


Figura 13. Distribución de tamaño de grano de $63\mu\text{m}$ en el Alto Golfo de California.

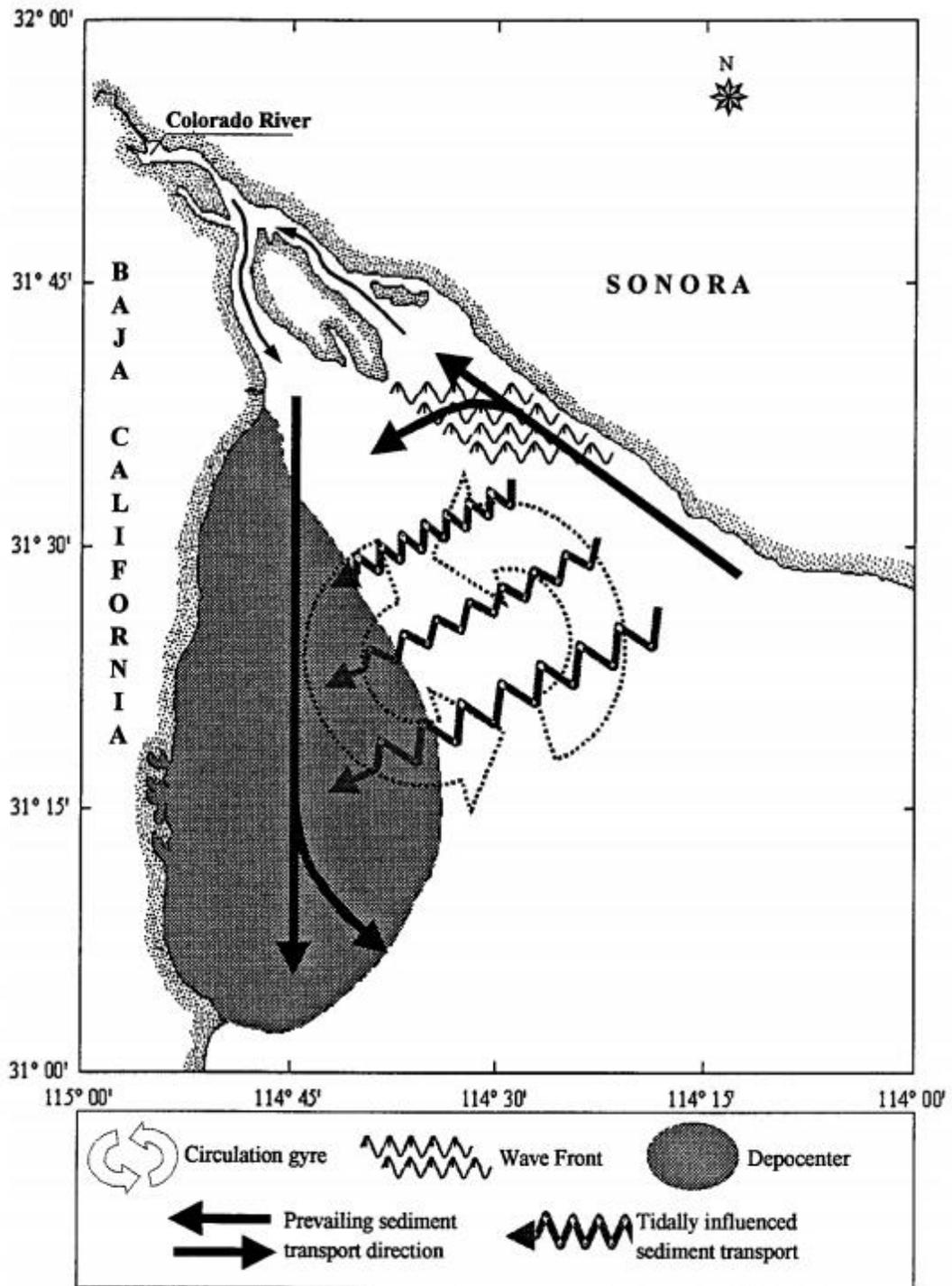


Figura 14. Patrón de circulación en el Alto Golfo de California propuesto y tomado de Carriquiry y Sánchez (1999).

En general la distribución de los metales traza parece estar controlada por la distribución de partículas de grano fino como lo muestran los coeficientes de determinación (r^2) entre cada uno de los metales y la fracción menor a $63 \mu\text{m}$ (entre 0.75 y 0.89). Es decir, los parámetros físicos (corrientes y mareas) parecen dominar la distribución de los metales traza en el AGC. Daesslé *et al.*, (2002) puntualizan que en el norte del Golfo de California (GC) el alto contenido de limo ($4-62.5 \mu\text{m}$) y arcilla ($< 4 \mu\text{m}$) deriva principalmente de la erosión del Delta del Río Colorado y se transporta hacia el sur adyacente a la costa de Baja California, lo que representa hasta el 50% de los sedimentos.

Los sitios en los que los sedimentos superficiales mostraron enriquecimiento por algún metal fueron escasos, tres de ellos mostraron enriquecimiento por un metal (estación AGS01 en Cu; AGS01 en Pb, AGS21 en Zn) y un solo sitio por dos metales (AGS18 en Cd y Zn). Lo anterior dificulta determinar la fuente que podría estar ocasionando este enriquecimiento. Segovia-Zavala *et al.*, (2009) mencionan que el enriquecimiento que se puede presentar en el Golfo de California no se puede atribuir a fuentes antropogénicas cercanas, esto debido a que la población costera y el desarrollo industrial que rodea al GC no tienen un gran impacto significativo que pueda causar este incremento de concentraciones por metales traza, por lo que estaría asociado principalmente a fenómenos naturales. Es posible que el enriquecimiento del Cu y Pb, provengan de escurrimientos del Delta del Río Colorado, en donde los drenes agrícolas y de aguas domésticas pudieran estar introduciendo estos metales, y que sean distribuidos en el área o

debido a la circulación que presenta la zona, o que pueda provenir del sur del Golfo de California y se distribuyan en la parte del Alto Golfo de California. Sin embargo, no es posible precisar si es alguna actividad en específico o refleja algún evento puntual.

Con respecto a los valores de concentración de cada uno de los metales medidos en este trabajo en sedimentos del Alto Golfo de California, sólo se encuentran los valores reportados por Shumilin *et al.* (2002). Ellos reportan concentraciones de Cr en sedimentos superficiales en la zona del Delta del Río Colorado de $27.6 \pm 8.8 \mu\text{g/g}$ y de $28.1 \pm 13.0 \mu\text{g/g}$ para sedimentos del Alto Golfo de California, valores que están dentro del rango de valores encontradas en este estudio ($28.84 \pm 11.30 \mu\text{g/g d.w.}$). Sin embargo, estos autores reportan para la zona del Delta del Río Colorado concentraciones de Zn de $39.26 \pm 19.61 \mu\text{g/g}$ y de $43.80 \pm 27.46 \mu\text{g/g}$ para sedimentos del Alto Golfo de California, valores que son menores a los encontrados en este trabajo ($185.45 \pm 75.51 \mu\text{g/g d.w.}$). Es posible que este incremento en su concentración sea debido a que es un metal muy usado en la industria. Se estima que alrededor del 50% del zinc metálico producido se utiliza para galvanizar otros metales tales como acero o hierro y cuya principal función es prevenir corrosión. También es ampliamente utilizado para producir piezas de fundición de troquel que se utilizan en las industrias de automovilismo, eléctricas y de hardware. En los últimos años el uso del Zn ha aumentado, por ejemplo, en baterías utilizadas

en vehículos eléctricos como un compuesto químico, en proceso de producción de caucho, cerámica y en la agricultura (Sisternes, 2013).

Sin embargo, uno de los objetivos de cuantificar y determinar su distribución, es evaluar si las concentraciones encontradas en el medio pueden ser dañinas para los organismos que en ella habitan. Los efectos adversos producidos por sedimentos contaminados sobre los organismos acuáticos pueden ser evaluados mediante valores de referencia denominados rango de efecto bajo (ERL) y rango de efecto medio (ERM), de los cuales se derivan tres categorías de efectos biológicos adversos: efectos no observados (concentración < ERL), ocasionalmente observados (concentración entre ERL y ERM) y frecuentemente observados (concentración > ERM) (Long et al., 1995).

En la Tabla 3 se incorporan los valores de ERL y ERM para cada metal y el número de estaciones que caen dentro de estos rangos. Según esta clasificación, los dos metales que pueden significar un riesgo para los organismos son el Ni y Zn, siendo el más preocupante el Zn; en 15 de las 22 estaciones los organismos que en ella habitan ocasionalmente podrían presentar efectos biológicos adversos. Mientras que, en el caso del Ni, sólo 6 de las 22 estaciones presentaron concentraciones mayores al ERL. Es decir, que los organismos que ahí se encuentran podrían raramente mostrar efectos biológicos adversos. Las concentraciones de los demás metales de acuerdo con esta clasificación, no serían de riesgo para los organismos que en ella habitan.

Tabla 3. Número de estaciones evaluados mediante valores de referencia. Datos de ERL^a y ERM^a obtenidos de Long *et. al.* (1995).

Estación	Metales							
	Cd	Cu	Cr	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Número de estaciones								
n<ERL	22	22	22	22	NA	16	22	7
Entre ERL y ERM	0	0	0	0	NA	6	0	15
n>ERM	0	0	0	0	NA	0	0	0
Concentración del rango de efectos (µg/g d.w.)								
ERL ^a	1.2	34	81	0.15	NA	20.9	46.7	150
ERM ^a	9.6	270	370	0.71	NA	51.6	218	410

9 CONCLUSIONES.

La relación metal / Fe se utilizó para identificar en los sedimentos marinos superficiales aquellos metales traza que se encontraban enriquecidos. Al utilizar el Fe como normalizador se obtuvo una buena correlación con cada uno de los metales traza analizados, obteniendo así en promedio un valor de $r^2 = 0.88$. Para el caso de Cd / Fe se presentó una buena correlación ($r^2 = 0.75$) lo cual con frecuencia no suele suceder, las fuertes corrientes debido al régimen de mareas genera corrientes fuertes que pueden ser el mecanismo por el cual el Cd ingrese por eventos de surgencias, pueda ser distribuidos en el área de estudio.

En el Alto Golfo de California, los parámetros físicos (corrientes y mareas) parecen determinar la distribución de los metales traza, lo cual se corrobora con la moderada correlación con la distribución del tamaño de grano.

La parte norte del Alto Golfo de California presenta solo una estación con enriquecimiento por Cu. Lo que sugiere que la zona norte del AGC se encuentra poco impactado por metales traza.

Por otra parte, el resto del área del Alto Golfo de California se observa bajo grado de perturbación en los sedimentos marinos, ya que se observó una baja incidencia de sitios enriquecidos por uno o dos metales, siendo los metales traza involucrados el Cd, Zn y Pb, los cuales presumiblemente tienen un origen atribuible a procesos naturales. No obstante, al evaluar las concentraciones de metales traza encontrada en los sitios del área de estudio se encontró que dos

metales que pueden representar un riesgo para los organismos expuestos, los cuales son el Ni y el Zn. La concentración del zinc en 15 de las 22 estaciones se encuentra en el rango entre el ERL y ERM, lo que implicaría que en estos sitios podrían estarse presentando ocasionalmente efectos biológicos adversos.

Mientras que la concentración del Ni indica que sólo 6 de las 22 estaciones son mayores al ERL, lo que señalaría que los organismos que ahí se encuentran raramente mostrar efectos biológicos. Finalmente, de acuerdo a esta clasificación las concentraciones del resto de los metales traza analizados se encuentran en niveles que no representarían un riesgo para los organismos que en ella habitan.

10 LITERATURA.

Acosta, V., Lodeiros, C., Senior, W., Martínez, G. (2002). Niveles de metales pesados en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela. *Interciencia*, 27(12). p. 686-690.

Alvarez-Borrego S., Flores-Báez B. P., Galindo-Bect L. A. (1975). Hidrología del Alto Golfo de California II. condiciones durante invierno, primare y verano. *Ciencias Marinas*. Vol 2. No. 1. p. 21-36.

Bruland, K.W. (1980). Oceanographic distribution of cadmium, nickel, and copper in the North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47. p. 176–198.

Brix, H., Lyngby, J., Schierup, H. (1983). Eelgrass (*Zostera marina L.*) as an indicator organism of trace metals in the Limfjord, Denmark. *Marine Environmental esearch* 8. p. 165-181.

Cadena-Cárdenas L. (2010). Biomarcadores de metales pesados y plaguicidas organofosforados en organismos acuáticos del Río Hardy y Alto Golfo de California.

Castro-Aguirre J. L., Balart E. F., Arvizu-Martínez J. (1995). Contribución al conocimiento del origen y distribución de la ictiofauna del Golfo de California, México. *Hidrobiológica* 5 (1-2) p. 57-78.

Delgadillo-Hinojosa F. (2000). Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, p 181.

Daesslé LW, Ramos SE, Carriquiry JD, Camacho VF. (2002). Clay dispersal and the geochemistry of manganese in the northern Gulf of California. *Cont. Shelf Res.* 22: 1311–1323.

DOF (2007). Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales: “Decreto del Programa de Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California”. p. 2.

Díaz-Rodríguez G. (2008). Estudio de la distribución vertical de manganeso y cobalto en la región de las grandes islas del Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, p 91.

Domínguez-Rosas A. (2008). Distribución vertical y temporal de níquel y cadmio en el Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, p 97.

Filloux, J. H. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature.* 243. p. 217-221.

Gutiérrez-Galindo, E. A., Flores-Muñoz, G., Olguín-Espinoza, G., Villaescusa-Celaya, J.A. (1990). Biodisponibilidad de metales traza en almejas y mejillón del valle agrícola de Mexicali y alto golfo de California. *Ciencias Marinas*, 16(4). p. 1-28.

Hernández-Azcúnaga L. (2005). Dinámica del transporte de sedimentos como carga de fondo en el Alto Golfo de California. p. 21-23.

Herrera, J., Rodríguez, J., Coto, J., Salgado, V. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. Tecnología en Marcha. Vol. 26, núm. 1. p. 27-36.

Lantzy, R. J., Mackenzie, F. T. (1979). Atmospheric trace metals: Global cycles and assessment of man's impact. Geochim. Cosmochim. Acta, 43. p. 511-525.

Lavín, M. y Marinone, G. (2003). An overview of the Physical oceanography of the Gulf of California. En Velasco, O., Sheinbaum, J., Ochoa, J. Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. p. 173-204.

Long Edward R., Macdonald Donald D., Smith Sherri L., Calder Fred D. (1995). Incidence of Adverse Biological Effects Within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediments.

Lluch-Cota, S.-E. (2000). Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. Oceanologica acta 23(6):731-740.

Mariani, C., Pompêo, M. (2008). La calidad del sedimento: La contaminación por metales puede ser una amenaza para los seres vivos. Ciencia Hoy 18 (107). p. 48-53.

Martínez, G., Rodríguez, L., Senior, W. (2002). Especiación de Cd, Zn, Cr y Pb en núcleos de sedimentos de la Bahía de Bergantín, Estado Azoátegui, Venezuela. *Interciencia*, vol 18, núm. 4. p. 173-179.

Merrifield, M. y Winant, C. (1989). Shelf circulation in the Gulf of California: A description of the variability. *Journal of Geophysical Research*, 94. p. 18133-18160.

Monsiño, P. y García, E. (1974) "The climate of México". Chap 4 of climathes of North America. Elsevier Sci. p. 345-391.

Montaño, Y. (2003). Long term effects of the bed sediment transport on the sea-bottom morphodynamics of the Colorado River Delta, México. Doctoral Dissertación, Liege University. Liege. p 126.

Orozco-Barrenetxea, C., Pérez-Serrano, A, Gonzáles-Delgado, M. N., Rodríguez-Vidal F. J., Alfayate-Blanco J. M. (2011). Contaminación ambiental: una visión desde la química. España: International Thomson Editores Spain Paraninfo, S. A. p. 88-97.

Ponce-Vélez, G., Botello, A. V. (1992) Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica*, vol.1, no. 2. p. 1-10.

Ríos, K. (2012). Diversidad genética de la corvina golfina (*Cynoscion othonopterus*) en la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado.

Roden, G. I. (1964). Oceanographic aspects of Gulf of California. In V. A. T. H. y S. J. G. G., editors. *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol., 3 30-58 pp.

Rubalcaba, E. (2013). Distribución tridimensional de paralarvas del complejo *Sthenoteuthis oualaniensis*- *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) asociada a la dinámica de mesoescala (Golfo de California y Pacífico Tropical Transicional).

Sadiq, M. (1992) *Toxic metal chemistry in marine environments*. p. 390.

Santamaría-del-Angel, E., S. Álvarez-Borrego, R. Millán-Nuñez, y F. Müller-Karger. (1999). Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 49(1):207-212.

Santamaría-del-Angel, E., S. Álvarez-Borrego, y F. E. Müller-Karger. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 99(C4):7411-7421

Schiff, K.C., Weisberg, S.B., (1999). Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments. *Marine Environmental Research* 48. p. 161-176.

Segovia-Zavala, Delgadillo-Hinojosa, Lares-Reyes, Huerta-Díaz, Muñoz-Barbosa, Torres-Delgado. (2009). Atmospheric input and concentration of

dissolved iron in the surface layer of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 35 (1). p. 75-90.

Shumilin Evgueni N., Carriquiry Jose D., Camacho-Ibar Víctor F., Sapozhnikov Dmitry., Kalmykov Stepan, Sánchez Alberto, Aguiñiga-García Sergio, Sapozhnikow, Yuri A. (2002). Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California. *Marine Chemistry* 79. p. 113-131.

Sisternes Amparo (2013). El zinc como metal industrial. Recuperado de: <https://normasapa.com/como-citar-referenciar-paginas-web-con-normas-apa/>.

Thompson, R. (1968). Tidal flat sedimentation on the Colorado River delta, northwestern Gulf of California. *Mem. Geol. Soc. Amer.* 107. p 133.

Thomson, D., Findley, L., Kerstitch, A. (1979) Reef fishes of the sea of Cortez: The rocky-stone fishes of the Gulf of California. p. 302.

ANEXOS

Anexo 1. Valores de los porcentajes de tamaño de grano de 4, 16, 40 y 63 μm presentes en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

Estación	Fracción			
	4 μm	16 μm	40 μm	63 μm
AGS01	25.36	61.42	83.72	93.14
AGS03	0.32	1.34	2.28	4.23
AGS04	4.60	26.44	46.07	59.52
AGS05	29.00	68.53	79.15	85.89
AGS07	37.93	90.20	97.65	98.00
AGS08	25.83	61.45	78.82	90.63
AGS09	22.47	59.04	75.35	86.69
AGS11	11.95	42.82	59.82	76.74
AGS12	23.55	57.20	70.69	76.19
AGS13	0.79	3.52	4.59	5.53
AGS14	20.64	50.68	60.16	68.50
AGS15	7.20	42.83	63.98	74.79
AGS16	5.90	36.16	59.36	72.76
AGS17	2.81	6.61	7.96	9.19
AGS18	5.64	22.11	30.43	33.43
AGS19	17.96	42.68	55.75	65.32
AGS20	22.16	60.11	76.35	87.49
AGS21	19.00	44.99	52.83	59.04
AGS22	12.56	38.99	52.44	65.48
AGS23	23.40	62.40	71.61	77.31
AGS24	25.51	64.84	81.86	91.46
AGS25	30.03	77.65	89.92	94.51

Anexo 2. Valores de los porcentajes de carbono orgánico presentes en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

Estación	%CO	Estación	%CO
AGS01	1.66	AGS15	1.56
AGS03	0.37	AGS16	1.34
AGS04	1.25	AGS17	0.33
AGS05	1.36	AGS18	1.03
AGS07	1.48	AGS19	0.66
AGS08	1.43	AGS20	1.46
AGS09	1.32	AGS21	1.71
AGS11	1.38	AGS22	1.21
AGS12	0.94	AGS23	1.02
AGS13	0.37	AGS24	1.89
AGS14	1.34	AGS25	1.33

Anexo 3. Concentraciones de metales traza (Cu, Cr, Pb, Cd, Mn, Ni, Zn y Hg) en los sedimentos marinos superficiales del Alto Golfo de California.

Estación	Metales Trazas (µg/gd.w.)							
	Cu	Cr	Pb	Cd	Mn	Ni	Zn	Hg
AGS01	15.34	40.04	20.22	0.97	669.39	22.95	201.96	0.02
AGS03	3.70	7.55	6.92	0.39	81.45	4.53	81.49	0.01
AGS04	8.46	24.62	14.18	0.83	312.00	15.37	148.71	0.01
AGS05	12.55	41.22	21.03	1.01	541.63	22.10	220.45	0.02
AGS07	14.23	44.65	26.31	0.98	533.32	23.80	214.29	0.02
AGS08	12.92	40.26	19.49	0.94	499.42	21.17	190.95	0.02
AGS09	12.35	33.65	19.36	0.92	542.11	20.19	192.58	0.02
AGS11	10.59	28.76	16.31	0.86	460.50	17.73	183.89	0.01
AGS12	12.32	33.29	19.26	0.91	501.98	18.30	172.83	0.01
AGS13	3.60	10.59	6.95	0.43	62.69	4.79	98.49	0.01
AGS14	12.54	42.40	18.87	0.98	484.97	21.26	233.72	0.01
AGS15	8.37	22.92	14.83	0.77	371.86	15.42	143.28	0.01
AGS16	9.45	29.90	15.31	0.84	366.23	16.27	169.24	0.01
AGS17	4.64	10.90	10.70	0.50	156.65	6.42	97.73	0.01
AGS18	5.13	14.91	12.41	0.84	95.69	7.99	444.07	0.01
AGS19	9.57	22.12	16.14	0.61	290.34	13.51	127.15	0.01
AGS20	10.05	31.31	19.02	0.85	556.39	16.03	167.12	0.02
AGS21	8.47	21.67	15.98	0.82	300.95	14.19	281.91	0.01
AGS22	9.15	22.17	16.63	0.78	446.41	15.56	148.68	0.01
AGS23	10.72	32.37	20.14	0.84	406.51	18.59	150.32	0.02
AGS24	12.58	44.54	19.89	0.98	483.40	23.13	237.67	0.02
AGS25	11.26	34.72	21.79	0.81	430.45	19.76	173.42	0.02