

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**EVALUACIÓN DE ALGORITMOS BIO-ÓPTICOS PARA ESTIMAR  
PROPIEDADES ÓPTICAS INHERENTES EN EL ALTO GOLFO DE  
CALIFORNIA**

**TESIS**

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA  
OBTENER EL GRADO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

PRESENTA

**STELLA PATRICIA BETANCUR TURIZO**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. DICIEMBRE DE 2017.

## RESUMEN

El presente documento de tesis ha sido organizado de la siguiente manera: un capítulo introductorio que presenta al lector los principales antecedentes y principios teóricos la óptica hidrológica, los sensores remotos de color del océano aplicados al estudio de las propiedades ópticas inherentes en el medio marino, y la justificación que permitió el planteamiento de los objetivos propuestos. En el capítulo 1 se hace una descripción de la variabilidad espacial de los coeficientes de absorción del fitoplancton, detrito y CDOM en la zona norte del Golfo de California y se describen las particularidades ópticas de dos regiones bio-ópticas denominadas Alto Golfo de California y Norte del Golfo de California. En el capítulo 2, se hace una evaluación de los algoritmos bio-ópticos globales (GSM y GIOP) comparando sus resultados con una base de datos *in situ* de coeficientes de absorción del fitoplancton, detrito y CDOM colectada en la región norte del Golfo de California y se dan los elementos necesarios para la formulación de la propuesta de adaptación al algoritmo bio-óptico. En el capítulo 3 se desarrollan las propuestas de ajuste al algoritmo que estima el coeficiente de absorción de la materia orgánica detrítica y disuelta ( $a_{dg}(\lambda)$ ) y se propone la modificación del valor de la pendiente espectral del  $a_{dg}(\lambda)$  ( $S_{dg}(\lambda)$ ) usado como entrada para la estimación de dicho coeficiente. Finalmente, un capítulo de conclusiones que permitió integrar los principales resultados científicos obtenidos a lo largo de esta investigación doctoral.

**Palabras claves:** Absorción de luz, CDOM, detrito, color del océano, algoritmos semi-analíticos, Golfo de California

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS  
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

EVALUACIÓN DE ALGORITMOS BIO-ÓPTICOS PARA ESTIMAR  
PROPIEDADES ÓPTICAS INHERENTES EN EL ALTO GOLFO DE  
CALIFORNIA

TESIS

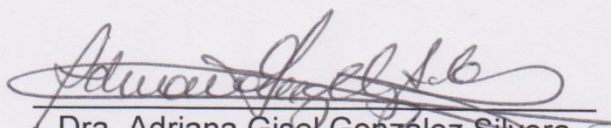
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

Presenta

**STELLA PATRICIA BETANCUR TURIZO**

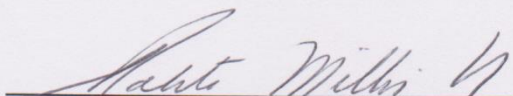
Aprobada por:



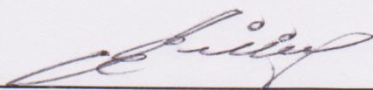
Dra. Adriana Gisel González Silvera  
Director de tesis



Dr. Eduardo Santamaría del Ángel  
Sinodal



Dr. Roberto Millán Núñez  
Sinodal



Dr. Eduardo Millán Núñez  
Sinodal



Dr. Héctor García Nava  
Sinodal

## DEDICATORIA

*Esta tesis está dedicada a mis padres, quienes nunca han dejado de creer que tengo una meta especial que cumplir en este planeta!*

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy Gracias a mi familia, en especial a mis papás por enseñarme el valor de la constancia y determinación, sin estas cualidades no hubiese podido cumplir con los objetivos trazados, A mis hermanos Diana María y Ricardo Andrés por alentarme y recordarme que soy una “berraquita”. A mi tía Edelcy y mi abuelita Lilia por su amor incondicional. Todos ustedes a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado, dándome el apoyo necesario para cada reto presentado.

Agradezco enormemente a todo mi comité de tesis conformado la Dra. Adriana González Silvera, directora de tesis, y sinodales, Dr. Eduardo Santamaría-del-Ángel, Dr. Roberto Millán Núñez, Dr. Eduardo Millán Núñez y Dr. Héctor García Nava. Cada uno fue parte fundamental en mi formación doctoral. Percibí de ustedes, siempre una total disposición y sus consejos y sugerencias estuvieron cargados del desinterés propio de un maestro. Gracias por todo el tiempo que invirtieron en las correcciones realizadas a este documento de tesis.

Particularmente, agradezco a mi directora, Dra. Adriana González Silvera, porque ante todo, fue mi amiga y conciencia, sus sabios consejos me mantuvieron alineada con mis objetivos primarios y con la meta trazada de acuerdo a los limitados tiempos de este programa de doctorado.

Asimismo, agradezco a todos los maestros de este posgrado, en especial a la Dra. Adriana González Silvera por sumergirme en el fascinante mundo de la óptica hidrológica, al Dr. Eduardo Santamaría por sus sabios consejos profesionales, su asesoría en el manejo estadísticos de los datos analizados y confianza brindada, y al Dr. Roberto Millán Núñez por ser ese maestro que todos admiramos y deseamos emular, sus consejos siempre fueron acertados en cada fase de mi proceso académico y personal.

Agradezco al Dr. Adán Mejía Trejo del IIO, por su amistad y total apoyo en todas y cada una de las dificultades que tuve para programar, graficar, analizar y procesar diferentes tipos de datos. Gracias infinitas por estar en tan diversos y difíciles momentos de mi vida en Ensenada.

Agradezco también a la Dra. Jing Tan de Scripps, UCSD, por recibirme y asesorarme en la programación requerida para el desarrollo de los capítulos 2 y 3 del presente documento. Su contribución será fundamental para el sometimiento de los artículos resultantes de los Capítulos 2 y 3 de ésta tesis.

Agradezco a Vane, Mau y técnicos del laboratorio de Química Analítica del Instituto de Investigaciones Oceanológicas – IIO de la UABC, por el apoyo prestado durante las etapas de preparación del material utilizado para la toma de muestras bio-ópticas.

A mis compañeros de cubículo pasados y presentes, Natalia, Yolo, Josué, Maite, Alejandra, Cristina, Antonio, Alfredo, Marthica, Catalina, Daniela, Diego, Liz, Eddi, por brindarme su amistad y compañerismo a lo largo de todo este tiempo en México, me hicieron sentir en casa y gracias a ustedes tuve momentos inolvidables que hicieron que mi estancia en Ensenada fuera más llevadera.

A mi amiga y compatriota Mary Luz, porque en la etapa final de mis estudios, conté con su amistad, oído y apoyo para los momentos difíciles que se presentan en este tipo de procesos, sus palabras no me dejaron olvidar que todo ocurre por una razón y que las dificultades nos hacen más fuertes.

A mis amigos de siempre, Henry (q.e.p.d.), Moisés, Gisela, Gustavo, José Luis, Anyelita, Claudilla, Claudia, que independiente de la distancia siempre estuvieron conmigo apoyándome incondicionalmente, gracias por su confianza y amistad!

Agradezco al proyecto SIMAC-CONACYT, SIMAC-2000107017; CICESE: Ecological monitoring of the Upper Gulf of California” (PANGAS-Packard Foundation); IPN-CICIMAR: SIP 1721, 20160514-CONACYT: 236864. Los cruceros desarrollados en el marco del proyecto fueron apoyados por la Armada de México (Secretaría de Marina) y R/V Francisco de Ulloa (CICESE).

Gracias a la información tomada durante los años 2008 a 2013, pude contar con la información requerida para el desarrollo de mi tesis doctoral.

Así mismo, agradezco a la Dra. Laura Sánchez y Eduardo Santamaría-del-Ángel, por financiar y permitirme participar en las campañas oceanográficas: AH1506-005 (Glider-GOLCA) realizada del 02 al 16 de junio de 2015, AH1603-017 (Marias1603) realizada del 1 al 11 de marzo de 2016, ambas en el R/V Alpha Hélix. Agradezco a la tripulación del buque y en particular al Dr. Victor Manuel Godínez Sandoval, Jefe científico de estas campañas por su apoyo, asesoría y amistad. Mi participación en cada una fue fundamental para mi fundamentación experimental y fortalecimiento de capacidades requeridas para el desarrollo de mi investigación doctoral.

Agradezco al Dr. Eduardo Santamaría-del-Ángel por financiar y permitirme participar en el crucero desarrollado en el buque de la Armada de México ARM "Río Tecolutla" (BI-08), entre el 20 de julio al 05 de agosto del año 2016 en la región norte del Golfo de California. En particular agradezco a la tripulación del buque, por su amable disposición y total apoyo para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Los datos tomados fueron usados en el capítulo 3 de la presente tesis doctoral, en el cual se hizo la validación del algoritmo bio-óptico que estima el coeficiente de absorción de la materia orgánica detrítica y disuelta ( $a_{dg}(\lambda)$ ).

Agradezco al CONACyT por el financiamiento otorgado (No. 384224) a través del Programa de Becas Nacionales (convocatoria 2014-2), sin el cual no hubiese podido desarrollar mis estudios doctorales en el programa en Ciencias en Oceanografía Costera de la UABC.

Agradezco al programa de doctorado en Ciencias en Oceanografía Costera de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC, por brindarme la oportunidad de desarrollar mis estudios doctorales.

Mis agradecimientos especiales también para la secretaria del posgrado, Angélica Arce y al intendente Esteban Flórez por su total disposición, buen trato y apoyo en todo momento. Mis agradecimientos también para el administrador de la Facultad de Ciencias Marina, señor Enrique Pérez Moya por su apoyo y gestión requeridos para la recepción de la beca otorgada por el proyecto ANTARES (IAI CRN393), que me permitió permanecer durante el periodo 2017-2 no cubiertos por el programa de becas de CONACYT, sin este apoyo no hubiera podido culminar mis compromisos en Ensenada.

## I. INDICE

	Página
Índice General .....	I
Lista de Tablas .....	III
Lista Figuras .....	IV
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	9
• Objetivo General	
• Objetivos Específicos	
CAPÍTULO 1. Variabilidad de los coeficientes de absorción de la luz por el fitoplancton, partículas no algales y materia orgánica disuelta coloreada en el norte del Golfo de California .....	10
CAPITULO 2: Evaluación de productos ( $a_{ph}(\lambda)$ , $a_d(\lambda)$ y $a_{cdom}(\lambda)$ ) derivados de algoritmos bio-ópticos semi-empíricos con datos <i>in situ</i> de aguas ópticamente complejas .....	48
CAPITULO 3. Adaptación del algoritmo bio-óptico GIOP y GSM en su componente de estimación del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) en aguas ópticamente complejas .....	81
CONCLUSIONES GENERALES.....	107
LITERATURA GENERAL CITADA .....	110

**ANEXOS:**

ANEXO 1. Artículo aceptado en la revista Open Journal of Marine Science: Betancur-Turizo, S.P., González-Silvera, A., Santamaría-Del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., Millán-Núñez, E., García-Nava, H., Godínez, V.M. and Sánchez-Velasco, L. (2017) Variability in the Light Absorption Coefficient by Phytoplankton, Non-Algal Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Northern Gulf of California. ....	117
ANEXO 2. Base de datos utilizada para la evaluación del coeficiente de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) <i>in situ</i> y satelital a 412, 443, 488, 555 y 678 nm .....	136
ANEXO 3. Base de datos utilizada para la evaluación del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) <i>in situ</i> y satelital a 412, 443, 488, 555 y 678 nm .....	141

## II. LISTA DE TABLAS

**Capítulo 1. Tabla I.** Número de datos (n), intervalo y media  $\pm$  desviación estándar (SD) de la primera profundidad óptica (1OD),  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$ ,  $a_{CDOM}(440)$  y Chla *in situ* (mg/m<sup>3</sup>) para las regiones bio-ópticas definidas para cada crucero.

**Capítulo 1. Tabla II.** Pigmentos fitoplanctónicos registrados en muestras del presente estudio, útiles como marcadores de diagnóstico (adaptado de Jeffrey *et al.*, 1997).

**Capítulo 1. Tabla III.** Promedios de la razón B/R por región y periodo de muestreo y la proporción de tamaño del fitoplancton determinado con base en la composición de pigmentos (Uitz *et al.*, 2006).

**Capítulo 2. Tabla IV.** Información general de base de datos *in situ* analizada y días efectivos de monitoreo usados para la extracción de imágenes L1A.

**Capítulo 2. Tabla V.** Variables de salida de los modelos GIOP y GSM.

**Capítulo 2. Tabla VI.** Banderas de calidad para imágenes Nivel-2 utilizadas para determinar los píxeles que se excluirán del análisis.

**Capítulo 2. Tabla VII.** Configuración base del modelo GIOP (datos tomados de Werdell *et al.*, 2013).

**Capítulo 2. Tabla VIII.** Estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $a_{ph}(\lambda)$  *in situ* y derivados de los modelos GIOP y GSM. En sombreado gris se resaltan los resultados de los estadísticos usados para todos los análisis aplicados y corresponden al total luego de la exclusión de datos extremos.

**Capítulo 2. Tabla IX.** Estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $adg(\lambda)$  *in situ* y derivados de los modelos GIOP y GSM. En sombreado gris se resaltan los resultados de los estadísticos usados para todos los análisis aplicados y corresponden al total luego de la exclusión de datos extremos.

**Capítulo 3. Tabla X.** Comparación entre los estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $adg(\lambda)$  *in situ* y las salidas de los modelos en su configuración predeterminada (GIOP, GSM), y salidas luego del ajuste por valores de Sdg *in situ* (GIOP\*, GSM\*).

**Capítulo 3. Tabla XI.** Comparación entre los estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $adg(\lambda)$  *in situ* correspondiente a las dos bases de datos analizadas (BD 01: Cuatro cruceros de 2011 a 2013 y BD 02: Crucero de julio de 2016) y las salidas de los modelos en su configuración predeterminada (GIOP, Sdg = 0.018 nm<sup>-1</sup>) y configuración de Sdg = 0.012 nm<sup>-1</sup>. Se resalta en rojo y negro el mejor resultado de cada estadístico aplicado.

### III. LISTA DE FIGURAS

**Introducción. Figura 1.** Principales bases de datos globales usadas para la validación y parametrización de algoritmos de color del océano. (Tomado de Valente *et al.*, 2016).

**Capítulo 1. Figura 2.** Batimetría del área de estudio con las provincias oceanográficas UGC y NGC. En el recuadro se presentan las Provincias oceanográficas definidas por Lavín y Marinone (2003).

**Capítulo 1. Figura 3.** Retícula de estaciones de cada crucero. En (a) se muestra las estaciones del crucero de Junio de 2008, en (b) Junio de 2010, en (c) Marzo de 2011, en (d) Agosto de 2012, en (e) Septiembre de 2012 y en (f) Junio de 2013.

**Capítulo 1. Figura 4.** Regiones bio-ópticas definidas de acuerdo a la 1OD para (a) Junio de 2008, Junio de 2010 y Junio de 2013, (b) Marzo de 2011, y (c) Agosto y Septiembre de 2012. Las líneas punteadas indican la posición de la zona de transición. Como referencia se indica la frontera entre las regiones UGC y NGC (línea gris) establecida por Lavín y Marinone (2003).

**Capítulo 1. Figura 5.** Valores promedio, mínimos y máximos de (a)  $a_{ph}$ , (b)  $a_d$  y (c)  $a_{CDOM}$  para en este y otros estudios (datos tomados de Tilstone *et al.*, 2012). El asterisco en el eje-y indica que los valores pueden ser 440, 442 o 443 nm dependiendo de la base de datos. Para este estudio los datos son para 440 nm.

**Capítulo 1. Figura 6.** Las barras verticales representan el porcentaje de contribución de cada pigmento por estación (eje izquierdo); los colores corresponden a los pigmentos enumerados en la leyenda. Los triángulos negros corresponden a la concentración de Chla ( $mg/m^3$ ) (eje derecho). Las líneas negras punteadas delimitan las regiones bio-ópticas (UGC, NGC y zona de transición). Se muestran gráficas separadas para (a) junio de 2008, (b) junio de 2010, (c) marzo de 2011, (d), agosto de 2012 y (e) junio de 2013.

**Capítulo 1. Figura 7.** Fracciones de tamaño del fitoplancton determinadas por la razón B/R y por pigmentos fotosintéticos. Los valores promedios de la razón B/R están representados por los puntos negros y las líneas rojas solidas delimitan las categorías micro (razón B/R <2.5), nano (razón B/R entre 2.5 y 3.0) y picofitoplancton (razón B/R >3.0). Las barras verticales representan el porcentaje de cada fracción de tamaño del fitoplancton por estación (eje a la izquierda) y los colores corresponden a los tamaños indicados en la leyenda para los cruceros de junio de 2008 (a), junio de 2010 (b), marzo de 2011 (c), agosto 2012 y junio de 2013 (d). Las líneas negras punteadas separan las tres regiones bio-ópticas (UGC, NGC y zona de Transición).

**Capítulo 2. Figura 8.** Contribución de  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  a la absorción de la luz en marzo de 2011, agosto y septiembre de 2012, y junio de 2013 para (a) UGC, (b) zona de transición y (c) NGC; y contribución a la absorción de la luz por  $a_{ph}(440)$  y  $a_d(440)$  en todos los cruceros para (d) UGC, (e) zona de transición y (f) NGC.

**Capítulo 2. Figura 9.** Distribución de estaciones correspondientes a los cruceros de Junio 2008, Junio 2010, Marzo 2011, Agosto 2012, Septiembre 2012 y Junio de 2013. La línea negra punteada representa la posición intermedia de la zona de transición que separa las regiones bio-ópticas UGC y NGC.

**Capítulo 2. Figura 10.** Análisis comparativo entre  $a_{ph}(412, 443 \text{ y } 488)$  *in situ* y satelital para los modelos GIOP y GSM, con estadísticos RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia. Las áreas rojas marcan puntos extremos retirados de los cálculos estadísticos. Los colores verde y azul corresponden a las regiones UGC y NGC respectivamente.

**Capítulo 2. Figura 11.** Diagrama de Taylor en el que se ilustra el rendimiento relativo de los modelos GIOP y GSM para reproducir el coeficiente de absorción  $a_{ph}(412, 443 \text{ y } 488 \text{ nm})$ . Cada diagrama representa el análisis aplicado a, (a) todos los datos y por región bio-óptica (b) UGC y (c) NGC. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson y Ref. indica una reproducción perfecta del modelo.

**Capítulo 2. Figura 12.** Análisis comparativo entre  $a_{dg}(412, 443 \text{ y } 488)$  *in situ* y satelital para los modelos GIOP y GSM, con estadísticos RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia. Las áreas rojas marcan puntos extremos retirados de los cálculos estadísticos. Los colores verde y azul corresponden a las regiones UGC y NGC respectivamente.

**Capítulo 2. Figura 13.** Diagrama de Taylor en el que se ilustra el rendimiento relativo de los modelos GIOP y GSM para reproducir el coeficiente de absorción  $a_{dg}(412, 443 \text{ y } 488 \text{ nm})$ . Cada diagrama representa el análisis aplicado a, (a) todo los datos y por región bio-óptica (b) UGC y (c) NGC. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson.

**Capítulo 3. Figura 14.** Espectros promedio del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) calculados para cada crucero en UGC (a, b, c y d) y NGC (f, g y h), así como el promedio total de  $a_{dg}(\lambda)$  para UGC (e) y para NGC (i). El diagrama de torta al interior de los espectros representa la contribución porcentual del detrito (ad) y el CDOM (ag) al  $a_{dg}(\lambda)$ . Nota: El crucero de Agosto de 2012 estuvo representado por una única estación, por ello no fue incluido dentro de la figura.

**Capítulo 3. Figura 15.** Variabilidad entre los valores  $S_{dg}$  *in situ* y los valores por defecto  $S_{dg}$  usados por los modelos GIOP ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ , línea negra punteada) y GSM ( $S_{dg} = 0.02061 \text{ nm}^{-1}$ , línea gris punteada) separados para cada crucero por líneas grises verticales.

**Capítulo 3. Figura 16.** Comando de linux para generar archivos .L2 y modificar las entradas de los algoritmos GIOP y GSM que estiman el coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$ . Resaltado en amarillo están las salidas de cada modelo, para GSM solo se modifica `_giop` por `_gsm`.

**Capítulo 3. Figura 17.** Distribución de estaciones del crucero desarrollado del 20 de julio a 5 de agosto de 2016 que contaron con información *in situ* del coeficiente  $a_{dg}(\lambda)$  en la zona de estudio. Los puntos negros representan las estaciones en las cuales se midió *in situ* el  $a_{dg}(\lambda)$ , los círculos azules corresponden a las estaciones emparejadas con los datos satelitales y los puntos rojos corresponden a estaciones con datos extremos que no pudieron ser reproducidos por el modelo. La línea negra discontinua representa la posición de la zona de transición determinada a partir de la primera profundidad óptica y separa las regiones bio-ópticas UGC y NGC.

**Capítulo 3. Figura 18.** Salidas del modelo GIOP para el coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) estimados a partir de 21 valores diferentes de  $S_{dg}$  (0.010 a  $0.030 \text{ nm}^{-1}$ ). Las líneas negras punteadas representan el valor mínimo y máximo del  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ*, la línea roja punteada es la moda de los datos *in situ* y el sombreado amarillo es la moda de los datos del modelo estimados con una  $S_{dg} = 0.012$  y  $0.018 \text{ nm}^{-1}$ .

**Capítulo 3. Figura 19.** Salidas del modelo GSM para el coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) estimados a partir de 21 valores diferentes de  $S_{dg}$  (0.010 a  $0.030 \text{ nm}^{-1}$ ). Las líneas negras punteadas representan el valor mínimo y máximo del  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ*, la línea roja punteada es la moda de los datos *in situ* y el sombreado amarillo es la moda de los datos del modelo estimados con una  $S_{dg} = 0.021 \text{ nm}^{-1}$ .

**Capítulo 3. Figura 20.** Análisis comparativo de los valores *in situ* de  $a_{dg}(412, 443 \text{ y } 488)$  con las salidas de los modelos GIOP y GSM generadas a partir de los respectivos  $S_{dg} = \textit{in situ}$ . Los estadísticos RMSE, BIAS, R2 y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia. Los colores verde y azul corresponden a las regiones UGC y NGC respectivamente. El rendimiento relativo de cada modelo fue evaluado por los diagramas de Taylor de acuerdo las regiones (m) UGC y (n) NGC. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson.

**Capítulo 3. Figura 21.** Variabilidad de la  $S_{dg}$  *in situ* correspondiente al (a) crucero de julio de 2016, y los histogramas de frecuencia de la  $S_{dg}$  en las regiones (b) UGC y (b) NGC. Se incluyen las referencias de los  $S_{dg}$  usados por los modelos GIOP ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ , línea negra punteada) y GSM ( $S_{dg} = 0.02061 \text{ nm}^{-1}$ , línea gris punteada) así como la mayor frecuencia de valores de  $S_{dg}$  en la UGC (línea azul punteado).

**Capítulo 3. Figura 22.** Análisis comparativo de los valores *in situ* de  $a_{dg}$ (412, 443 y 488) con las tres diferentes salidas del modelo GIOP: (a, d y g) modelo en su configuración predeterminada ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ), (b, e y h) modelo en su configuración modificada con valores de  $S_{dg} = \textit{in situ}$ , y (c, f e i) modelo en su configuración modificada con valores de  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$ . Los datos corresponden a las estaciones de la UGC en los cuatro cruces desarrollados entre 2011 y 2013. Los estadísticos RMSE, BIAS, R2 y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia.

**Capítulo 3. Figura 23.** Diagrama de Taylor en el que se ilustra el rendimiento relativo del modelo GIOP en sus configuraciones predeterminada ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ) y ajustada ( $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$ ), para reproducir el coeficiente de absorción  $a_{dg}$  (412, 443 y 488 nm). Cada diagrama representa el análisis aplicado a (a) la base de datos de los cruces desarrollados de 2011 a 2013 y (b) base de datos del crucero de julio de 2016. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson.

## INTRODUCCIÓN

Los principales productores primarios del océano están representados por microscópicas plantas llamadas fitoplancton que requieren de energía en forma de radiación solar, carbono inorgánico en forma de CO<sub>2</sub>, nutrientes y agua, para poder crecer (Kirk, 1994). Estos microorganismos son un componente fundamental de la naturaleza y son reconocidos como una variable climática esencial en el plan de implementación del Sistema de Observación del Clima Global (GCOS, 2011).

El fitoplancton absorbe la energía lumínica proveniente del sol para su proceso fotosintético, convirtiendo la luz en energía química y transformando el carbono inorgánico a su forma orgánica (Brewin *et al.*, 2015). El comportamiento de la luz en un medio acuático, es de especial interés para la comunidad científica, denominándola óptica hidrológica (Kirk, 1994). La física marina, estudia la radiación electromagnética en su paso por un fluido líquido como el océano. Este medio, además de la misma agua pura, contiene una diversidad de componentes orgánicos e inorgánicos, disueltos y particulados, que alteran la calidad espectral del campo de luz bajo el agua, influyendo en la fotosíntesis y calentamiento de la capa fótica (Platt y Sathyendranath, 2014; Brewin *et al.*, 2015).

Es así como los constituyentes del agua de mar, pueden modificar los espectros de absorción y dispersión que sufre la luz al ponerse en contacto con una partícula, y que según Kirk (1994), son las dos cosas que le pueden pasar a un fotón cuando se pone en contacto con el agua: puede ser absorbido o puede ser esparcido.

Las variaciones en las propiedades ópticas de las aguas oceánicas, como son las características de esparcimiento y absorción de la luz por el agua y sus componentes (material disuelto y en suspensión), están directamente relacionadas a cambios en la concentración, distribución de tamaño y composición del material particulado y/o del material disuelto, lo que provee la posibilidad de cuantificar otras variables como carbón particulado (Balch *et al.*, 2005; Stramski *et al.*, 2007) desarrollar otras actividades relacionadas con el monitoreo de la calidad del agua (Bisset *et al.*, 2005) o el seguimiento de floraciones nocivas de fitoplancton (Cannizzaro *et al.*, 2008).

Dentro de la administración de los océanos se ha establecido en consenso global, que el manejo ambiental debe tener como base al ecosistema sin comprometer su integralidad, y en lugar de trabajar sobre conceptos subjetivos y difíciles de cuantificar como la salud, el vigor y la resiliencia del ecosistema, se deben desarrollar indicadores ecológicos que puedan ser aplicados operacionalmente para detectar cambios que puedan ocurrir en respuesta a perturbaciones ambientales (Platt y Sathyendranath, 2014). Los sensores

remotos de color del océano han presentado información de procesos y estructuras oceanográficas a diferentes escalas en los océanos, explicando así una serie de procesos biológicos y ecológicos (McClain *et al.*, 1998), por lo que se puede establecer que esta herramienta cumple con muchos de los requisitos de un conjunto ideal de indicadores ecológicos (repetibilidad, bajo costo, aplicable a una variedad de escalas, medición rápida, series de tiempo largas, estandarizados) (Platt y Sathyendranath, 2014).

Las propiedades ópticas del agua de mar ejercen una influencia importante en la función de los ecosistemas marinos, por tanto, son un indicador ecológico importante en el estudio de regiones oceánicas y costeras, dado sus implicaciones en un amplio espectro de escenarios como el desarrollo de actividades deportivas o recreativas (Brewin *et al.*, 2015), la disponibilidad de la radiación solar para el crecimiento del fitoplancton (Capuzzo *et al.*, 2013), la efectividad de la predación visual (Haraldsson *et al.*, 2012) o la cinética de los procesos fotoquímicos (Siegel *et al.*, 2013).

Dentro de las propiedades ópticas, la absorción de luz en el agua se ha identificado como una propiedad determinante en la identificación de aquellos componentes del agua que contribuyen con el proceso de absorción. Para su estudio, tanto la absorción como la propiedad de esparcimiento se especifican en términos del coeficiente de absorción ( $a(\lambda)$ ) y del coeficiente de esparcimiento ( $b(\lambda)$ ) y se les conoce como Propiedades Ópticas Inherentes

(POIs); cuyo término inherente, obedece a la dependencia que la magnitud y variación de la luz sufre por los componentes que están en el medio acuático y no por la geometría de incidencia de rayo de luz (Kirk, 1994).

La estimación de las POIs por medio de sensores remotos de color del océano, obedecer a principios fundamentados en la reflectancia espectral medida remotamente ( $R_{rs}(\lambda)$ ), la cual está directamente relacionada a la Reflectancia. Esta se define como la cantidad relativa de radiación que está emergiendo del agua a diferentes longitudes de onda y se expresa como:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)}$$

donde,  $L_w(\lambda)$  es la radiancia emergente del agua y,  $E_d(\lambda)$  es la irradiancia incidente proveniente del sol.

De igual forma, la  $R_{rs}(\lambda)$  puede expresarse en función de los coeficientes de absorción ( $a(\lambda)$ ) y retroesparcimiento ( $b_b(\lambda)$ ) de la luz por los componentes del agua de mar (Morel y Maritorena, 2001), según la siguiente ecuación:

$$R_{rs}(\lambda) = g \frac{b(\lambda)}{a(\lambda)}$$

El factor  $g$  varía con las condiciones de iluminación en la superficie (esencialmente con la posición del Sol en cielo despejado). Dado un campo radiante incidente,  $g$  también depende de las propiedades ópticas inherentes de

la masa de agua y por lo tanto de la concentración de clorofila y longitud de onda (Morel y Maritorena, 2001).

Dado a las aproximaciones que permiten determinar los constituyentes oceánicos, se ha encontrado que se puede predecir  $R_{rs}(\lambda)$  a partir de la descripción de las características de absorción y esparcimiento de los componentes del agua. De igual forma, el problema inverso ha sido documentado, es decir, los parámetros que describen las partículas y el material disuelto ( $a(\lambda)$  y  $b_b(\lambda)$ ) pueden ser determinados, a partir del conocimiento de  $R_{rs}(\lambda)$  (IOCCG, 2006). En otras palabras, a partir de las POIs se puede predecir  $R_{rs}(\lambda)$ , o a partir de  $R_{rs}(\lambda)$  se pueden determinar las POIs.

La aproximación teórica que deriva las POIs de la  $R_{rs}(\lambda)$  puede mejorar el rendimiento de los algoritmos en aguas ópticamente complejas, y una variedad de aproximaciones semi-analíticas se han desarrollado en ese sentido (Brewin *et al.*, 2015). Un análisis objetivo de estos modelos fue realizado por Brewin *et al.* (2015), mediante la comparación de once modelos semi-analíticos que varían en su uso por las soluciones analíticas y empíricas empleadas para resolver las POIs. Los autores establecen que para el desarrollo de este tipo de inter-comparaciones, sería ideal el uso de una base de datos totalmente independiente a cualquier dato utilizado en la parametrización original de los modelos, así entonces, cuando esta condición no se cumple se hace muy difícil

evaluar el impacto que el conjunto de datos utilizado pueda tener sobre el rendimiento de cada algoritmo (Brewin *et al.*, 2015). Estas bases de datos globales como NOMAD (por sus siglas en inglés, NASA bio-Optical Marine Algorithm Data set) (Figura 1) provienen principalmente de aguas oceánicas ópticamente claras (Caso I), que no necesariamente responden a las condiciones locales de ciertas regiones de estudio, en especial zonas costeras influenciadas por altas concentraciones de sedimento, materia orgánica particulada y disuelta (Aguas Caso II) y por tanto, las validaciones a los modelos ameritan estudios que contemplen bases de datos provenientes de aguas ópticamente complejas.

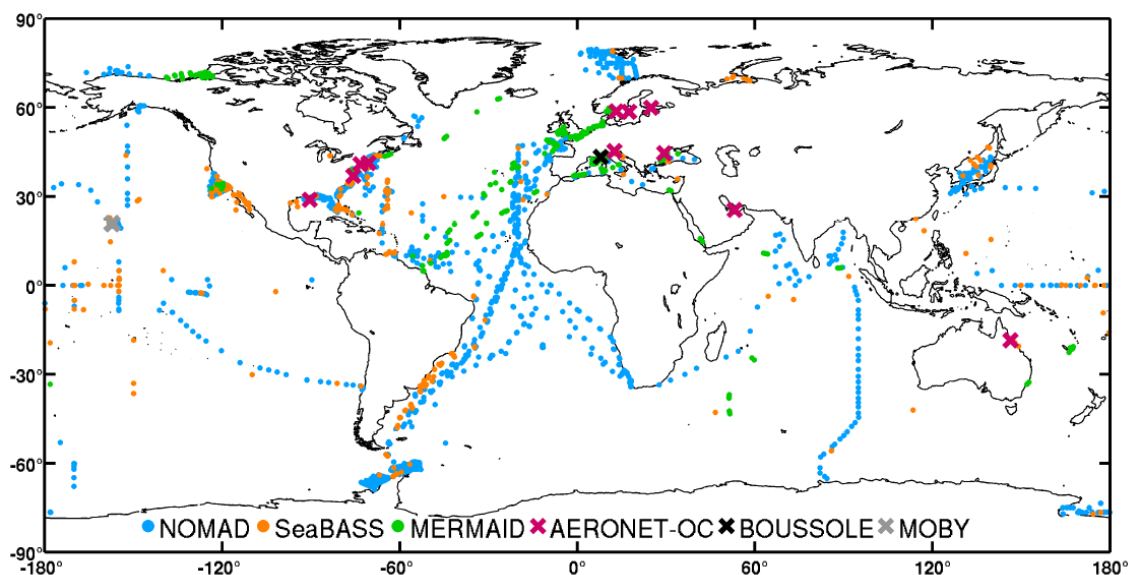


Figura 1. Principales bases de datos globales usadas para la validación y parametrización de algoritmos de color del océano. (tomado de Valente *et al.*, 2016).

Un ejemplo de zonas que describen características de aguas ópticamente complejas es el Golfo de California, en especial desde la región de las Grandes Islas hacia el norte (Golfo Norte, GN), donde se encuentran aguas Caso I, Caso II, y de esta última se puede diferenciar aquellas dominadas por material terrígeno en suspensión y/o materia orgánica disuelta (Pegau *et al.*, 1999; Bastidas-Salamanca, 2010). El trabajo de Bastidas-Salamanca (2010) detectó la necesidad de realizar ajustes regionales a los algoritmos globales para medir la Clorofila *a*, dada la complejidad óptica de estas aguas. Una evaluación de algunos algoritmos bio-ópticos se realizó recientemente por Alvarado-Graef (2014), en donde se identificó la necesidad de hacer adaptaciones a los métodos de optimización que permiten determinar diferentes variables del modelo analizado (GSM). Finalmente, se debe considerar que medir las POIs a partir de datos de sensores remotos, es una herramienta de gran importancia para diferentes estudios oceanográficos, una vez que estas se puedan relacionar de forma directa o indirecta con diferentes procesos biológicos y biogeoquímicos (Gould y Arnone, 1997; Bissett *et al.*, 2001, Coble *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2004, 2005).

## **HIPÓTESIS**

Debido a la alta variabilidad natural de las Propiedades Ópticas Inherentes (POIs) en aguas ópticamente complejas, los algoritmos semi-analíticos existentes sobreestiman o subestiman los datos *in situ*, por tanto, se requiere un

ajuste de los algoritmos que permita usar los sensores remotos de color del océano como una herramienta para el monitoreo sinóptico de dichas propiedades.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades ópticas inherentes a partir de mediciones *in situ* y algoritmos bio-ópticos de color del océano, que permitan obtener una evaluación espacial y temporal más precisa de las características de absorción de la luz por las partículas y material disuelto.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la variabilidad de los coeficientes de absorción del fitoplancton, detrito y materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) en la parte norte del Golfo de California.
- Evaluar los algoritmos bio-ópticos globales GIOP y GSM comparando sus resultados a datos *in situ*.
- Adaptar los algoritmos bio-ópticos GIOP y GSM para medir las propiedades ópticas inherentes (Coeficiente de absorción por las partículas (fitoplancton y detrito) y materia orgánica disuelta (CDOM)) en aguas ópticamente complejas y validarlo con datos *in situ* no utilizados en la evaluación del modelo.

## **CAPITULO 1. Variabilidad de los coeficientes de absorción de la luz por el fitoplancton, partículas no algales y materia orgánica disuelta coloreada en el norte del Golfo de California**

**Artículo aceptado en la revista Open Journal of Marine Science: Betancur-Turizo, S.P., González-Silvera, A., Santamaría-Del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., Millán-Núñez, E., García-Nava, H., Godínez, V.M. and Sánchez-Velasco, L. (2017) Variability in the Light Absorption Coefficient by Phytoplankton, Non-Algal Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Northern Gulf of California. Open Journal of Marine Science (ANEXO 1).**

### **RESUMEN**

La variabilidad de las propiedades ópticas del norte del Golfo de California (México) se analizó por primera vez con base en seis cruceros realizados de primavera a verano (marzo a septiembre) entre 2008 y 2013. Los cambios observados en la absorción por tres componentes del agua de mar (fitoplancton, detrito y materia orgánica disuelta cromofórica o CDOM) se analizaron en relación con los cambios en las regiones bio-ópticas y la composición de la comunidad de fitoplancton (determinada a partir de pigmentos de fitoplancton). Se identificaron dos regiones con características bio-ópticas únicas separadas por una estrecha zona de transición: el Alto Golfo de California (UGC) y el Norte del Golfo de California (NGC). A pesar de los cambios temporales en su distribución espacial, las regiones mantuvieron una característica particular. La UGC se caracterizó por una Chl $a$  promedio de 1.78 mg/m $^3$ , el predominio del microfitoplancton (diatomeas y dinoflagelados) y una mayor contribución del detrito a la absorción total de la luz. La NGC se caracterizó por una Chl $a$  promedio de 0.7 mg/m $^3$  y el predominio de picofitoplancton, caracterizado por el predominio de zeaxantina (pigmento marcador para cianobacterias) y/o clorofila  $b$  (pigmento marcador para algas verdes), junto con un dominio compartido del CDOM y el fitoplancton a la absorción de la luz. Los resultados indican que las aguas Caso II pueden ser muy diferentes cuando se evalúa la contribución individual a la absorción de luz total del fitoplancton, detrito y CDOM, lo que debe tenerse en cuenta para la selección de modelos bio-ópticos para cada región específica, lo que también puede ayudar a una mejor definición de las incertidumbres relacionadas.

**Palabras clave:** absorción de la luz; fitoplancton; CDOM; detrito; color del océano; Golfo de California.

## 1. Introducción

El estudio de las propiedades ópticas del océano ha cobrado especial interés en las últimas décadas, y como resultado se han desarrollado herramientas tecnológicas para estimar dichas propiedades mediante el uso de los sensores remotos (Garver y Siegel, 1997; Lee *et al.*, 1998; Carder *et al.*, 1999). Sin embargo, estas herramientas han sido validadas para aguas Caso I (Morel y Prieur, 1977) que no representan las condiciones de las zonas costeras caracterizadas por ser ópticamente complejas (Caso II) y dentro de las cuales, se concentran las principales actividades económicas y productivas de muchos países. Así, al estudiar la complejidad óptica de estas zonas, nos debemos preguntar: ¿Qué sabemos de las propiedades ópticas de los constituyentes importantes del agua de mar, y sobretodo cómo podemos cuantificarlos? (IOCCG, 2000). Sabemos que las zonas costeras reciben aportes de materiales particulados y disueltos de diversas fuentes, y sus propiedades ópticas pueden ser determinadas mediante sensores remotos. Sin embargo, la calidad y confiabilidad en los datos obtenidos requieren una caracterización precisa de dichas propiedades (Ferreira *et al.*, 2014). Se han propuesto modelos bio-ópticos (Lee *et al.*, 2002; Maritorena *et al.*, 2002; Franz y Werdell, 2010; Werdell *et al.*, 2013) para estimar estas propiedades ópticas pero estos no siempre tienen una buena precisión, en particular en las zonas costeras, ya que las propiedades ópticas de estos cuerpos de agua no son dominadas solamente por el fitoplancton (Siegel *et al.*, 2002), excepto cuando se presentan eventos de alta intensidad como los florecimientos fitoplanctónicos.

Modelos bio-ópticos discriminan los constituyentes del océano abierto en dos categorías principales: el fitoplancton y la materia detrítica, que incluye la señal combinada de la Materia Orgánica Disuelta Cromofórica (CDOM) y las partículas no-algales (orgánicas e inorgánicas) (Ferreira *et al.*, 2014). Dichos constituyentes influyen en las propiedades de absorción y esparcimiento de luz en el agua y varían de acuerdo a los procesos bioquímicos (floraciones algales, vertimientos de aguas residuales) e hidrodinámicos (corrientes de marea, frentes costeros, turbulencia) propios del ecosistema. Cada constituyente tiene características particulares, por ejemplo el CDOM absorbe la luz en el UV y visible y se le considera el principal determinante de las propiedades ópticas en las zonas costeras, ríos y lagos (Blough y Del Vecchio, 2002; Nelson y Siegel, 2002; Siegel *et al.*, 2002a) lo que ha motivado a que sea ampliamente estudiado en la última década (Blough y Del Vecchio, 2002; Nelson y Siegel, 2002). Sus magnitudes y formas espectrales dependen de su origen, el cual puede ser derivado de la descomposición de las plantas leñosas en ambientes terrestres (Alóctono) o derivado de la descomposición de las algas y la vegetación acuática dentro de un cuerpo de agua (Autóctono) (Brezonik *et al.*, 2015). Por otro lado, el material detrítico o materia orgánica particulada no-algal (bacterias, minerales inorgánicos y burbujas) (IOCCG, 2006), se caracteriza por presentar una mayor absorción en el azul disminuyendo exponencialmente hacia el rojo. Finalmente, la absorción por fitoplancton se relaciona más o menos de forma directa con la concentración de Clorofila *a* (IOCCG, 2006), con variaciones espectrales como las de cualquier espectro de absorción de un

pigmento individual, pero en lo general exhibe picos de absorción en las regiones azul y rojo del espectro, debido a la presencia ubicua de la Clorofila *a* (Roesler *et al.*, 1989).

El Norte del Golfo de California es un cuerpo de agua con un alto grado de complejidad óptica, ha sido clasificada como Caso II (Pegau *et al.*, 1999; Bastidas-Salamanca *et al.*, 2014). Sus particularidades ópticas son dadas en gran parte por el alto esparcimiento de la luz (dispersión a 440 nm de  $\sim 0.87 \text{ m}^{-1}$ ) provocado por el material resuspendido (Pegau *et al.*, 1999), el cual puede ser muy elevado principalmente en las zonas someras debido a fuertes corrientes de marea (Argote *et al.*, 1995). Otras particularidades ópticas de la zona del Alto Golfo de California (UGC) se la dan su condición de estuario inverso así como la alta evaporación (1.1 m/y) y casi nula precipitación (Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994; Lavín *et al.*, 1998). La Región Norte del Golfo (NGC) además está afectada por una circulación reversible estacionalmente, con un giro en el centro de la cuenca, y una corriente costera sobre la plataforma (Sánchez-Velasco *et al.*, 2009). Este proceso, aunado a la mezcla por mareas, permiten que esta región este asociada a altas tasas de producción primaria y de diversidad, lo que favorece las altas abundancias de peces de importancia comercial y ecológica (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2001).

Pocos estudios han registrado la variabilidad de las propiedades ópticas en la parte Norte del Golfo de California, salvo por los trabajos de Millán-Núñez *et al.* (1998), Pegau *et al.* (1999) y Bastidas-Salamanca *et al.* (2014). En el primero, se describieron las variaciones espaciales y verticales del coeficiente de absorción de luz específico del fitoplancton y de pigmentos fitoplanctónicos para un único crucero que contó con cinco estaciones distribuidas en todo el Golfo de California, solo una de ellas se ubicó hacia la región norte. En el segundo, los cruceros analizados se concentraron hacia la región central del golfo con unas cuantas estaciones hacia el Noreste del Golfo. En el tercero, los resultados se basaron en el análisis de un único crucero, lo que si bien contribuyó con el conocimiento de dichas propiedades, no aporta al entendimiento de aspectos tales como la variabilidad estacional e interanual de la región y variabilidad de los coeficientes de absorción del material particulado (fitoplancton y detrito) respecto a la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM). Esta última variable no ha sido evaluada anteriormente en esta región pero es muy importante que sea considerada para aportar a los modelos bio-ópticos globales (Brewin *et al.*, 2015) y debido a su papel en el ciclo del carbono, oligoelementos y gases traza de importancia para la actividad biológicas y el clima del planeta.

En este contexto, el presente capítulo tiene como objetivo documentar por primera vez la variabilidad espacial de los coeficientes de absorción del fitoplancton, detrito y CDOM en la zona norte del Golfo de California, de

acuerdo a previas clasificaciones del área de estudio que determinaron dos regiones bio-ópticas denominadas Alto Golfo de California y Norte del Golfo de California (Bastidas-Salamaca *et al.*, 2014). En primera instancia se evaluaron las diferencias estadísticas entre regiones utilizando una amplia base de datos que incluye seis cruceros oceanográficos de primavera a verano (marzo a septiembre) entre 2008 y 2013. Posteriormente, se examinó la contribución de la absorción asociada al área de estudio, sus características ópticas y las relaciones entre variables ópticas que nos permitan contar con elementos tanto para evaluar los modelos bio-ópticos en aguas ópticamente complejas como para proponer nuevos enfoques específicos para esta región.

## **2. Métodos**

### **2.1. Área de Estudio**

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas 30.5°N a 32°N y -115°W a -113.5°W, lo que según la regionalización de Lavín y Marinone (2003) para el Golfo de California (Figura 2), la ubica en una zona entre la provincia del Alto Golfo de California (UGC) y el Norte del Golfo de California (NGC) (Figura 2). El área es somera con profundidades menores a 30 m en la UGC y menores a 200 m en la NGC (Figura 2), la temperatura promedio tiene un comportamiento estacional y oscila entre los 14°C aproximadamente en invierno a valores mayores de 32°C en verano (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Álvarez-Borrego y Galindo-Bect, 1974; Lavín *et al.*, 1998). Los valores de salinidad varían entre los 35.4 en las aguas abiertas del NGC hasta 39 en las áreas someras del UGC

(Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Lavín y Organista, 1988; Lavín y Sánchez, 1999). La marea es principalmente semidiurna con un rango de aproximadamente 6 m durante mareas vivas, con fuertes corrientes de marea de hasta 1m/s y un frente de mezcla de marea que separa las aguas bien mezcladas del UGC de las aguas profundas y estratificadas del NGC (Argote *et al.*, 1995).

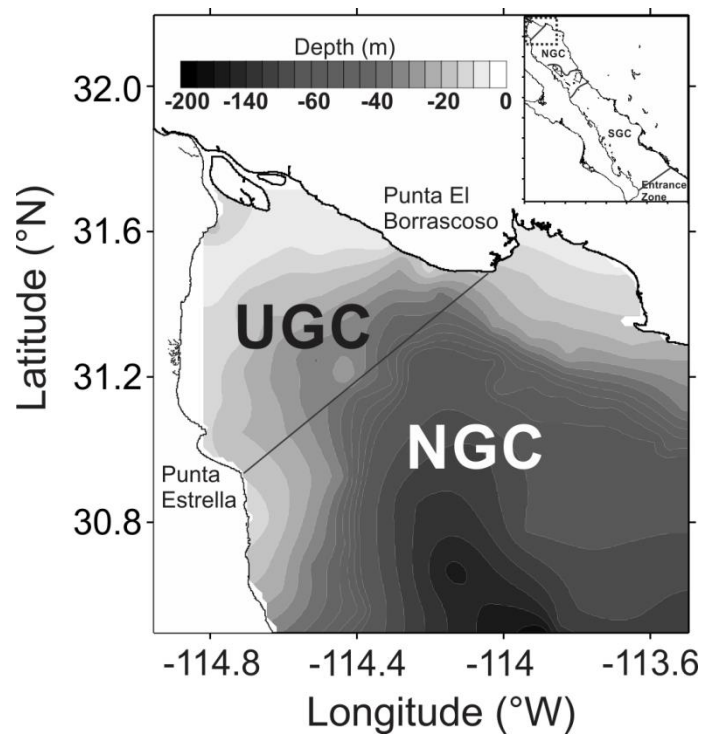


Figura 2. Batimetría del área de estudio con las provincias oceanográficas UGC y NGC. En el recuadro se presentan las Provincias oceanográficas definidas por Lavín y Marinone (2003).

## 2.2. Datos y Métodos

### 2.2.1. Toma de muestras de campo

Los datos físicos y biológicos fueron colectados durante seis cruceros oceanográficos en el área de estudio, realizados durante el periodo de mareas muertas. En la Figura 3 se indican las fechas de muestreo para cada crucero y el número de estaciones en cada uno.

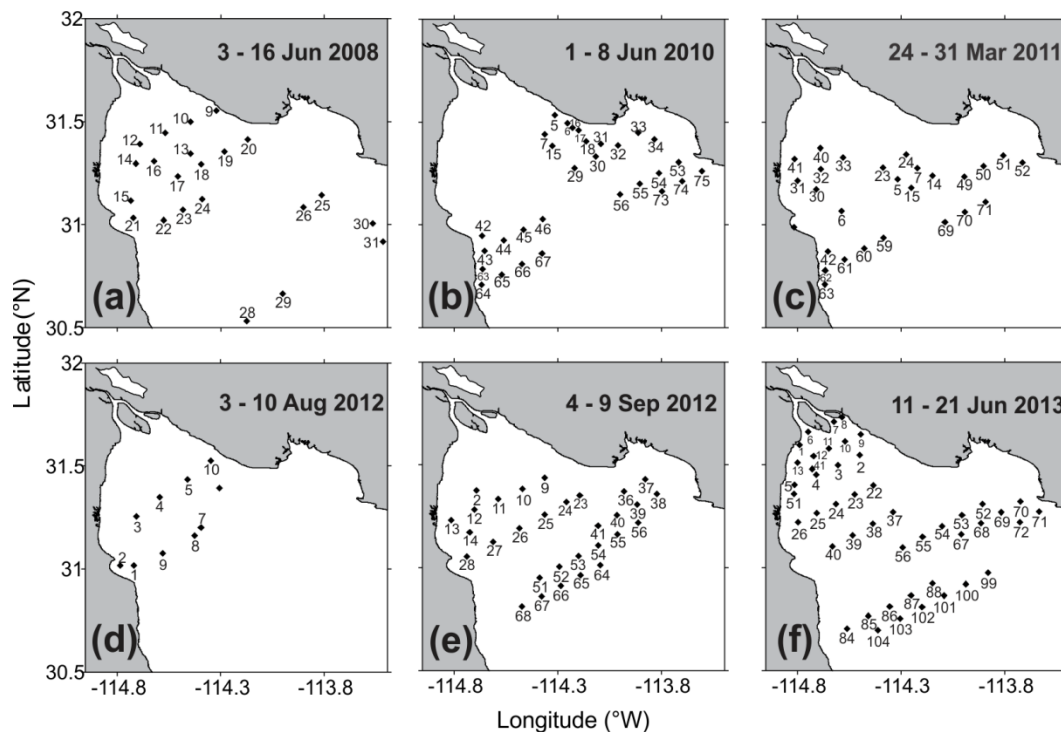


Figura 3. Retícula de estaciones de cada crucero. En (a) se muestra las estaciones del crucero de Junio de 2008, en (b) Junio de 2010, en (c) Marzo de 2011, en (d) Agosto de 2012, en (e) Septiembre de 2012 y en (f) Junio de 2013

La transparencia del agua fue medida usando un disco Secchi (disco blanco de 30 cm de diámetro). El procedimiento aplicado para la toma de esta variable consideró que la medición puede ser afectada por el ojo humano y por tanto en los cruceros la misma persona hizo la medición; además se consideró que existen diferencias asociadas al ángulo por lo que la lectura se hizo en el mismo

intervalo de tiempo (entre 10 am y 3 pm) principalmente durante días soleados, cuando se asume que hay más luz indirecta que luz difusa penetrando la columna de agua (ver Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2015 para más detalles de estas asunciones). Al considerar estos aspectos se asumió que los errores fueron consistentes (o constantes) y que no se afectó la comparación entre regiones. Finalmente, del disco de secchi se calculó el coeficiente de atenuación de la luz ( $K_d$ ) y la primera profundidad óptica (1OD).

Para la determinación de  $K_d$  diversos autores formulan modificaciones a la ecuación 1 propuesta por Poole y Atkins (1929):

$$K_d = \frac{1.7}{Z_{SD}} \quad (1),$$

donde,  $Z_{SD}$  es la profundidad del disco de Secchi y el valor de 1.7 se consideraba como un valor promedio aplicable a todo tipo de agua. Sin embargo, Holmes (1970) propuso que para aguas costeras, que son ópticamente más complejas, dicho valor podría ser remplazado por 1.44 (Ecuación 2).

$$K_d = \frac{1.44}{Z_{SD}} \quad (2),$$

En el presente estudio, los denominadores de las ecuaciones 1 y 2 fueron promediados y se obtuvo un valor de 1.6, que correspondería a aguas con características entre costeras y oceánicas.

Para la determinación de la 1OD se usó la siguiente ecuación:

$$1OD = \frac{1}{K_d} \quad (3),$$

Su aplicación obedece a que el  $K_d$  se ha usado como una medida directa de la capacidad de un cuerpo de agua para producir una disminución con la profundidad en la cantidad radiométrica apropiada (Kirk, 2011) y sus valores cambian de acuerdo a los constituyentes del cuerpo de agua. Por tanto, en el contexto de la producción primaria, las profundidades ópticas en las cuales se atenúa la irradiancia descendente al 10% y al 1% de los valores sub-superficiales, esto es 2.3 y 4.6 profundidades ópticas respectivamente, corresponden al punto medio y al límite inferior de la zona eufótica dentro de la cual se produce una fotosíntesis significativa (Kirk, 2011).

Muestras de agua superficial (~0.50m de profundidad) fueron tomadas utilizando botellas Niskin de 5L para la determinación de pigmentos fotosintéticos y coeficientes de absorción de luz del material particulado y materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM).

Directamente de la botella Niskin se extrajo una muestra de agua utilizando frascos de vidrio ámbar previamente lavados, para la determinación del coeficiente de absorción del CDOM según protocolo de Mitchell *et al.* (2002). Estas se almacenaron en refrigeración (4 a 8 °C) hasta su análisis en laboratorio. Del volumen restante de agua se filtraron de uno a dos litros

mediante un sistema de filtración positivo, utilizando filtros Whatman GF/F de 25mm de diámetro, para el análisis de los pigmentos en el fitoplancton (Barlow *et al.*, 1997; Thomas, 2012) y del coeficiente de absorción de luz por el material particulado (Mitchell *et al.*, 2002). Los filtros para pigmentos fueron doblados a la mitad y guardados en sobres de papel aluminio y los filtros para determinación de las propiedades ópticas fueron guardados en capsulas Histoprep, y posteriormente almacenados en nitrógeno líquido hasta su análisis en el laboratorio.

### 2.2.2. Determinación de Coeficientes de Absorción

El coeficiente de absorción de luz es una propiedad óptica inherente que puede ser descrita en términos de la contribución aditiva de sus componentes (Ecuación 4) (Mitchell *et al.*, 2002):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) \quad (4),$$

donde,  $a_w(\lambda)$  se refiere a la absorción del agua,  $a_p(\lambda)$  a la absorción del material particulado que a su vez se descompone en fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) y detrito ( $a_d(\lambda)$ ), y  $a_{CDOM}(\lambda)$  a la absorción por la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM). Para la determinación del coeficiente de absorción de luz por el material particulado ( $a_p(\lambda)$ ) se aplicó la metodología de Mitchell *et al.* (2002). Se realiza la lectura de la densidad óptica del filtro con el material particulado ( $OD_p$ ) en un espectrofotómetro, para las longitudes de onda entre 400 a 800 nm, a 1 nm de resolución espectral. El mismo filtro se coloca en un aparato de filtración donde

se le agrega metanol caliente y se deja inmerso durante 15 minutos, proceso que se repite en dos ocasiones. Este filtro se regresa al espectrofotómetro, y en esta ocasión se realiza la lectura de la densidad óptica del detrito ( $OD_d$ ).

Para los cruceros de junio de 2008, junio de 2010 y marzo de 2011, las lecturas de las densidades ópticas se hicieron en un espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 10 con esfera integradora. Para los cruceros de agosto y septiembre de 2012 y junio de 2013, se utilizó un espectrofotómetro Cary 100 UV-Vis con esfera integradora. La determinación de los coeficientes de absorción del particulado  $a_p(\lambda)$  y del detrito  $a_d(\lambda)$  se hizo para todos los cruceros usando la ecuación 5 y 6 respectivamente:

$$a_p(\lambda) = \left(2.3003 \frac{S}{V}\right) (C_1(OD_p - OD_{null}) + C_2(OD_p - OD_{null})^2) \quad (5)$$

$$a_d(\lambda) = \left(2.3003 \frac{S}{V}\right) (C_1(OD_d - OD_{null}) + C_2(OD_d - OD_{null})^2) \quad (6)$$

donde  $OD_p$  y  $OD_d$  son la densidad óptica del filtro con material particulado y detrito respectivamente,  $OD_{null}$  es la corrección por desplazamientos residuales en el filtro (se usó la media entre 790-800nm),  $S$  es el área efectiva de filtración,  $V$  es el volumen filtrado, y  $C_1$  y  $C_2$  son los coeficientes de corrección del aumento de la longitud de la trayectoria provocada por la dispersión múltiple en el filtro de fibra de vidrio, para este caso se utilizó 0.392 y 0.655 respectivamente (Mitchell *et al.*, 2002).

El coeficiente de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) fue determinado por la diferencia entre el coeficiente de absorción de la materia particulada total  $a_p(\lambda)$  y el detrimento  $a_d(\lambda)$ . Se comparó la forma espectral de las curvas asociadas a las regiones bio-ópticas, utilizando el promedio de los espectros de absorción de los coeficientes  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$ . Así mismo se determinó la razón  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  (razón Blue:Red o B/R) para evaluar el tamaño de la población fitoplanctónica dominante a partir de los siguientes condicionales: Una razón B/R  $>3.0$  corresponde a una población dominada por picofitoplancton ( $<2 \mu\text{m}$ ); una razón B/R  $<2.5$  es una población dominada por microfitoplancton ( $>20 \mu\text{m}$ ) y una razón B/R con valores entre 2.5 y 3.0 indica un dominio de nanofitoplancton (2-20  $\mu\text{m}$ ) (Stuart *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2007; Millán-Núñez y Millán-Núñez, 2010).

Las muestras de agua de mar almacenadas para determinación del CDOM fueron filtradas en un sistema de filtración negativo usando filtros Nuclepore de  $0.2 \mu\text{m}$  y 25 mm. Previo a la filtración, los filtros son sumergidos en HCl al 10% y lavados con agua ultra pura (J.T.Bakerwater HPLC Grade), según metodología descrita por Mitchell *et al.* (2000). Los cruceros de junio de 2008 y junio de 2010, no contaron con lecturas de CDOM. Los datos de los cruceros de junio de 2010, marzo de 2011, agosto y septiembre de 2012 y junio de 2013 se midieron con un espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 10. Se realizó un barrido de la densidad óptica de las muestras entre 250 y 800 nm utilizando una cubeta de 10 cm de longitud, a una resolución de 1 nm. La determinación del

coeficiente de absorción por el CDOM ( $a_{CDOM}(\lambda)$ ) se realizó mediante la ecuación 7 (Mitchell *et al.*, 2000):

$$a_{CDOM}(\lambda) = \left(\frac{2.303}{l}\right)((OD_s(\lambda) - OD_{null}) - (OD_b(\lambda) - OD_{null})) \quad (7),$$

donde  $l$  es la longitud de paso de la celda (10 cm),  $OD_s$  es la densidad óptica de la muestra,  $OD_b$  es la densidad óptica del blanco y  $OD_{null}$  es la densidad óptica del punto nulo (600nm).

Los valores de la pendiente espectral del espectro de  $a_{CDOM}(\lambda)$  ( $S_{CDOM}$ ) pueden ser afectados por el modelo e intervalo del espectro escogido para su cálculo (Twardowski *et al.*, 2004). Por esta razón, antes de aplicar el ajuste, se hizo una evaluación de cuatro modelos propuestos en la literatura (exponencial simple, hiperbólico, doble exponencial y doble exponencial con una pendiente fijada) para tres diferentes porciones del espectro de absorción del CDOM (250-500 nm, 350-500 nm y 400-500nm), con el propósito de escoger el mejor modelo de ajuste. La prueba estadística aplicada al set de datos analizado, fue el cálculo de mínimos cuadrados o SSE (por sus siglas en inglés Sum of Squared Errors of prediction) y el menor valor fue el criterio para su selección. Así entonces, el ganador fue el modelo exponencial simple ( $y = Ae^{(-S*\lambda)}$ ) en el intervalo de longitud de onda entre 250 a 500 nm y su aplicación se hizo mediante el método de mínimos cuadrados no lineal.

Al aplicar el modelo de ajuste antes mencionado, a cada uno de los espectros de absorción del CDOM, se obtuvo el valor de la exponente S, es decir la  $S_{\text{CDOM}}$ . Este parámetro define la dependencia espectral del  $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$  y provee información sobre la naturaleza de los cromóforos del CDOM (Blough y Del Vecchio, 2002).

### 2.2.3. Determinación de Pigmentos fotosintéticos

Se utilizaron dos metodologías para el análisis de la concentración de pigmentos. Para los cruceros de junio de 2008, junio de 2010 y marzo de 2011 se utilizó la metodología de Barlow *et al.* (1997) y para los cruceros de agosto de 2012 y junio de 2013 se utilizó la metodología de Thomas (2012). No se cuenta con datos de pigmentos para el crucero de septiembre de 2012.

Los pigmentos estándares utilizados en el HPLC fueron adquiridos de Sigma-Aldrich y de DHI (Dinamarca). La concentración de los estándares fueron determinados espectrofotométricamente usando coeficientes de extinción publicados (Jeffrey *et al.*, 1997). Los pigmentos estándar fueron usados para la identificación de los picos de absorción en el cromatograma. La información de los pigmentos permitió calcular las fracciones de tamaño del fitoplancton (micro, nano y picofitoplancton) de acuerdo a Uitz *et al.* (2006), incluyendo el pigmento Divinil Chla (DVChla) que representa a las células del picofitoplancton (Prochlorophytes) observadas en este estudio.

### 2.3. Regiones Bio-ópticas y análisis estadísticos

Lavín y Marinone (2003) clasificaron el área de estudio de acuerdo a procesos físicos en UGC y NGC, y propusieron una línea imaginaria entre Punta Borrascoso y Punta Estrella (Figura 2) como un límite entre dichas regiones. Bastidas-Salamanca *et al.* (2014) propusieron a la 1OD como una variable para clasificar ópticamente las regiones, por considerarla como un indicador de la transparencia del agua que les permitió evaluar el dinamismo de la frontera entre una UGC somera y una NGC más profunda.

En este estudio se clasificaron las estaciones muestreadas usando como criterio que estaciones con  $1OD < 3m$  se clasifican como UGC, estaciones con  $1OD > 5 m$  corresponden al NGC y estaciones con  $1OD$  entre 3 m y 5 m corresponden a la zona de Transición. Así mismo, con el objetivo de establecer si las diferencias entre las regiones UGC y NGC fueron estadísticamente significativas, una prueba a priori no-paramétrica de Kruskal-Wallis (Zar, 1999) fue usada para establecer las diferencias en los coeficientes de absorción  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$ . Esta prueba fue aplicada con base en la ZEOF1 combinando los coeficientes de absorción por longitud de onda (412, 440, 488, 555, 675). Cuando la hipótesis nula fue rechazada, una prueba a posterior de contraste múltiple Wilcoxon para dos muestras independientes fue usada para establecer si existen diferencias significativas entre las regiones UGC, Zona de transición y NGC. En la mayoría de contrastes aplicados, el número de los datos fue mayor a diez, por lo que se usó la aproximación de los valores

$H_{\text{calculados}}$  propuestos por Kruskal-Wallis. Estas pruebas estadísticas fueron aplicadas por crucero y a todo el set de datos. Para los cruces del 2008 y 2010, la aplicación de estos análisis fue considerada en los coeficientes de absorción  $a_{\text{ph}}(\lambda)$  y  $a_{\text{d}}(\lambda)$ , dada la ausencia de datos de  $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$

### 3. Resultados

#### 3.1. Regiones bio-ópticas

Las diferencias entre regiones bio-ópticas fue evaluada para cada crucero de forma individual, y para toda la base de datos disponible, y se encontró que fueron estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ). Al contrario de lo establecido como una línea imaginaria estática (Lavin y Marinone, 2003), nuestros datos confirman que la zona de transición tiene un comportamiento dinámico. Por ejemplo, en junio de 2008 (Figura 4a) y septiembre de 2012 (Figura 4c), la zona de transición se ubicó en la posición antes mencionada; sin embargo, en marzo de 2011 (Figura 2b) se observó un desplazamiento de la misma al suroeste hacia la península de Baja California, mientras que en junio de 2010 (Figura 4a), agosto de 2012 (Figura 4) y junio de 2013 (Figura 4a), se situó hacia las zonas poco profundas de UGC. En la Tabla I se muestra una estadística descriptiva aplicada para todas las variables analizadas en este trabajo, organizada por región y crucero.

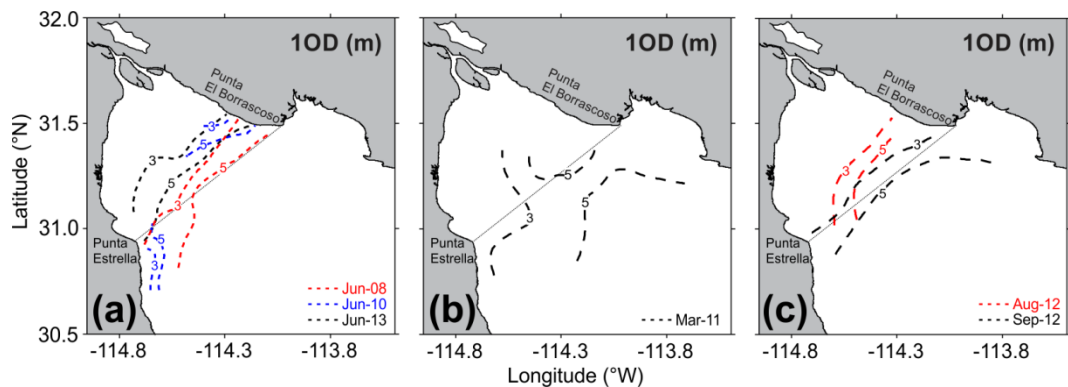


Figura 4. Regiones bio-ópticas definidas de acuerdo a la 10D para (a) Junio de 2008, Junio de 2010 y Junio de 2013, (b) Marzo de 2011, y (c) Agosto y Septiembre de 2012. Las líneas punteadas indican la posición de la zona de transición. Como referencia se indica la frontera entre las regiones UGC y NGC (línea gris) establecida por Lavín y Marinone (2003).

### 3.2. Variabilidad de los constituyentes ópticos del agua

La UGC mostró los mayores intervalos de variación para  $a_{ph}(440)$  y  $a_d(440)$  (Tabla 1). En la mayoría de los cruceros, los valores promedio excedieron los reportados para la región NGC, excepto marzo de 2011. En particular, vale la pena señalar los datos de junio de 2013, ya que el  $a_d(440)$  arrojó los valores más altos de todos los cruceros (Tabla 1). El coeficiente  $a_{CDOM}(440)$  mostró valores promedio entre  $0.098 \pm 0.036 \text{ m}^{-1}$  y  $0.194 \pm 0.078 \text{ m}^{-1}$ , aumentando de marzo de 2011 a junio de 2013, cuando se registraron los valores máximos a pesar de la poca variación.

Tabla I. Número de datos (n), intervalo y media  $\pm$  desviación estándar (SD) de la primera profundidad óptica (1OD),  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$ ,  $a_{CDOM}(440)$  y  $Chla$  *in situ* ( $mg/m^3$ ) para las regiones bio-ópticas definidas para cada crucero.

Crucero/ Regiones bio-ópticas	UGC			Zona de Transición			NGC		
	n	Intervalo	Media $\pm$ SD	n	Intervalo	Media $\pm$ SD	n	Intervalo	Media $\pm$ SD
<b>1OD (m)</b>									
Jun-08	10	0.6-2.1	1.4 $\pm$ 0.5	5	3.0-4.8	3.9 $\pm$ 0.7	7	6.0-9.0	7.1 $\pm$ 1.1
Jun-10	4	1.8-2.4	2.0 $\pm$ 0.3	9	3.0-4.8	4.2 $\pm$ 0.7	17	6.0-11.4	8.4 $\pm$ 1.7
Mar- 11	10	0.9-2.7	1.8 $\pm$ 0.6	9	3.0-4.8	3.9 $\pm$ 0.7	8	5.0-9.6	6.5 $\pm$ 1.6
Ago-12	6	0.8-2.5	1.3 $\pm$ 0.6	1	3.5	3.5	3	6.5-7.8	6.9 $\pm$ 0.8
Sep-12	9	0.5-2.0	1.2 $\pm$ 0.5	7	3.3-4.2	3.8 $\pm$ 0.3	14	5.4-11.4	8.2 $\pm$ 1.8
Jun-13	15	0.1-3.0	0.7 $\pm$ 0.9	6	3.0-4.8	4.1 $\pm$ 0.8	25	5.7-18.1	10.4 $\pm$ 3.4
<b>Todos los cruceros</b>	<b>54</b>	<b>0.1-3.0</b>	<b>1.3<math>\pm</math>0.8</b>	<b>37</b>	<b>3.0-4.8</b>	<b>4.0<math>\pm</math>0.6</b>	<b>74</b>	<b>5.0-18.1</b>	<b>8.7<math>\pm</math>2.7</b>
<b><math>a_{ph}(440)</math> (<math>m^{-1}</math>)</b>									
Jun-08	7	0.037-0.161	0.089 $\pm$ 0.047	3	0.063-0.091	0.082 $\pm$ 0.16	5	0.032-0.081	0.049 $\pm$ 0.021
Jun-10	4	0.021-0.056	0.041 $\pm$ 0.016	7	0.012-0.052	0.032 $\pm$ 0.014	16	0.006-0.041	0.016 $\pm$ 0.011
Mar- 11	10	0.016-0.092	0.042 $\pm$ 0.028	9	0.021-0.128	0.057 $\pm$ 0.034	8	0.023-0.094	0.053 $\pm$ 0.029
Ago-12	6	0.073-0.136	0.098 $\pm$ 0.022	1	0.028	0.028	2	0.019-0.052	0.036 $\pm$ 0.023
Sep-12	8	0.076-0.236	0.140 $\pm$ 0.052	7	0.055-0.112	0.086 $\pm$ 0.022	14	0.036-0.076	0.052 $\pm$ 0.012
Jun-13	12	0.031-0.392	0.188 $\pm$ 0.116	6	0.035-0.073	0.052 $\pm$ 0.014	25	0.010-0.099	0.039 $\pm$ 0.021
<b>Todos los cruceros</b>	<b>47</b>	<b>0.016-0.392</b>	<b>0.110<math>\pm</math>0.086</b>	<b>33</b>	<b>0.012-0.128</b>	<b>0.058<math>\pm</math>0.030</b>	<b>70</b>	<b>0.006-0.099</b>	<b>0.039<math>\pm</math>0.023</b>
<b><math>a_d(440)</math> (<math>m^{-1}</math>)</b>									
Jun-08	7	0.059-0.282	0.142 $\pm$ 0.083	3	0.041-0.064	0.056 $\pm$ 0.012	5	0.006-0.062	0.043 $\pm$ 0.025
Jun-10	4	0.003-0.025	0.011 $\pm$ 0.010	7	0.001-0.005	0.003 $\pm$ 0.001	16	0.0001-0.007	0.002 $\pm$ 0.002
Mar- 11	10	0.007-0.061	0.038 $\pm$ 0.015	9	0.013-0.032	0.021 $\pm$ 0.007	8	0.006-0.024	0.014 $\pm$ 0.007
Ago-12	6	0.092-0.433	0.256 $\pm$ 0.114	1	0.045	0.045	2	0.012-0.014	0.013 $\pm$ 0.001
Sep-12	8	0.126-0.762	0.290 $\pm$ 0.206	7	0.019-0.062	0.037 $\pm$ 0.015	14	0.007-0.039	0.015 $\pm$ 0.011
Jun-13	12	0.059-2.257	0.904 $\pm$ 0.802	6	0.015-0.144	0.057 $\pm$ 0.046	25	0.002-0.105	0.018 $\pm$ 0.024
<b>Todos los cruceros</b>	<b>47</b>	<b>0.003-2.257</b>	<b>0.343<math>\pm</math>0.531</b>	<b>33</b>	<b>0.001-0.144</b>	<b>0.031<math>\pm</math>0.028</b>	<b>70</b>	<b>0.0001-0.105</b>	<b>0.015<math>\pm</math>0.019</b>
<b><math>a_{CDOM}(440)</math> (<math>m^{-1}</math>)</b>									
Jun-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mar- 11	7	0.053-0.146	0.098 $\pm$ 0.036	6	0.030-0.421	0.161 $\pm$ 0.157	8	0.028-0.213	0.090 $\pm$ 0.066
Ago-12	5	0.017-0.178	0.129 $\pm$ 0.065	1	0.064	0.064	2	0.232-0.258	0.245 $\pm$ 0.018
Sep-12	9	0.058-0.210	0.118 $\pm$ 0.042	5	0.039-0.083	0.059 $\pm$ 0.018	11	0.009-0.047	0.026 $\pm$ 0.012
Jun-13	10	0.110-0.388	0.194 $\pm$ 0.078	1	0.009	0.009	8	0.004-0.245	0.070 $\pm$ 0.096
<b>Todos los cruceros</b>	<b>31</b>	<b>0.017-0.388</b>	<b>0.140<math>\pm</math>0.068</b>	<b>13</b>	<b>0.009-0.421</b>	<b>0.103<math>\pm</math>0.117</b>	<b>29</b>	<b>0.004-0.258</b>	<b>0.071<math>\pm</math>0.081</b>
<b><math>Chla</math> (<math>mg/m^3</math>)</b>									
Jun-08	7	0.83-2.03	1.51 $\pm$ 0.50	3	0.67-3.28	1.90 $\pm$ 1.31	5	0.62-1.15	0.81 $\pm$ 0.22
Jun-10	4	0.42-3.33	1.34 $\pm$ 1.35	9	0.24-1.17	0.62 $\pm$ 0.31	15	0.12-2.45	0.43 $\pm$ 0.58
Mar- 11	10	0.77-4.11	2.07 $\pm$ 1.18	9	0.48-6.88	2.19 $\pm$ 2.16	8	0.60-2.61	1.37 $\pm$ 0.63
Ago-12	4	0.86-3.52	1.69 $\pm$ 1.25	1	0.65	0.65	2	0.32-0.77	0.54 $\pm$ 0.32
Sep-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun-13	15	0.53-4.44	2.26 $\pm$ 1.22	5	0.34-0.94	0.51 $\pm$ 0.25	25	0.08-0.87	0.31 $\pm$ 0.21
<b>Todos los cruceros</b>	<b>40</b>	<b>0.42-4.44</b>	<b>1.93<math>\pm</math>1.13</b>	<b>27</b>	<b>0.24-6.88</b>	<b>1.27<math>\pm</math>1.5</b>	<b>55</b>	<b>0.08-2.61</b>	<b>0.55<math>\pm</math>0.55</b>

La NGC mostró menor  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  que la UGC (Tabla I).

Cuando se comparan los valores promedio de  $a_{CDOM}(440)$  con los coeficientes de absorción  $a_{ph}(440)$  y  $a_d(440)$ , es evidente que  $a_{CDOM}(440)$  muestra picos más altos en la región de transición y NGC (Tabla I). Finalmente, en la zona de transición se observa que los intervalos de variabilidad de los datos estuvieron

entre el UGC y el NGC (Tabla I), aunque  $a_{\text{CDOM}}(440)$  muestra una mayor dispersión especialmente en las estaciones de marzo de 2011, cuando fueron observados los valores más altos de todos los cruceros analizados (Tabla I).

Al comparar los valores promedio de  $a_{\text{ph}}(440)$ ,  $a_{\text{d}}(440)$  y  $a_{\text{CDOM}}(440)$  con datos de otras regiones costeras (Figura 5), y se observó que  $a_{\text{ph}}(440)$  y  $a_{\text{CDOM}}(440)$  en la UGC son más bajos, mientras que los valores  $a_{\text{d}}(440)$  son más altos y con un mayor intervalo de variabilidad. Para la NGC, los valores están en el mismo intervalo o incluso más bajos que los promedios de las otras regiones, especialmente  $a_{\text{CDOM}}(440)$ .

### 3.3. Pigmentos fitoplanctónicos

Los valores de Chla muestran importantes variaciones espaciales y temporales, con una tendencia a mayores concentraciones en UGC vs. NGC. La Chla varió entre  $1.34 \pm 1.35$  y  $2.26 \pm 1.22$   $\text{mg}/\text{m}^3$  en UGC, entre  $0.51 \pm 0.25$  y  $2.19 \pm 2.16$   $\text{mg}/\text{m}^3$  en la zona de transición y entre  $0.31 \pm 0.21$  y  $1.37 \pm 0.63$   $\text{mg}/\text{m}^3$  en NGC (Tabla I). Asimismo, marzo de 2011 mostró los valores más altos y junio de 2010 los más bajos (Tabla I).

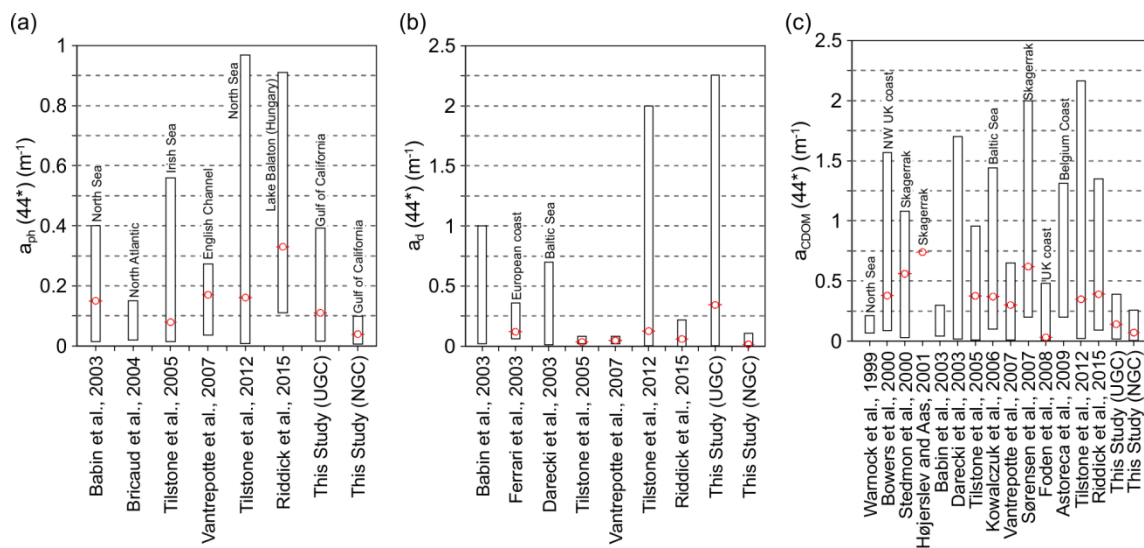


Figura 5. Valores promedio, mínimos y máximos de (a)  $a_{ph}$ , (b)  $a_d$  y (c)  $a_{CDOM}$  para en este y otros estudios (datos tomados de Tilstone *et al.*, 2012). El asterisco en el eje-y indica que los valores pueden ser 440, 442 o 443 nm dependiendo de la base de datos. Para este estudio los datos son para 440 nm.

Algunos pigmentos de fitoplancton pueden usarse como marcadores para ciertos grupos de algas (Jeffrey *et al.*, 1997). En este trabajo los pigmentos fueron usados para evaluar la composición de la comunidad fitoplanctónica de acuerdo con la Tabla II (Jeffrey *et al.*, 1997). El crucero de Junio de 2008 (Figura 6a) mostró en la UGC un alto porcentaje (>50%) de fucoxantina (indicador de Diatomeas), pero en la zona de transición y región NGC del mismo crucero, se observó un aumento en el porcentaje de peridina (Dinoflagelados), 19'Hex (Prymnesiophytes) y zeaxantina (Cianobacterias) (Figura 6a).

Tabla II. Pigmentos fitoplanctónicos registrados en muestras del presente estudio, útiles como marcadores de diagnóstico (adaptado de Jeffrey *et al.*, 1997).

PIGMENTO	ABREVIACIÓN	GRUPO ALGAL
Total Chlorophyll <i>a</i>	[Tot_ChI_a]	Todos los grupos excepto <i>Prochlorococcus</i>
Total Chlorophyll <i>b</i>	[Tot_ChI_b]	Chlorophytes, Prasinophytes, Euglenophytes
19'-Butanoyloxyfucoxanthin	[19'But]	Chrysophytes, Prymnesiophytes
19'-Hexanoyloxyfucoxanthin	[19'Hex]	Prymnesiophytes
Alloxanthin	[Allo]	Cryptophytes
Fucoxanthin	[Fuco]	Diatoms, Prymnesiophytes, Chrysophytes, Raphidophytes
Peridinin	[Perid]	Dinoflagellates
Zeaxanthin	[Zea]	Cyanobacteria (including <i>Prochlorococcus</i> ), Rhodophytes, Chlorophytes, Estigmatophytes
Neoxanthin	[Neo]	Chlorophytes, Prasinophytes
Prasincoxanthin	[Pras]	Prasinophytes

Un alto porcentaje de fucoxantina en la UGC fue nuevamente observada para el crucero de junio de 2010 (Figura 6b), pero con una mayor participación de 19'Hex y 19'But (Chrysophytes y Prymnesiophytes). La zona de transición mostró un aumento en la contribución de zeaxantina (30%) y 19'But, mientras que en la NGC se observó que los pigmentos con un mayor porcentaje fueron zeaxantina, fucoxantina y 19'Hex, esta última con valores hasta del 50% en algunas estaciones. En marzo de 2011 (Figura 6c), la fucoxantina y la peridinina en general contribuyeron con más del 70% al total de pigmentos en casi todas las regiones. Cabe señalar que la aloxantina, pigmento marcador de Cryptophytes (Tabla II), se registró en todas las estaciones a pesar de un porcentaje inferior al 5% en algunos de ellos. Este pigmento no se observó en junio de 2008 y se registró en algunas estaciones en junio de 2010. En agosto de 2012 (Figura 6d), crucero que incluyó pocas estaciones, se observó un cambio significativo en el porcentaje de pigmentos, con una alta contribución de clorofila *b* (> 45%), seguida de fucoxantina y zeaxantina, pero con una mayor proporción de

fucoxantina (36%) en UGC y un aumento de zeaxantina (> 30%) en la zona de transición y la región NGC.

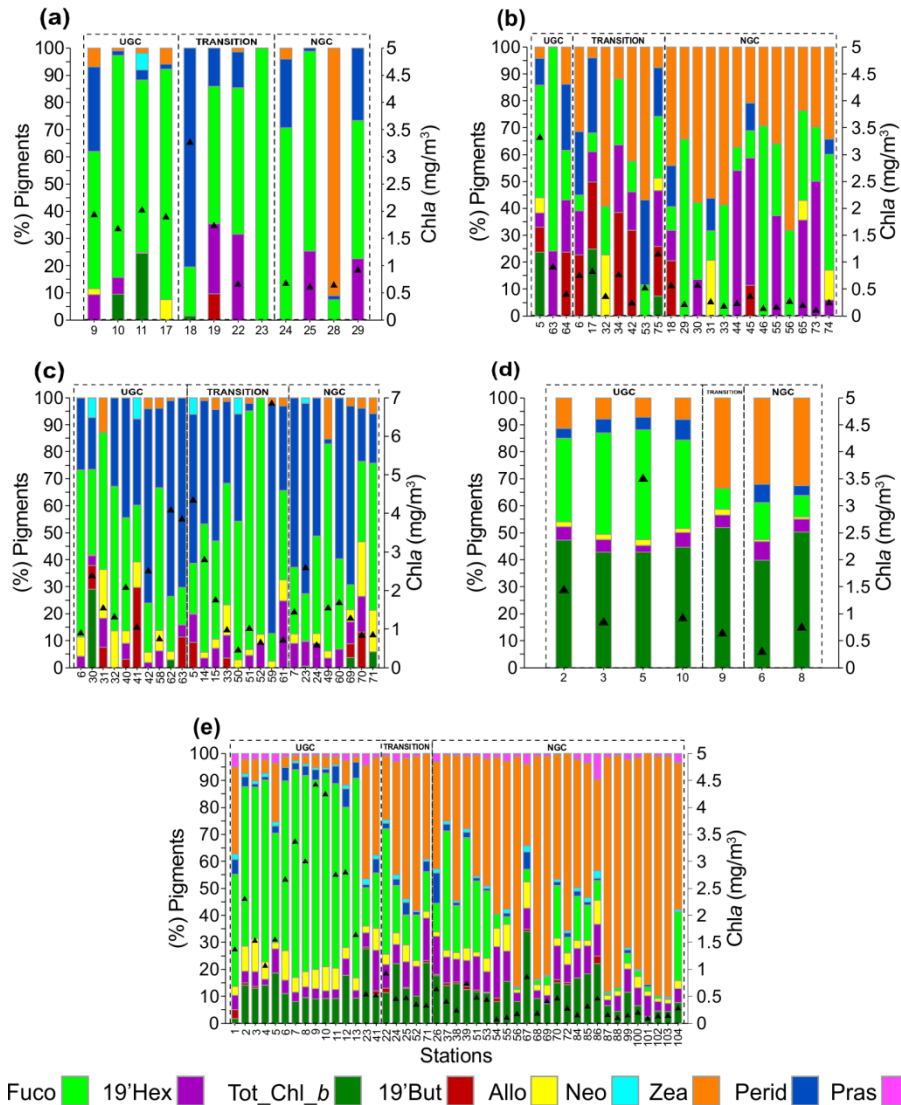


Figura 6. Las barras verticales representan el porcentaje de contribución de cada pigmento por estación (eje izquierdo); los colores corresponden a los pigmentos enumerados en la leyenda. Los triángulos negros corresponden a la concentración de Chla (mg/m<sup>3</sup>) (eje derecho). Las líneas negras punteadas delimitan las regiones bio-ópticas (UGC, NGC y zona de transición). Se muestran gráficas separadas para (a) junio de 2008, (b) junio de 2010, (c) marzo de 2011, (d), agosto de 2012 y (e) junio de 2013.

Finalmente, en junio de 2013 (Figura 6e) se observó en la UGC un predominio continuo de fucoxantina y clorofila *b*, y en la NGC de zeaxantina y clorofila *b*, con algunas estaciones donde también se observó fucoxantina. A su vez, la zona de transición mostró una participación bastante homogénea de los tres pigmentos, es decir, fucoxantina, zeaxantina y clorofila *b*.

La información de los pigmentos fitoplanctónicos permitió además determinar las fracciones de tamaño de pico (pFP), nano (nFP) y microfitoplancton (mFP) (Uitz *et al.*, 2006). Para el crucero de junio de 2008 el mFP dominó las tres regiones bio-ópticas a pesar de que se observa una tendencia a disminuir hacia el NGC (Figura 7a). En el crucero de junio de 2010 (Figura 7b) no se observó una fracción de tamaño de fitoplancton particularmente dominante, pero nuevamente existe la tendencia a disminuir hacia las estaciones del NGC. En especial en esta región se incrementa la participación del nFP que, en conjunto con el pFP, representan en promedio más del 70% de la comunidad. El crucero de marzo de 2011 se destacó como el que presentó el mayor porcentaje de participación del mFP en las tres regiones (Figura 7c). Por otro lado, el crucero de agosto de 2012 (Figura 7d) estuvo dominado por el pFP en las tres regiones, a pesar del pequeño número de estaciones analizadas. Finalmente en junio de 2013 (Figura 7e) se observa una UGC dominada por mFP (promedio de 62%) y las regiones de Transición y NGC dominadas por pFP (60% y 74% en promedio respectivamente).

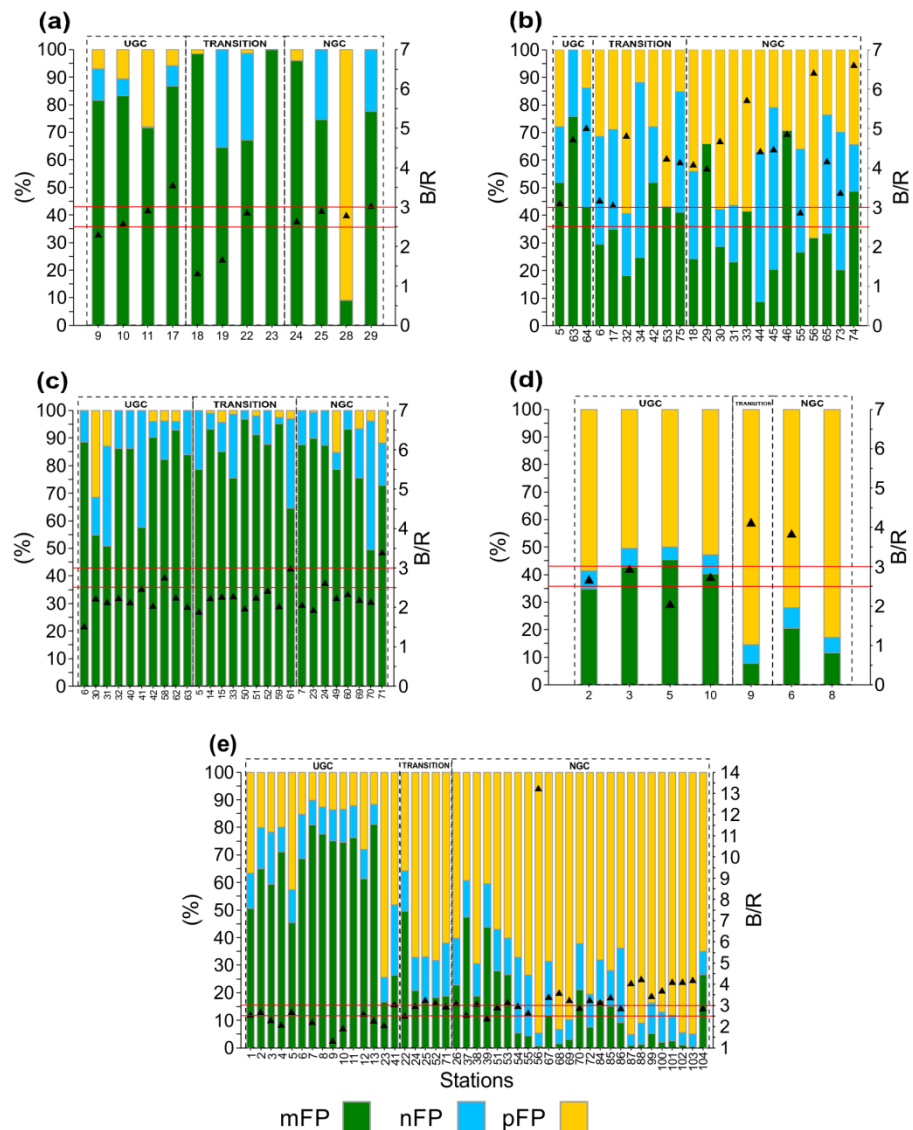


Figura 7. Fracciones de tamaño del fitoplancton determinadas por la razón B/R y por pigmentos fotosintéticos. Los valores promedio de la razón B/R están representados por los puntos negros y las líneas rojas solidas delimitan las categorías micro (razón B/R <2.5), nano (razón B/R entre 2.5 y 3.0) y picofitoplancton (razón B/R >3.0). Las barras verticales representan el porcentaje de cada fracción de tamaño del fitoplancton por estación (eje a la izquierda) y los colores corresponden a los tamaños indicados en la leyenda para los cruceros de junio de 2008 (a), junio de 2010 (b), marzo de 2011 (c), agosto 2012 y junio de 2013 (d). Las líneas negras punteadas separan las tres regiones bio-ópticas (UGC, NGC y zona de Transición).

Con el fin de determinar si existen diferencias entre las aproximaciones utilizadas para evaluar clases de tamaño (razón B/R y pigmentos), se elaboró una tabla comparativa de estos datos (Tabla III). Se observó que en la mayoría de los cruceros de las regiones de transición y NGC las fracciones de tamaño del fitoplancton determinadas coinciden. Por otro lado, esto no fue así en la región UGC.

Tabla III. Promedios de la razón B/R por región y periodo de muestreo y la proporción de tamaño del fitoplancton determinado con base en la composición de pigmentos (Uitz *et al.*, 2006).

Crucero/ Region Bio-óptica	UGC		Zona de Transición		NGC	
	B/R	Fracción de tamaño (%)	B/R	Fracción de tamaño (%)	B/R	Fracción de tamaño (%)
<b>Jun-08</b>	Nano (2.7) N=7	Micro (80%) N=4	Micro (2.0) N=3	Micro (83%) N=4	Nano (2.7) N=5	Micro (64%) N=4
<b>Jun-10</b>	Pico (4.6) N=4	Micro (57%) N=3	Pico (3.8) N=7	Nano (36%) N=7	Pico (4.5) N=16	Pico (41%) N=13
<b>Mar- 11</b>	Micro (2.2) N=10	Micro (77%) N=10	Micro (2.3) N=9	Micro (85%) N=9	Micro (2.4) N=8	Micro (79%) N=8
<b>Ago-12</b>	Micro (2.4) N=6	Pico (53%) N=4	Pico (4.1) N=1	Pico (85%) N=1	Pico (4.6) N=2	Pico (77%) N=2
<b>Jun-13</b>	Micro (2.3) N=12	Micro (62%) N=15	Pico (3.0) N=6	Pico (60%) N=5	Pico (3.7) N=25	Pico (74%) N=25

#### 3.4. Contribución a la absorción

Para los cruceros de marzo de 2011, agosto y septiembre de 2012 y junio de 2013 se exploró la contribución relativa de los coeficientes de absorción,  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  a la absorción de luz total (Figura 8a, b y c). Los cruceros de Junio de 2008 y 2010 se incluyeron en el análisis considerando solamente la contribución relativa del  $a_d(440)$  y  $a_{ph}(440)$ , dado que estos cruceros no contaron con datos de  $a_{CDOM}(440)$  (Figura 8d, e y f).

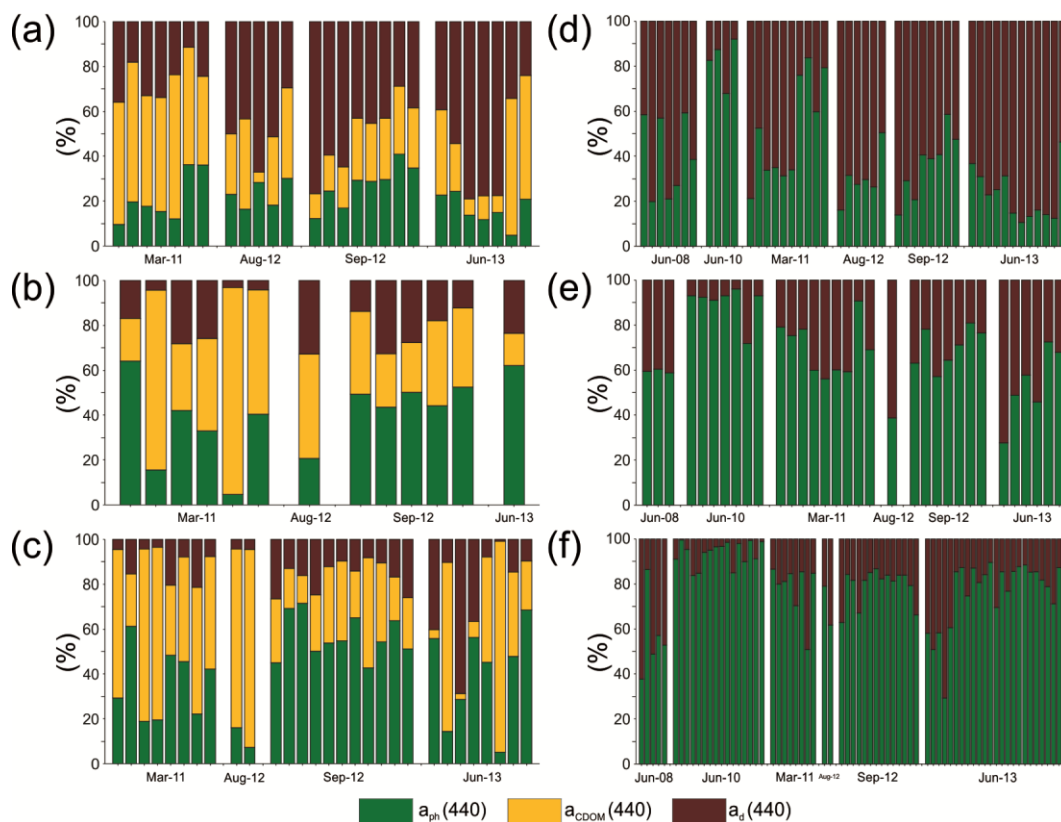


Figura 8. Contribución de  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  a la absorción de la luz en marzo de 2011, agosto y septiembre de 2012, y junio de 2013 para (a) UGC, (b) zona de transición y (c) NGC; y contribución a la absorción de la luz por  $a_{ph}(440)$  y  $a_d(440)$  en todos los cruceros para (d) UGC, (e) zona de transición y (f) NGC.

En UGC, la alta contribución de  $a_d(440)$  a la absorción de la luz es evidente con una tendencia creciente desde marzo de 2011 hasta junio de 2013 (Figura 8a). Este aumento fue seguido por una disminución en  $a_{CDOM}(440)$  mientras que  $a_{ph}(440)$  casi no tuvo variabilidad con una contribución a la absorción de luz total del 10 al 40%. Cuando este análisis tuvo en cuenta la contribución de solo  $a_{ph}(440)$  y  $a_d(440)$  (Figura 8b) se enfatiza la importancia del detrito y  $a_d(440)$  fue la mayor parte del tiempo superior al 40% alcanzando el 80% en junio de 2013.

Se observó una excepción en junio de 2010, aunque este crucero también fue el que tuvo el menor número de estaciones en esta región.

En la NGC la contribución de  $a_d(440)$  a la absorción de luz es mucho más baja que en UGC, mientras que la contribución promedio de  $a_{ph}(440)$  es mucho más alta (Figura 8c y f). En el análisis basado en los cruceros con datos  $a_{CDOM}(440)$  (Figura 8c), se pudo observar que la contribución de este componente puede ser incluso mayor que  $a_{ph}(440)$  dependiendo del crucero, tal y como se observó para la mayoría de las estaciones en marzo 2012, agosto de 2012 y junio de 2013, mientras que en septiembre de 2012 la contribución de  $a_{ph}(440)$  siempre fue superior al 40%. Cuando este análisis se llevó a cabo considerando solo  $a_{ph}(440)$  y  $a_d(440)$  (Figura 8f),  $a_{ph}(440)$  aparece como el componente más importante con una contribución promedio del 79%. La zona de transición (Figura 8b y e) tiene características similares a las de NGC con un dominio compartido de  $a_{ph}(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  (40% y 41% en promedio) (Figura 8b) mientras que  $a_{ph}(440)$  tuvo una contribución de más del 60% cuando  $a_{CDOM}(440)$  no se toma en consideración (Figura 8e).

#### **4. Discusión**

La variabilidad espacial y temporal de las propiedades de absorción de luz se ha utilizado como una herramienta exitosa para la investigación y gestión de las aguas costeras (Werdell *et al.*, 2007) y se han recomendado esquemas de clasificación para integrar la óptica en estudios ecológicos (Mélin y Vantrepotte,

2015). Sin embargo, la medición de estas variables a través de la teledetección puede ser un desafío en las aguas costeras, especialmente aquellas asociadas a fuertes gradientes espaciales. Los resultados del presente estudio indican que en el norte del Golfo de California esta variabilidad es alta, aunque se observa un patrón espacial que permitió la definición de dos regiones bio-ópticas. Sin embargo, su distribución espacial cambia en el tiempo lo que se enfatizó mediante el análisis de la zona de transición, cuya posición probablemente está relacionada con un frente de mezcla de mareas, responsable de la resuspensión de sedimentos y la separación entre las aguas bien mezcladas de la UGC de las aguas profundas y estratificadas de la NGC (Argote *et al.*, 1995). Si bien la ubicación promedio de la zona de transición es consistente con trabajos previos (Lavín y Marinone, 2003; Bastidas-Salamanca *et al.*, 2014), existen diferencias obvias entre los cruceros, asociados con las diferencias en las condiciones físicas de cada uno. Por ejemplo, marzo de 2011 mostró un patrón que era marcadamente diferente al de todos los demás cruceros, con la UGC ubicada frente a la península de Baja California, mientras que la zona de transición se observó ubicada hacia el sur. Este patrón coincide con el período de transición estacional descrito por Montes *et al.* (2015), caracterizado por la presencia simultánea de remolinos ciclónicos y anticiclónicos. A pesar de los cambios temporales en la distribución espacial de cada región bio-óptica, se mantuvieron las características particulares que serán útiles en los enfoques futuros para la detección remota de las propiedades de absorción de la luz.

En general, la UGC mostró los niveles más altos de Chla y la mayor contribución de fucoxantina (Figura 6), pigmento que indica la presencia de diatomeas (Tabla II), un grupo asociado con áreas de altas concentraciones de nutrientes y mezcla vertical (Sarhou *et al.*, 2005). Santamaría-del-Ángel *et al.* (1996) notaron que este grupo puede mostrar altas tasas de productividad a pesar de la baja penetración de luz asociada con la alta turbidez en esta región a través del aumento en la Chla por célula. En marzo de 2011, la peridinina también tuvo una contribución importante, lo que indica la presencia de dinoflagelados. Las diatomeas y los dinoflagelados son grupos de fitoplancton que en general pertenecen al microfitoplancton (Uitz *et al.*, 2006), clase de tamaño asociada a altas concentraciones de nutrientes. Otra característica importante de esta región es la mayor contribución a la absorción de luz total de  $a_d(\lambda)$  y en ocasiones  $a_{CDOM}(\lambda)$ , independientemente de la marcada variabilidad temporal en la contribución relativa de cada componente (Figura 8). Las características ópticas distintivas de UGC fueron destacadas por Bastidas-Salamanca *et al.* (2014) cuando se trabaja con datos de junio de 2008, ya que observaron una correlación negativa significativa entre el coeficiente de atenuación de la luz ( $K_d$ ) y Chla, asociado con la alta concentración de partículas minerales en el área. Los autores sugirieron que la ecuación derivada de su análisis podría usarse para modelar la relación entre estas variables. Mientras tanto, los datos analizados en este estudio no mostraron la misma tendencia, lo que destaca la importante variabilidad temporal en el área. Por otro lado, un hecho que debe tenerse en cuenta es que la mayoría de los

cruceros muestrearon algunas estaciones en la UGC, y dada la variabilidad observada, se debe realizar un mayor esfuerzo de muestreo en esta área para evaluar adecuadamente la variabilidad óptica en ella.

El patrón antes mencionado también puede influir en las diferencias observadas entre las fracciones de tamaño del fitoplancton determinadas por la razón B/R y pigmentos fotosintéticos (Tabla III), sobre todo en la región UGC caracterizada por una mayor turbidez y procesos de mezcla más intensos, que influyen en los procesos de adaptación de las comunidades fitoplanctónicas y por consiguiente en sus propiedades de absorción de luz. Si bien se pudo observar que las fracciones de tamaño determinadas por la razón B/R concordaron en lo general con las determinadas por los pigmentos fitoplanctónicos (Tabla III), hubo diferencias importantes en los datos de las estaciones correspondientes a la región UGC, por lo que para masas de agua con condiciones ambientales tan complejas, el uso de la razón B/R debe aplicarse con mayor cuidado, sobre todo si no se cuenta con datos de pigmentos fitoplanctónicos que confirmen dichos resultados.

La comparación del set de datos usado en el presente estudio, con los de otras regiones costeras (Figura 5) nos permitió inferir la importancia de  $a_d(440)$  para las propiedades ópticas de la UGC. Mientras que  $a_{ph}(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  mostraron el mismo intervalo de variabilidad que en otras regiones,  $a_d(440)$  fue mucho más alto y con un intervalo de variabilidad más grande (0.003 a  $2.26\text{m}^{-1}$ )

lo que también puede indicar que esto se debe tener en cuenta como una característica particular si se desea hacer un uso adecuado de los modelos bio-ópticos. Además, la región NGC fue más oligotrófica que la UGC, mostrando los valores más bajos de  $Chl_a$ ,  $a_{ph}(\lambda)$  y  $a_d(\lambda)$  (Tabla I) a pesar de una alta contribución del  $a_{CDOM}(\lambda)$  (Figura 8c) en muchas estaciones.

La composición de pigmentos en la NGC reveló un alto predominio de zeaxantina y ocasionalmente de clorofila  $b$ , lo que indica la importancia de las cianobacterias y las algas verdes. Estos grupos de fitoplancton pertenecen a las fracciones de tamaño de picofitoplancton que son características de las aguas pobres en nutrientes (Ji, 2008) lo que también explica las diferencias con la UGC. Marzo de 2011 fue una excepción, ya que la contribución de fucoxantina y peridina se extendió por toda el área de estudio y la razón B/R mostró un predominio del microfitoplancton en el área (Figura 7c) confirmado por lo determinado a partir de los pigmentos (Tabla III y Figura 7). Este patrón puede asociarse a las condiciones de primavera mencionadas anteriormente, que promueven las floraciones de fitoplancton en el golfo debido al aumento en los niveles de irradiación (Gaxiola-Castro *et al.*, 1999). De hecho, los datos analizados en otro estudio (Gracia-Escobar, 2016) mostraron tasas de producción primaria hasta seis veces más altas en marzo de 2011 que las registradas en junio de 2010.

La región de estudio es un cuerpo de agua con una fuerte complejidad óptica que fue previamente clasificada como aguas Caso II (Pegau *et al.*, 1999) aunque Bastidas-Salamanca *et al.* (2014) mencionaron que esta suposición es una simplificación dadas las diferencias observadas en las propiedades ópticas entre UGC y NGC. El área cubierta por la región de estudio es más pequeña que otras aguas costeras, como el Mar del Norte o el Mar Báltico, pero sus características ópticas son espacialmente más variables. Por ejemplo, y como se mencionó anteriormente, el promedio de  $a_{ph}(440)$  y  $a_{CDOM}(440)$  en la UGC estuvieron por debajo de los valores observados en otras regiones (Figura 5). Sin embargo,  $a_d(440)$  no solo fue muy variable (0.003 a  $2.257 \text{ m}^{-1}$ ), sino que también fue mucho más alto ( $0.343 \text{ m}^{-1}$  en promedio). El análisis de la contribución proporcional de cada componente a la absorción de luz (Figura 8) indicó que existen diferencias entre la UGC y la NGC y que para la UGC el detrito es importante y para la NGC el CDOM es importante.

## 5. Conclusiones

Este trabajo contribuye en gran medida al conocimiento de las propiedades bio-ópticas en aguas ópticamente complejas como las del norte del Golfo de California, una región caracterizada por una fuerte hidrodinámica reflejada en una marcada variabilidad espacial y temporal sus propiedades ópticas, incluida la composición de los productores primarios. Más específicamente, nuestro estudio confirmó la presencia de dos regiones bio-ópticas (UGC y NGC), cuyas características particulares enfatizan que las aguas Caso II son muy diferentes

cuando se evalúa la contribución individual a la absorción de luz total del fitoplancton, detrito y CDOM. En particular, la región UGC se caracterizó por una mayor contribución de detrito, mientras que en la NGC el fitoplancton y el CDOM alternaron su dominio. Una aplicación importante de esta clasificación es la selección de modelos bio-ópticos para cada región específica teniendo en cuenta las características particulares de cada uno, lo que también puede ayudar a una mejor definición de las incertidumbres relacionadas.

## Referencias

- Alvarez-Borrego, S., and Galindo-Bect, L. A. (1974). Hidrología del Alto Golfo de California-I. Condiciones Durante Otoño. *Ciencias Marinas*, 1, 46-64.
- Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F., and Hunter, J. R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100, 16103-16118. <https://doi.org/10.1029/95JC01500>
- Barlow, R. G., Cummings, D. G., and Gibb, S. W. (1997). Improved resolution of mono-and divinyl chlorophylls a and b and zeaxanthin and lutein in phytoplankton extracts using reverse phase C-8 HPLC. *Marine Ecology Progress Series*, 161, 303–307. <http://www.jstor.org/stable/24859034>
- Bastidas-Salamanca, M., Gonzalez-Silvera, A., Millán-Núñez, R., Santamaria-del-Angel, E., and Frouin, R. (2014). Bio-optical characteristics of the Northern Gulf of California during June 2008. *International Journal of Oceanography*, 2014, 13. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/384618>
- Blough, N.V., Del Vecchio, R., (2002). Chromophoric DOM in the Coastal Environment, In “Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter” (D. A Hansell and CA Carlson, Eds.). Academic Press, San Diego.
- Borrego, S. A., Báez, B. P. F., and Bect, L. A. G. (1975). Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno primavera y verano. *Ciencias Marinas*, 2, 21-36.
- Brewin, R. J., Sathyendranath, S., Müller, D., Brockmann, C., Deschamps, P. Y., Devred, E. and Groom, S. (2015). The Ocean Colour Climate Change Initiative: III. A round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 162, 271-294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.016>
- Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., Finlay, J. C., and Bauer, M. E. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex

- inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 157, 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.033>
- Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K., and Kamykowski, D. (1999). Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104, 5403-5421. <https://doi.org/10.1029/1998JC900082>
- Coble, P. G. (2007). Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color. *Chemical reviews*, 107, 402-418. <https://doi.org/10.1021/cr050350+>
- Ferreira, A., Ciotti, Á. M., and Giannini, M. F. C. (2014). Variability in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and colored dissolved organic matter in a subtropical bay (Brazil). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.01.002>
- Franz, B. A., and Werdell, P. J. (2010). A generalized framework for modeling of inherent optical properties in ocean remote sensing applications. *Proceedings of Ocean Optics, Anchorage, Alaska*, 27.
- Garver, S. A., and Siegel, D. A. (1997). Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. Time series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102, 18607-18625. <https://doi.org/10.1029/96JC03243>
- Gaxiola-Castro, G., Alvarez-Borrego, S., Lavín, M. F., Zirino, A., and Nájera-Martínez, S. (1999). Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 21, 231-245. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.2.231>
- Gracia-Escobar, M.F., (2016). Abundancia, Carbono: Clorofila a, productividad primaria, pigmentos y absorción de la luz del fitoplancton en el Alto Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.
- Hidalgo-Gonzalez, R. M., and Alvarez-Borrego, S. (2001). Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica acta*, 24, 19-28. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)01126-9](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01126-9)
- IOCCG (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optical-ly-Complex,Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- IOCCG (2006). Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Lee, Z.-P. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C., Wright, S.W., (1997). Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. *Monogr. Oceanogr. Methodol.*
- Ji, Z.G., (2008). *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuar-ies*. John Wiley and Sons.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge Uni-versity Press, Cambridge, 509 p.

- Lavín, M. F., and Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Springer Netherlands. 173–204. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11)
- Lavín, M. F., and Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93, 14033-14038. <https://doi.org/10.1029/JC093iC11p14033>
- Lavin, M. F., and Sánchez, S. (1999). On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 19, 1545-1560. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00030-8)
- Lavin, M. F., Godinez, V. M., and Alvarez, L. G. (1998). Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, 769-795. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0387>
- Lee, Z., Carder, K. L., and Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied optics*, 41, 5755-5772. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>
- Lee, Z., Carder, K. L., Steward, R. G., Peacock, T. G., Davis, C. O., and Patch, J. S. (1998). An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103, 27967-27978. <https://doi.org/10.1029/98JC01946>
- Maritorea, S., Siegel, D. A., and Peterson, A. R. (2002). Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, 41, 2705-2714. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002705>
- Mélin, F., and Vantrepotte, V. (2015). How optically diverse is the coastal ocean?. *Remote Sensing of Environment*, 160, 235-251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.023>
- Millan-Núñez, E., Lara-Lara, J. R., and Cleveland, J. S. (1998). Variations in specific absorption coefficients and total phytoplankton in the Gulf of California. CALIFORNIA COOPERATIVE OCEANIC FISHERIES INVESTIGATIONS REPORT, 159-168.
- Mitchell, B. G., Kahru, M., Wieland, J., Stramska, M., and Mueller, J. L. (2002). Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. *Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation*, Revision, 3, 231–257.
- Montes, J. M., Lavín, M. F., and Parés-Sierra, A. F. (2015). Seasonal Heat and Salt Balance in the Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, 32, 853-862. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00192.1>
- Morel, A., and Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, 22, 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Nelson, N. B., and Siegel, D. A. (2002). Chromophoric DOM in the open ocean. *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*, 547-578.
- Pegau, W. S., Zaneveld, J. R. V., Barnard, A. H., Maske, H., Álvarez Borrego, S., Lara Lara, R., and Cervantes Duarte, R. (1999). Inherent optical

- properties in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25, 469–485. ISSN 0185-3880. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48025402>
- Roesler, C. S., Perry, M. J., and Carder, K. L. (1989). Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*, 34, 1510-1523. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1510>
- Sanchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Peguero-Icaza, M., León-Chávez, C. A., Contreras-Catala, F., Marinone, S. G., ... and Godínez, V. M. (2009). Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, 29, 1697-1710. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.06.001>
- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., and Müller-Karger, F. E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99, 7411-7421. <https://doi.org/10.1029/93JC02154>
- Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., De la Peña-Nettel, G., (1996). Efecto de la turbidez en la productividad primaria en dos estaciones en el área del delta del Río Colorado. *Ciencias Marinas*, 22, 483–493. <http://www.redalyc.org/html/480/48022407/>
- Santamaría-del-Ángel, E., Soto, I., Millán-Núñez, R., González-Silvera, A., Wolny, J., Cer-deira-Estrada, S., Cajal-Medrano, R., Muller-Karger, F., Cannizzaro, J., Padilla-Rosas, Y.X.S., Mercado-Santana, A., Gracia-Escobar, M.F., Álvarez-Torres, P., Ruiz-de-la-Torre, M.C., 2015. Phytoplankton blooms: New initiative using marine optics as a basis for monitoring programs, in: *Coastal Ecosystems: Experiences and Recommendations for Environmental Monitoring Programs*, Environmental Science, Engineering and Technology. p. 7x15-(NBC-C).
- Sarthou, G., Timmermans, K. R., Blain, S., and Tréguer, P. (2005). Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *Journal of Sea Research*, 53, 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2004.01.007>
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., Hansell, D. A., and Lorenzi-Kayser, M. (2002). Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107. <https://doi.org/10.1029/2001JC000965>
- Thomas, C., (2012). The HPLC Method, Chapter 6, in: *The Fifth SeaWiFS HPLC Analysis Round-Robin Experiment (SeaHARRE-5)* - Buscar Con Google. pp. 63–72.
- Tilstone, G. H., Peters, S. W., van der Woerd, H. J., Eleveld, M. A., Ruddick, K., Schönfeld, W., ... & Sørensen, K. (2012). Variability in specific-absorption properties and their use in a semi-analytical ocean colour algorithm for MERIS in North Sea and Western English Channel Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, 118, 320–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.019>
- Uitz, J., Claustre, H., Morel, A., and Hooker, S. B. (2006). Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on

- surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111. <https://doi.org/10.1029/2005JC003207>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Feldman, G. C., Boss, E., Brando, V. E., ... and Loisel, H. (2013). Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied optics*, 52, 2019-2037. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Harding Jr, L. W., and Feldman, G. C. (2007, September). Approach for the long-term spatial and temporal evaluation of ocean color satellite data products in a coastal environment. In *Proc. of SPIE Vol. 6680*, pp. 66800G-1). <https://doi.org/10.1117/12.732489>
- Zar, J.H., 1999. *Biostatistical analysis*. Pearson Education India.

## **CAPITULO 2: Evaluación de productos ( $a_{ph}(\lambda)$ , $a_d(\lambda)$ y $a_{cdom}(\lambda)$ ) derivados de algoritmos bio-ópticos semi-empíricos con datos *in situ* de aguas ópticamente complejas**

### **Resumen**

Dos modelos semi-analíticos (Generalized Inherent Optical Property algorithm – GIOP y Garver-Siegel-Maritorena - GSM) fueron evaluados en términos de su capacidad de reproducir los coeficientes de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) y de la materia orgánica disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) en una zona de aguas ópticamente complejas, el Alto Golfo de California (UGC) y el Norte del Golfo de California (NGC). En UGC la mayor contribución a la absorción total de luz está determinada por el detrito, mientras que en la NGC el dominio es compartido entre la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) y el fitoplancton. Al comparar los resultados de cada modelo con una base de datos integrada por cuatro cruceros realizados de primavera a verano (marzo a septiembre) entre 2011 y 2013 se encontró que el modelo GIOP capturó con una mayor validez estadística las características espaciales y estacionales de  $a_{ph}(\lambda)$  en ambas regiones bio-ópticas, mientras que el modelo GSM mostró una marcada tendencia a la subestimación de los datos (BIAS negativos). Aunque ambos modelos funcionaron relativamente bien cuando se compararon los datos estimados por cada uno con los datos  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ* en la región NGC, la habilidad del modelo GIOP fue mejor que la del GSM. En la UGC ninguno de los modelos evaluados pudo reproducir la variabilidad de los datos  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ*, en gran parte determinada por la pendiente espectral de  $a_{dg}(\lambda)$  ( $S_{dg}$ ), cuyos valores tienden a ser inferiores a  $0.012 \text{ nm}^{-1}$ , por tanto, en los algoritmos semi-analíticos que estimen  $a_{dg}(\lambda)$  esta componente debe ser ajustada.

## 1. Introducción

Los sensores remotos de color del océano han presentado información de procesos y estructuras oceanográficas a diferentes escalas en los océanos, explicando así una serie de procesos biológicos y ecológicos (McClain *et al.*, 1998). Por ejemplo, la detección remota de la concentración de la clorofila-*a* (Chl*a*) aplicada desde el lanzamiento en 1978, del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) (Antoine *et al.*, 2005) permitió contar con datos importantes para la generación posterior de los satélites actuales como el MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS/NASA). La información proporcionada por estos sensores ha sido utilizada entre otras cosas para el estudio de la dinámica oceánica, biogeoquímica y cambio climático global (McClain *et al.*, 2002; Gregg *et al.*, 2003; Behrenfeld *et al.*, 2005; Yoder y Kennelly, 2006).

Así entonces el aprendizaje adquirido de dichos estudios ha sido fundamental para que durante la última década, se haya potenciado la importancia de entender y estimar de forma remota las propiedades de absorción de la luz por el agua y el material particulado y disuelto (Garver y Siegel, 1997; Lee *et al.*, 1998; Carder *et al.*, 1999; Morel y Maritorena, 2001; Lee *et al.*, 2005a, 2005b; Hu *et al.*, 2006). Estas propiedades ejercen una influencia importante en la función de los ecosistemas marinos, determinando por ejemplo, la disponibilidad de la radiación solar para el crecimiento del fitoplancton (Capuzzo

*et al.*, 2013), la efectividad de la predación visual (Haraldsson *et al.*, 2012) y la cinética de los procesos fotoquímicos (Siegel *et al.*, 2013).

La concentración de material particulado en el agua por ejemplo, es un aspecto importante en regiones costeras por sus implicaciones para el desarrollo de actividades deportivas o recreativas (Brewin *et al.*, 2015). Su análisis es determinante para la identificación de aquellos componentes del agua que contribuyen con el proceso de absorción de luz, y que son representados en la siguiente ecuación (Mitchell *et al.*, 2002):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) \quad (1),$$

donde,  $a(\lambda)$  es el coeficiente de absorción de luz a una determinada longitud de onda;  $a_w(\lambda)$  es el coeficiente de absorción por el agua pura;  $a_p(\lambda)$  es el coeficiente de absorción por el material particulado, el cual a su vez puede descomponerse en la absorción por el fitoplancton  $a_{ph}(\lambda)$  y la absorción por partículas detríticas orgánicas y minerales  $a_d(\lambda)$ , y finalmente  $a_{CDOM}(\lambda)$  es el coeficiente de absorción por la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM, por sus siglas en inglés, Coloured o Cromophoric Dissolved Organic Matter). Debido a que  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$  tienen una forma espectral similar, algunos estudios la evalúan de forma conjunta y se denomina como  $a_{dg}(\lambda)$  (Brewin *et al.*, 2015). El coeficiente de absorción y esparcimiento de la luz ( $b_b(\lambda)$ ) son denominadas como propiedades ópticas inherentes de los cuerpos de agua (POI) (Kirk, 1994) y una variedad de aproximaciones semi-analíticas se han

propuesto con el objetivo de derivarlas a partir de la reflectancia espectral medida remotamente ( $R_{rs}(\lambda)$ ).

La aproximación teórica que deriva las POIs de la  $R_{rs}(\lambda)$  puede mejorar el rendimiento de los algoritmos en aguas ópticamente complejas, y aproximaciones semi-analíticas como las propuestas por Maritorena *et al.* (2002) o la de Werdell *et al.* (2013) se han desarrollado en ese sentido (Brewin *et al.*, 2015). La primera corresponde al modelo GSM (por Garver-Siegel-Maritorena) inicialmente desarrollado por Garver y Siegel (1997) y actualizado por Maritorena *et al.* (2002). El GSM aún es considerado un producto de evaluación derivado de datos de sensores remotos (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/>) y está basado en la relación cuadrática entre la  $R_{rs}(\lambda)$  y los coeficientes de absorción y esparcimiento de Gordon *et al.* (1988) y utiliza una aproximación semi-analítica y un método de optimización para obtener estimaciones de la concentración de clorofila-a (Chla),  $a_{dg}(443)$  y el  $b_b(443)$ , asumiendo un modelo bio-óptico subyacente y el uso del método de optimización no-lineal.

El segundo ha sido denominado Generalized Inherent Optical Property algorithm (GIOP) y se considera un producto estándar (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/>) que utiliza una aproximación semi-analítica y un método de optimización, pero incorpora muchas ideas de modelos

y métodos bio-ópticos publicados previamente lo que le permite al usuario tener la capacidad de aislar y evaluar las diferencias individuales entre modelos en un entorno controlado. Su particularidad se debe a que fue diseñado como resultado de dos talleres internacionales de algoritmos de POI que fueron organizados por la NASA conjuntamente con las conferencias Ocean Optics XIX (Oct 2008) y XX (Sep 2010). El grupo de trabajo internacional asociado a estos talleres propuso en consenso la configuración preliminar del GIOP, con parametrizaciones y características alternativas del modelo definidas con el objetivo de aplicar evaluaciones continuas.

Autores como Brewin *et al.* (2015) evaluaron los modelos semi-analíticos disponibles para la determinación de las POI, mediante una clasificación objetiva que permitió calificar a cada uno. En sus resultados muestran que el puntaje obtenido por los modelos que estiman el coeficiente de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) cuando se suman los puntos a través de todas las longitudes de onda, fue más alto en el modelo GIOP, seguido por otros modelos dentro de los cuales estuvo el GSM. Para el coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ), los puntajes ligeramente superiores fueron para los modelos QAA (Quasi-Analytical Algorithm) y HOPE (Hyperspectral Optimization Process Exemplar), seguidos por otros modelos dentro de los cuales estuvo el GSM y el GIOP. Entretanto, al final ninguno de los modelos capturó bien la variabilidad de  $S_{dg}$  (pendiente espectral de  $a_{dg}(\lambda)$ ). En este estudio, los autores establecen que para futuros ejercicios de inter-comparación

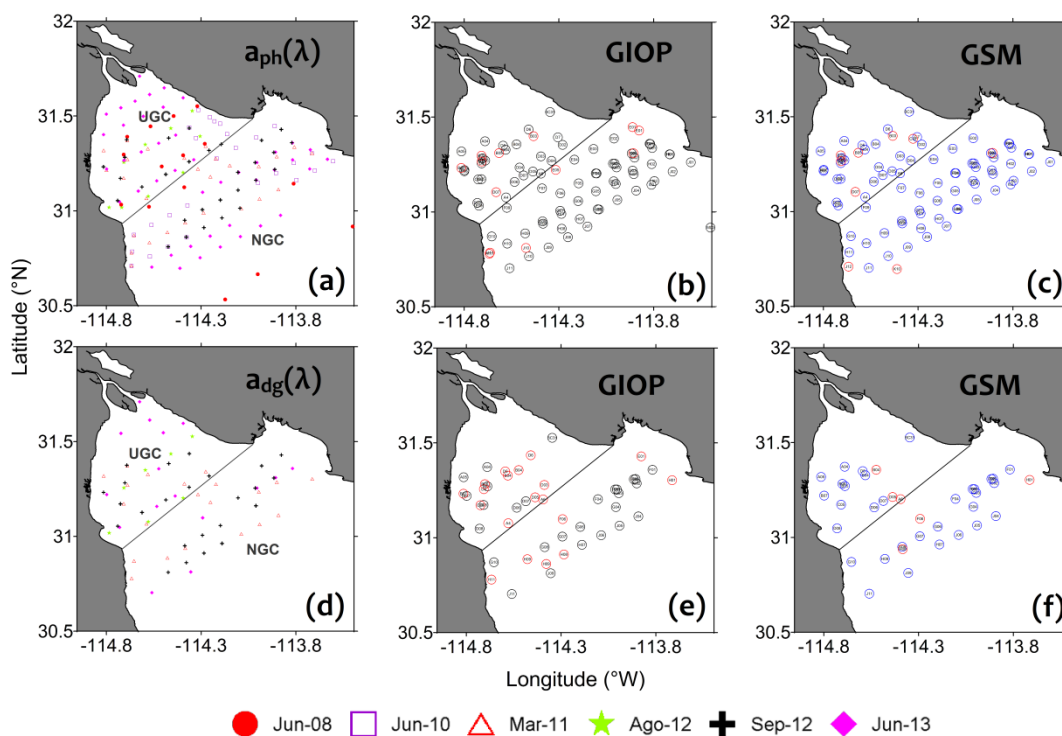
es importante el uso de bases de datos ajenas a la parametrización original de los modelos, puesto que usar la misma base (en su caso NOMAD), hizo difícil evaluar el impacto de la misma en el rendimiento de cada algoritmo, porque la mayoría de estos son influenciados en cierta medida por el conjunto de datos (Brewin *et al.*, 2015).

El objetivo del presente estudio plantea la evaluación de los algoritmos bio-ópticos globales (GSM y GIOP) comparando sus resultados con una base de datos *in situ* de coeficientes de absorción del fitoplancton, detrito y CDOM colectada en la región norte del Golfo de California. La selección del mejor modelo se hizo con base en pruebas estadísticas y el resultado de los análisis permitió identificar las posibles adaptaciones al algoritmo que pudiesen mejorar sus resultados en aguas ópticamente complejas.

## **2. Métodos**

### **2.1. Datos *in situ***

La base de datos *in situ*, utilizada para este estudio corresponde a datos de coeficientes de absorción tomados en seis cruceros oceanográficos desarrollados entre los años 2008 y 2013 en la parte norte del Golfo de California entre las coordenadas 30.5°N a 32°N y -115°W a -113.5°W (Figura 9).



**Figura 9.** Distribución de estaciones de los 6 cruceros que contaron con información *in situ* de los coeficientes (a)  $a_{ph}(\lambda)$  y (d)  $a_{dg}(\lambda)$  en la zona de estudio. Se incluye la posición de las estaciones que contaron con información de  $a_{ph}(\lambda)$  del modelo (b) GIOP y (c) GSM, e información de  $a_{dg}(\lambda)$  del modelo (e) GIOP y (f) GSM. Los círculos negros y azules representan los datos usados para el cálculo de los estadísticos y los círculos rojos, representan los datos excluidos de los análisis. La línea negra punteada representa la posición intermedia de la zona de transición que separa las regiones bio-ópticas UGC y NGC (Ver Capítulo 1).

## 2.2. Datos satelitales

Para la conformación de la base de datos satelital, se hizo un proceso de depuración de los archivos MODIS-Aqua nivel L1A, en el cual se seleccionaron escenas con menos del 80% de nubes y/o sin sunlint. El resultado fue un total de 48 imágenes nivel L1A (Tabla IV) con una resolución espacial de  $\sim 1.1\text{km}^2$  al

nadir. Estos archivos fueron extraídos de la base de datos online del OBPG Data Processing System (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl>) de acuerdo a los pases disponibles según las fechas de cada crucero analizado (Tabla IV).

Tabla IV. Información general de base de datos *in situ* analizada y días efectivos de monitoreo usados para la extracción de imágenes L1A.

CRUCEROS	FECHAS	TOTAL ESTACIONES	DIAS JULIANOS	TOTAL DE DIAS POR CRUCERO	IMÁGENES L1A SELECCIONADAS
Junio 2008	6 - 12	22	158 - 164	06	11
Junio 2010	1 - 8	30	152 - 159	08	08
Marzo 2011	25 Mar a 01 Abr	27	84 - 91	08	10
Agosto 2012	3 - 10	10	216 - 223	08	03
Septiembre	4 - 9	30	248 - 253	06	06
Junio 2013	11 - 20	46	162 - 171	09	10
<b>TOTAL</b>		<b>165</b>		<b>55</b>	<b>48</b>

Para el procesamiento de los archivos de Nivel 1A a Nivel 2, se usó el programa L2GEN y su esquema de corrección atmosférica estándar (SeaDAS versión 7.4), seleccionando los productos POI (Tabla V) en la opciones predeterminadas para los algoritmos GIOP y GSM. Paso seguido a la generación de los archivos L2, fue la extracción por cada uno de las estadísticas, incluyendo la media, la desviación estándar y el número de píxeles válidos mediante una rutina creada para su extracción.

Tabla V. Variables de salida de los modelos GIOP y GSM.

Abreviación	Variable	Modelo Semi-analítico	Salidas
$a_{dg}(\lambda)$	Coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica	GIOP	adg_412_giop, adg_443_giop, adg_488_giop
		GSM	adg_412_gsm, adg_443_gsm, adg_488_gsm
$a_{ph}(\lambda)$	Coeficiente de absorción del fitoplancton	GIOP	aph_412_giop, aph_443_giop, aph_488_giop
		GSM	aph_412_gsm, aph_443_gsm, aph_488_gsm

Un proceso de exclusión para cada posición geográfica extraída fue aplicado en aquellos casos en los cuales no se cumpliera con uno o más de los indicadores de control de calidad Nivel 2 de L2GEN detallados en la Tabla VI. Todas las variables de los archivos Nivel 2 fueron extraídas de ventanas de 3x3 píxeles, centradas al pixel más cercano a la muestra *in situ* y para los análisis solo se incluyeron datos con al menos 3 píxeles válidos (de un total de 9), debido al aumento de errores por píxeles cercanos a nubes o tierra.

Tabla VI. Banderas de calidad para imágenes Nivel-2 utilizadas para determinar los píxeles que se excluirán del análisis.

Name	Description
ATMFAIL	Fallo en la corrección atmosférica
HIGLINT	Alto brillo determinado
HILT	Alta (o saturación) TOA radiancia
HISATZEN	Ángulo zenith del satélite grande
STRAYLIGHT	Straylight determinado
CLDICE	Probable contaminación de nubes o hielo
LOWLW	Muy baja radiancia ascendente
MAXAERITER	Absorción de Aerosoles determinada

### 2.3. Determinación de los coeficientes de absorción

Para la determinación del coeficiente de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ), detrito ( $a_d(\lambda)$ ) y CDOM ( $a_{CDOM}(\lambda)$ ) se aplicó la metodología de Mitchell *et al.* (2002). Los modelos semi-analíticos que determinan las POI no estiman los coeficientes de absorción del detrito  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$  de forma independiente, sino como una variable integrada denominada  $a_{dg}(\lambda)$  que representa la suma de los dos primeros. Por esta razón, se hizo la determinación de la misma, mediante la suma de cada uno de los espectros de absorción del  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$ . Los nuevos espectros generados fueron ajustados mediante una función exponencial ( $y = Ae^{(-S*\lambda)}$ ) de los datos entre 250 y 500 nm usando una rutina de mínimos cuadrados no lineal (nonlinear least squares minimization). El exponente S de la ecuación fue denominado  $S_{dg}$  y corresponde a la pendiente espectral del espectro de absorción del  $a_{dg}(\lambda)$ . Finalmente, y dado que los cruceros de Junio de 2008 y 2010 no contaron con datos de CDOM, los análisis de esta variable fueron aplicados solo a los datos de los cuatro cruceros tomados entre el 2011 y 2013 (Figura 9d).

### 2.4. Algoritmos semi-analíticos

Dos modelos semi-analíticos (GIOP y GSM) fueron utilizados para evaluar los datos del coeficiente de absorción derivados de sensores remotos con datos *in situ* de una región caracterizada por aguas ópticamente complejas. En el

modelo GSM (Maritorena *et al.*, 2002) los componentes que integran el algoritmo se calculan a partir de las siguientes aproximaciones:

$$a_{\phi}(\lambda) = C_a a_{\phi}^*(\lambda) \quad (4),$$

$$a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(443) \exp^{-S(\lambda-443)} \quad (5),$$

donde  $a_{\phi}^*$  es el coeficiente de absorción específico de la Clorofila ( $C_a$ ) y  $S$  es la constante de decaimiento espectral de la absorción de  $dg$  (Werdell *et al.*, 2007) y su valor ha sido descrito en el código fuente del modelo como  $S_{dg}=0.02061\text{nm}^{-1}$  (Maritorena y Siegel, 2006). En GSM estos dos términos son definidos como valores constantes, la  $R_{rs}(\lambda)$  se utiliza como entrada y el método de mínimos cuadrados no lineal de Levenberg-Marquardt es usado para resolver los términos desconocidos, denominados  $C_a$  y  $a_{dg}(443)$  (Werdell *et al.*, 2007).

La diferencia entre el modelo GIOP (Werdell *et al.*, 2013) y los otros modelos de inversión está en la elección de los vectores propios (eigenvectors) empleados, el número de valores propios (eigenvalues) resueltos, el método de optimización seleccionado y el número de longitudes de onda del sensor consideradas en la optimización Tabla VII. Todos estos elementos le otorgan como particularidad la especificación de vectores propios para cada constituyente ópticamente significativo presente en la columna de agua.

Tabla VII. Configuración base del modelo GIOP (datos tomados de Werdell *et al.*, 2013).

Entrada	Salida	Ecuación usada	Descripción	Referencias
$R_{rs}(\lambda)$	$r_{rs}(\lambda)$	$r_{rs}(\lambda, 0^-) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{0.52 + 1.7R_{rs}(\lambda)}$	Convert $R_{rs}[0+]$ to $r_{rs}[0-]$	Lee <i>et al.</i> , 2002
$r_{rs}(\lambda, 0^-)$	IOPs	$r_{rs}(\lambda, 0^-) = G_1(\lambda)u(\lambda) + G_2(\lambda)u(\lambda)^2$	AOP to IOP via Morel $f/Q$ , input Chla from empirical OCx.	(Gordon <i>et al.</i> , 1988; Morel <i>et al.</i> , 2002; Lee <i>et al.</i> , 2011)
$C_a$	$a_{ph}^*$	$a_{ph}^*(443) = 0.055 m^2 mg^{-1}$	$a_{ph}^*$ estimated using OC-derived $C_a$ and normalized such that equation	(Bricaud <i>et al.</i> , 1998; O'Reilly <i>et al.</i> , 1998)
$S_{dg}$	$a_{dg}^*$	$a_{d,g}^*(\lambda) = \exp(-S_{dg}\lambda)$	$a_{dg}^*$ via exponential with fixed exponent $S_{dg} = 0.018 nm^{-1}$	(Roesler <i>et al.</i> , 1989)
$S_{bp}$	$b_{bp}^*$	$b_{bp}^*(\lambda) = \lambda^{S_{bp}}$	$b_{bp}^*$ via power-law with exponent derived via Lee <i>et al.</i> , 2002	(Lee <i>et al.</i> , 2002)
$B_{bp}$ , $A_{dg}$ and $A_{ph}$		Levenberg-Marquardt (LM) optimization. Werdell <i>et al.</i> (2013) consider the IOP retrievals to be valid when: $-0.05b_{bw}(\lambda) \leq b_{bp}(\lambda) \leq 0.05m^{-1}$ $-0.05a_w(\lambda) \leq a_{dg}(\lambda) \leq 5m^{-1}$ $-0.05a_w(\lambda) \leq a_{ph}(\lambda) \leq 5m^{-1}$ $\Delta R_{rs} \leq 33\%$	The three unknown eigenvalues ( $B_{bp}$ , $A_{dg}$ , y $A_{ph}$ ) are optimized using LM, and wavelengths between 400 and 700 nm are considered.	(Werdell <i>et al.</i> , 2013)

#### 2.4.1. Aproximación Match-up

Para determinar el grado de asociación entre los productos IOP y los datos *in-situ*, se aplicó la técnica “match-up” (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2010). Las variables graficadas fueron los coeficientes de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}$  (412, 443 y 488)) y el coeficiente de absorción del CDOM y detrito ( $a_{dg}$  (412, 443 y 488)) (eje y) contra sus respectivos datos *in situ* (eje x). Estas longitudes de onda fueron seleccionadas por ser las más representativas de la mayoría de sensores remotos y en particular del sensor MODIS-Aqua y su análisis permitió

evaluar el rendimiento de los algoritmos con los valores *in situ* de la base de datos utilizada.

#### 2.4.2. Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

El  $R^2$  permitió determinar la calidad de cada modelo (GIOP y GSM) para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede ser explicada por el modelo.

#### 2.4.3. Coeficiente de correlación de Pearson

La validez estadística de los modelos, se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ ), cuya expresión matemática es:

$$r_p = \frac{Cov_{A,B}}{SD_A \times SD_B} \quad (7),$$

donde  $r_p$  es el coeficiente de correlación de *Pearson*;  $Cov_{A,B}$  es la covarianza de A y B;  $SD_A$  y  $SD_B$  son la Desviación Estándar de A y B respectivamente. Este coeficiente es una medida de correlación lineal entre dos variables A y B, cuyos resultados se encuentran entre +1 y -1 inclusive (1 indica una relación lineal directa, -1 indica una relación lineal inversa y cero indica una relación no lineal). La significancia del coeficiente, se determina con una prueba de hipótesis, conocida como análisis de correlación:

$$H_0: r_p = 0 \quad (8),$$

$$H_a: r_p \neq 0 \quad (9),$$

Para aceptar o rechazar la  $H_0$ , se comparó el valor  $r_{calculado}$  con el valor  $r_{crítico}$  determinado en función de los grados de libertad ( $gl = n-1$ ) y el error  $\alpha$  (1 - Nivel de confianza del 95%).  $r_{crítico}$  es el valor mínimo significativo de  $r_p$ . Si  $r_{calculado} > r_{crítico}$ , se rechaza la  $H_0$  y por tanto, es estadísticamente significativa, pero si  $r_{calculado} < r_{crítico}$ ,  $H_0$  no puede ser rechazada y por tanto  $r_p$  no es significativo.

#### 2.4.4. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

El error cuadrático medio o RMSE (por sus siglas en inglés *Root Mean Square Error*) es una estimación del error del conjunto de datos pronosticados (satelitales) con respecto a los observados (*in situ*) y se calcula de acuerdo a

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (11),$$

#### 2.4.5. El BIAS

El BIAS proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobrestimar ( $BIAS > 0$ ) o subestimar ( $BIAS < 0$ ) una variable y se calcula de acuerdo a

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - x_i}{x_i} \right) \quad (12),$$

#### 2.4.6. Mínimos cuadrados ( $\chi^2$ )

El cálculo de mínimos cuadrados ( $\chi^2$ ) o SSE (por sus siglas en inglés Sum of Squared Errors of prediction) es el error mínimo de los datos modelados

(satelitales) respecto a los datos observados (*in situ*). En la comparación entre modelos, el menor valor de SSE es el que mejor describe la respuesta y se calcula de acuerdo a:

$$SSE = \sum(y - \hat{y})^2 \quad (13),$$

#### 2.4.7. Diagrama de Taylor

El diagrama de Taylor (*Taylor, 2001*) ilustra un conjunto de estadísticos en término de  $uRMSD^*$ , variable compuesta por la desviación estándar de la salida del modelo ( $\sigma_{modelo}$ ) y de los datos *in situ* ( $\sigma_{in-situ}$ ), así como por el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ ) estimado entre los datos del modelo y mediciones *in situ*:

$$uRMSD^* = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{modelo}^2}{\sigma_{in-situ}^2} - 2 * \frac{\sigma_{modelo}}{\sigma_{in-situ}} * r_p} \quad (14),$$

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Comparación del coeficiente de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ )

En el **Anexo 2** se presentan los datos del coeficiente de absorción  $a_{ph}(412, 443$  y  $448)$  que integraron la base de datos utilizada. El total de datos *in situ* de  $a_{ph}(412, 443$  y  $448)$  fue de 151, mientras que el total de los modelos GIOP y GSM fue de 88 y 85 respectivamente (Figura 9 a, b y c). El menor número de datos satelitales obedeció principalmente a dos razones: ciertos puntos geográficos no contaron con imagen (ND) o durante el proceso de exclusión

aplicado no se cumplió con uno o más de los indicadores de control de calidad Nivel 2 de L2GEN (ED) detallados en la Tabla VI.

En la Figura 10 se muestran las comparaciones entre el coeficiente de absorción  $a_{ph}(\lambda)$  *in situ* y los modelos GIOP y GSM. El resultado indica que no hay una marcada variabilidad entre los modelos, salvo en la longitud de onda 412 nm, en donde se observa que el modelo GSM no evidencia ningún tipo de asociación con los datos *in situ*. El análisis aplicado a todo el set de datos sin distinción de las regiones bio-ópticas, muestra que los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) más altos fueron para el modelo GIOP (Figura 10a, g y m) particularmente a 443 nm ( $R^2 = 0.39$ ) (Figura 10g). Así mismo se observa que el RMSE presentó los valores más bajos y el BIAS tuvo valores cercanos a cero (Figura 10d, j y p), lo que indica que este modelo describe una mejor asociación con los datos *in situ*. Para el modelo GSM, además de presentar valores bajos del  $R^2$ , se observó una marcada subestimación de los datos particularmente acentuada para la longitud de onda de 412 nm (BIAS = -0.81) (Figura 10d). Al comparar los mínimos cuadrados ( $\chi^2$ ) se observa que los menores valores corresponden al modelo GIOP (0.03 a 0.06). En cuanto al grado de asociación analizado para cada región, se observa que en la NGC la tendencia en ambos modelos fue a la subestimación de los datos (BIAS negativos), con valores de  $R^2$  muy similares entre ellos de aproximadamente 0.25 (Figura 10) exceptuando al modelo GSM a 412 nm (Figura 10f). En

contraste, el mejor grado de asociación ( $R^2 = 0.42$ ) de los datos *in situ* se observó con el modelo GIOP en la región UGC (Figura 10h).

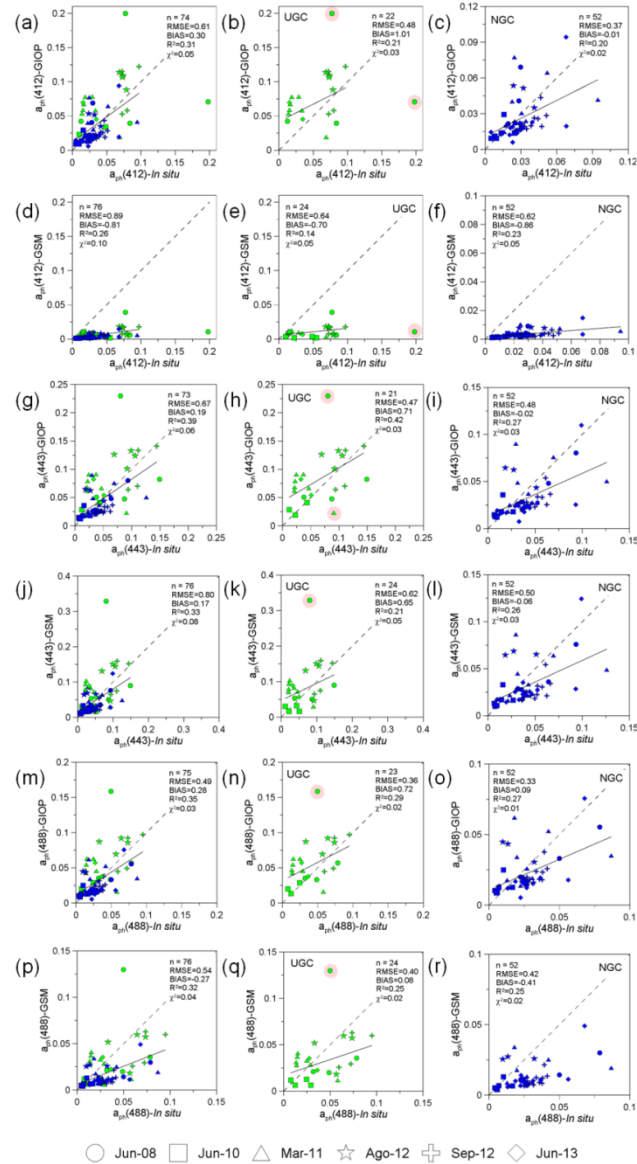


Figura 10. Análisis comparativo entre  $a_{ph}$  (412, 443 y 488) *in situ* y satelital para los modelos GIOP y GSM, con estadísticos RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia. Las áreas rojas marcan puntos extremos retirados de los cálculos estadísticos. Los colores verde y azul corresponden a las regiones UGC y NGC respectivamente.

Tabla VIII. Estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $a_{ph}(\lambda)$  *in situ* y derivados de los modelos GIOP y GSM. En sombreado gris se resaltan los resultados de los estadísticos usados para todos los análisis aplicados y corresponden al total luego de la exclusión de datos extremos.

$\lambda$		n		SD <sub>In situ</sub>		SD <sub>Satellite</sub>		RMSE		BIAS		Least squares		R <sup>2</sup> (%)	
		GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM
ALL	412	76	77	0.03	0.03	0.03	0.01	0.79	1.04	0.30	-0.81	0.08	0.13	25	21
		74	76	0.02	0.02	0.03	0.01	0.61	0.89	0.30	-0.81	<b>0.05</b>	0.10	<b>31</b>	26
	443	76	77	0.03	0.03	0.04	0.05	0.84	1.06	0.19	0.20	0.09	0.14	32	25
		73	76	0.03	0.03	0.03	0.04	0.67	0.80	0.19	0.17	<b>0.06</b>	0.08	<b>39</b>	33
	488	76	77	0.02	0.02	0.03	0.02	0.58	0.59	0.31	-0.25	0.04	0.04	30	24
		75	76	0.02	0.02	0.02	0.01	0.49	0.54	0.28	-0.27	<b>0.03</b>	0.04	<b>35</b>	32
UGC	412	24	25	0.04	0.04	0.04	0.01	0.70	0.83	0.97	-0.71	0.06	0.09	11	7
		22	24	0.03	0.03	0.03	0.01	0.48	0.64	1.01	-0.70	<b>0.03</b>	0.05	<b>21</b>	14
	443	24	25	0.04	0.04	0.05	0.07	0.69	0.94	0.65	0.75	0.06	0.11	18	12
		21	24	0.04	0.04	0.04	0.04	0.47	0.62	0.71	0.65	<b>0.03</b>	0.05	<b>42</b>	21
	488	24	25	0.03	0.02	0.03	0.03	0.47	0.40	0.78	0.08	0.03	0.02	20	14
		23	24	0.03	0.03	0.02	0.02	0.36	0.34	0.72	0.01	<b>0.02</b>	0.01	<b>29</b>	25
NGC	412	52	52	0.02	0.02	0.02	0.00	0.37	0.62	-0.01	-0.86	<b>0.02</b>	0.05	21	<b>23</b>
	443	52	52	0.02	0.02	0.02	0.02	0.48	0.50	-0.02	-0.06	0.03	0.03	<b>27</b>	26
	488	52	52	0.02	0.02	0.01	0.01	0.33	0.42	0.09	-0.41	<b>0.01</b>	0.02	<b>27</b>	25

La base de datos usada para la comparación de los datos *in situ* de  $a_{ph}(\lambda)$  con los datos generados por los modelos GIOP y GSM, fue definida como resultado de un análisis pareado estación por estación y al graficarlos se observó que algunos datos, particularmente pertenecientes a la región UGC, se alejaban del conjunto total representado, a estos puntos se les denominó extremos (sombreado rojo en Figura 10b, e, h, k, n y q) y no fueron tenidos en cuenta para el cálculo de los estadísticos. En la *Tabla VIII* se presentan los resultados de los estadísticos antes y después de aplicar la exclusión de los extremos, lo que

particularmente para este set de datos, no afectó las conclusiones finales de los análisis.

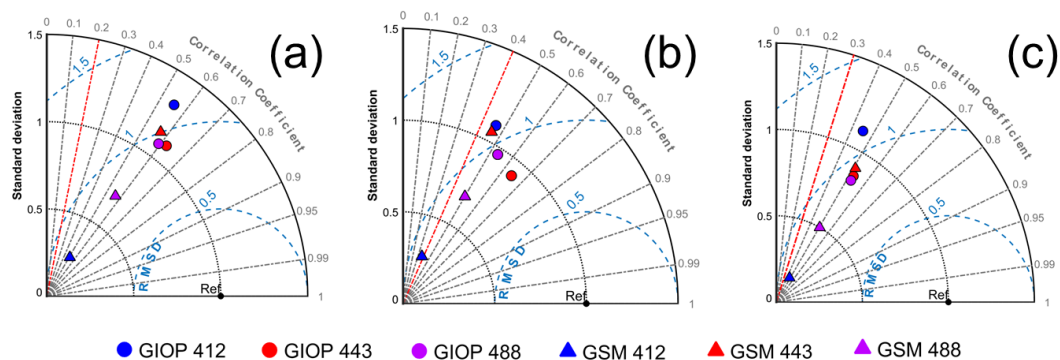


Figura 11. Diagrama de Taylor en el que se ilustra el rendimiento relativo de los modelos GIOP y GSM para reproducir el coeficiente de absorción  $a_{ph}(412, 443$  y  $488$  nm). Cada diagrama representa el análisis aplicado a, (a) todo los datos y por región bio-óptica (b) UGC y (c) NGC. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson y Ref. indica una reproducción perfecta del modelo.

Los diagramas de Taylor (Figura 11) confirman que los valores  $a_{ph}(\lambda)$  derivados de ambos modelos, fueron ligeramente mejores para el GIOP que el GSM, con mayores valores del coeficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ ) ( $\approx 0.45$ ) y desviaciones estándar normalizadas cercanas a 1.0. Finalmente, y aunque desde la evaluación de los  $r_p$  se observa que ambos modelos fueron estadísticamente significativos ( $r_{calculado} > r_{crítico}, \alpha=0.05$ ), hubo ligeras diferencias del GSM sobre todo para  $a_{ph}(412)$  en la UGC, en donde  $r_p$  fue inferior al valor crítico (Figura 11b). Lo anterior, sumado a la tendencia a la

subestimación de los datos (BIAS negativos) observada en los Match-up independientemente del análisis aplicado (todos los datos y por región bio-óptica) y a la obtención de un valor de  $\chi^2$  mayor, indica que el modelo que mejor deriva los valores  $a_{ph}(\lambda)$  para esta región, es el GIOP.

Como resultado integral de la evaluación estadística aplicada al set de datos analizado, se concluye que el modelo GIOP además de ser estadísticamente más significativo, es el que mejor reproduce la variabilidad descrita por los datos *in situ* del coeficiente de absorción  $a_{ph}(\lambda)$ . Esto se evidencia con las estaciones (cuadrados, estrellas y cruces, Figura 10 c, h, i, n, o) correspondientes a los cruceros de junio de 2010, agosto y septiembre de 2012 que se caracterizaron por presentar bajos valores de  $a_{ph}(\lambda)$ , que fueron reproducidos casi linealmente por el modelo. Sin embargo, para algunas estaciones del crucero de marzo de 2011 (triángulos, Figura 10 b, c, h, i, n y o), el modelo no pudo reproducir sus valores *in situ* y tendió a sobreestimar los datos, esto muy posiblemente fue debido a la alta dispersión asociada a las condiciones propias de la primavera, descritas en el capítulo 1.

Los modelos GSM y GIOP tienen como entrada la Chla satelital (*Tabla VII*) y por lo tanto sus estimaciones también dependen de esta variable. Bastidas-Salamanca *et al.* (2014) observaron que datos del MODIS en general sobreestiman la Chla en el área de estudio, y obtuvieron un RMSE de 35% con

datos obtenidos en Junio del 2008. Estos autores indicaron que la precisión en las mediciones de la Chla en esta región se ven altamente afectadas por la influencia no solamente de altas concentraciones de detrito ( $a_d(\lambda)$ ) como también por el efecto de aerosoles continentales y del desierto cercano (i.e., absorbing aerosols) que afectan las correcciones atmosféricas aplicadas a los datos del sensor. Así mismo, en el capítulo 1 del presente documento, se observó una alta contribución del  $a_{CDOM}(\lambda)$  a la absorción de luz, lo que a su vez también puede afectar las mediciones de la clorofila satelital en ambas regiones bio-ópticas. De hecho, en las estaciones donde los modelos subestimaron los valores *in situ* se observó una mayor contribución a la absorción de la luz dominada por el  $a_{CDOM}(\lambda)$  (Capítulo 1). Por lo tanto, no se puede descartar el efecto que estas mismas variables (CDOM y detrito) tienen sobre las estimaciones de clorofila a y por ende, en las estimaciones del coeficiente de absorción del  $a_{ph}(\lambda)$

### 3.2. Comparación del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ )

En el **Anexo 3** se presentan los datos del coeficiente de absorción  $a_{dg}(412, 443$  y  $448)$  que integraron la base de datos utilizada. El total de datos *in situ* de  $a_{dg}(412, 443$  y  $448)$  fue de 68, mientras que el total de los modelos GIOP y GSM fue de 47 y 38 respectivamente (Figura 9 d, e y f). Al igual que con el

$a_{ph}(\lambda)$ , el menor número de datos satelitales obedeció principalmente a ND y ED.

A diferencia de lo observado con  $a_{ph}(\lambda)$ , en el análisis comparativo entre el coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ* y los datos derivados de los modelos GIOP y GSM, si se observa una marcada diferencia entre modelos (Figura 12) y la presencia de datos extremos en la NGC (Figura 12c, g, j, m, p y s). En los diagramas (Figura 12b, f, i, l, o y r) se observa una alta variabilidad *in situ*, que se relaciona con las variaciones de  $S_{dg}$  e indica que los modelos no están siendo sensibles a los cambios naturales de la región (Brewin *et al.*, 2015), sobre todo en las estaciones ubicadas en la UGC que fueron altamente subestimadas por ambos modelos (BIAS negativos). En contraste, en la NGC no hay una tendencia a la subestimación, inclusive cuando los valores extremos no se han retirado de los cálculos de los estadísticos (*Tabla IX*). En la Figura 12 se muestra el análisis comparativo sin distinción de las regiones bio-ópticas y se observa que los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) más altos fueron para el modelo GIOP (Figura 12a, h y n) particularmente a 443 nm ( $R^2 = 0.55$ ). Así mismo, se observa que el RMSE presentó los valores más bajos y el BIAS tuvo valores cercanos a cero (Figura 10d, k y q), con excepción de  $a_{dg}(488)$  que mostró una ligera subestimación (BIAS = -0.02). Cuando la comparación se hace de acuerdo a cada región bio-óptica, se observan los  $R^2$  más altos en ambos modelos para  $a_{dg}(443)$  tanto en la UGC (Figura 12i y l) como en la NGC,

pero con una tendencia a la subestimación en ambos modelos y en las tres longitudes de onda, con una importante disminución de  $R^2$  sobre todo para el modelo GSM en las longitudes 412 y 488 nm (Figura 12 f y r).

Al igual que en  $a_{ph}(\lambda)$ , el cálculo de los estadísticos se hizo considerando la exclusión de los datos extremos (áreas sombreadas en rojo en Figura 12). En la **Tabla IX** se presentan los valores del RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$  para el set de datos antes y después de aplicar la exclusión de los extremos y se observa que si hubo cambios en los resultados finales, mejorando incluso la significancia estadística de los modelos. Por ejemplo, antes de la exclusión, la  $\chi^2$  fue más baja para el modelo GSM, pero en los resultados finales representados en los match up, se observa que los valores más bajos de este estadístico los obtuvo el GIOP. Así mismo, se analizaron las estaciones excluidas y se observó que el mayor porcentaje de contribución a la suma total de  $a_{dg}(\lambda)$  de las estaciones pertenecientes a la UGC (D5, D6, B06 y B04) fue del  $a_d(\lambda)$  con porcentajes superiores al 62%, mientras que la mayoría de las estaciones con datos extremos pertenecientes a la región NGC (B04, H09, H01, A6, D05, F06), se caracterizaron por una mayor contribución de  $a_{CDOM}(\lambda)$  (>60%) en todas las longitudes de onda, alguna de ellas con incluso una contribución fue superior al 90%.

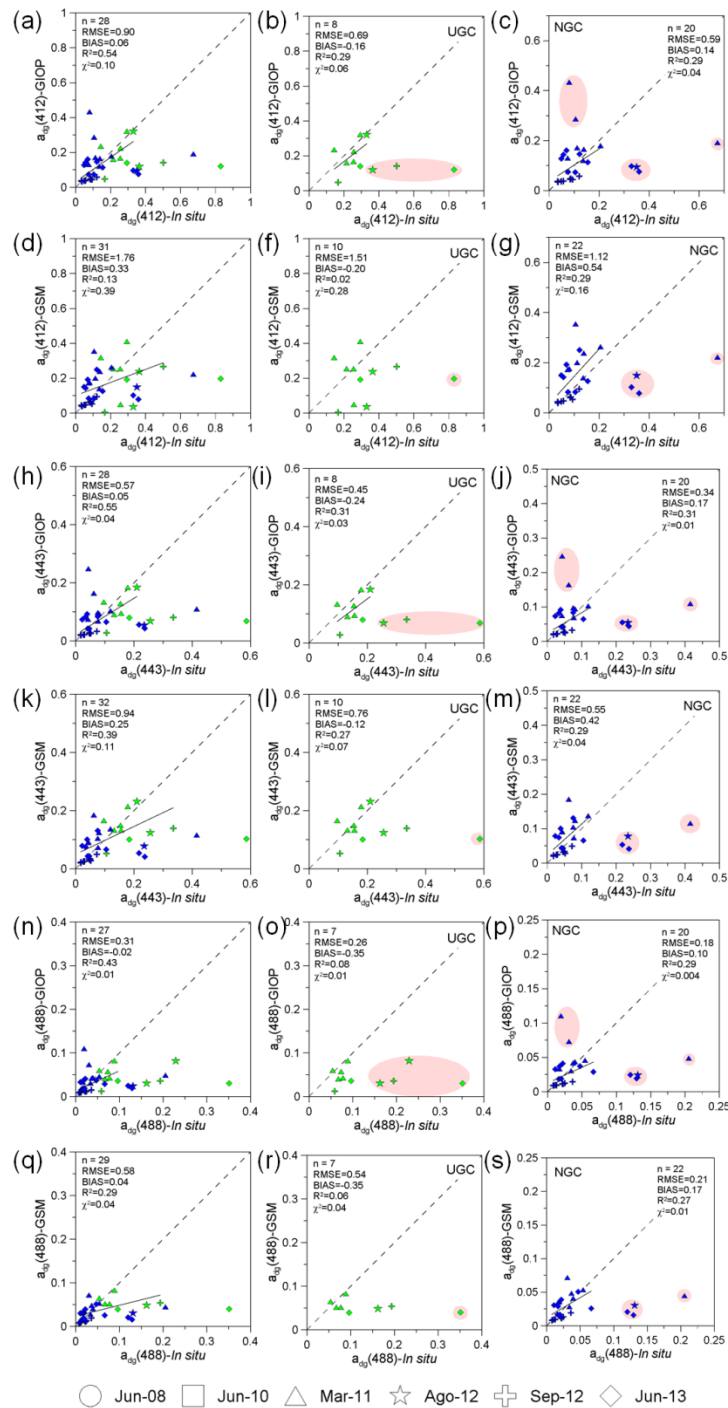


Figura 12. Análisis comparativo entre  $a_{dg}(412, 443 \text{ y } 488) \text{ in situ}$  y satelital para los modelos GIOP y GSM, con estadísticos RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia. Las áreas rojas marcan puntos extremos retirados de los cálculos estadísticos. Los colores verde y azul corresponden a las regiones UGC y NGC respectivamente.

Tabla IX. Estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ* y derivados de los modelos GIOP y GSM. En sombreado gris se resaltan los resultados de los estadísticos usados para todos los análisis aplicados y corresponden al total luego de la exclusión de datos extremos.

$\lambda$		n		SD <sub>In situ</sub>		SD <sub>Satellite</sub>		RMSE		BIAS		Least squares		R <sup>2</sup>	
		GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM	GIOP	GSM
ALL	412	37	37	0.18	0.18	0.09	0.10	3.33	3.12	0.07	0.17	1.38	1.22	0.03	0.08
		28	32	0.09	0.11	0.08	0.11	<b>0.90</b>	1.88	0.06	0.31	<b>0.10</b>	0.44	<b>0.54</b>	0.13
	443	37	37	0.12	0.12	0.05	0.05	2.28	2.05	0.06	0.12	0.65	0.52	0.02	0.11
		28	32	0.06	0.07	0.05	0.06	<b>0.57</b>	0.94	0.05	0.25	<b>0.04</b>	0.11	<b>0.55</b>	0.39
	488	37	34	0.08	0.07	0.02	0.02	1.40	1.26	-0.02	-0.09	0.25	0.20	0.04	0.03
		27	29	0.03	0.04	0.02	0.02	<b>0.31</b>	0.58	-0.02	0.04	<b>0.01</b>	0.04	<b>0.43</b>	0.29
UGC	412	11	11	0.19	0.19	0.09	0.13	2.45	2.34	-0.32	-0.26	0.75	0.69	0.04	0.00
		8	10	0.06	0.10	0.09	0.13	<b>0.69</b>	1.51	-0.16	-0.20	<b>0.06</b>	0.28	<b>0.29</b>	0.02
	443	11	11	0.14	0.14	0.05	0.05	1.77	1.57	-0.39	-0.19	0.39	0.31	0.05	0.02
		8	10	0.04	0.07	0.05	0.05	<b>0.45</b>	0.76	-0.24	-0.12	<b>0.03</b>	0.07	<b>0.31</b>	0.27
	488	11	8	0.09	0.10	0.02	0.01	1.18	1.04	-0.51	-0.42	0.18	0.13	0.00	0.01
		7	7	0.02	0.05	0.02	0.01	<b>0.26</b>	0.54	-0.35	-0.35	<b>0.01</b>	0.04	<b>0.08</b>	0.06
NGC	412	26	26	0.14	0.14	0.09	0.08	2.25	2.06	0.23	0.35	0.63	0.53	0.02	0.06
		20	22	0.04	0.04	0.05	0.09	<b>0.59</b>	1.12	0.14	0.54	<b>0.04</b>	0.16	0.29	0.29
	443	26	26	0.09	0.09	0.05	0.04	1.43	1.32	0.25	0.25	0.26	0.22	0.01	0.05
		20	22	0.03	0.03	0.03	0.05	<b>0.34</b>	0.55	0.17	0.42	<b>0.01</b>	0.04	<b>0.31</b>	0.29
	488	26	26	0.05	0.05	0.02	0.02	0.76	0.72	0.19	0.02	0.07	0.06	0.01	0.05
		20	22	0.02	0.02	0.01	0.02	<b>0.18</b>	0.21	0.10	0.17	<b>0.00</b>	0.01	<b>0.29</b>	0.27

En la Figura 13a se muestra que ambos modelos fueron estadísticamente significativos ( $\alpha=0.05$ ) cuando el análisis se hace sin distinción de región bio-ópticas, con mayores valores de  $r_p$  ( $>0.60$ ) y desviaciones estándar normalizadas alrededor de 0.8 para el modelo GIOP y más dispersas para el GSM. Sin embargo, cuando los datos se analizan de acuerdo a cada región, se observa que en UGC los valores de  $r_p$  fueron menores al valor crítico (-0.60 y

0.60) en ambos modelos, lo que indica que ninguno pudo reproducir los valores *in situ* de  $a_{dg}(\lambda)$ . En la NGC los valores del  $r_p$  estuvieron por encima de 0.50 y fueron estadísticamente significativos ( $r_{calculado} > r_{crítico}$ ,  $\alpha=0.05$ ). En cuanto a los valores de las desviaciones estándar normalizadas (Figura 13c), para GIOP fueron cercanas a 1.0, mientras que para GSM fueron más dispersas (entre 1 y 2).

Como evaluación integral de los estadísticos, se observa que los modelos GIOP y GSM tienen problemas para derivar  $a_{dg}(\lambda)$ . En la región UGC, ambos subestiman los datos *in situ* y de acuerdo al  $r_p$  no son estadísticamente significativos. Para NGC, la situación cambia, dado que los estadísticos fueron ligeramente mejores para el GIOP que el GSM, con mayores valores del coeficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ ) ( $>0.29$ ), desviaciones estándar normalizadas cercanas a 1.0, menores valores de RMSE, BIAS cercanos a cero y la obtención de los menores valores de  $\chi^2$ , lo que indica que el modelo que mejor deriva los valores  $a_{dg}(\lambda)$  para la NGC es el GIOP.

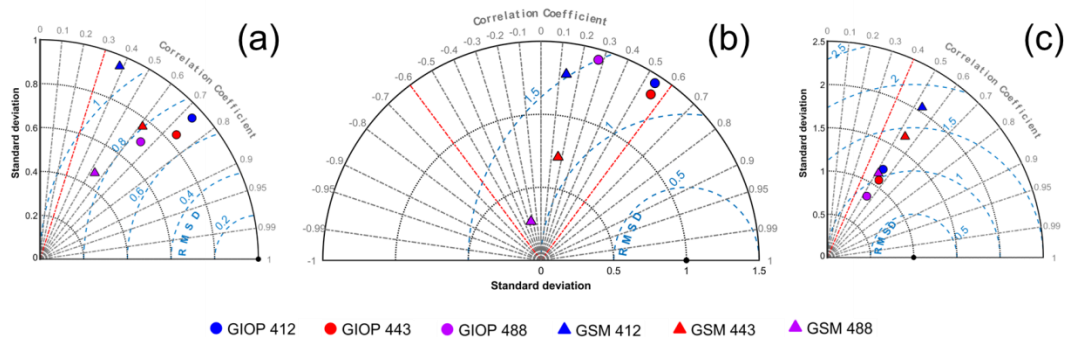


Figura 13. Diagrama de Taylor en el que se ilustra el rendimiento relativo de los modelos GIOP y GSM para reproducir el coeficiente de absorción  $a_{dg}$ (412, 443 y 488 nm). Cada diagrama representa el análisis aplicado a, (a) todo los datos y por región bio-óptica (b) UGC y (c) NGC. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson.

Debido a que  $a_{dg}(\lambda)$  fue calculado como el producto de la suma de  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$ , se consideró importante analizar los espectros promedios de estas variables para cada crucero y región bio-óptica. Este análisis se realizó comparando los valores de  $a_{dg}(\lambda)$  de los modelos GIOP y GSM a cinco longitudes de onda (412, 443, 448, 555 y 678), incluyendo la contribución dada por el detrito ( $a_d(\lambda)$ ) y el CDOM ( $a_{CDOM}(\lambda)$ ) al coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$ . Así entonces, en la Figura 14 se observa que en la UGC la subestimación de ambos modelos se asocia con los cruceros en los cuales la contribución del detrito al  $a_{dg}(\lambda)$  es mayor que la del CDOM (Figura 14b, c y d), mientras que en la región NGC ambos modelos muestran valores promedio similares a los promedios *in situ*. Estas relaciones confirman lo observado en los match-ups, cuando se analizaron las estaciones por crucero y región bio-óptica.

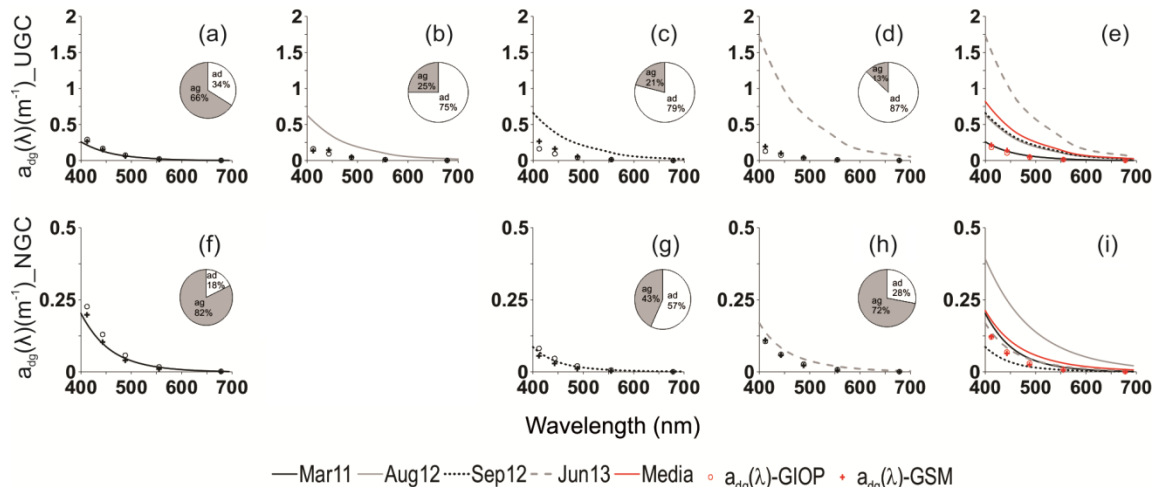


Figura 14. Espectros promedio del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detritica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) calculados para cada crucero en UGC (a, b, c y d) y NGC (f, g y h), así como el promedio total de  $a_{dg}(\lambda)$  para UGC (e) y para NGC (i). El diagrama de torta al interior de los espectros representa la contribución porcentual del detrito (ad) y el CDOM (ag) al  $a_{dg}(\lambda)$ . **Nota:** El crucero de Agosto de 2012 estuvo representado por una única estación, por ello no fue incluido dentro de la figura.

Como se ha indicado antes, la alta variabilidad de los datos *in situ*, se relaciona con las variaciones de  $S_{dg}$ , lo que se confirma en la Figura 15a. En esta se puede observar que la mayoría de valores de  $S_{dg}$  *in situ*, estuvieron por debajo los valores definidos por defecto para el GIOP y GSM, especialmente en la región UGC (Figura 15b) cuyos valores de  $S_{dg}$  estuvieron entre 0.011 y 0.018  $\text{nm}^{-1}$ , pero con la mayoría de valores agrupados en 0.012  $\text{nm}^{-1}$ . En la región NGC (Figura 15c), aunque la mayoría de los valores estuvieron por debajo de 0.018, el intervalo de variación fue más amplio (0.011 a 0.027  $\text{nm}^{-1}$ ). Esta variable se identifica como un término importante para la estimación del  $a_{dg}(\lambda)$ , por lo que debe ser revisado el uso de un valor fijo de entrada al modelo y

considerar el uso de intervalos de dicho parámetro como propuesta de ajuste de los algoritmos semi-analíticos usados para aguas ópticamente complejas.

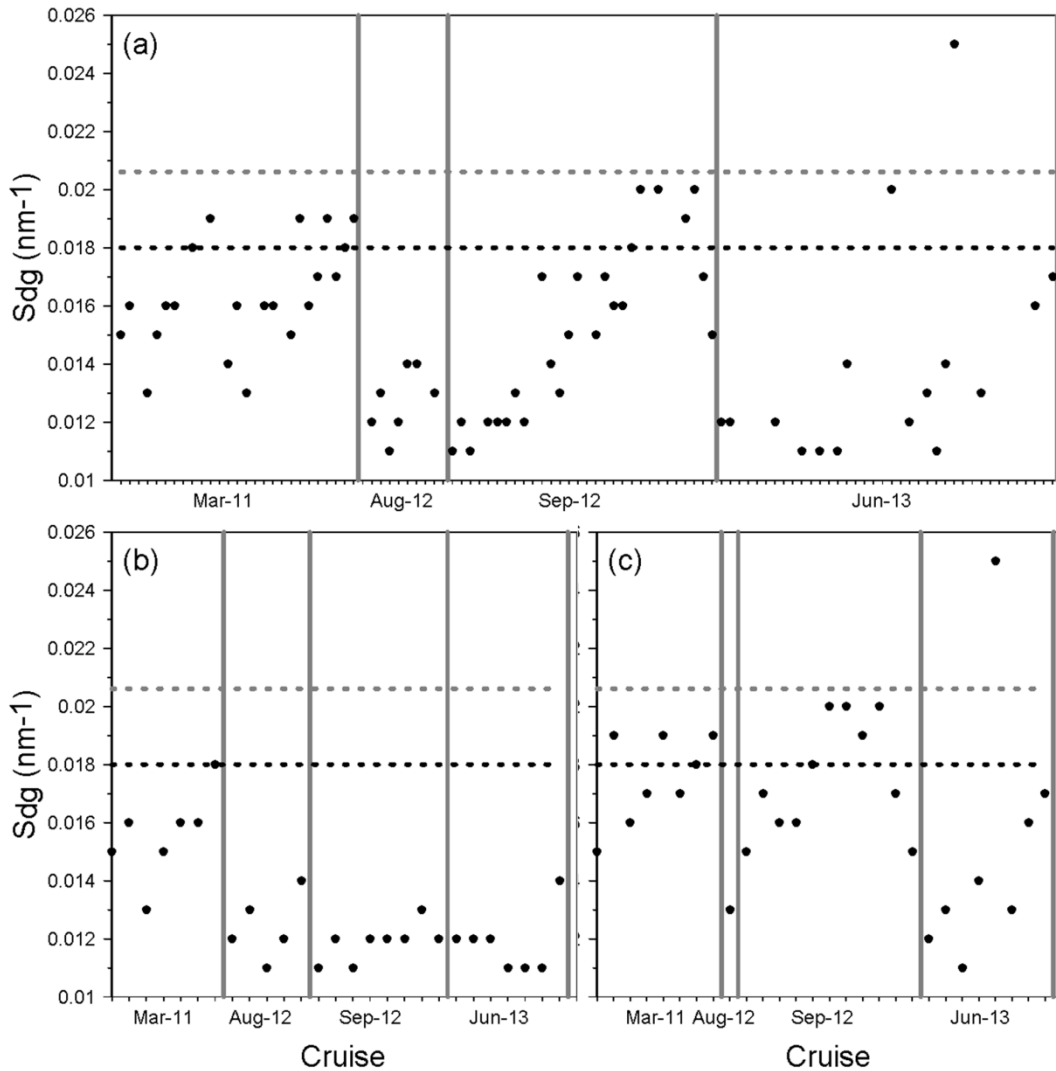


Figura 15. Variabilidad entre los valores  $S_{dg}$  *in situ* y los valores por defecto  $S_{dg}$  usados por los modelos GIOP ( $S_{dg} = 0.018$ , línea negra punteada) y GSM ( $S_{dg} = 0.02061$ , línea gris punteada) separados para cada crucero por líneas grises verticales.

#### 4. Conclusiones

Un análisis estadístico fue aplicado para comparar dos modelos semi-analíticos usando una base de datos integrada por cuatro cruceros realizados de primavera a verano (marzo a septiembre) entre 2011 y 2013 en la región norte del Golfo de California. Los resultados sugieren que en esta región, el modelo GIOP tuvo una mayor validez estadística que GSM cuando se compararon valores modelados con valores *in situ* de los coeficientes de absorción  $a_{ph}(\lambda)$  y  $a_{dg}(\lambda)$ , pero se debe prestar especial atención a la influencia de los coeficientes  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$  sobre la tendencia final de los datos. Finalmente, se sugiere un mayor esfuerzo de monitoreo en el área de estudio para la toma de datos de reflectancias *in situ* que permitan explicar los efectos que el detrito y el CDOM sobre las salidas de los modelos pero aislando la posible afectación de la atmósfera sobre las reflectancias satelitales.

#### Referencias

- Antoine, D., Morel, A., Gordon, H. R., Banzon, V. F., & Evans, R. H. (2005). Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002620>
- Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A., & Shea, D. M. (2005). Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global biogeochemical cycles*, 19. <https://doi.org/10.1029/2004GB002299>
- Brewin, R. J., Sathyendranath, S., Müller, D., Brockmann, C., Deschamps, P. Y., Devred, E. and Groom, S. (2015). The Ocean Colour Climate Change Initiative: III. A round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 162, 271-294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.016>

- Bricaud, A., Morel, A., Babin, M., Allali, K., & Claustre, H. (1998). Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103, 31033-31044. <https://doi.org/10.1029/98JC02712>
- Capuzzo, E., Painting, S. J., Forster, R. M., Greenwood, N., Stephens, D. T., & Mikkelsen, O. A. (2013). Variability in the sub-surface light climate at ecohydrodynamically distinct sites in the North Sea. *Biogeochemistry*, 113, 85-103.
- Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K., & Kamykowski, D. (1999). Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104, 5403-5421. <https://doi.org/10.1029/1998JC900082>
- Garver, S. A., and Siegel, D. A. (1997). Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. Time series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102, 18607-18625. <https://doi.org/10.1029/96JC03243>
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., Baker, K. S., & Clark, D. K. (1988). A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D9), 10909-10924. <https://doi.org/10.1029/JD093iD09p10909>
- Gregg, W. W., Conkright, M. E., Ginoux, P., O'Reilly, J. E., & Casey, N. W. (2003). Ocean primary production and climate: Global decadal changes. *Geophysical Research Letters*, 30. <https://doi.org/10.1029/2003GL016889>
- Haraldsson, M., Tönnesson, K., Tiselius, P., Thingstad, T. F., & Aksnes, D. L. (2012). Relationship between fish and jellyfish as a function of eutrophication and water clarity. *Marine Ecology Progress Series*, 471, 73-85. <https://doi.org/10.3354/meps10036>
- Hu, C., Lee, Z., Muller-Karger, E., Carder, L., & Walsh, J. J. (2006). Ocean color reveals phase shift between marine plants and yellow substance. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(2), 262-266. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.862527>
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge University Press, Cambridge, 509 p.
- Lee, Z., Carder, K. L., and Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied optics*, 41, 5755-5772. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>
- Lee, Z., Carder, K. L., Steward, R. G., Peacock, T. G., Davis, C. O., and Patch, J. S. (1998). An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103, 27967-27978. <https://doi.org/10.1029/98JC01946>

- Lee, Z. P., Darecki, M., Carder, K. L., Davis, C. O., Stramski, D., & Rhea, W. J. (2005a). Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002573>
- Lee, Z., Du, K., Arnone, R., Liew, S., & Penta, B. (2005b). Penetration of solar radiation in the upper ocean: A numerical model for oceanic and coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002780>
- Lee, Z. P., Du, K., Voss, K. J., Zibordi, G., Lubac, B., Arnone, R., & Weidemann, A. (2011). An inherent-optical-property-centered approach to correct the angular effects in water-leaving radiance. *Applied Optics*, 50, 3155-3167. <https://doi.org/10.1364/AO.50.003155>
- Maritorena, S., & Siegel, D. A. (2006). Chapter 11: The GSM semi-analytical bio-optical model. *Remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms, and applications*, 73-79.
- Maritorena, S., Siegel, D. A., and Peterson, A. R. (2002). Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, 41, 2705-2714. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002705>
- McClain, C. R., Christian, J. R., Signorini, S. R., Lewis, M. R., Asanuma, I., Turk, D., & Dupouy-Douchement, C. (2002). Satellite ocean-color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49, 2533-2560. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00047-4)
- McClain, C. R. (1998). Science quality SeaWiFS data for global biosphere research. *Sea Technol.*, 39, 10-16.
- Mitchell, B. G., Kahru, M., Wieland, J., Stramska, M., and Mueller, J. L. (2002). Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. *Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision, 3*, 231–257.
- Morel, A., Antoine, D., & Gentili, B. (2002). Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function. *Applied Optics*, 41, 6289-6306. <https://doi.org/10.1364/AO.41.006289>
- Morel, A., & Maritorena, S. (2001). Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106, 7163-7180. <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., ... & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103, 24937-24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
- Roesler, C. S., Perry, M. J., and Carder, K. L. (1989). Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*, 34, 1510-1523. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1510>

- Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., González-Silvera, A., Cajal-Medrano, R., 2010. Comparison of In Situ and Remotely-Sensed Chl-a concentrations: a Statistical Examination of the Match-up Approach, in: Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretatio: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management. EU PRESPO and IOCCG, pp. 221–238.
- Siegel, D. A., Behrenfeld, M. J., Maritorena, S., McClain, C. R., Antoine, D., Bailey, S. W., ... & Eplee, R. E. (2013). Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission. *Remote Sensing of Environment*, 135, 77-91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.025>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Feldman, G. C., Boss, E., Brando, V. E., ... and Loisel, H. (2013). Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied optics*, 52, 2019-2037. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Harding Jr, L. W., and Feldman, G. C. (2007). Approach for the long-term spatial and temporal evaluation of ocean color satellite data products in a coastal environment. In *Proc. of SPIE Vol. 6680*, pp. 66800G-1). <https://doi.org/10.1117/12.732489>
- Yoder, J., Kennelly, M., (2006). What Have We Learned About Ocean Variability from Satellite Ocean Color Imagers? *Oceanography* 19, 152–171. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2006.98>

### **CAPITULO 3: Adaptación del algoritmo bio-óptico GIOP y GSM en su componente de estimación del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) en aguas ópticamente complejas.**

#### **Resumen**

Un ajuste a los modelos semi-análíticos GIOP (Generalized Inherent Optical Property algorithm) y GSM (Garvel-Siegel-Maritorena) fue aplicado con el objetivo de evaluar la estimación del coeficiente de absorción de la materia orgánica disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) en una zona de aguas ópticamente complejas, el Alto Golfo de California (UGC) y el Norte del Golfo de California (NGC). El ajuste a los algoritmos planteó la modificación de la pendiente espectral del  $a_{dg}(\lambda)$  ( $S_{dg}$ ) de acuerdo a dos propuestas: la primera se basó en el uso de valores de  $S_{dg}$  *in situ* como entradas específicas para estimación del  $a_{dg}(\lambda)$  con ambos modelos, y la segunda propuso la modificación del modelo GIOP mediante el uso de un valor fijo de la  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$  para estaciones ubicadas en la UGC. Para la validación de los ajustes del modelo, se usaron dos bases de datos, una correspondió a cuatro cruceros realizados de primavera a verano (marzo a septiembre) entre 2011 y 2013 (BD01), y la otra correspondió a un crucero realizado en la misma zona del 20 de julio al 5 de agosto de 2016 (BD02). Al comparar las salidas de los modelos GIOP y GSM utilizando como entrada valores de la  $S_{dg}$  *in situ* se observó que en la UGC la mayor significancia estadística la obtuvo el GSM, mientras que en la NGC ambos modelos mantuvieron la sobrestimación descrita para la configuración predeterminada y al igual que en la UGC, la mayor significancia estadística se asoció con el GSM. En cuanto al ajuste del modelo GIOP usando una  $S_{dg}$  de  $0.012 \text{ nm}^{-1}$ , se observó que para la BD01 no hay mejora en la significancia estadística del modelo, mientras que para la BD02, se observa una mayor validez estadística del modelo, que podría ser resultado de la variabilidad dada por la conformación no homogénea de estaciones que integraron la BD01.

## 1. Introducción

En las mediciones satelitales de color del océano, la clorofila-a se considera el principal producto de salida y la principal entrada de los modelos para estimar la productividad primaria (Behrenfeld y Falkowski, 1997). El fundamento de los algoritmos diseñados para su estimación, se basan en la relación entre las reflectancias satelitales ( $R_{rs}$ ) en longitudes de onda azules y verdes, que representa principalmente un cambio en el coeficiente de absorción total de la luz en la longitud de onda azul (~440nm). Por lo general, estos algoritmos siempre han considerado que la contribución de otras sustancias a las propiedades ópticas de las llamadas aguas Caso 1 es insignificante, o incluso descartan la posibilidad de que estas puedan co-variar con el fitoplancton (IOCCG, 2000). Sin embargo, la absorción total de la luz a ~440 nm no está determinada únicamente por la absorción de pigmentos de fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ), sino también por la absorción de la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) y detrito (Kahru *et al.*, 2015). Las contribuciones relativas de estos componentes individuales no son constantes y pueden variar en el espacio y el tiempo. El CDOM y el detrito se producen principalmente durante la remineralización de la materia orgánica particulada que se hunde (Swan *et al.*, 2009) y el CDOM se destruye en la superficie por blanqueamiento solar (Nelson *et al.*, 1998). Estas variables no han podido ser determinados de forma aislada por los algoritmos de color del océano, por ello se utilizan como una variable integrada y su suma se denomina materia disuelta y detritica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) (Siegel *et*

*al.*, 2002). La relación entre  $a_{dg}(\lambda)$  y  $a_{ph}(\lambda)$  se considera un índice inverso de la proporción de absorción de luz por los organismos autótrofos y varía en un amplio rango en el océano mundial. Por otra parte, las variaciones en la relación  $a_{dg}(\lambda)$  y  $a_{ph}(\lambda)$  están causando errores sistemáticos en los productos satelitales de Chla (Siegel *et al.*, 2005; Sauer *et al.*, 2012), lo que se muestra como una evidencia de la necesidad de desarrollar algoritmos que expliquen la influencia de componentes distintos a la clorofila-a en las variaciones de la reflectancia satelital (IOCCG, 2000). De hecho, trabajos recientes (Kahru *et al.*, 2015) presentan algoritmos para estimar la producción primaria fitoplanctónica con base en el coeficiente de absorción  $a_{ph}(\lambda)$  en lugar de la Chla e indican la importancia de que los modelos para estimar  $a_{ph}(\lambda)$  sean validados localmente.

En el capítulo anterior, se hizo una validación de los algoritmos bio-ópticos globales (GSM y GIOP) comparando sus resultados con una base de datos *in situ* de los coeficientes de absorción  $a_{ph}(\lambda)$  y  $a_{dg}(\lambda)$ . Los principales resultados de dicha validación indicaron que ambos modelos tienen problemas para derivar  $a_{dg}(\lambda)$  en la región UGC y que su tendencia fue a la subestimación de los datos *in situ*. Se identificó además, que la pendiente espectral de la materia disuelta y detrítica ( $S_{dg}$ ), es una componente que puede ser ajustada dentro de los algoritmos y con ello mejorar sus resultados. Por ello el principal objetivo de este capítulo es ajustar el algoritmo que estima el coeficiente de absorción de la

materia orgánica detrítica y disuelta ( $a_{dg}(\lambda)$ ) con base en la modificación de su entrada (valor  $S_{dg}$ ).

## 2. Métodos

### 2.1. Algoritmos Semi-analíticos

Los modelos GIOP y GSM fueron modificados para estimar el coeficiente de absorción de la materia orgánica disuelta y detrítica  $a_{dg}(\lambda)$ . En ambos algoritmos la variable de entrada para estimar el  $a_{dg}(\lambda)$  es  $S_{dg}$  o constante de decaimiento espectral de la absorción de  $dg$  (Werdell *et al.*, 2007) y para su estimación se usa la siguiente función:

$$a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(443) \exp^{-S(\lambda-443)} \quad (1),$$

### 2.2. Datos satelitales

Las 48 imágenes nivel L1A seleccionadas en el capítulo II, integraron la base de datos utilizada para el procesamiento de los archivos de Nivel 1A a Nivel 2. Para el ajuste de los algoritmos, se creó un comando de Linux (Figura 16), que permitió llamar el programa L2GEN (SeaDAS versión 7.4) y modificar en ambos modelos el parámetro de entrada  $S_{dg}$  requerido para estimar el coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$  en tres longitudes de onda (412, 443, 488). Como resultado se obtuvo por cada modelo, un total de 987 archivos nivel L2 y de cada uno se extrajo las estadísticas, incluyendo la media, la desviación estándar y el número de píxeles válidos mediante una rutina creada para la extracción.

```

#!/bin/bash
export OCSSWROOT=/home/eduardo/seadas-7.4/ocssw
source $OCSSWROOT/OCSSW_bash.env

FILES="/home/eduardo/Descargas_Linux/L1A/Modis-A/*.L1A_LAC"
DIR="/home/eduardo/Descargas_Linux/L1A/Modis-A/"

EXTENSION1=.L1B_LAC
EXTENSION2=.GEO
EXTENSION3=.L2
str=_

for f in $FILES
do
for i in $(seq 0.010 0.001 0.030)
do
/home/eduardo/seadas-7.4/ocssw/run/scripts/modis_GEO.py $f
/home/eduardo/seadas-7.4/ocssw/run/scripts/modis_L1B.py $f ${f%.*}$EXTENSION2
/home/eduardo/seadas-7.4/ocssw/run/bin/linux_64/l2gen ifile=${f%.*}$EXTENSION1
geofile=${f%.*}$EXTENSION2 ofile=${f%.*}$EXTENSION3 $str$i giop_adg_s=$i
l2prod="adg_412_giop adg_443_giop adg_488_giop"
done
done

#cd ./test
#rm *.L1A*
#rm *.L1B*
#rm *.GEO*

```

Figura 16. Comando de linux para generar archivos .L2 y modificar las entradas de los algoritmos GIOP y GSM que estiman el coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$ . Resaltado en amarillo están las salidas de cada modelo, para GSM solo se modifica `_giop` por `_gsm`.

Un proceso de exclusión para cada posición geográfica extraída fue aplicado en aquellos casos en los cuales no se cumpliera con uno o más de los indicadores de control de calidad Nivel 2 de L2GEN detallados en el capítulo 2 (Tabla VI). Todas las variables de los archivos Nivel 2 fueron extraídas de ventanas de 3x3

pixeles, centradas al pixel más cercano a la muestra *in situ* y para los análisis solo se incluyeron datos con al menos 3 píxeles válidos (de un total de 9), debido al aumento de errores por píxeles cercanos a nubes o tierra.

Para cada modelo se generó una matriz de datos de  $a_{dg}(\lambda)$  en las tres longitudes de onda seleccionadas (412, 443, 488). Los valores de  $a_{dg}(\lambda)$  se calcularon para un intervalo de valores de  $S_{dg}$  entre 0.010 y 0.030, y para cada estación se extrajo el valor que coincide con el  $S_{dg}$  medido *in situ*. Es decir, si en una estación el valor *in situ* de  $S_{dg}$  fue 0.016, entonces en la matriz se busca el valor de  $a_{dg}(\lambda)$  estimado con una  $S_{dg}=0.016$ . Con estos nuevos datos de  $a_{dg}(\lambda)$  se hicieron los análisis de valoración de cada modelo.

### 2.3. Datos *in situ*

Para el presente capítulo se utilizaron datos del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) de dos bases de datos. Una correspondió a los datos descritos en el capítulo 2 usada en la evaluación del modelo (Figura 9e) y la otra correspondió a un crucero independiente desarrollado del 20 julio al 05 de agosto del 2016 (Figura 17).

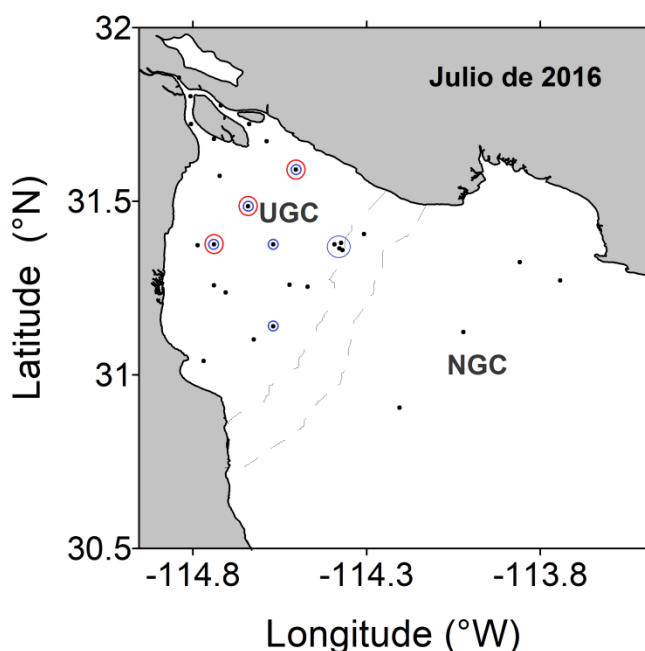


Figura 17. Distribución de estaciones del cruceo desarrollado del 20 de julio a 5 de agosto de 2016 que contaron con información *in situ* del coeficiente  $a_{dg}(\lambda)$  en la zona de estudio. Los puntos negros representan las estaciones en las cuales se midió *in situ* el  $a_{dg}(\lambda)$ , los círculos azules corresponden a las estaciones emparejadas con los datos satelitales y los círculos rojos corresponden a estaciones con datos extremos que no pudieron ser reproducidos por el modelo. La línea negra discontinua representa la posición de la zona de transición determinada a partir de la primera profundidad óptica y separa las regiones bio-ópticas UGC y NGC.

#### 2.4. Pruebas estadísticas

Las pruebas estadísticas aplicadas a los datos analizados fueron las mismas usadas en el capítulo 2, y la aplicación de las mismas tiene el objetivo de evaluar el grado de asociación del  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ* y el estimado por los modelos GIOP y GSM, determinar la validez estadística de cada modelo, probar el rendimiento de cada modelo y finalmente, comprobar los resultados obtenidos por el capítulo 2:

- *Aproximación Match-up*
- *Coefficiente de determinación ( $R^2$ )*
- *Coefficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ )*
- *Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)*
- *El BIAS*
- *Mínimos cuadrados ( $\chi^2$ )*
- *Diagrama de Taylor (conjunto de estadísticos en término de  $uRMSD^*$ )*

### **3. Resultados y Discusión**

#### **3.1. Salidas de los modelos GIOP y GSM**

La base de datos analizada en el capítulo anterior, mostró que los modelos GIOP y GSM no reproducen la variabilidad de los datos *in situ* del coeficiente  $a_{dg}(\lambda)$  en la región UGC, lo que fue atribuido al amplio intervalo de variación de la pendiente espectral ( $S_{dg}$ ). La variabilidad de esta pendiente fue también analizada de acuerdo a las regiones bio-ópticas definidas, y se observó que para la NGC el intervalo fue más amplio, con valores entre 0.011 y 0.027  $\text{nm}^{-1}$ , mientras que en la UGC el patrón fue más estrecho con la mayoría de valores agrupados en 0.012  $\text{nm}^{-1}$ . Considerando estos resultados, el presente capítulo buscó resolver el siguiente interrogante: ¿Cómo mejorar el algoritmo que estima el coeficiente de absorción de la materia orgánica detrítica y disuelta  $a_{dg}(\lambda)$ , a partir de la modificación de la  $S_{dg}$  en una región con las características del Alto Golfo de California? Y para lograrlo, se desarrollaron las siguientes propuestas:

- A. Si se conocen los valores *in situ* de la pendiente espectral ( $S_{dg}$ ), calcular el  $a_{dg}(\lambda)$  usando dichos valores, como entradas en los algoritmos.
- B. En la configuración de los algoritmos modificar el valor predeterminado de  $S_{dg}$  por  $0.012 \text{ nm}^{-1}$  para las estaciones ubicadas en la región UGC, y comparar los resultados con los mismos datos *in situ* utilizados en la evaluación de los modelos.
- C. Lo anterior, aplicarlo a la región UGC de un crucero independiente al set de datos usados en la evaluación de los algoritmos.

La primera propuesta (A), contempló la estimación de  $a_{dg}(\lambda)$  mediante la modificación de la configuración predeterminada de los algoritmos y se obtuvo de cada modelo valores de  $a_{dg}(\lambda)$  a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) estimados a partir de 21 valores diferentes de  $S_{dg}$  ( $0.010$  a  $0.030 \text{ nm}^{-1}$ ). Teniendo en cuenta que los modelos usan una función exponencial negativa ( $a_{d,g}^*(\lambda) = \exp(-S_{d,g}\lambda)$ ) para la estimación del  $a_{dg}(\lambda)$ , se espera que los datos describan un comportamiento exponencial, esto es, valores altos de  $a_{dg}(\lambda)$  cuando el  $S_{dg}$  usado es pequeño ( $0.010 \text{ nm}^{-1}$ ) y lo contrario cuando el  $S_{dg}$  es grande ( $0.030 \text{ nm}^{-1}$ ). Para el modelo GIOP, se observó que las salidas de  $a_{dg}(412)$  y  $a_{dg}(443)$  describieron el comportamiento exponencial esperado. Para  $a_{dg}(412)$  los valores variaron entre  $0.04$  y  $0.65 \text{ nm}^{-1}$ , cuando  $S_{dg}$  fue de  $0.010 \text{ nm}^{-1}$  y entre  $0.02$  y  $0.40 \text{ nm}^{-1}$  cuando  $S_{dg}$  fue de  $0.030 \text{ nm}^{-1}$  (Figura 18a). A su vez, para  $a_{dg}(443)$  los valores variaron entre  $0.03$  y  $0.58 \text{ nm}^{-1}$ , cuando  $S_{dg}$  fue de

0.010 nm<sup>-1</sup> y entre 0.01 y 0.25 nm<sup>-1</sup> cuando S<sub>dg</sub> fue de 0.030 nm<sup>-1</sup> (Figura 18b). Para a<sub>dg</sub>(488) el comportamiento exponencial fue mucho más acentuado (Figura 18c), con valores entre 0.008 y 0.30 nm<sup>-1</sup> cuando S<sub>dg</sub> fue de 0.010 nm<sup>-1</sup> y entre 0.001 y 0.023 nm<sup>-1</sup> cuando S<sub>dg</sub> fue de 0.030 nm<sup>-1</sup>. En estas figuras se incluyeron además la moda (línea roja punteada) y los valores mínimos y máximos (líneas negras punteadas) de los datos *in situ* de a<sub>dg</sub>(412, 443 y 488), así como la moda de las salidas del modelo a 0.012 y 0.018 nm<sup>-1</sup> (resaltado en amarillo). El resultado indicó que independientemente del valor S<sub>dg</sub> usado, es probable que el modelo GIOP no pueda reproducir valores cercanos a los máximos observados en los datos *in situ*, sobre todo en la longitud de onda 488 nm (Figura 18c).

En cuando a la moda, se observó que las salidas del modelo GIOP en su configuración predeterminada (S<sub>dg</sub> = 0.018 nm<sup>-1</sup>) estuvieron alrededor de la moda de los datos *in situ*, lo que explica lo observado en el capítulo 2, esto es, que este modelo tuvo una buena aproximación a los datos *in situ* para las estaciones en la NGC como se muestra en el intervalo resaltado en amarillo (Figura 18). Una situación diferente se observa con la moda de las salidas del modelo cuando se usa un S<sub>dg</sub> = 0.012 nm<sup>-1</sup>. Para esta configuración es posible que no se puedan reproducir los datos *in situ*, salvo para las salidas a 488 nm en donde la moda *in situ* estuvo dentro del intervalo observado de la moda del modelo (Figura 18c).

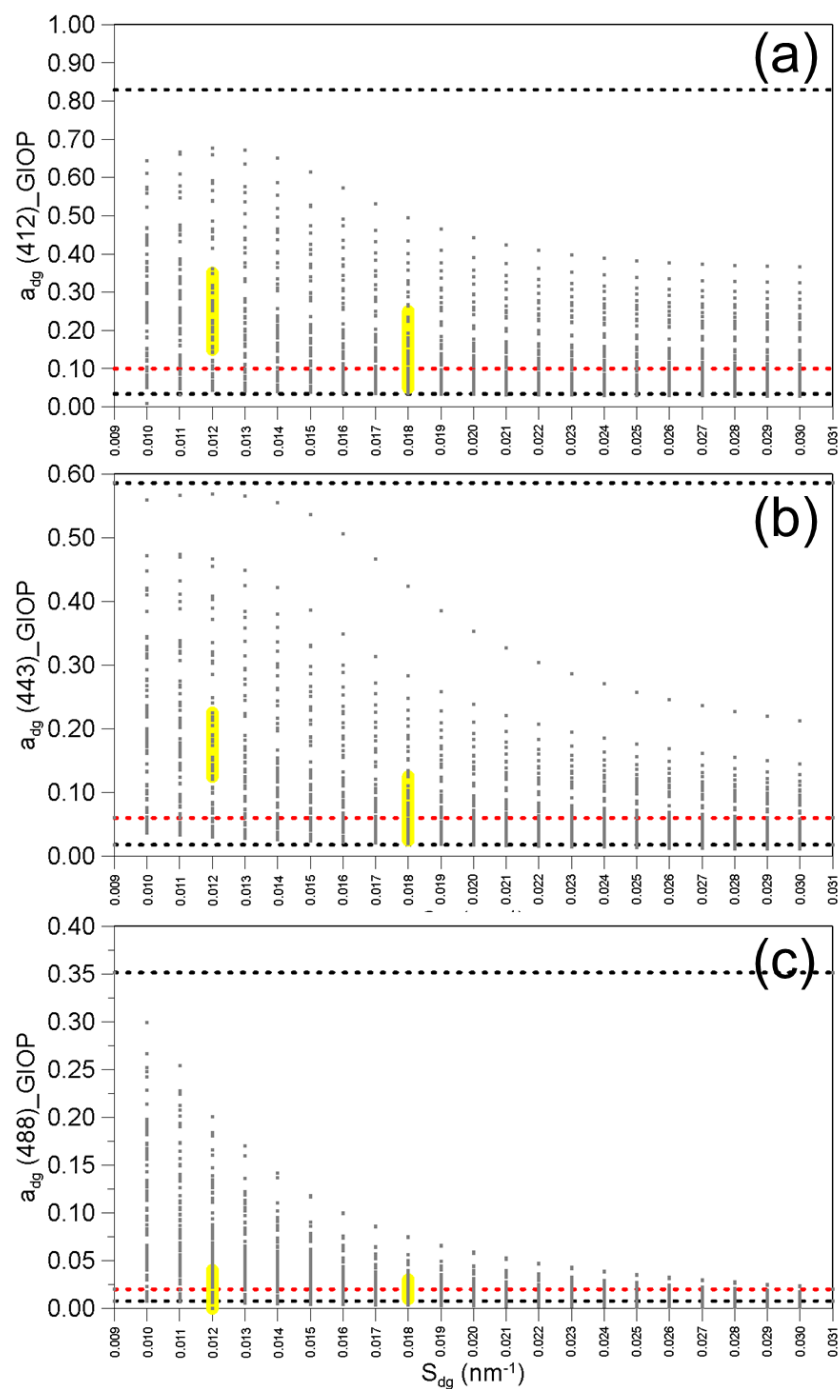


Figura 18. Salidas del modelo GIOP para el coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) estimados a partir de 21 valores diferentes de  $S_{dg}$ , (0.010 a 0.030  $\text{nm}^{-1}$ ). Las líneas negras punteadas representan el valor mínimo y máximo del  $a_{dg}$  *in situ*, la línea roja punteada es la moda de los datos *in situ* y el sombreado amarillo es la moda de los datos del modelo estimados con una  $S_{dg} = 0.012$  y  $0.018$   $\text{nm}^{-1}$ .

Para el GSM, el comportamiento exponencial esperado no fue evidente como con el GIOP. En este modelo, cuando se usaron valores de  $S_{dg}$  inferiores a  $0.018 \text{ nm}^{-1}$ , se presentaron fallas en las salidas, por ello se puede observar una interrupción en los datos graficados (Figura 19), lo que además podría indicar que los valores de  $a_{dg}(\lambda)$  generados a partir de  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$  no se asocian con los valores *in situ* correspondientes. Las salidas del modelo GSM con el valor predeterminado ( $S_{dg} = 0.021$ ) tuvieron intervalos entre  $0.004$  y  $0.41 \text{ nm}^{-1}$  para  $a_{dg}(412)$  (Figura 19a), entre  $0.02$  y  $0.23 \text{ nm}^{-1}$  para  $a_{dg}(443)$  (Figura 19b) y entre  $0.008$  y  $0.08 \text{ nm}^{-1}$  para  $a_{dg}(488)$  (Figura 19c). Al igual que con el GIOP, se observó que independientemente del valor  $S_{dg}$  usado, no se podrán reproducir valores cercanos a los máximos observados en los datos *in situ*.

En cuando a la moda, se observa que los valores de salida del modelo en su configuración predeterminada ( $S_{dg} = 0.021 \text{ nm}^{-1}$ ) estuvieron por encima de la moda de los datos *in situ* en las tres longitudes de onda analizadas, lo que también explica lo observado en el capítulo 2, en cuanto al menor porcentaje de asociación que tuvo el GSM con los valores  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ*.

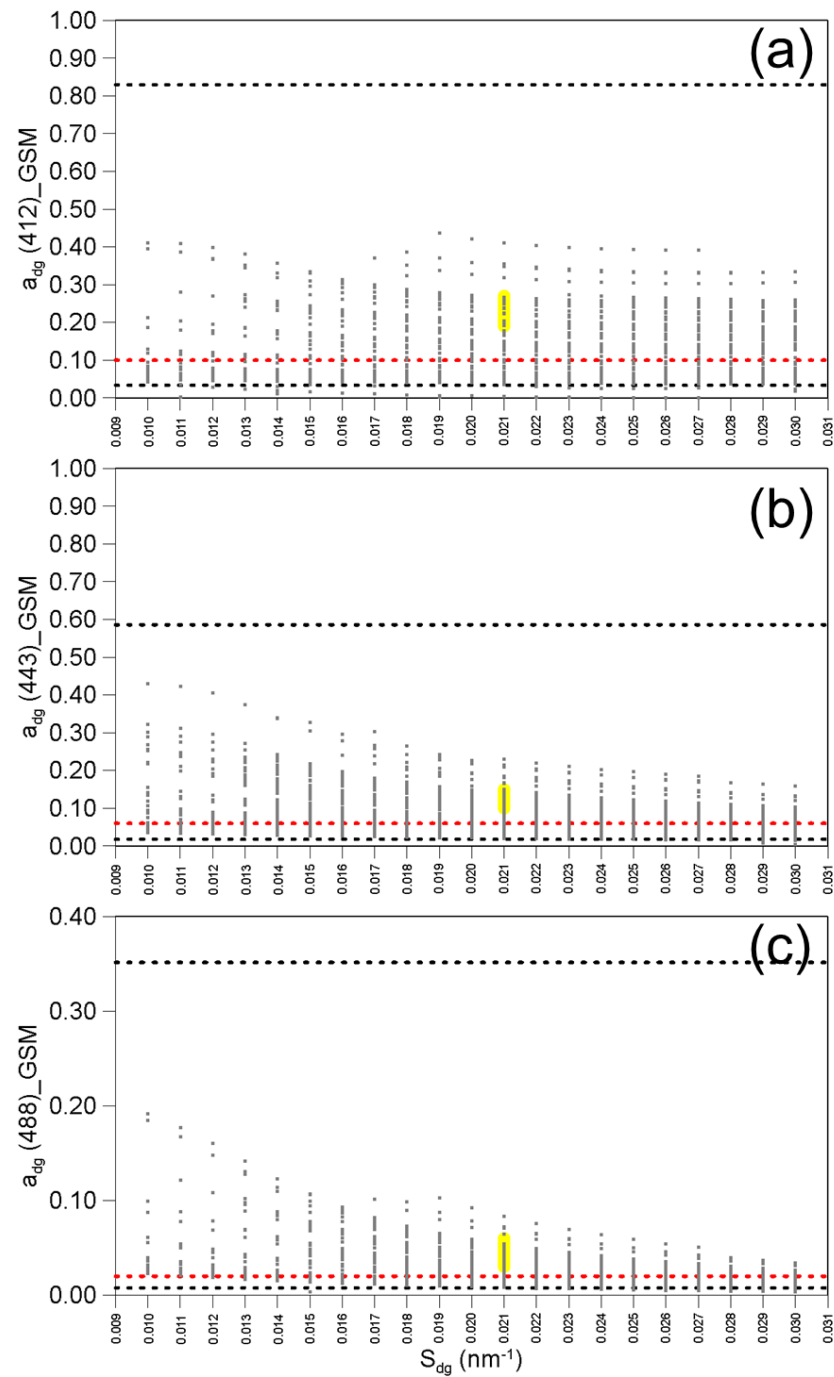


Figura 19. Salidas del modelo GSM para el coeficiente de absorción de la materia disuelta y detritica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) a tres longitudes de onda (412, 443 y 488 nm) estimados a partir de 21 valores diferentes de  $S_{dg}$ , (0.010 a 0.030  $\text{nm}^{-1}$ ). Las líneas negras punteadas representan el valor mínimo y máximo del  $a_{dg}$  *in situ*, la línea roja punteada es la moda de los datos *in situ* y el sombreado amarillo es la moda de los datos del modelo estimados con una  $S_{dg} = 0.021 \text{ nm}^{-1}$

### 3.2. Ajuste a los modelos GIOP y GSM

#### 3.2.1. Entrada al modelo de valores $S_{dg}$ *in situ*

Para la generación de la matriz de datos a evaluar, se seleccionaron los valores respectivos de  $a_{dg}(\lambda)$  de acuerdo a la  $S_{dg}$  *in situ* de cada estación analizada y el análisis comparativo de los datos se hizo solo con base en las regiones bio-ópticas UGC y NGC. Los resultados mostraron que la subestimación descrita en el capítulo anterior (Tabla X) para la UGC en ambos modelos y en las tres longitudes de onda desaparece con el ajuste de los datos, pero la mayor significancia estadística se invierte en estas nuevas salidas de los modelos y es el GSM el que mejor deriva el  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ*, con valores más altos de los coeficientes de determinación ( $R^2 > 0.46$ ), RMSE más bajos, BIAS con valores cercanos a cero y una  $\chi^2$  más baja (Figura 20d, e y f).

En la NGC se mantiene la sobrestimación descrita en el capítulo anterior (Tabla X), inclusive se acentúa particularmente para las estaciones de los cruceros de marzo de 2011 (triángulos azules, Figura 20 g-l) y junio de 2013 (rombos azules, Figura 20 g-l). Al igual que en la UGC, la mayor significancia estadística se asoció con el GSM, pero no muy distante del GIOP, cuyos estadísticos se mantuvieron similares a las salidas del modelo en su configuración predeterminada ( $S_{dg} = 0.018$ ) e incluso mejoraron el grado de asociación de los

datos, por ejemplo en  $a_{dg}(443)$  el  $R^2$  paso de 0.31 a 0.36 y en  $a_{dg}(488)$  paso de 0.29 a 0.52 (Figura 20g, h e i, Tabla X).

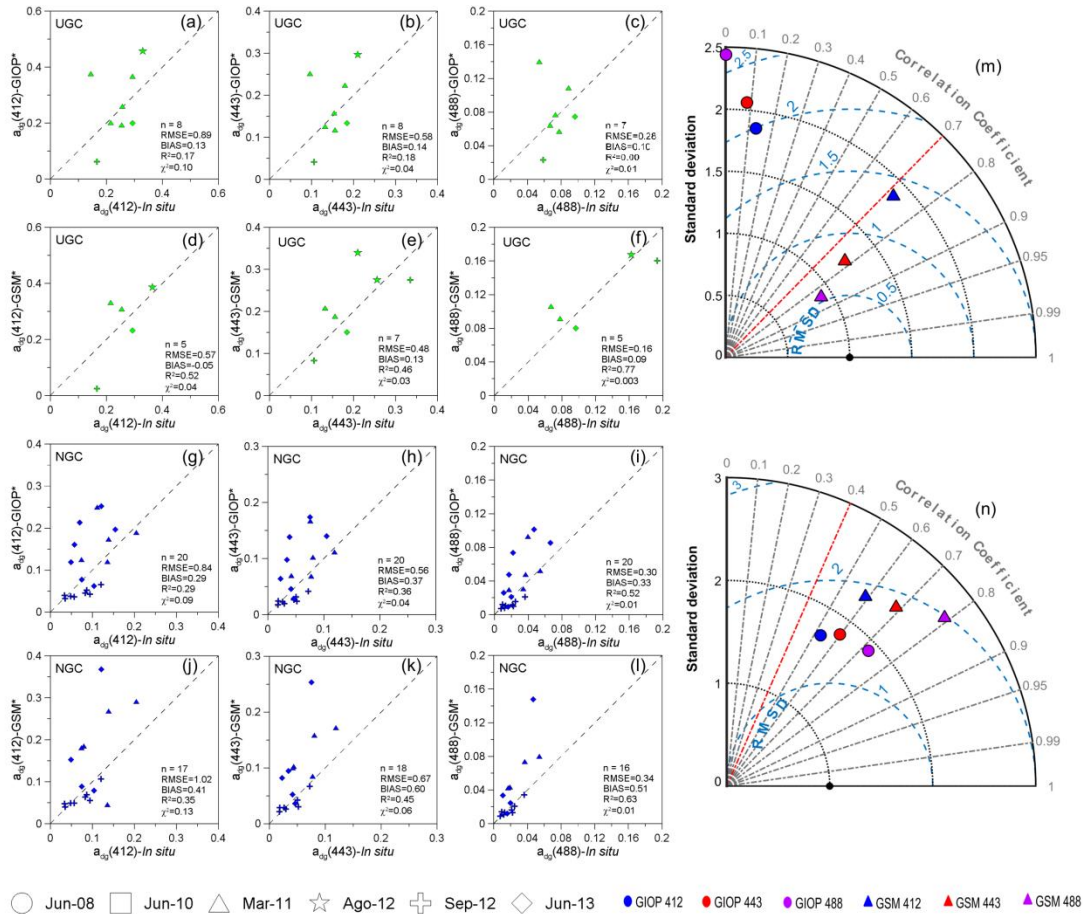


Figura 20. Análisis comparativo de los valores *in situ* de  $a_{dg}(412, 443$  y  $488)$  con las salidas de los modelos GIOP y GSM generadas a partir de los respectivos  $S_{dg} = In situ$ . Los estadísticos RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia. Los colores verde y azul corresponden a las regiones UGC y NGC respectivamente. El rendimiento relativo de cada modelo fue evaluado por los diagramas de Taylor de acuerdo las regiones (m) UGC y (n) NGC. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson.

Tabla X. Comparación entre los estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ* y las salidas de los modelos en su configuración predeterminada (**GIOP**, **GSM**), y salidas luego del ajuste por valores de  $S_{dg}$  *in situ* (**GIOP\***, **GSM\***).

$\lambda$	n		SD <sub>In situ</sub>		SD <sub>Satellite</sub>		RMSE		BIAS		Least squares		R <sup>2</sup>		
	GIOP	GIOP*	GIOP	GIOP*	GIOP	GIOP*	GIOP	GIOP*	GIOP	GIOP*	GIOP	GIOP*	GIOP	GIOP*	
UGC	412	11	11	0.19	0.19	0.09	0.13	2.45	2.34	-	-0.26	0.75	0.69	0.04	0.00
	443	11	11	0.14	0.14	0.05	0.05	1.77	1.57	-	-0.19	0.39	0.31	0.05	0.02
	488	11	8	0.09	0.10	0.02	0.01	1.18	1.04	-	-0.42	0.18	0.13	0.00	0.01
NGC	412	26	26	0.14	0.14	0.09	0.08	2.25	2.06	0.23	0.35	0.63	0.53	0.02	0.06
	443	26	26	0.09	0.09	0.05	0.04	1.43	1.32	0.25	0.25	0.26	0.22	0.01	0.05
	488	26	26	0.05	0.05	0.02	0.02	0.76	0.72	0.19	0.02	0.07	0.06	0.01	0.05
$\lambda$	GSM	GSM*	GSM	GSM*	GSM	GSM*	GSM	GSM*	GSM	GSM*	GSM	GSM*	GSM	GSM*	
UGC	412	10	5	0.10	0.08	0.13	0.14	1.51	<b>0.57</b>	-	-0.05	0.14	<b>0.72</b>	0.28	<b>0.04</b>
	443	10	7	0.07	0.08	0.05	0.09	0.76	<b>0.48</b>	-	0.13	0.16	<b>0.68</b>	0.07	<b>0.03</b>
	488	7	5	0.05	0.06	0.01	0.04	0.54	<b>0.16</b>	-	0.09	-	<b>0.88</b>	0.04	<b>0.003</b>
NGC	412	22	17	0.04	0.04	0.09	0.10	1.12	<b>1.02</b>	0.54	0.41	0.53	<b>0.59</b>	0.16	<b>0.13</b>
	443	22	18	0.03	0.03	0.05	0.06	<b>0.55</b>	0.67	0.42	0.60	0.54	<b>0.67</b>	0.04	<b>0.06</b>
	488	22	16	0.02	0.01	0.02	0.04	<b>0.21</b>	0.34	0.17	0.51	0.52	<b>0.79</b>	0.01	<b>0.01</b>

En la Figura 20 m se observa que en UGC el modelo GIOP describe valores de  $r_p$  menores al valor crítico (0.70) indicando que no pudo reproducir los valores *in situ* de  $a_{dg}(\lambda)$ , mientras que valores del  $r_p$  del modelo GSM estuvieron por encima de 0.70, por tanto fueron estadísticamente significativos ( $r_{calculado} > r_{crítico}$ ,  $\alpha=0.05$ ). En este modelo los valores de las desviaciones estándar normalizadas mostraron marcadas diferencias entre longitudes de onda (Figura 20 m). En la NGC ambos modelos presentaron valores del  $r_p$  por encima del valor crítico (0.40), por tanto fueron estadísticamente significativos ( $r_{calculado} >$

$r_{crítico}$ ,  $\alpha=0.05$ ), pero en el GIOP las desviaciones estándar normalizadas fueron más bajas que el GSM (Figura 20 n).

Como evaluación integral de los estadísticos se observa que a pesar de que se observa una disminución en la significancia estadística del modelo GIOP para la UGC, en general se observa una sustancial mejora de las salidas de los modelos para esta región, lo que indica que hay un efecto sobre los datos cuando se cambia el  $S_{dg}$ . Para NGC, caracterizada por una mayor dispersión de los valores de  $S_{dg}$  *in situ*, la mejora de los estadísticos es mucho más evidente que en la UGC, sobre todo para el modelo GSM. Así mismo, se debe considerar que si bien el GSM mostró una mejor significancia estadística, al final para el análisis comparativo, el número de datos fue menor al GIOP, debido a los errores de salida descrito previamente, cuando se utilizan valores del  $S_{dg}$  inferiores a 0.018 (Figura 19).

### 3.2.2. Entrada al modelo de valores $S_{dg} = 0.012$

Las propuestas B y C presentadas como estrategia para mejorar el algoritmo que estima el  $a_{dg}(\lambda)$  se enfocaron en la modificación del valor predeterminado del modelo GIOP ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ) por  $0.012 \text{ nm}^{-1}$  solamente para UGC pero usando dos bases de datos (Figura 9e y Figura 17). La definición de estas propuestas se debió principalmente a tres razones: 1) en los resultados del capítulo 2 se identificó que la mayoría de las estaciones en la UGC presentaron

una  $S_{dg}$  de  $0.012 \text{ nm}^{-1}$ , 2) en la evaluación aplicada a la salida de los modelos se observó que el GIOP puede calcular valores de  $a_{dg}(\lambda)$  para  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$  (Figura 18), mientras que el GSM presenta un error en la salida de los datos para ese valor de  $S_{dg}$  (Figura 19), y 3) evitar el impacto que pueda tener el uso del mismo conjunto de datos para validar la modificación del algoritmo.

La variabilidad de los valores de  $S_{dg}$  *in situ* de la base de datos del crucero de julio de 2016 fue también analizada (Figura 21 a), y se encontró que los valores para toda la base de datos estuvieron entre  $0.008$  y  $0.026 \text{ nm}^{-1}$ . En específico para la NGC estos variaron entre  $0.018 \text{ nm}^{-1}$  y  $0.025 \text{ nm}^{-1}$  (Figura 21 b), mientras que para la región UGC los valores estuvieron entre  $0.018 \text{ nm}^{-1}$  y  $0.024 \text{ nm}^{-1}$  con la mayor frecuencia de datos concentrados en  $0.012 \text{ nm}^{-1}$  (Figura 21 c), lo que confirma el uso de este valor como entrada para la estimación de  $a_{dg}(\lambda)$ .

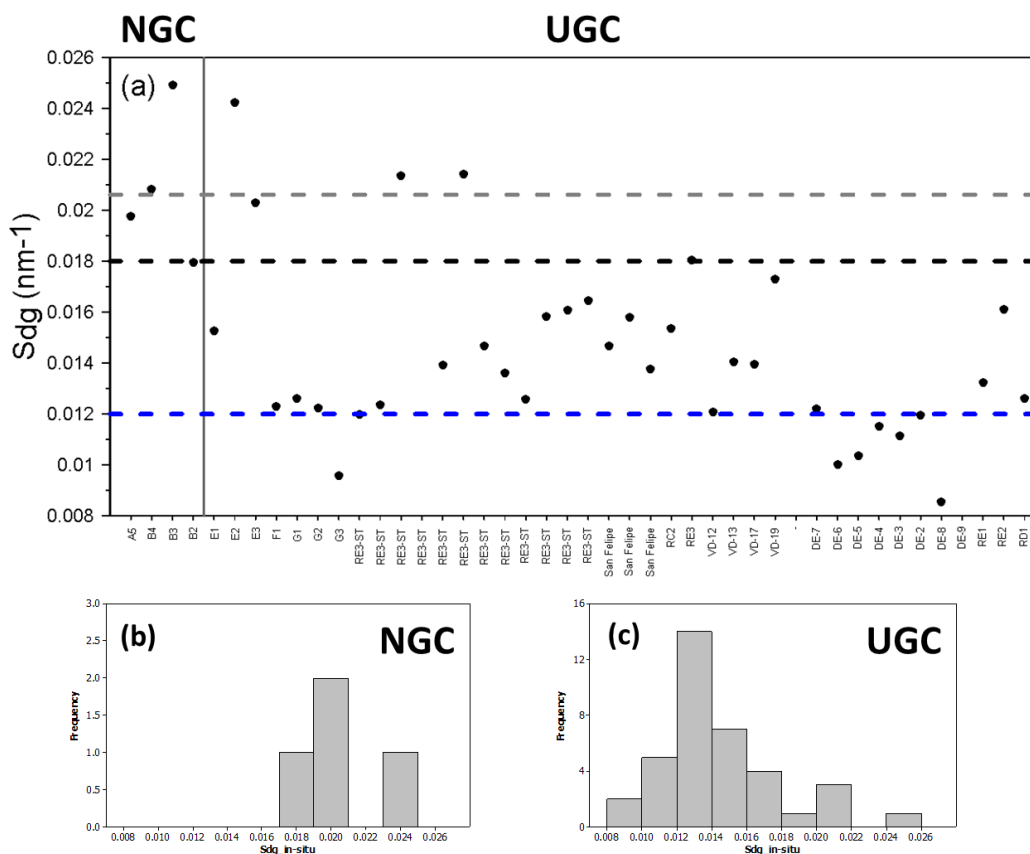


Figura 21. Variabilidad de la  $S_{dg}$  *in situ* correspondiente al (a) crucero de julio de 2016, y los histogramas de frecuencia de la  $S_{dg}$  en las regiones (b) UGC y (b) NGC. Se incluyen las referencias de los  $S_{dg}$  usados por los modelos GIOP ( $S_{dg} = 0.018$ , línea negra punteada) y GSM ( $S_{dg} = 0.02061$ , línea gris punteada) así como la mayor frecuencia de valores de  $S_{dg}$  en la UGC (línea azul punteado).

Los resultados de la aplicación de las propuestas A y B se muestran en la Figura 22, donde se observan los análisis Match up para el modelo con su configuración predeterminada (Fig. 22 a, d, g), con la propuesta A (Fig. 22 b, e, h) y propuesta B (Fig. 22 c, f, i). En general se evidencia que los cambios aplicados al algoritmo no mejoran la significancia estadística del modelo en ninguna de las tres longitudes de onda analizadas.

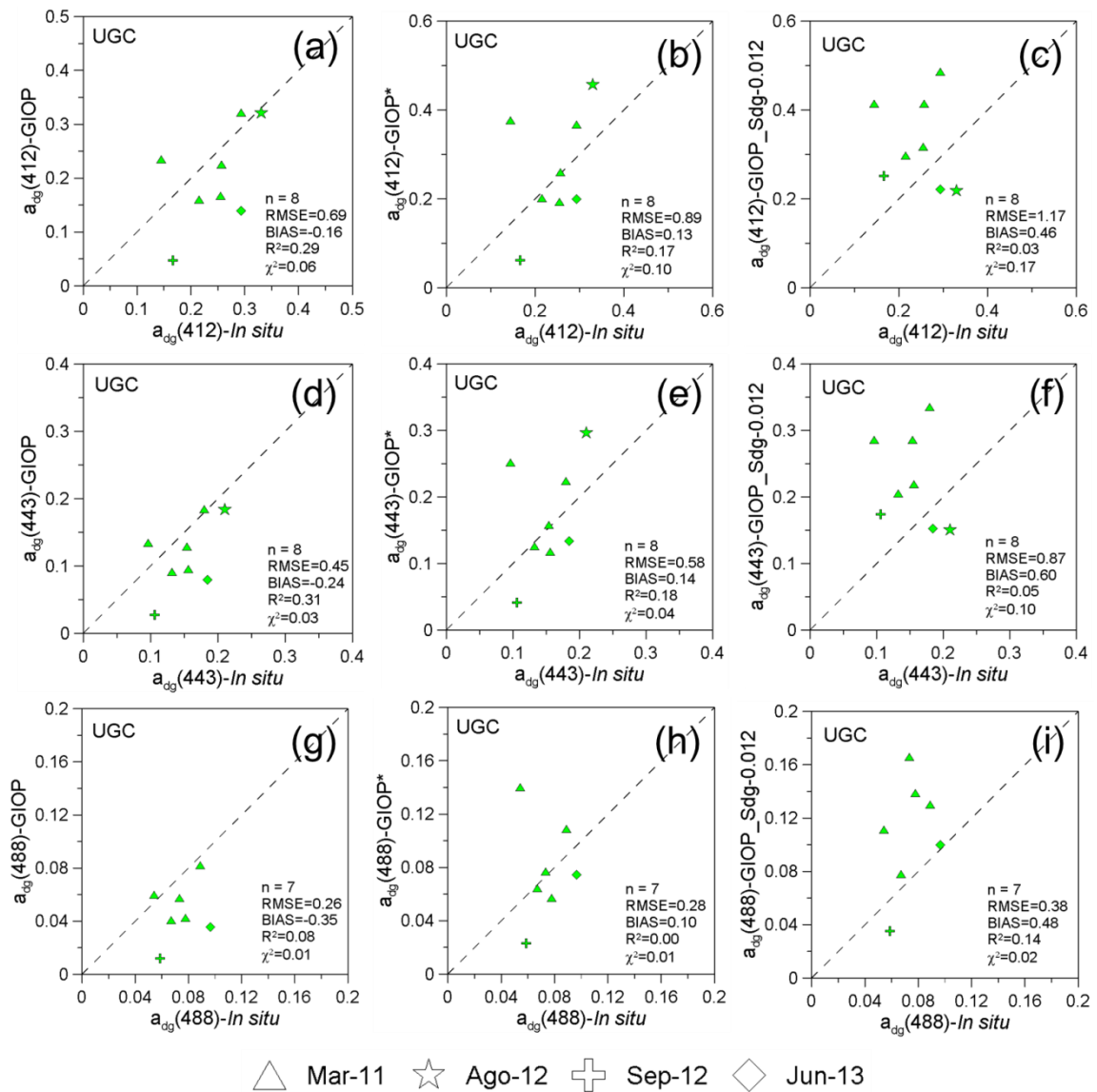


Figura 22. Análisis comparativo de los valores *in situ* de  $a_{dg}(412, 443 \text{ y } 488)$  con las tres diferentes salidas del modelo GIOP: (a, d y g) modelo en su configuración predeterminada ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ), (b, e y h) modelo en su configuración modificada con valores de  $S_{dg} = \text{in situ}$ , y (c, f e i) modelo en su configuración modificada con valores de  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$ . Los datos corresponden a las estaciones de la UGC en los cuatro cruceros desarrollados entre 2011 y 2013. Los estadísticos RMSE, BIAS,  $R^2$  y  $\chi^2$ ; la línea 1:1 está indicada para referencia.

El ajuste del algoritmo con valores de  $S_{dg}$  *in situ* (Propuesta A) promueven que el BIAS disminuya y se haga positivo en comparación al modelo en su configuración predeterminada (Figura 22 b, d y g) pero disminuye los coeficientes de determinación ( $R^2 < 0.18$ ) (Figura 22 b, e y h). Cuando se aplica la propuesta B, se observa una tendencia a la sobreestimación.

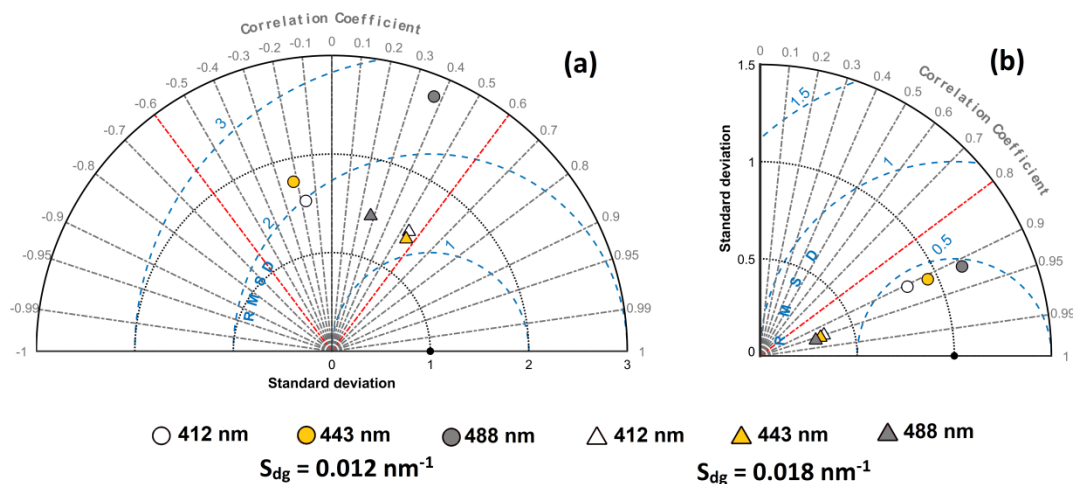


Figura 23. Diagrama de Taylor en el que se ilustra el rendimiento relativo del modelo GIOP en sus configuraciones predeterminada ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ) y ajustada ( $S_{dg} = 0.012 \text{ m}^{-1}$ ), para reproducir el coeficiente de absorción  $a_{dg}$ (412, 443 y 488 nm). Cada diagrama representa el análisis aplicado a (a) la base de datos de los cruceros desarrollados de 2011 a 2013 y (b) base de datos del crucero de julio de 2016. La línea roja punteada representa el valor crítico del coeficiente de correlación de Pearson.

En la Figura 23 se comparan los diagramas de Taylor del modelo GIOP aplicado a las dos bases de datos analizadas, y se observa que para el set de datos de los cuatro cruceros de 2011 a 2013 (BD01), el ajuste al algoritmo no

mejora la significancia estadística del modelo, por el contrario la acentúa en las longitudes de onda 412 y 443 nm (Figura 23 a). En contraste, se observa que el set de datos correspondiente al crucero de julio de 2016 (BD02), describe una significancia estadística ( $r_{calculdo} > r_{critico}$ ,  $\alpha=0.05$ ) en ambas configuraciones del modelo, con valores de  $r_p > 0.90$  para la configuración con  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$  y  $r_p > 0.95$  para la configuración predeterminada del modelo ( $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ).

Como evaluación integral de los estadísticos, se observa que para la BD01 ninguna de las configuraciones usadas indica que el modelo GIOP pueda derivar los valores  $a_{dg}(\lambda)$  en la NGC. De hecho los menores valor de  $\chi^2$  (Tabla XI) obtenidos por la configuración predeterminada indican que esta es mejor que la modificación aplicada. Por otro lado, al usar una base de datos diferente a aquella usada para evaluar las modificaciones al modelo (BD02), se observó que ambas configuraciones son estadísticamente significativas ( $r_{calculdo} > r_{critico}$ ,  $\alpha=0.05$ ) (Figura 23 b), y aunque se observa que la configuración predeterminada presentó mayores valores de  $r_p$  ( $>0.95$ ) y del  $R^2$  ( $>0.90$ ), los valores del RMSE, BIAS y sobre todo los menos valores de la  $\chi^2$  indican que la configuración que mejor deriva los valores  $a_{dg}(\lambda)$  es la ajustada ( $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$ ) (Tabla XI).

Tabla XI. Comparación entre los estadísticos aplicados al coeficiente de absorción  $a_{dg}(\lambda)$  *in situ* correspondiente a las dos bases de datos analizadas (BD 01: Cuatro cruceros de 2011 a 2013 y BD 02: Crucero de julio de 2016) y las salidas de los modelos en su configuración predeterminada (GIOP,  $S_{dg} = 0.018 \text{ nm}^{-1}$ ) y configuración de  $S_{dg} = 0.012 \text{ nm}^{-1}$ . Se resalta en rojo y negro el mejor resultado de cada estadístico aplicado.

ESTADISTICO	MODELO	UGC					
		412		443		488	
		BD 01	BD 02	BD 01	BD 02	BD 01	BD 02
<b>N</b>	GIOP (Sdg = 0.018)	8	6	8	6	7	6
	GIOP (Sdg = 0.012)						
<b>Mean</b> <i>in situ</i>	GIOP (Sdg = 0.018)	0.244	0.276	0.152	0.167	0.074	0.080
	GIOP (Sdg = 0.012)						
<b>Mean</b> <sub>Satellite</sub>	GIOP (Sdg = 0.018)	0.202	0.072	0.116	0.041	0.047	0.018
	GIOP (Sdg = 0.012)	0.328	0.127	0.226	0.087	0.108	0.051
<b>SD</b> <i>In situ</i>	GIOP (Sdg = 0.018)	0.06	0.13	0.04	0.08	0.02	0.04
	GIOP (Sdg = 0.012)						
<b>SD</b> <sub>Satellite</sub>	GIOP (Sdg = 0.018)	0.09	0.07	0.05	0.04	0.02	0.02
	GIOP (Sdg = 0.012)	0.10	0.11	0.07	0.08	0.04	0.04
<b>RMSE</b>	GIOP (Sdg = 0.018)	<b>0.69</b>	1.52	<b>0.45</b>	0.94	<b>0.26</b>	0.46
	GIOP (Sdg = 0.012)	1.17	<b>1.10</b>	0.87	<b>0.59</b>	0.38	<b>0.23</b>
<b>BIAS</b>	GIOP (Sdg = 0.018)	-0.16	-0.76	-0.24	-0.78	-0.35	-0.79
	GIOP (Sdg = 0.012)	0.46	-0.61	0.60	-0.56	0.48	-0.47
<b>r<sub>p</sub></b>	GIOP (Sdg = 0.018)	<b>0.54</b>	<b>0.95</b>	<b>0.55</b>	<b>0.96</b>	0.28	<b>0.96</b>
	GIOP (Sdg = 0.012)	-0.17	0.90	-0.22	0.91	<b>0.37</b>	0.91
<b>Least squares</b>	GIOP (Sdg = 0.018)	<b>0.06</b>	0.29	<b>0.03</b>	0.11	<b>0.01</b>	0.03
	GIOP (Sdg = 0.012)	0.17	<b>0.15</b>	0.10	<b>0.04</b>	0.02	<b>0.01</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	GIOP (Sdg = 0.018)	<b>0.29</b>	<b>0.90</b>	<b>0.31</b>	<b>0.91</b>	0.08	<b>0.93</b>
	GIOP (Sdg = 0.012)	0.03	0.82	0.05	0.83	<b>0.14</b>	0.84

Cabe anotar que la BD01 está integrada por un conjunto de datos tomados en periodos estacionales distintos y algunos cruceros estuvieron representados por uno o dos estaciones, lo que puede ser un factor que acentúe la dispersión de los datos, y se suma a los factores que puedan afectar la asociación con los datos *in situ*. Por otro lado, los resultados obtenidos con los datos de la BD02 indican que la modificación propuesta al modelo puede representar de forma muy acertada los valores *in situ* en la región UGC. Entretanto, sería recomendable realizar más evaluaciones con otras bases de datos para que esta tendencia se confirme.

#### **4. Conclusiones**

En este trabajo se realizó un ajuste al modelo semi-analítico GIOP basado en la pendiente espectral  $S_{dg}$ , con la finalidad de mejorar la precisión del modelo para estimar el coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) en un cuerpo de agua con una alta complejidad óptica, donde la mayor contribución a la absorción de la luz está dominada por  $a_d(\lambda)$ . Los resultados sugieren que la propuesta de considerar para este tipo de aguas un valor de la  $S_{dg}$  más bajo mejora las salidas del modelo, lo que se evidenció con los menores valores del RMSE y  $\chi^2$ . Sin embargo, es necesario contar con número mayor de datos para la validación definitiva, dado que para el presente estudio, el “n” de las bases de datos usada para la evaluación y validación fue inferior a 10. De igual forma, se recomienda incluir dentro de los monitoreos en la zona

de estudio, la toma de datos de reflectancias *in situ* que permitan incluirla en la entrada al modelo de inversión de los datos y con ello evitar interferencias de efectos atmosféricos que se pueden dar en las mediciones de la reflectancia satelital.

## Referencias

- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and oceanography*, 42, 1-20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- IOCCG (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optical-ly-Complex,Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Kahru, M., Lee, Z., Kudela, R. M., Manzano-Sarabia, M., & Mitchell, B. G. (2015). Multi-satellite time series of inherent optical properties in the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 112, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.07.023>
- Nelson, N. B., Siegel, D. A., & Michaels, A. F. (1998). Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45, 931-957. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00106-4)
- Sauer, M. J., Roesler, C. S., Werdell, P. J., & Barnard, A. (2012). Under the hood of satellite empirical chlorophyll a algorithms: revealing the dependencies of maximum band ratio algorithms on inherent optical properties. *Optics express*, 20, 20920-20933. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020920>
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., & Behrenfeld, M. J. (2005). Independence and interdependencies among global ocean color properties: Reassessing the bio-optical assumption. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002527>
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., Hansell, D. A., and Lorenzi-Kayser, M. (2002). Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107. <https://doi.org/10.1029/2001JC000965>
- Swan, C. M., Siegel, D. A., Nelson, N. B., Carlson, C. A., & Nasir, E. (2009). Biogeochemical and hydrographic controls on chromophoric dissolved organic matter distribution in the Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56, 2175-2192. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.09.002>

Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Harding Jr, L. W., and Feldman, G. C. (2007). Approach for the long-term spatial and temporal evaluation of ocean color satellite data products in a coastal environment. In Proc. of SPIE Vol. 6680, pp. 66800G-1). <https://doi.org/10.1117/12.732489>

## CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo de tesis propuso como objetivo principal evaluar la variabilidad del coeficiente de absorción por los componentes del agua fitoplancton, detrito y CDOM, con énfasis en el uso de esta información para la evaluación de los algoritmos bio-ópticos utilizados en la percepción remota de estas variables. En primera medida, se pretendió responder el interrogante: ¿Qué sabemos de las propiedades ópticas de los constituyentes importantes del agua de mar, y sobretodo cómo podemos cuantificarlos? y como respuesta se determinó la variabilidad *in situ* de los coeficientes de absorción del fitoplancton, detrito y materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) en la zona norte del Golfo de California, y se estudió la pendiente espectral del CDOM, analizada por primera vez en el área de estudio. Los resultados confirmaron que la región describe características de un cuerpo de agua ópticamente complejo, con la presencia de dos regiones bio-ópticas (UGC y NGC) que pueden ser muy diferentes cuando se evalúa la contribución de sus componentes.

En segunda medida, se pretendió usar el conocimiento de la variabilidad de los constituyentes ópticos en el área de estudio, entendiendo que la precisión de los algoritmos bio-ópticos como los mencionados GSM y GIOP depende de la contribución relativa que los componentes del agua tengan a la absorción de luz y esto a su vez va a determinar la complejidad óptica de una determinada

región. Los resultados mostraron que los modelos GIOP y GSM pudieron reproducir los valores *in situ* de  $a_{ph}(\lambda)$  en ambas regiones bio-ópticas y de  $a_{dg}(\lambda)$  en la región NGC, mientras que en la región UGC ambos modelos fueron incapaces de reproducir los valores *in situ* de  $a_{dg}(\lambda)$ . En la evaluación de los algoritmos, se observó una tendencia a la sobreestimación de los modelos asociada a las estaciones con una mayor contribución de  $a_d(\lambda)$  y una tendencia a la subestimación asociada a las estaciones con una mayor contribución de  $a_{CDOM}(\lambda)$ , lo que sugiere la necesidad de prestar especial atención a la influencia que sobre la tendencia final de los datos puedan ejercer los coeficientes  $a_d(\lambda)$  y  $a_{CDOM}(\lambda)$ .

Otros estudios han sugerido que es necesario usar un conjunto de datos *in situ* independiente al usado en la parametrización de los modelos para poder evaluar adecuadamente el ajuste de estos a los datos *in situ*. En la aplicación de las propuestas de ajuste a los algoritmos esta consideración fue tomada en cuenta y cuando el ajuste de los modelos se evaluó con una base de datos adicional (crucero en Julio de 2016) se observó que la salida del modelo reprodujo de forma mucho más acertada ( $r_p > 0.90$  y  $R^2 > 0.82$ ) la variabilidad de los datos *in situ*.

Finalmente, la propuesta que contempla el uso de un valor fijo de la  $S_{dg}$  presentada aquí como ajuste al modelo GIOP tiene el potencial de ser

implementada de forma rutinaria, para estimar el  $a_{dg}(\lambda)$  en la región del Alto Golfo de California generando resultados mucho más precisos (menores valores de RMSE y  $\chi^2$ ) que los arrojados por el modelo estándar (configuración predeterminada).

## LITERATURA GENERAL CITADA

- Alvarez-Borrego, S., and Galindo-Bect, L. A. (1974). Hidrología del Alto Golfo de California-I. Condiciones Durante Otoño. *Ciencias Marinas*, 1, 46-64.
- Antoine, D., Morel, A., Gordon, H. R., Banzon, V. F., & Evans, R. H. (2005). Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **110**. <https://doi.org/10.1029/2004JC002620>
- Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F., and Hunter, J. R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100, 16103-16118. <https://doi.org/10.1029/95JC01500>
- Barlow, R. G., Cummings, D. G., and Gibb, S. W. (1997). Improved resolution of mono-and divinyl chlorophylls a and b and zeaxanthin and lutein in phytoplankton extracts using reverse phase C-8 HPLC. *Marine Ecology Progress Series*, 161, 303–307. <http://www.jstor.org/stable/24859034>
- Bastidas-Salamanca, M., Gonzalez-Silvera, A., Millán-Núñez, R., Santamaria-del-Angel, E., and Frouin, R. (2014). Bio-optical characteristics of the Northern Gulf of California during June 2008. *International Journal of Oceanography*, 2014, 13. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/384618>
- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and oceanography*, 42, 1-20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A., & Shea, D. M. (2005). Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global biogeochemical cycles*, **19**. <https://doi.org/10.1029/2004GB002299>
- Blough, N.V., Del Vecchio, R., (2002). Chromophoric DOM in the Coastal Environment, In “Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter” (D. A Hansell and CA Carlson, Eds.). Academic Press, San Diego.
- Borrego, S. A., Báez, B. P. F., and Bect, L. A. G. (1975). Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno primavera y verano. *Ciencias Marinas*, 2, 21-36.
- Brewin, R. J., Sathyendranath, S., Müller, D., Brockmann, C., Deschamps, P. Y., Devred, E. and Groom, S. (2015). The Ocean Colour Climate Change Initiative: III. A round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 162, 271-294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.016>
- Brewin, R. J., Sathyendranath, S., Müller, D., Brockmann, C., Deschamps, P. Y., Devred, E. and Groom, S. (2015). The Ocean Colour Climate Change Initiative: III. A round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 162, 271-294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.016>
- Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., Finlay, J. C., and Bauer, M. E. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 157, 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.033>

- Bricaud, A., Morel, A., Babin, M., Allali, K., & Claustre, H. (1998). Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **103**, 31033-31044. <https://doi.org/10.1029/98JC02712>
- Capuzzo, E., Painting, S. J., Forster, R. M., Greenwood, N., Stephens, D. T., & Mikkelsen, O. A. (2013). Variability in the sub-surface light climate at ecohydrodynamically distinct sites in the North Sea. *Biogeochemistry*, **113**, 85-103.
- Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K., & Kamykowski, D. (1999). Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **104**, 5403-5421. <https://doi.org/10.1029/1998JC900082>
- Coble, P. G. (2007). Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color. *Chemical reviews*, **107**, 402-418. <https://doi.org/10.1021/cr050350+>
- Ferreira, A., Ciotti, Á. M., and Giannini, M. F. C. (2014). Variability in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and colored dissolved organic matter in a subtropical bay (Brazil). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **139**, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.01.002>
- Franz, B. A., and Werdell, P. J. (2010). A generalized framework for modeling of inherent optical properties in ocean remote sensing applications. *Proceedings of Ocean Optics, Anchorage, Alaska*, 27.
- Garver, S. A., and Siegel, D. A. (1997). Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. Time series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **102**, 18607-18625. <https://doi.org/10.1029/96JC03243>
- Gaxiola-Castro, G., Alvarez-Borrego, S., Lavín, M. F., Zirino, A., and Nájera-Martínez, S. (1999). Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, **21**, 231-245. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.2.231>
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., Baker, K. S., & Clark, D. K. (1988). A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **93**(D9), 10909-10924. <https://doi.org/10.1029/JD093iD09p10909>
- Gracia-Escobar, M.F., (2016). Abundancia, Carbono: Clorofila a, productividad primaria, pigmentos y absorción de la luz del fitoplancton en el Alto Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.
- Gregg, W. W., Conkright, M. E., Ginoux, P., O'Reilly, J. E., & Casey, N. W. (2003). Ocean primary production and climate: Global decadal changes. *Geophysical Research Letters*, **30**. <https://doi.org/10.1029/2003GL016889>

- Haraldsson, M., Tönnesson, K., Tiselius, P., Thingstad, T. F., & Aksnes, D. L. (2012). Relationship between fish and jellyfish as a function of eutrophication and water clarity. *Marine Ecology Progress Series*, 471, 73-85. <https://doi.org/10.3354/meps10036>
- Hidalgo-Gonzalez, R. M., and Alvarez-Borrego, S. (2001). Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica acta*, 24, 19-28. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)01126-9](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01126-9)
- Hu, C., Lee, Z., Muller-Karger, E., Carder, L., & Walsh, J. J. (2006). Ocean color reveals phase shift between marine plants and yellow substance. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(2), 262-266. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.862527>
- IOCCG (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optical-ly-Complex, Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- IOCCG (2006). Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Lee, Z.-P. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C., Wright, S.W., (1997). Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. *Monogr. Oceanogr. Methodol.*
- Ji, Z.G., (2008). *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuar-ies*. John Wiley and Sons.
- Kahru, M., Lee, Z., Kudela, R. M., Manzano-Sarabia, M., & Mitchell, B. G. (2015). Multi-satellite time series of inherent optical properties in the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 112, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.07.023>
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge Uni-versity Press, Cambridge, 509 p.
- Lavín, M. F., and Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Springer Netherlands. 173–204. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11)
- Lavín, M. F., and Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93, 14033-14038. <https://doi.org/10.1029/JC093iC11p14033>
- Lavin, M. F., and Sánchez, S. (1999). On how the Colorado River affected the hydrogra-phy of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 19, 1545-1560. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00030-8)
- Lavin, M. F., Godinez, V. M., and Alvarez, L. G. (1998). Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, 769-795. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0387>
- Lee, Z. P., Darecki, M., Carder, K. L., Davis, C. O., Stramski, D., & Rhea, W. J. (2005a). Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An

- evaluation of remote sensing methods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002573>
- Lee, Z. P., Du, K., Voss, K. J., Zibordi, G., Lubac, B., Arnone, R., & Weidemann, A. (2011). An inherent-optical-property-centered approach to correct the angular effects in water-leaving radiance. *Applied Optics*, 50, 3155-3167. <https://doi.org/10.1364/AO.50.003155>
- Lee, Z., Carder, K. L., and Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41, 5755-5772. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>
- Lee, Z., Carder, K. L., Steward, R. G., Peacock, T. G., Davis, C. O., and Patch, J. S. (1998). An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103, 27967-27978. <https://doi.org/10.1029/98JC01946>
- Lee, Z., Du, K., Arnone, R., Liew, S., & Penta, B. (2005b). Penetration of solar radiation in the upper ocean: A numerical model for oceanic and coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002780>
- Maritorena, S., & Siegel, D. A. (2006). Chapter 11: The GSM semi-analytical bio-optical model. *Remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms, and applications*, 73-79.
- Maritorena, S., Siegel, D. A., and Peterson, A. R. (2002). Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, 41, 2705-2714. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002705>
- McClain, C. R. (1998). Science quality SeaWiFS data for global biosphere research. *Sea Technol.*, 39, 10-16.
- McClain, C. R., Christian, J. R., Signorini, S. R., Lewis, M. R., Asanuma, I., Turk, D., & Dupouy-Douchement, C. (2002). Satellite ocean-color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49, 2533-2560. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00047-4)
- Mélin, F., and Vantrepotte, V. (2015). How optically diverse is the coastal ocean?. *Remote Sensing of Environment*, 160, 235-251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.023>
- Millan-Núñez, E., Lara-Lara, J. R., and Cleveland, J. S. (1998). Variations in specific absorption coefficients and total phytoplankton in the Gulf of California. CALIFORNIA COOPERATIVE OCEANIC FISHERIES INVESTIGATIONS REPORT, 159-168.
- Mitchell, B. G., Kahru, M., Wieland, J., Stramska, M., and Mueller, J. L. (2002). Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. *Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation*, Revision, 3, 231-257.
- Montes, J. M., Lavín, M. F., and Parés-Sierra, A. F. (2015). Seasonal Heat and Salt Balance in the Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, 32, 853-862. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00192.1>

- Morel, A., & Maritorena, S. (2001). Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106, 7163-7180. <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
- Morel, A., and Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, 22, 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Morel, A., Antoine, D., & Gentili, B. (2002). Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function. *Applied Optics*, 41, 6289-6306. <https://doi.org/10.1364/AO.41.006289>
- Nelson, N. B., and Siegel, D. A. (2002). Chromophoric DOM in the open ocean. *Biogeo-chemistry of marine dissolved organic matter*, 547-578.
- Nelson, N. B., Siegel, D. A., & Michaels, A. F. (1998). Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45, 931-957. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00106-4)
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., ... & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103, 24937-24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
- Pegau, W. S., Zaneveld, J. R. V., Barnard, A. H., Maske, H., Álvarez Borrego, S., Lara Lara, R., and Cervantes Duarte, R. (1999). Inherent optical properties in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25, 469-485. ISSN 0185-3880. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48025402>
- Roesler, C. S., Perry, M. J., and Carder, K. L. (1989). Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*, 34, 1510-1523. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1510>
- Sanchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Peguero-Icaza, M., León-Chávez, C. A., Contreras-Catala, F., Marinone, S. G., ... and Godínez, V. M. (2009). Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, 29, 1697-1710. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.06.001>
- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., and Müller-Karger, F. E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99, 7411-7421. <https://doi.org/10.1029/93JC02154>
- Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., De la Peña-Nettel, G., (1996). Efecto de la turbidez en la productividad primaria en dos estaciones en el área del delta del Río Colorado. *Ciencias Marinas*, 22, 483-493. <http://www.redalyc.org/html/480/48022407/>
- Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., González-Silvera, A., Cajal-Medrano, R., 2010. Comparison of In Situ and Remotely-Sensed Chl-a concentrations: a Statistical Examination of the Match-up Approach, in: *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretatio: Applications for*

- Marine Living Resources Conservation and Management. EU PRESPO and IOCCG, pp. 221–238.
- Santamaría-del-Ángel, E., Soto, I., Millán-Nuñez, R., González-Silvera, A., Wolny, J., Cer-deira-Estrada, S., Cajal-Medrano, R., Muller-Karger, F., Cannizzaro, J., Padilla-Rosas, Y.X.S., Mercado-Santana, A., Gracia-Escobar, M.F., Álvarez-Torres, P., Ruiz-de-la-Torre, M.C., 2015. Phytoplankton blooms: New initiative using marine optics as a basis for monitoring programs, in: Coastal Ecosystems: Experiences and Recommendations for Environmental Monitoring Programs, Environmental Science, Engineering and Technology. p. 7x15-(NBC-C).
- Sarthou, G., Timmermans, K. R., Blain, S., and Tréguer, P. (2005). Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *Journal of Sea Research*, 53, 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2004.01.007>
- Sauer, M. J., Roesler, C. S., Werdell, P. J., & Barnard, A. (2012). Under the hood of satellite empirical chlorophyll a algorithms: revealing the dependencies of maximum band ratio algorithms on inherent optical properties. *Optics express*, 20, 20920-20933. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020920>
- Siegel, D. A., Behrenfeld, M. J., Maritorena, S., McClain, C. R., Antoine, D., Bailey, S. W., ... & Eplee, R. E. (2013). Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission. *Remote Sensing of Environment*, 135, 77-91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.025>
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., & Behrenfeld, M. J. (2005). Independence and interdependencies among global ocean color properties: Reassessing the bio-optical assumption. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002527>
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., Hansell, D. A., and Lorenzi-Kayser, M. (2002). Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107. <https://doi.org/10.1029/2001JC000965>
- Swan, C. M., Siegel, D. A., Nelson, N. B., Carlson, C. A., & Nasir, E. (2009). Biogeochemical and hydrographic controls on chromophoric dissolved organic matter distribution in the Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56, 2175-2192. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.09.002>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Thomas, C., (2012). The HPLC Method, Chapter 6, in: The Fifth SeaWiFS HPLC Analysis Round-Robin Experiment (SeaHARRE-5) - Buscar Con Google. pp. 63–72.
- Tilstone, G. H., Peters, S. W., van der Woerd, H. J., Eleveld, M. A., Ruddick, K., Schönfeld, W., ... & Sørensen, K. (2012). Variability in specific-absorption properties and their use in a semi-analytical ocean colour algorithm for

- MERIS in North Sea and Western English Channel Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, 118, 320–338.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.019>
- Uitz, J., Claustre, H., Morel, A., and Hooker, S. B. (2006). Vertical distribution of phyto-plankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111.  
<https://doi.org/10.1029/2005JC003207>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Feldman, G. C., Boss, E., Brando, V. E., ... and Loisel, H. (2013). Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied optics*, 52, 2019-2037.  
<https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Harding Jr, L. W., and Feldman, G. C. (2007). Approach for the long-term spatial and temporal evaluation of ocean color satellite data products in a coastal environment. In *Proc. of SPIE Vol. 6680*, pp. 66800G-1). <https://doi.org/10.1117/12.732489>
- Yoder, J., Kennelly, M., (2006). What Have We Learned About Ocean Variability from Satellite Ocean Color Imagers? *Oceanography* 19, 152–171.  
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2006.98>
- Zar, J.H., 1999. *Biostatistical analysis*. Pearson Education India.

## ANEXO 1

# Variability in the Light Absorption Coefficient by Phytoplankton, Non-Algal Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Northern Gulf of California

Stella P. Betancur-Turizo<sup>1,6</sup>, Adriana G. González-Silvera<sup>1,\*</sup>, Eduardo Santamaría-Del-Ángel<sup>1</sup>, Roberto Millán-Núñez<sup>1</sup>, Eduardo Millán-Núñez<sup>2</sup>, Héctor García-Nava<sup>3</sup>, Víctor M. Godínez<sup>4</sup>, Laura Sánchez-Velasco<sup>5</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Carretera Tijuana-Ensenada Km 103, 22800 Ensenada, BC, México

<sup>2</sup>Departamento de Ecología Marina, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California 22860, México

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Carretera Tijuana-Ensenada Km 103, 22800 Ensenada, BC, México

<sup>4</sup>Departamento de Oceanografía Física, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California 22860, México

<sup>5</sup>Departamento de Plancton y Ecología Marina, CICIMAR-IPN. Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, C.P. 23096, La Paz, B.C.S. México

<sup>6</sup>Grupo de Investigación en Oceanología, Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Barrio Bosque, Sector Manzanillo, Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia

Email: \*adriana.gonzalez@uabc.edu.mx

**How to cite this paper:** Betancur-Turizo, S.P., González-Silvera, A., Santamaría-Del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., Millán-Núñez, E., García-Nava, H., Godínez, V.M. and Sánchez-Velasco, L. (2017) Variability in the Light Absorption Coefficient by Phytoplankton, Non-Algal Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Northern Gulf of California. *Open Journal of Marine Science*, \*, \*-\*. [http://dx.doi.org/10.4236/ojms.2017.\\*\\*\\*.2017.\\*\\*\\*\\*](http://dx.doi.org/10.4236/ojms.2017.***.2017.****)

**Received:** \*\*\*\*, \*\*

**Accepted:** \*\*\*\*, \*\*

**Published:** \*\*\*\*, \*\*

Copyright © 2017 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Variability of the optical properties of the northern Gulf of California (México) were analyzed for the first time based on six cruises performed from spring to summer (March to September) between 2008 and 2013. The changes observed in the absorption by three seawater components (phytoplankton, detritus and chromophoric dissolved organic matter or CDOM) were analyzed in relation to changes in bio-optical regions and composition of the phytoplankton community (determined based on phytoplankton pigments). Two regions with unique bio-optical characteristics were identified separated by a narrow transition zone: the Upper Gulf of California (UGC) and Northern Gulf of California (NGC). Despite the temporal changes in their spatial distribution they maintained particular characteristic. UGC is characterized by an average Chl<sub>a</sub> of 1.78 mg/m<sup>3</sup>, the dominance of microphytoplankton (diatoms and dinoflagellates) and a stronger contribution of detritus to total light absorption. NGC is characterized by an average Chl<sub>a</sub> of 0.7 mg/m<sup>3</sup> and the predominance of picophytoplankton, characterized by the dominance of zeaxanthin (marker pigment for cyanobacteria) and/or chlorophyll b (marker pigment for green algae), along with a co-dominium by CDOM and

phytoplankton to light absorption. Results indicate that Case II waters can be very different when evaluating the individual contribution by phytoplankton, detritus and CDOM to total light absorption what has to be considered for the selection of bio-optical models for each specific region what can also help to a better definition of the related uncertainties.

## Keywords

Light absorption, Phytoplankton, CDOM, Detritus, Ocean color, Gulf of California

---

## 1. Introduction

The study of the optical properties of the ocean has raised increasing interest in the last decades, leading to the development of technological tools to estimate these properties through remote sensing [1] [2] [3]. However, these tools have been validated for Case-I waters [4], which do not represent the conditions of coastal areas characterized by being optically complex (Case II) and that concentrate the main economic and productive activities in many countries. Thus, when investigating the optical complexity of these areas, the following questions should be addressed: What do we know about the optical properties of the major components of sea water, and how can we quantify them? [5]. It is currently known that coastal areas receive contributions of particulate and dissolved material from various sources, the optical properties of which can be determined through remote sensing. However, the quality and reliability of the data obtained require an accurate characterization of these properties [6]. Bio-optical models [7]-[10] have been proposed for estimating these optical properties; however, these models are not always highly accurate, particularly in coastal areas, since the optical properties of these water bodies do not depend exclusively on phytoplankton [11], except when there are high-intensity events such as phytoplankton blooms.

Bio-optical models group the components of the open ocean into two main categories: phytoplankton and detritus, the latter including the combined signal of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM, see **Table 1** for symbols and abbreviations used in this paper) and non-algal (organic and inorganic) particles [6]. These components influence the absorption and light-scattering properties of water and vary according to biochemical (algal blooms, wastewater discharges) and hydrodynamic (tidal currents, coastal fronts, turbulence) processes that are characteristic of the ecosystem. Each component has particular characteristics; for example, CDOM absorbs UV and visible light, and is considered as the primary driver of the optical properties in coastal areas and freshwater [12] [13] [11], a reason for which it has been widely studied in the last decade [12] [13]. Its magnitude and

---

\*\*Special description of the title. (dispensable)

spectral form depend on its origin, which can be derived from the decomposition of woody plants in terrestrial environments (allochthonous) or from the decomposition of algae and aquatic vegetation within a water body (autochthonous) [14]. On the other hand, detritus, or non-algal particulate matter (bacteria, inorganic minerals and bubbles) [15], is characterized by a greater absorption of blue light, which decreases exponentially toward the red portion of the spectrum. Finally, absorption by phytoplankton is more or less directly related to chlorophyll *a* concentration [15], with spectral variations similar to those of any absorption spectrum of an individual pigment, but in general exhibits absorption peaks in the blue and red spectral regions due to the ubiquitous presence of chlorophyll *a* [16].

**Table 1.** Symbol and abbreviations

Symbol / Abbreviation	Description	Unit
$\lambda$	wavelength	nm
CDOM	Chromophoric Dissolved Organic Matter	
UGC	Upper Gulf of California	
NGC	Northern Gulf of California	
Chl <i>a</i>	Chlorophyll <i>a</i>	mg/m <sup>3</sup>
$K_d$	Light attenuation coefficient	m <sup>-1</sup>
1OD	first optical depth	m
OD	Optical density	
$a_p(\lambda)$	Absorption coefficient of particulates	m <sup>-1</sup>
$a_d(\lambda)$	Absorption coefficients of detritus or non-algal matter	m <sup>-1</sup>
$a_{ph}(\lambda)$	Absorption coefficient of phytoplankton	m <sup>-1</sup>
$a_{CDOM}(\lambda)$	Absorption coefficient for CDOM	m <sup>-1</sup>

The Northern Gulf of California is a water body with a high optical complexity that has been classified as Case II [17] [18]. Its particular optical characteristics are partly due to the high light scattering due to suspended material [17], the level of which may be very high, mainly in shallow areas, as a result of strong tidal currents [19]. The region is also affected by a seasonally reversible circulation, with a gyre in the center of the basin and a coastal current running on the continental shelf [20]. This process, in addition to tidal mixing, leads to high primary productivity and biological diversity in this region, which in turn favors a high abundance of commercially and ecologically important fish species [21] [22].

Few studies have reported the variability of the optical properties in this area, except for the works of Millán-Núñez *et al.* [23], Pegau *et al.* [17] and Bastidas-Salamanca *et al.* [18]. The first described the spatial and vertical variations of the light absorption coefficient that characterized phytoplankton and phytoplankton pigments recorded in a single cruise that included five stations distributed across the Gulf of California, only one being located to the northern region. In the second,

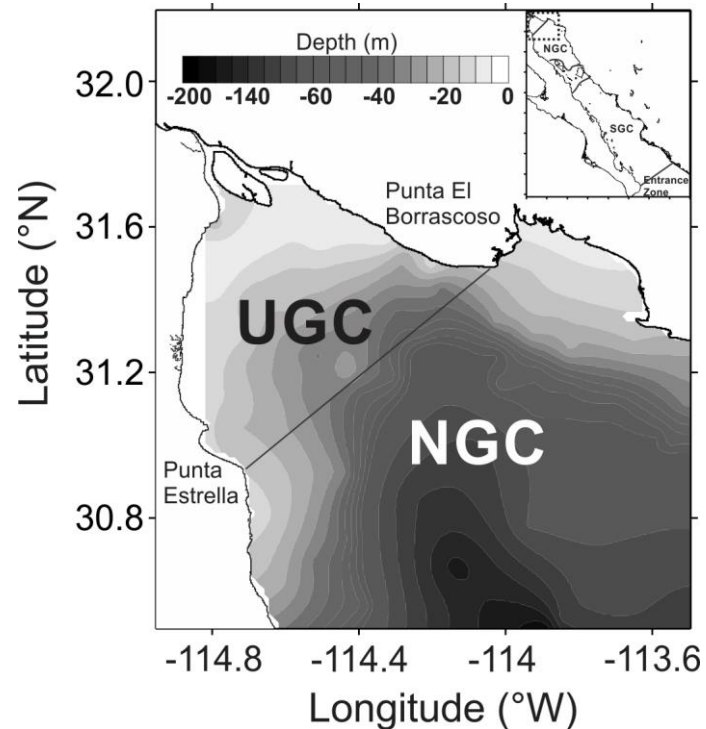
the cruises focused on the central region of the Gulf, with a few stations located to the northeast. In the third, the results were derived from the analysis of a single cruise, which while contributing to the knowledge of these properties, did not investigate aspects such as the seasonal and inter-annual variability in the region and the variability in the absorption coefficients of particulate material (phytoplankton and detritus) compared with CDOM. This latter variable has not been evaluated previously in this region; however, it is very important to be considered to contribute to the global bio-optical models [24] and due to its role in cycling carbon, trace elements, and trace gases of importance to biological activity and global climate [12] [13] [25].

In this context, the primary objective of this study was to document for the first time the spatial and temporal variability of the absorption coefficients of phytoplankton, detritus and CDOM to the north of the Gulf of California using a database that includes six oceanographic cruises from spring to summer (March to September) between 2008 and 2013. In addition, the absorption budget associated to the study area was analyzed to give elements to both evaluate bio-optical models in optically complex waters and propose new approaches specific for this region.

## 2. Methods

### 2.1. Study Area

The study area comprises the northern part of the Gulf of California, México and is located at 30.5° N to 32° N and -115° W to -113.5° W (**Figure 1**). It includes the Upper Gulf of California (UGC) and part of the Northern Gulf of California (NGC) oceanographic provinces (**Figure 1**) [26]. The area is shallow, with depths of less than 30 m in UGC and less than 200 m in NGC (**Figure 1**). The mean temperature varies seasonally between approximately 14 °C in winter and over 32 °C in summer [27]-[29]. Salinity ranges between 35.4 in NGC open waters and 39 in UGC shallow areas [27] [30] [31]. The tide is mainly semi-diurnal, with a range of approximately 6 m during spring tides, where there is the observation of strong tidal currents of up to 1 m/s, and a tidal mixing front that separates the well-mixed UGC waters from the deeper and stratified NGC waters [19].



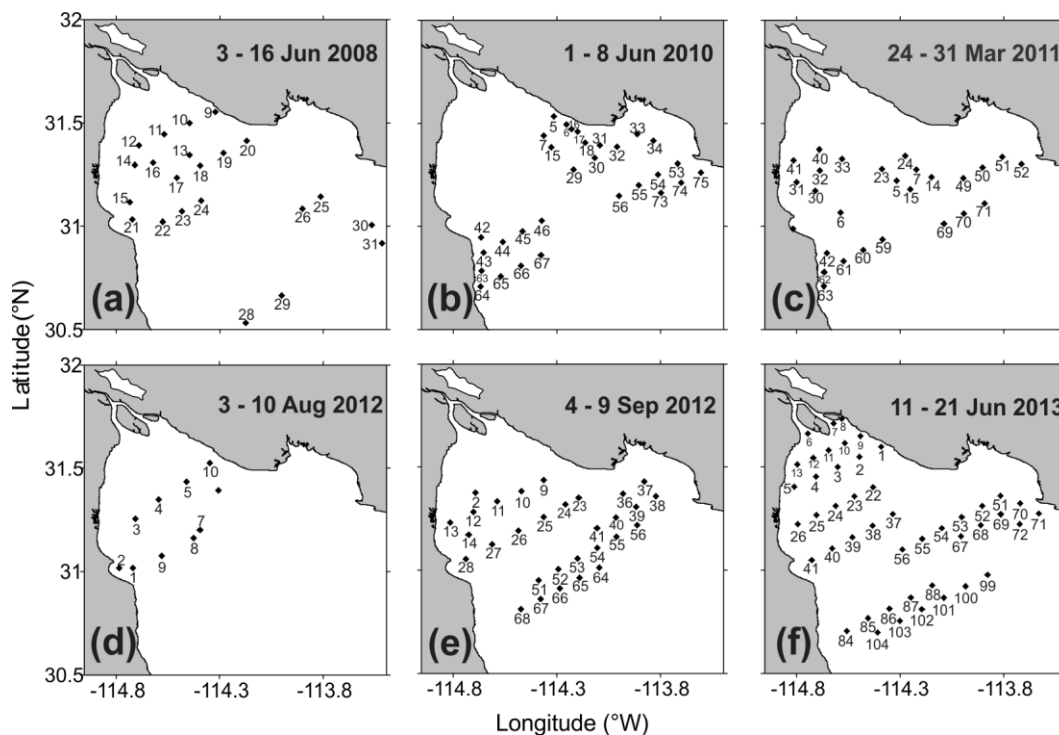
**Figure 1.** Bathymetry of the study area with the UGC and part of the NGC oceanographic regions. Inset: The oceanographic provinces defined by Lavín and Marinone [26].

## 2.2. Data and Methods

### 2.2.1. Field Sampling

Physical and biological data were recorded during six oceanographic cruises in the study area performed during neap tides. **Figure 2** indicates the sampling dates and the number of stations included in each cruise.

Water transparency was measured using a Secchi disk. It is known that this measurement can be affected by human eye but during cruises we minimized this error making measurements by the same person and at the same time interval (between 10 am to 3 pm). In addition, we only used data taken during mostly sunny days, when we could assume that there is more direct light than diffuse light penetrating into the water column (see Santamaria-del-Angel *et al.* [32] for a detailed description of these assumptions). In doing that we assumed that errors were consistent (or constant) and they did not affect the comparison among stations and cruises. From Secchi disk it was calculated the light attenuation coefficient ( $K_d$ ) and the first optical depth (1OD) as  $1OD = 1/K_d$  [33].



**Figure 2.** Grid of stations in each cruise. The stations sampled in the cruises conducted during the study period are shown as follows: (a) June 2008, (b) June 2010, (c) March 2011, (d) August 2012, (e) September 2012, and (f) June 2013.

Surface water samples (~0.50 m depth) were collected using 5 L Niskin bottles for the determination of photosynthetic pigments and light absorption coefficients of particulate material and CDOM. A sample was taken directly from the Niskin bottle using previously washed amber glass flasks for the determination of the CDOM absorption coefficient [34]. From the remaining water, 1 to 2 liters were filtered through a positive filtration system using 25 mm Whatman GF/F filters for the analysis of pigments in phytoplankton [35] [36], and of the light absorption coefficient for particulate material [34].

### 2.2.2. Determination of absorption coefficients

The light absorption coefficient for particulate material ( $a_p(\lambda)$ ) was determined through the methodology of Mitchell *et al.* [34]. For June 2008, June 2010 and March 2011, the optical density (OD) was read in a Perkin-Elmer Lambda 10 spectrophotometer with integrating sphere. For August 2012, September 2012 and June 2013, a Cary 100 UV-Vis spectrophotometer with integrating sphere was used. For all cruises, the absorption coefficients for particulate material  $a_p(\lambda)$  and detritus  $a_d(\lambda)$  were determined as [34]:

$$a_p(\lambda) = (2.3003 \frac{S}{V})(C_1(OD_f - OD_{null}) + C_2(OD_f - OD_{null})^2) \quad (1)$$

where  $OD_f$  is the optical density of the filter with material,  $OD_{null}$  is the correction for residual shifts in the filter (the mean between 790-800 nm was used),  $S$  is the effective filtration area,  $V$  is the volume filtered, and  $C_1$  and  $C_2$  are the correction coefficients for the increase in length of the trajectory caused by the multiple scattering in the fiberglass filter; values of 0.392 and 0.655, respectively, were used in this case [34].

The absorption coefficient of phytoplankton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) was determined as the difference between the absorption coefficient of the total particulate material  $a_p(\lambda)$  and the one for detritus  $a_d(\lambda)$ . Water samples for CDOM absorption measurements were collected only during March 2011, August and September 2012 and June 2013. The absorption coefficient for CDOM ( $a_{CDOM}(\lambda)$ ) was calculated as [34]:

$$a_{CDOM}(\lambda) = (\frac{2.303}{l})((OD_s(\lambda) - OD_{null}) - (OD_b(\lambda) - OD_{null})) \quad (2)$$

where  $l$  is the cell path length (10 cm),  $OD_s$  is the optical density of the sample,  $OD_b$  is the optical density of the blank, and  $OD_{null}$  is the optical density at the null point (600 nm). Physical and biological data were recorded during six oceanographic cruises in the study area performed during neap tides. **Figure 2** indicates the sampling dates and the number of stations included in each cruise.

### 2.2.2. Determination of photosynthetic pigments

Two methodologies were used for the pigment concentration analysis. For June 2008, June 2010 and March 2011, the methodology of Barlow *et al.* [35] was used; for August 2012 and June 2013, the methodology of Thomas [36]. There are no data on pigments for September 2012. The standard pigments used in the HPLC were purchased from Sigma-Aldrich and DHI (Denmark). The concentration of the standards was measured spectrophotometrically using published extinction coefficients [37]. Standard pigments were used for the identification of absorption peaks in the chromatogram.

### 2.3. Bio-optical regions and statistical analysis

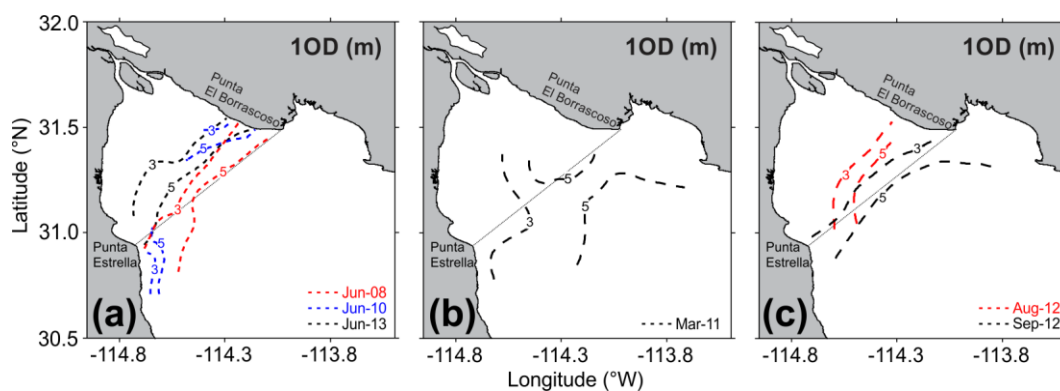
Lavin and Marinone [26] classified the study area according to physical processes in UGC and NGC and proposed an imaginary line between Punta Borrascoso and Punta Estrella (**Figure 1**) as the limit between them. Bastidas-Salamanca *et al.* [18] proposed the 10D to classify these regions considering this variable as an indicator of water transparency that allow the evaluation of the dynamism of the frontier between a shallow UGC and a deeper NGC. In our study we classified the sampling stations using this criterion which considers that stations with  $10D < 3$  m belong to UGC, stations with  $10D > 5$  m correspond to NGC, and stations with  $10D$  between 3 m and

5 m belong to a transition zone. In order to establish if the differences between UGC and NGC were statistically significant, a priori non-parametric Kruskal-Wallis test [38] was used to assess the differences in the absorption coefficients  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_d(\lambda)$  and  $a_{CDOM}(\lambda)$ . This test was applied based on the first empirical standardized orthogonal function (ZEOF1) combining the absorption coefficients by wavelength (412, 440, 488, 555 and 675 nm). When the null hypothesis was rejected, a posteriori multiple contrast Wilcoxon test for two independent samples was used to establish whether significant differences exist. In most contrasts the number of data was higher than ten, and the approach of H calculated values proposed by Kruskal-Wallis was used. These statistical tests were applied by cruise and also for the entire dataset. For cruises in 2008 and 2010 we only considered  $a_{ph}(\lambda)$  and  $a_d(\lambda)$  for these analyses.

### 3. Results

#### 3.1. Bio-optical regions

The differences between bio-optical regions were statistically significant ( $\alpha = 0.05$ ) when evaluating each cruise individually or when the entire dataset was considered. Contrary of what was established as a static imaginary line [26] our data confirm that the transition zone has a dynamic behavior. For example, in June 2008 (Figure 3(a)) and September 2012 (Figure 3(c)), the transition zone was located in the position just mentioned; however, in March 2011 (Figure 3b) it shifted to southwest towards the Baja California peninsula. In contrast, in June 2010 (Figure 3(a)), August 2012 (Figure 3(c)) and June 2013 (Figure 3(a)) the transition zone was located toward the shallowest UGC areas. A descriptive statistics for all variables analyzed in this work organized by region and cruise is presented in Table 2.



**Figure 3.** Bio-optical regions as defined according to the 10D for (a) June 2008, June 2010 and June 2013, (b) March 2011, and (c) August and September 2012. Dotted lines indicate the position of the transition zone. As reference it is indicated the boundary between the UGC and NGC regions (gray line) established by Lavín and Marinone [26].

### 3.2. Variability of water optical constituents

UGC showed the largest ranges of variation for  $a_{ph}(440)$  and  $a_d(440)$  (Table 2). On most cruises the average values exceeded those reported for the NGC region, except for March 2011. In particular, the data for June of 2013 are worth noting, as  $a_d(440)$  yielded the highest values of all cruises (Table 2). The coefficient  $a_{CDOM}(440)$  showed average values between  $0.098 \pm 0.036 \text{ m}^{-1}$  and  $0.194 \pm 0.078 \text{ m}^{-1}$ , rising from March 2011 to June 2013, when the peak values were recorded despite the little variation.

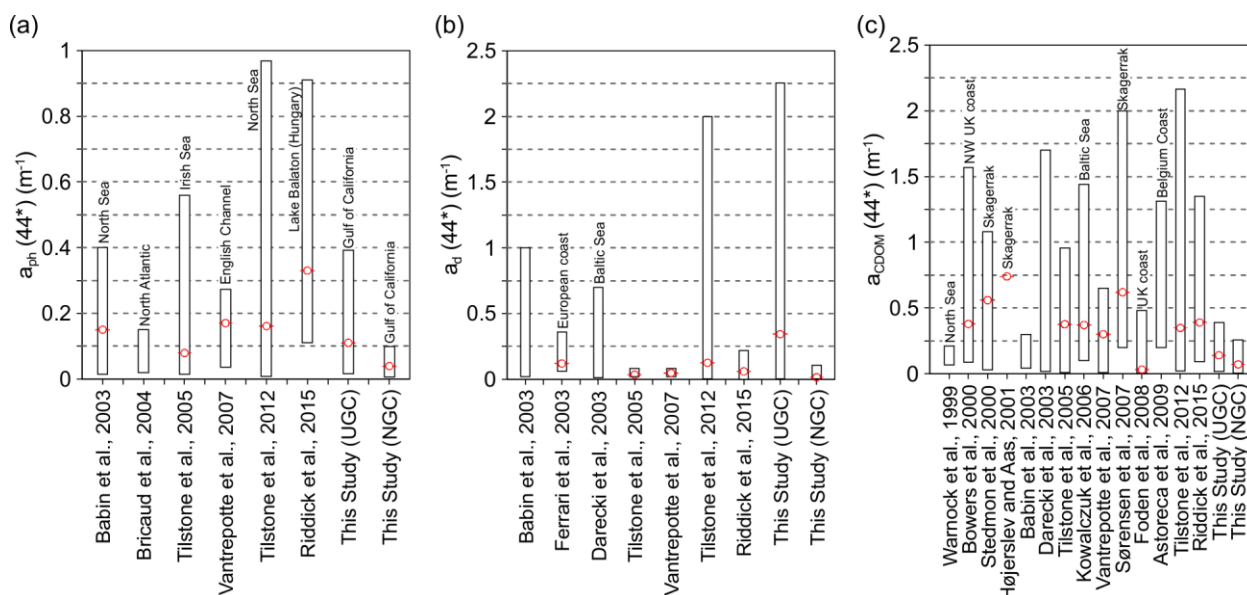
**Table 2.** Number of data (n), range and mean  $\pm$  standard deviation for first optical depth (10D),  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$ ,  $a_{CDOM}(440)$  and *in-situ* Chl*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) for the bio-optical regions defined for each cruise.

Cruise/bio-optical regions	UGC			Transition Zone			NGC		
	n	Range	Mean $\pm$ SD	n	Range	Mean $\pm$ SD	n	Range	Mean $\pm$ SD
<b>10D (m)</b>									
Jun-08	10	0.6-2.1	1.4 $\pm$ 0.5	5	3.0-4.8	3.9 $\pm$ 0.7	7	6.0-9.0	7.1 $\pm$ 1.1
Jun-10	4	1.8-2.4	2.0 $\pm$ 0.3	9	3.0-4.8	4.2 $\pm$ 0.7	17	6.0-11.4	8.4 $\pm$ 1.7
Mar- 11	10	0.9-2.7	1.8 $\pm$ 0.6	9	3.0-4.8	3.9 $\pm$ 0.7	8	5.0-9.6	6.5 $\pm$ 1.6
Aug-12	6	0.8-2.5	1.3 $\pm$ 0.6	1	3.5	3.5	3	6.5-7.8	6.9 $\pm$ 0.8
Sep-12	9	0.5-2.0	1.2 $\pm$ 0.5	7	3.3-4.2	3.8 $\pm$ 0.3	14	5.4-11.4	8.2 $\pm$ 1.8
Jun-13	15	0.1-3.0	0.7 $\pm$ 0.9	6	3.0-4.8	4.1 $\pm$ 0.8	25	5.7-18.1	10.4 $\pm$ 3.4
<b>All cruises</b>	<b>54</b>	<b>0.1-3.0</b>	<b>1.3<math>\pm</math>0.8</b>	<b>37</b>	<b>3.0-4.8</b>	<b>4.0<math>\pm</math>0.6</b>	<b>74</b>	<b>5.0-18.1</b>	<b>8.7<math>\pm</math>2.7</b>
<b><math>a_{ph}(440)</math> (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>									
Jun-08	7	0.037-0.161	0.089 $\pm$ 0.047	3	0.063-0.091	0.082 $\pm$ 0.16	5	0.032-0.081	0.049 $\pm$ 0.021
Jun-10	4	0.021-0.056	0.041 $\pm$ 0.016	7	0.012-0.052	0.032 $\pm$ 0.014	16	0.006-0.041	0.016 $\pm$ 0.011
Mar- 11	10	0.016-0.092	0.042 $\pm$ 0.028	9	0.021-0.128	0.057 $\pm$ 0.034	8	0.023-0.094	0.053 $\pm$ 0.029
Aug-12	6	0.073-0.136	0.098 $\pm$ 0.022	1	0.028	0.028	2	0.019-0.052	0.036 $\pm$ 0.023
Sep-12	8	0.076-0.236	0.140 $\pm$ 0.052	7	0.055-0.112	0.086 $\pm$ 0.022	14	0.036-0.076	0.052 $\pm$ 0.012
Jun-13	12	0.031-0.392	0.188 $\pm$ 0.116	6	0.035-0.073	0.052 $\pm$ 0.014	25	0.010-0.099	0.039 $\pm$ 0.021
<b>All cruises</b>	<b>47</b>	<b>0.016-0.392</b>	<b>0.110<math>\pm</math>0.086</b>	<b>33</b>	<b>0.012-0.128</b>	<b>0.058<math>\pm</math>0.030</b>	<b>70</b>	<b>0.006-0.099</b>	<b>0.039<math>\pm</math>0.023</b>
<b><math>a_d(440)</math> (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>									
Jun-08	7	0.059-0.282	0.142 $\pm$ 0.083	3	0.041-0.064	0.056 $\pm$ 0.012	5	0.006-0.062	0.043 $\pm$ 0.025
Jun-10	4	0.003-0.025	0.011 $\pm$ 0.010	7	0.001-0.005	0.003 $\pm$ 0.001	16	0.0001-0.007	0.002 $\pm$ 0.002
Mar- 11	10	0.007-0.061	0.038 $\pm$ 0.015	9	0.013-0.032	0.021 $\pm$ 0.007	8	0.006-0.024	0.014 $\pm$ 0.007
Aug-12	6	0.092-0.433	0.256 $\pm$ 0.114	1	0.045	0.045	2	0.012-0.014	0.013 $\pm$ 0.001
Sep-12	8	0.126-0.762	0.290 $\pm$ 0.206	7	0.019-0.062	0.037 $\pm$ 0.015	14	0.007-0.039	0.015 $\pm$ 0.011
Jun-13	12	0.059-2.257	0.904 $\pm$ 0.802	6	0.015-0.144	0.057 $\pm$ 0.046	25	0.002-0.105	0.018 $\pm$ 0.024
<b>All cruises</b>	<b>47</b>	<b>0.003-2.257</b>	<b>0.343<math>\pm</math>0.531</b>	<b>33</b>	<b>0.001-0.144</b>	<b>0.031<math>\pm</math>0.028</b>	<b>70</b>	<b>0.0001-0.105</b>	<b>0.015<math>\pm</math>0.019</b>
<b><math>a_{CDOM}(440)</math> (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>									
Jun-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mar- 11	7	0.053-0.146	0.098 $\pm$ 0.036	6	0.030-0.421	0.161 $\pm$ 0.157	8	0.028-0.213	0.090 $\pm$ 0.066
Aug-12	5	0.017-0.178	0.129 $\pm$ 0.065	1	0.064	0.064	2	0.232-0.258	0.245 $\pm$ 0.018
Sep-12	9	0.058-0.210	0.118 $\pm$ 0.042	5	0.039-0.083	0.059 $\pm$ 0.018	11	0.009-0.047	0.026 $\pm$ 0.012
Jun-13	10	0.110-0.388	0.194 $\pm$ 0.078	1	0.009	0.009	8	0.004-0.245	0.070 $\pm$ 0.096
<b>All cruises</b>	<b>31</b>	<b>0.017-0.388</b>	<b>0.140<math>\pm</math>0.068</b>	<b>13</b>	<b>0.009-0.421</b>	<b>0.103<math>\pm</math>0.117</b>	<b>29</b>	<b>0.004-0.258</b>	<b>0.071<math>\pm</math>0.081</b>
<b>Chl<i>a</i> (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>)</b>									
Jun-08	7	0.83-2.03	1.51 $\pm$ 0.50	3	0.67-3.28	1.90 $\pm$ 1.31	5	0.62-1.15	0.81 $\pm$ 0.22
Jun-10	4	0.42-3.33	1.34 $\pm$ 1.35	9	0.24-1.17	0.62 $\pm$ 0.31	15	0.12-2.45	0.43 $\pm$ 0.58
Mar- 11	10	0.77-4.11	2.07 $\pm$ 1.18	9	0.48-6.88	2.19 $\pm$ 2.16	8	0.60-2.61	1.37 $\pm$ 0.63
Aug-12	4	0.86-3.52	1.69 $\pm$ 1.25	1	0.65	0.65	2	0.32-0.77	0.54 $\pm$ 0.32
Sep-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun-13	15	0.53-4.44	2.26 $\pm$ 1.22	5	0.34-0.94	0.51 $\pm$ 0.25	25	0.08-0.87	0.31 $\pm$ 0.21
<b>All cruises</b>	<b>40</b>	<b>0.42-4.44</b>	<b>1.93<math>\pm</math>1.13</b>	<b>27</b>	<b>0.24-6.88</b>	<b>1.27<math>\pm</math>1.5</b>	<b>55</b>	<b>0.08-2.61</b>	<b>0.55<math>\pm</math>0.55</b>

NGC showed lower  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  than UGC (Table 2). When

$a_{CDOM}(440)$  average values are compared with the absorption coefficients  $a_{ph}(440)$  and  $a_d(440)$ , it is evident that  $a_{CDOM}(440)$  show the highest peak values in the transition region and NGC (**Table 2**). Finally, variables from the transition zone presented a range of variability that is between that of the UGC and the NGC (**Table 2**), although  $a_{CDOM}(440)$  was especially highly scattered across stations in March 2011, when the highest values of all cruises analyzed were observed (**Table 2**).

We compared the average values of  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  with data from other coastal regions (**Figure 4**), and it was observed that  $a_{ph}(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  in the UGC are lower while  $a_d(440)$  values are higher and with a larger range of variability. For NGC values are in the same range or even lower than those averages, especially  $a_{CDOM}(440)$ .



**Figure 4.** Average (red circle) and minimum and maximum (rectangle) values for (a)  $a_{ph}$ , (b)  $a_d$  y (c)  $a_{CDOM}$  from data in this study and others (data taken from Tilstone *et al.*, [39]). The asterisk in the y-axes indicates that values can be for 440, 442 or 443 nm depending on the data base. Data from this study are for 440 nm.

### 3.3. Phytoplankton pigments

Chl<sub>a</sub> showed important spatial and temporal variations, with a trend to higher concentrations in UGC vs. NGC. Chl<sub>a</sub> ranged between  $1.34 \pm 1.35$  and  $2.26 \pm 1.22$  mg/m<sup>3</sup> in UGC, between  $0.51 \pm 0.25$  and  $2.19 \pm 2.16$  mg/m<sup>3</sup> in the transition zone and between  $0.31 \pm 0.21$  and  $1.37 \pm 0.63$  mg/m<sup>3</sup> in NGC (**Table 2**). Likewise, March 2011 showed the highest values and June 2010 the lowest (**Table 2**).

Some phytoplankton pigments can be used as markers for certain algal groups [37]. This work used pigments for assessing the composition of the phytoplankton community according to **Table 3** [37]. June 2008 (**Figure 5(a)**) showed a high proportion (70%) of fucoxanthin (indicator of diatoms) in UGC, but an increase in the

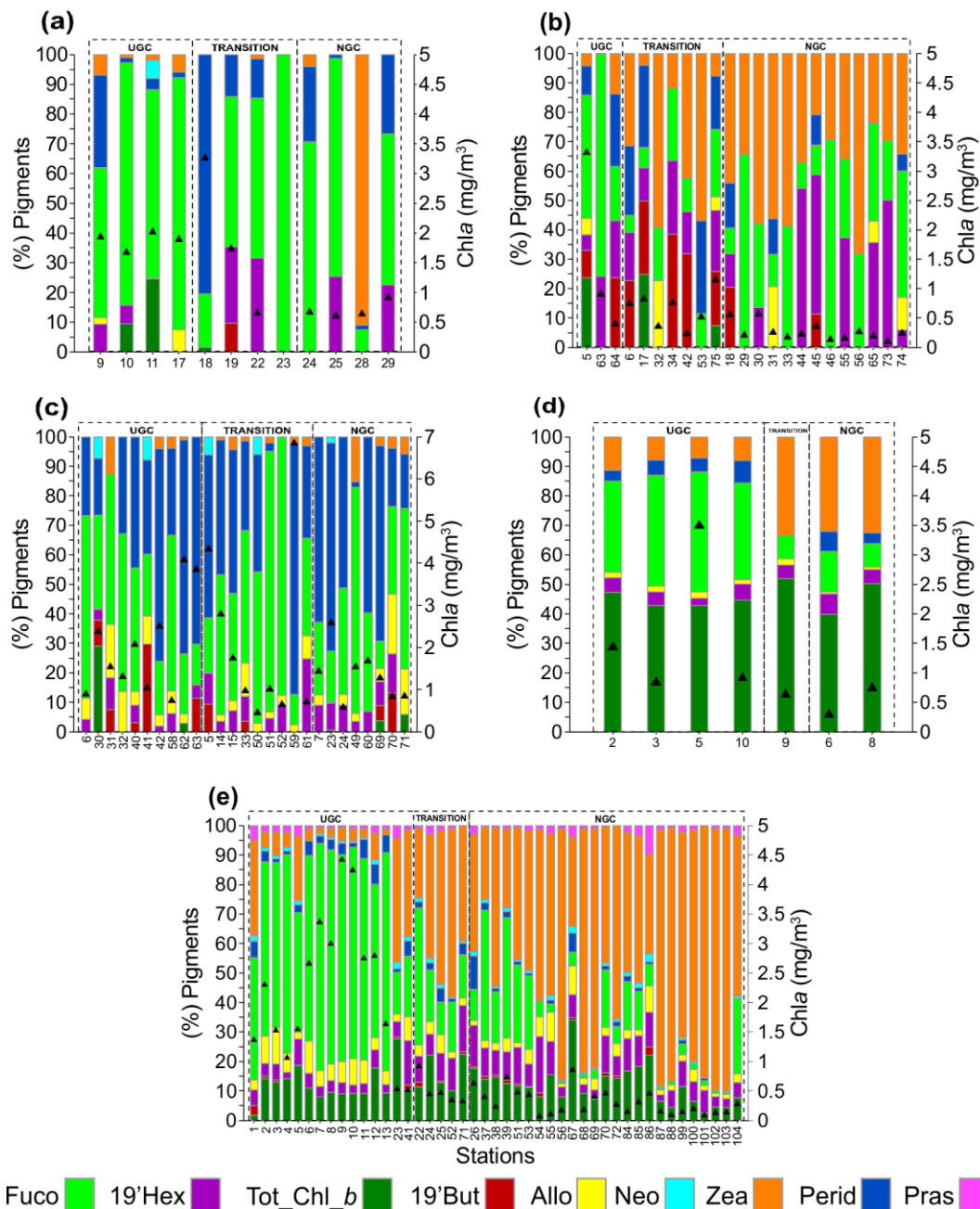
percentage of peridinin (dinoflagellates), 19'Hex (prymnesiophytes) and zeaxanthin (cyanobacteria) in the transition zone and NGC region.

June 2010 (**Figure 5(b)**) again showed a high proportion of fucoxanthin in UGC, but with a greater participation of 19'Hex and 19'But (chrysophytes and prymnesiophytes). The transition zone showed a rise in the contribution of zeaxanthin (30%) and 19'But, while pigments with a larger proportion in NGC are zeaxanthin, fucoxanthin and 19'Hex, the latter with > 35% in some stations. In March 2011 (**Figure 5c**), fucoxanthin and peridinin in general contributed more than 70% to total pigments in all regions. It should be noted that alloxanthin, a marker pigment for cryptophytes (**Table 3**), was recorded in all stations in spite of a contribution lower than 5% in some of them. This pigment was not observed in June 2008, and was recorded in a few stations in June 2010. In August 2012 (**Figure 5(d)**), a cruise that included few stations, a significant change was observed in the proportion of pigments, with a high contribution of chlorophyll *b* (>45%), followed by fucoxanthin and zeaxanthin, but with a higher proportion of fucoxanthin (36%) in UGC and an increase in zeaxanthin (>30%) in the transition zone and NGC region.

**Table 3.** Phytoplankton pigments recorded in study samples useful as diagnostic markers (adapted from Jeffrey *et al.* [37]).

PIGMENT	ABBREVIATION	ALGAL GROUPS
Total Chlorophyll <i>a</i>	[Tot_Ch1_a]	All groups except <i>Prochlorococcus</i>
Total Chlorophyll <i>b</i>	[Tot_Ch1_b]	Chlorophytes, Prasinophytes, Euglenophytes
19'-Butanoyloxyfucoxanthin	[19'But]	Chrysophytes, Prymnesiophytes
19'-Hexanoyloxyfucoxanthin	[19'Hex]	Prymnesiophytes
Alloxa. nthin	[Allo]	Cryptophytes
Fucoxanthin	[Fuco]	Diatoms, Prymnesiophytes, Chrysophytes, Raphidophytes
Peridinin	[Perid]	Dinoflagellates
Zeaxanthin	[Zea]	Cyanobacteria (including <i>Prochlorococcus</i> ), Rhodophytes, Chlorophytes, Estigmatophytes
Neoxanthin	[Neo]	Chlorophytes, Prasinophytes
Prasinoxanthin	[Pras]	Prasinophytes

Finally, June 2013 (**Figure 5(e)**) showed a continued predominance of fucoxanthin and chlorophyll *b* in UGC, and of zeaxanthin and chlorophyll *b* in NGC, with some stations where fucoxanthin was also observed. In turn, the transition zone showed a fairly homogeneous participation of the three pigments, i.e. fucoxanthin, zeaxanthin and chlorophyll *b*.



**Figure 5.** Vertical bars represent the percent contribution of each pigment by station (left axis); colors correspond to pigments listed in the legend. Black triangles correspond to Chla concentration (mg/m<sup>3</sup>) (right axis). Dotted black lines delimit the bio-optical regions (UGC: Upper Gulf of California; NGC: North Gulf of California; Transition: Transition zone). Separate graphs are shown for (a) June 2008, (b) June 2010, (c) March 2011, (d), August 2012, and (e) June 2013.

### 3.4. Absorption Budget

The relative contribution of the absorption coefficients,  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  to total light absorption was explored for the March 2011, August and September 2012 and June 2013 cruises (**Figure 6(a)- (c)**). Considering that for June 2008 and 2010 no  $a_{CDOM}(440)$  data were obtained we evaluated the relative contribution of only  $a_d(440)$  and  $a_{ph}(440)$  for all cruises for comparison (**Figure 6(d)- (f)**).

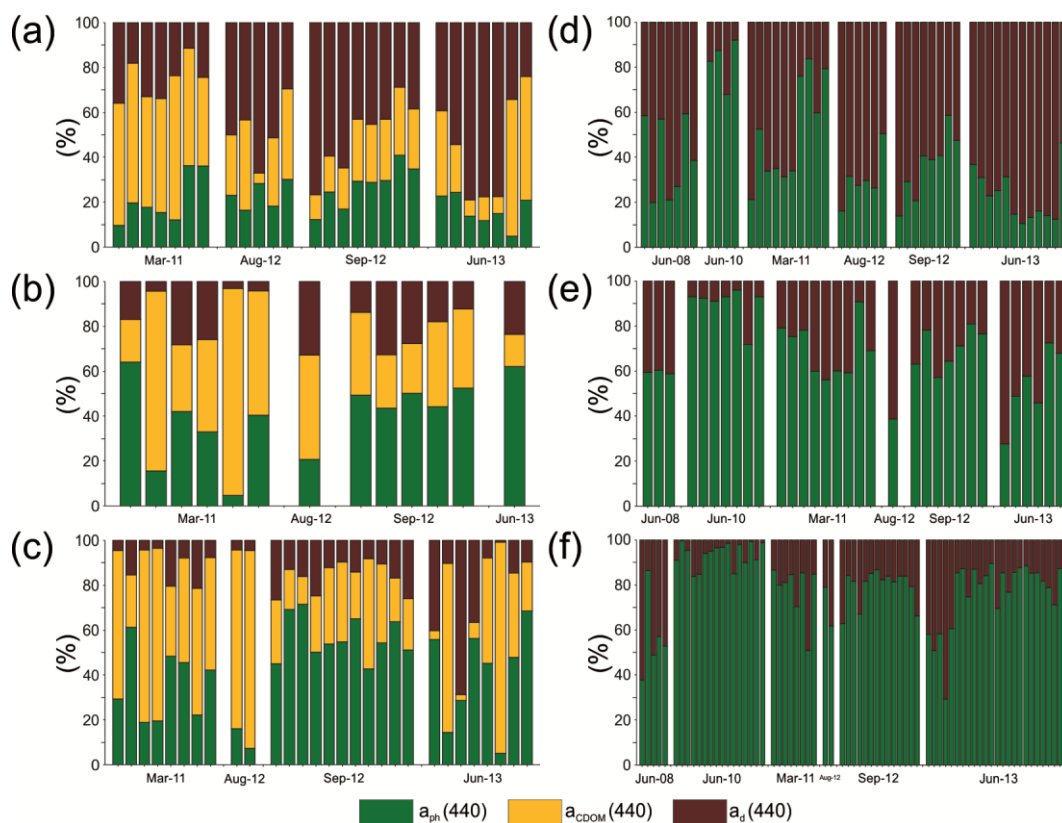
In UGC the high contribution of  $a_d(440)$  for light absorption is evident with an increasing trend from March 2011 to June 2013 (**Figure 6(a)**). This increase was followed by a decrease in  $a_{CDOM}(440)$  while  $a_{ph}(440)$  had almost no variability with a contribution from 10 to 40% to total light absorption. When this analysis took in account the contribution of only  $a_{ph}(440)$  and  $a_d(440)$  (**Figure 6(b)**) the importance of detritus is emphasized and  $a_d(440)$  was most of the time higher than 40% reaching 80% in June 2013. An exception was observed in June 2010 although this cruise was also the one with the lowest number of stations in this region.

The contribution of  $a_d(440)$  to light absorption at NGC is much lower than in UGC while the average contribution of  $a_{ph}(440)$  is much higher (**Figure 6(c)(f)**). In the analysis based on the cruises with  $a_{CDOM}(440)$  data (**Figure 6c**) it was possible to observe that the contribution of this component can be even higher than  $a_{ph}(440)$  depending on the cruise as it was for most stations in March 2012, August 2012 and June 2013, while in September 2012  $a_{ph}(440)$  contribution was always higher than 40%. When this analysis was carried out considering only  $a_{ph}(440)$  and  $a_d(440)$  (**Figure 6(f)**),  $a_{ph}(440)$  appears as the most important component with an average contribution of 79%. The transition zone (**Figure 6(b)(e)**) has similar characteristics to those of NGC with a co-dominium by  $a_{ph}(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  (40% and 41% in average) (**Figure 6(b)**) while  $a_{ph}(440)$  had a contribution of more than 60% when  $a_{CDOM}(440)$  is not taken into consideration (**Figure 6(e)**).

## 4. Discussion

The spatial and temporal variability of light absorption properties has been used as a successful tool for coastal water research and management [40] and classification schemes has been recommended to integrate optics into ecological studies [41]. However, the measurement of these variables through remote sensing can be challenging in coastal waters, especially those associated to strong spatial gradients. Our results indicate that at the northern Gulf of California this variability is high although a spatial pattern is observed that allowed the definition of two bio-optical regions. Nevertheless, their spatial distribution changes in time what was emphasized through the analysis of the transition zone, which position is probably related to a tidal-mixing front, responsible for the resuspension of sediments and the separation between the well-mixed waters in UGC and the deep and stratified waters in NGC [19]. Although the average location of the transition zone is consistent with previous

works [26] [18] there are obvious differences between cruises, associated with differences in the physical conditions during each one. For example, March 2011 showed a pattern that was markedly different from the one in all others cruises, with UGC located off Baja California peninsula while the transition zone was located to the south. This pattern matches the seasonal transition period described by Montes *et al.* [42], characterized by the simultaneous presence of cyclonic and anti-cyclonic eddies. Despite the temporal changes in the spatial distribution of each bio-optical region they maintained particular characteristic that will be useful on future approaches for the remote sensing of the light absorption properties.



**Figure 6.** Contribution of  $a_{ph}(440)$ ,  $a_d(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  to light absorption in March 2011, August and September 2012, and June 2013 for (a) UGC, (b) Transition and (c) NGC; and contribution to light absorption by  $a_{ph}(440)$  and  $a_d(440)$  in all cruises for (d) UGC, (e) Transition and (f) NGC.

In general, UGC showed the highest Chl $a$  levels and the highest contribution by fucoxanthin (**Figure 5**), pigment that indicates the presence of diatoms (**Table 3**), a group associated with areas of high nutrient concentrations and vertical mixing [43]. Santamaría-del-Ángel *et al.* [44] noted that this group may show high productivity rates despite low light penetration associated with high turbidity in this region through the increase in Chl $a$  per cell. In March 2011 peridinin also had an important contribution, indicating the presence of dinoflagellates. Diatoms and dinoflagellates are phytoplankton groups that in general belong to microphytoplankton [45], size class associated to high nutrient concentrations. Another important feature of this region is the largest contribution of  $a_d(\lambda)$  and in occasion  $a_{CDOM}(\lambda)$  to total light absorption irrespective of the marked temporal variability in the relative contribution of each component (**Figure 6**). The distinctive optical characteristics of UGC were highlighted by Bastidas-Salamanca *et al.* [18] when working with data from June 2008, as they observed a significant negative correlation between the light attenuation coefficient ( $K_d$ ) and Chl $a$ , associated with the high concentration of mineral particles in the area. The authors suggested that the equation derived from their analysis could be used for modelling the relationship between these variables. Meanwhile, the data analyzed in this study did not show the same trend, highlighting the important temporal variability in the area. On the other hand, a fact that should be kept in mind is that most cruises sampled a few stations in UGC, and given the variability observed, a greater sampling effort should be conducted in this area in order to properly evaluate the optical variability in it.

The comparison of our data with those from other regions (**Figure 4**) allowed us to infer the importance of  $a_d(440)$  to the optical properties of UGC. While  $a_{ph}(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  were in the same range of variability than in other regions,  $a_d(440)$  was much higher and with a larger range of variability (0.003 to 2.26 m<sup>-1</sup>) what also may indicate that this particular characteristic should be taken in account for an accurate use of bio-optical models. Moreover, NGC region is more oligotrophic than UGC, showing the lowest values of Chl $a$ ,  $a_{ph}(\lambda)$  and  $a_d(\lambda)$  (**Table 2**) in spite of a high contribution by  $a_{CDOM}(\lambda)$  (**Figure 6(c)**) in many stations.

The pigment composition at NGC revealed a high predominance of zeaxanthin and occasionally Chlorophyll b, indicating the importance of cyanobacteria and green algae. These phytoplankton groups belong to the picoplankton size fractions which are characteristics of nutrient-poor waters [46] what also explains the differences with UGC. March 2011 was an exception, as the contribution of fucoxanthin and peridinin spread across the entire study area. This pattern can be associated to the above mentioned spring conditions, which promote phytoplankton blooms in the gulf due to the increase in irradiance levels [47]. In fact, data analyzed in another study [48] showed primary production rates up to six times as high in March 2011 as those recorded in June 2010.

The study region is a water body with a strong optical complexity that was pre-

viously classified as Case II waters [17] although Bastidas-Salamanca *et al.* [18] mentioned that this assumption is a simplification given the differences observed in the optical properties between UGC and NGC. The area covered by the study region is smaller than other coastal waters such as the North Sea or the Baltic Sea, but its optical characteristics are spatially more variable. For example, and as previously mentioned, average  $a_{ph}(440)$  and  $a_{CDOM}(440)$  at UGC were below those values observed in other regions (Figure 4). However,  $a_d(440)$  was not only highly variable (0.003 to 2.257  $m^{-1}$ ), but it was also much higher. The analysis of the proportional contribution of each component to light absorption (Figure 6) indicated both the differences between UGC and NGC and the importance of detritus in UGC and CDOM in NGC.

## 5. Conclusions

This work makes a major contribution to the knowledge of the bio-optical properties in optically complex waters such as those to the north of the Gulf of California, a region characterized by a strong hydrodynamic reflected in a marked spatial and temporal variability of their bio-optical properties, including the composition of primary producers. More specifically, our study confirmed the presence of two bio-optical regions (UGC and NGC), which particular characteristics emphasizes that Case II waters can be very different when evaluating the individual contribution by phytoplankton, detritus and CDOM to total light absorption. Particularly, UGC region was characterized by a stronger contribution by detritus while at NGC phytoplankton and CDOM alternate their dominance. One important application of this classification is the selection of bio-optical models for each specific region taking in account their particular characteristics, what can also help to a better definition of the related uncertainties.

## Acknowledgements

The first author was support by CONACyT (Mexican Council of Science) through a PhD scholarship (No. 384224). This work was funded by projects SIMAC-CONACYT, SIMAC-2000107017; CICESE: Ecological monitoring of the Upper Gulf of California" (PANGAS-Packard Foundation); IPN-CICIMAR: SIP 1721, 20160514-CONACYT: 236864. Cruises were supported by the Mexican Navy (Secretariat of the Navy) and R/V Francisco de Ulloa (CICESE). We thank all the students from the Phytoplankton Ecology Team of the Faculty of Marine Science that participated in cruises and sampling procedures. We gratefully acknowledge the comments, suggestions and English edition of María Elena Sánchez-Salazar and anonymous reviewers.

## References

- [1] Garver, S. A., and Siegel, D. A. (1997). Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. Time series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102, 18607-18625.

- <https://doi.org/10.1029/96JC03243>
- [2] Lee, Z., Carder, K. L., Steward, R. G., Peacock, T. G., Davis, C. O., and Patch, J. S. (1998). An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **103**, 27967-27978. <https://doi.org/10.1029/98JC01946>
- [3] Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K., and Kamykowski, D. (1999). Semianalytic Moderate - Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio - optical domains based on nitrate - depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **104**, 5403-5421. <https://doi.org/10.1029/1998JC900082>
- [4] Morel, A., and Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, **22**, 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- [5] IOCCG (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, **No. 3**, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- [6] Ferreira, A., Ciotti, Á. M., and Giannini, M. F. C. (2014). Variability in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and colored dissolved organic matter in a subtropical bay (Brazil). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **139**, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.01.002>
- [7] Lee, Z., Carder, K. L., and Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied optics*, **41**, 5755-5772. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>
- [8] Maritorena, S., Siegel, D. A., and Peterson, A. R. (2002). Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, **41**, 2705-2714. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002705>
- [9] Franz, B. A., and Werdell, P. J. (2010). A generalized framework for modeling of inherent optical properties in ocean remote sensing applications. *Proceedings of Ocean Optics*, Anchorage, Alaska, **27**.
- [10] Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Feldman, G. C., Boss, E., Brando, V. E., ... and Loisel, H. (2013). Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied optics*, **52**, 2019-2037. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
- [11] Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., Hansell, D. A., and Lorenzi - Kayser, M. (2002). Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **107**. <https://doi.org/10.1029/2001JC000965>
- [12] Blough, N.V., Del Vecchio, R., (2002). Chromophoric DOM in the Coastal Environment, In "Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter" (D. A Hansell and CA Carlson, Eds.). Academic Press, San Diego.
- [13] Nelson, N. B., and Siegel, D. A. (2002). Chromophoric DOM in the open ocean. *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*, 547-578.
- [14] Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., Finlay, J. C., and Bauer, M. E. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*, **157**, 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.033>
- [15] IOCCG (2006). Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Lee, Z.-P. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, **No. 5**, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- [16] Roesler, C. S., Perry, M. J., and Carder, K. L. (1989). Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*, **34**, 1510-1523. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1510>
- [17] Pegau, W. S., Zaneveld, J. R. V., Barnard, A. H., Maske, H., Álvarez Borrego, S., Lara Lara, R., and Cervantes Duarte, R. (1999). Inherent optical properties in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, **25**, 469-485. ISSN 0185-3880. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48025402>
- [18] Bastidas-Salamanca, M., Gonzalez-Silvera, A., Millán-Núñez, R., Santamaria-del-Angel, E.,

- and Frouin, R. (2014). Bio-optical characteristics of the Northern Gulf of California during June 2008. *International Journal of Oceanography*, **2014**, 13. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/384618>
- [19] Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F., and Hunter, J. R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **100**, 16103-16118. <https://doi.org/10.1029/95JC01500>
- [20] Sanchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Peguero-Icaza, M., León-Chávez, C. A., Contreras-Catala, F., Marinone, S. G., ... and Godínez, V. M. (2009). Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, **29**, 1697-1710. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.06.001>
- [21] Santamaría - del - Angel, E., Alvarez - Borrego, S., and Müller - Karger, F. E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **99**, 7411-7421. <https://doi.org/10.1029/93JC02154>
- [22] Hidalgo-Gonzalez, R. M., and Alvarez-Borrego, S. (2001). Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica acta*, **24**, 19-28. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)01126-9](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01126-9)
- [23] Millan-Nu ez, E., Lara-Lara, J. R., and Cleveland, J. S. (1998). Variations in specific absorption coefficients and total phytoplankton in the Gulf of California. CALIFORNIA COOPERATIVE OCEANIC FISHERIES INVESTIGATIONS REPORT, 159-168.
- [24] Brewin, R. J., Sathyendranath, S., Müller, D., Brockmann, C., Deschamps, P. Y., Devred, E. and Groom, S. (2015). The Ocean Colour Climate Change Initiative: III. A round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. *Remote Sensing of Environment*, **162**, 271-294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.016>
- [25] Coble, P. G. (2007). Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color. *Chemical reviews*, **107**, 402-418. <https://doi.org/10.1021/cr050350+>
- [26] Lavín, M. F., and Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Springer Netherlands. 173-204. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11)
- [27] Borrego, S. A., Báez, B. P. F., and Bect, L. A. G. (1975). Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno primavera y verano. *Ciencias Marinas*, **2**, 21-36.
- [28] Alvarez-Borrego, S., and Galindo-Bect, L. A. (1974). Hidrológia del Alto Golfo de California-I. Condiciones Durante Otoño. *Ciencias Marinas*, **1**, 46-64.
- [29] Lavín, M. F., Godínez, V. M., and Alvarez, L. G. (1998). Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **47**, 769-795. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0387>
- [30] Lavín, M. F., and Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **93**, 14033-14038. <https://doi.org/10.1029/JC093iC11p14033>
- [31] Lavín, M. F., and Sánchez, S. (1999). On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research*, **19**, 1545-1560. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00030-8)
- [32] Santamaría-del-Ángel, E., Soto, I., Millán-Nuñez, R., González-Silvera, A., Wolny, J., Cerdeira-Estrada, S., Cajal-Medrano, R., Muller-Karger, F., Cannizzaro, J., Padilla-Rosas, Y.X.S., Mercado-Santana, A., Gracia-Escobar, M.F., Álvarez-Torres, P., Ruiz-de-la-Torre, M.C., 2015. Phytoplankton blooms: New initiative using marine optics as a basis for monitoring programs, in: *Coastal Ecosystems: Experiences and Recommendations for Environmental Monitoring Programs*, Environmental Science, Engineering and Technology. p. 7x15-(NBC-C).
- [33] Kirk, J. T. O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge University Press, Cambridge, 509 p.
- [34] Mitchell, B. G., Kahru, M., Wieland, J., Stramska, M., and Mueller, J. L. (2002). Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplank-

- ton for discrete water samples. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision, **3**, 231–257.
- [35] Barlow, R. G., Cummings, D. G., and Gibb, S. W. (1997). Improved resolution of mono- and divinyl chlorophylls a and b and zeaxanthin and lutein in phytoplankton extracts using reverse phase C-8 HPLC. *Marine Ecology Progress Series*, **161**, 303–307. <http://www.jstor.org/stable/24859034>
- [36] Thomas, C., (2012). The HPLC Method, Chapter 6, in: *The Fifth SeaWiFS HPLC Analysis Round-Robin Experiment (SeaHARRE-5)* - Buscar Con Google. pp. 63–72.
- [37] Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C., Wright, S.W., (1997). *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*. Monogr. Oceanogr. Methodol.
- [38] Zar, J.H., 1999. *Biostatistical analysis*. Pearson Education India.
- [39] Tilstone, G. H., Peters, S. W., van der Woerd, H. J., Eleveld, M. A., Ruddick, K., Schönfeld, W., ... & Sørensen, K. (2012). Variability in specific-absorption properties and their use in a semi-analytical ocean colour algorithm for MERIS in North Sea and Western English Channel Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, **118**, 320–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.019>
- [40] Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Harding Jr, L. W., and Feldman, G. C. (2007, September). Approach for the long-term spatial and temporal evaluation of ocean color satellite data products in a coastal environment. In *Proc. of SPIE* **Vol. 6680**, pp. 66800G-1). <https://doi.org/10.1117/12.732489>
- [41] Mélin, F., and Vantrepotte, V. (2015). How optically diverse is the coastal ocean?. *Remote Sensing of Environment*, **160**, 235–251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.023>
- [42] Montes, J. M., Lavín, M. F., and Parés-Sierra, A. F. (2015). Seasonal Heat and Salt Balance in the Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, **32**, 853–862. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00192.1>
- [43] Sarthou, G., Timmermans, K. R., Blain, S., and Tréguer, P. (2005). Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *Journal of Sea Research*, **53**, 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2004.01.007>
- [44] Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., De la Peña-Nettel, G., (1996). Efecto de la turbidez en la productividad primaria en dos estaciones en el área del delta del Río Colorado. *Ciencias Marinas*, **22**, 483–493. <http://www.redalyc.org/html/480/48022407/>
- [45] Uitz, J., Claustre, H., Morel, A., and Hooker, S. B. (2006). Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **111**. <https://doi.org/10.1029/2005JC003207>
- [46] Ji, Z.G., (2008). *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*. John Wiley and Sons.
- [47] Gaxiola-Castro, G., Alvarez-Borrego, S., Lavín, M. F., Zirino, A., and Nájera-Martínez, S. (1999). Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, **21**, 231–245. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.2.231>
- [48] Gracia-Escobar, M.F., (2016). Abundancia, Carbono: Clorofila a, productividad primaria, pigmentos y absorción de la luz del fitoplancton en el Alto Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

**ANEXO 2.** Base de datos utilizada para la evaluación del coeficiente de absorción del fitoplancton ( $a_{ph}(\lambda)$ ) *in situ* y satelital a 412, 443, 488 nm (ND = No hubo dato, ED = Error en el dato, Letras rojas = Datos extremos)

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{ph}$ (412)	$a_{ph}$ (443)	$a_{ph}$ (488)	$a_{ph}$ (412) GIOP	$a_{ph}$ (443) GIOP	$a_{ph}$ (488) GIOP	$a_{ph}$ (412) GSM	$a_{ph}$ (443) GSM	$a_{ph}$ (488) GSM
<b>Junio 2008 – UGC</b>											
A01	31.6	-114.3	0.072	0.089	0.056	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A02	31.5	-114.4	0.043	0.039	0.021	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A03	31.4	-114.6	0.119	0.136	0.101	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A04	31.4	-114.7	0.061	0.076	0.053	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B05	31.3	-114.7	0.077	0.080	0.050	0.200	0.230	0.159	0.039	0.329	0.130
D04	31.2	-114.5	0.198	0.149	0.078	0.071	0.082	0.057	0.011	0.090	0.036
E09	31.0	-114.7	0.012	0.038	0.032	0.042	0.051	0.035	0.006	0.053	0.021
<b>Junio 2008 – Zona de transición</b>											
D03	31.3	-114.4	0.030	0.093	0.079	0.069	0.080	0.055	0.009	0.076	0.030
D02	31.4	-114.3	0.028	0.064	0.050	0.041	0.048	0.033	0.004	0.036	0.014
F09	31.0	-114.6	0.084	0.087	0.049	0.039	0.048	0.033	0.006	0.051	0.020
<b>Junio 2008 – NGC</b>											
F07	31.1	-114.4	0.025	0.035	0.022	0.022	0.028	0.020	0.003	0.028	0.011
I03	31.1	-113.8	0.029	0.036	0.027	0.017	0.021	0.015	0.002	0.017	0.007
K04	30.5	-114.2	0.041	0.057	0.041	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K03	30.7	-114.0	0.067	0.078	0.054	ND	ND	ND	ND	ND	ND
M03	30.9	-113.5	0.019	0.031	0.025	0.022	0.026	0.018	0.003	0.029	0.011
<b>Junio 2010 – UGC</b>											
A01	31.5	-114.3	0.054	0.055	0.033	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G10	30.9	-114.7	0.022	0.020	0.011	ED	ED	ED	ED	ED	ED
H11	30.8	-114.7	0.055	0.051	0.029	0.003	0.004	0.003	0.002	0.016	0.006
J12	30.7	-114.7	0.034	0.034	0.021	ED	ED	ED	ED	ED	ED
<b>Junio 2010 – Zona de transición</b>											
B01	31.5	-114.3	0.021	0.024	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B02	31.4	-114.4	0.049	0.049	0.029	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BC01	31.5	-114.2	0.027	0.033	0.022	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C01	31.5	-114.2	0.021	0.029	0.019	ND	ND	ND	ND	ND	ND
E02	31.4	-114.0	0.022	0.022	0.012	0.016	0.019	0.013	0.002	0.016	0.006
H01	31.3	-113.7	0.010	0.012	0.008	0.023	0.028	0.020	0.004	0.030	0.012
J01	31.3	-113.6	0.048	0.044	0.024	0.034	0.041	0.028	0.004	0.032	0.013

## Continuación ANEXO 2

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{ph}$ (412)	$a_{ph}$ (443)	$a_{ph}$ (488)	$a_{ph}$ (412) GIOP	$a_{ph}$ (443) GIOP	$a_{ph}$ (488) GIOP	$a_{ph}$ (412) GSM	$a_{ph}$ (443) GSM	$a_{ph}$ (488) GSM
<b>Junio 2010 – NGC</b>											
C02	31.4	-114.3	0.038	0.040	0.024	ED	ED	ED	ED	ED	ED
D01	31.4	-114.2	0.023	0.025	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	ND
E04	31.3	-114.2	0.008	0.008	0.005	0.010	0.013	0.009	0.001	0.011	0.004
E03	31.3	-114.1	0.016	0.016	0.010	0.029	0.036	0.025	0.004	0.033	0.013
E01	31.4	-113.9	0.038	0.037	0.022	ED	ED	ED	ED	ED	ED
G09	30.9	-114.6	0.009	0.009	0.006	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G08	31.0	-114.5	0.011	0.011	0.006	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G07	31.0	-114.4	0.006	0.006	0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND
H02	31.3	-113.8	0.013	0.014	0.007	0.014	0.018	0.012	0.002	0.017	0.007
H03	31.2	-113.9	0.008	0.006	0.004	0.011	0.015	0.010	0.002	0.013	0.005
H04	31.1	-114.0	0.024	0.027	0.017	0.014	0.018	0.013	0.002	0.016	0.007
J11	30.8	-114.6	0.011	0.015	0.011	ND	ND	ND	ND	ND	ND
J10	30.8	-114.5	0.008	0.011	0.009	ED	ED	ED	ED	ED	ED
J09	30.9	-114.4	0.015	0.014	0.008	ND	ND	ND	ND	ND	ND
J03	31.2	-113.8	0.005	0.007	0.006	0.009	0.012	0.009	0.001	0.010	0.004
J02	31.2	-113.7	0.010	0.009	0.005	0.009	0.012	0.009	0.001	0.011	0.004
<b>Marzo 2011 – UGC</b>											
Vaquita	31.1	-114.6	0.009	0.016	0.010	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C05	31.2	-114.7	0.034	0.046	0.029	0.058	0.067	0.046	0.009	0.072	0.029
B06	31.2	-114.8	0.014	0.021	0.014	0.054	0.062	0.043	0.008	0.071	0.028
B05	31.3	-114.7	0.015	0.021	0.013	0.059	0.068	0.047	0.009	0.080	0.031
A04	31.4	-114.7	0.019	0.024	0.015	0.078	0.091	0.063	0.012	0.104	0.041
A05	31.3	-114.8	0.017	0.022	0.015	0.067	0.079	0.055	0.011	0.094	0.037
G10	30.9	-114.7	0.069	0.091	0.058	0.019	0.023	0.016	0.004	0.030	0.012
H07	31.0	-114.3	0.029	0.037	0.025	0.078	0.091	0.063	0.010	0.083	0.033
H11	30.8	-114.7	0.036	0.047	0.030	ED	ED	ED	ED	ED	ED
J12	30.7	-114.7	0.069	0.090	0.055	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Marzo 2011 – Zona de transición</b>											
E05	31.2	-114.3	0.076	0.100	0.062	ED	ED	ED	ED	ED	ED
F04	31.2	-114.1	0.038	0.046	0.028	ND	ND	ND	ND	ND	ND
F05	31.2	-114.3	0.038	0.050	0.034	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B04	31.3	-114.6	0.034	0.047	0.031	0.024	0.028	0.019	0.003	0.024	0.009
G02	31.3	-113.9	0.031	0.039	0.024	0.020	0.024	0.017	0.003	0.026	0.010
G01	31.3	-113.8	0.026	0.036	0.022	0.017	0.020	0.014	0.002	0.018	0.007

## Continuación ANEXO 2

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{ph}$ (412)	$a_{ph}$ (443)	$a_{ph}$ (488)	$a_{ph}$ (412) GIOP	$a_{ph}$ (443) GIOP	$a_{ph}$ (488) GIOP	$a_{ph}$ (412) GSM	$a_{ph}$ (443) GSM	$a_{ph}$ (488) GSM
<b>Marzo 2011 – Zona de transición</b>											
H01	31.3	-113.7	0.016	0.021	0.014	0.015	0.018	0.013	0.002	0.016	0.006
H08	30.9	-114.4	0.094	0.126	0.087	0.042	0.050	0.035	0.006	0.049	0.019
H10	30.8	-114.6	0.031	0.042	0.028	0.021	0.025	0.017	0.003	0.021	0.008
<b>Marzo 2011 – NGC</b>											
E04	31.3	-114.2	0.071	0.093	0.059	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D03	31.3	-114.4	0.069	0.093	0.058	ED	ED	ED	ED	ED	ED
D02	31.3	-114.3	0.029	0.037	0.023	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G03	31.2	-114.0	0.025	0.030	0.018	0.077	0.090	0.062	0.010	0.087	0.034
H09	30.9	-114.5	0.030	0.043	0.027	0.030	0.037	0.026	0.004	0.033	0.013
J06	31.0	-114.1	0.052	0.069	0.042	0.065	0.076	0.052	0.008	0.064	0.025
J05	31.1	-114.0	0.017	0.023	0.013	0.020	0.025	0.018	0.003	0.022	0.009
J04	31.1	-113.9	0.022	0.031	0.020	0.040	0.049	0.034	0.005	0.045	0.018
<b>Agosto 2012 – UGC</b>											
BC01	31.0	-114.7	0.053	0.082	0.051	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BC02	31.0	-114.8	0.109	0.134	0.083	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D4	31.3	-114.7	0.074	0.069	0.033	0.109	0.126	0.087	0.016	0.131	0.052
D5	31.3	-114.6	0.073	0.106	0.074	0.106	0.124	0.086	0.017	0.144	0.057
D6	31.4	-114.5	0.068	0.099	0.064	0.114	0.133	0.092	0.018	0.150	0.059
BC31	31.5	-114.3	0.079	0.092	0.057	0.088	0.101	0.069	0.005	0.046	0.018
<b>Agosto 2012 – Zona de transición</b>											
A4	31.1	-114.6	0.032	0.027	0.013	0.051	0.062	0.043	0.008	0.069	0.027
D7	31.4	-114.3	0.041	0.051	0.032	0.035	0.043	0.030	0.008	0.065	0.026
A6	31.2	-114.4	0.024	0.018	0.010	0.053	0.064	0.045	0.008	0.064	0.025
<b>Septiembre 2012 – UGC</b>											
A05	31.4	-114.7	0.043	0.129	0.081	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B03	31.4	-114.4	0.061	0.089	0.058	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B04	31.4	-114.5	0.042	0.078	0.052	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B06	31.3	-114.7	0.097	0.144	0.095	0.122	0.141	0.097	0.018	0.152	0.060
B07	31.2	-114.8	0.184	0.229	0.140	ED	ED	ED	ED	ED	ED
C06	31.2	-114.7	0.072	0.112	0.074	0.115	0.134	0.092	0.019	0.159	0.063
D08	31.1	-114.6	0.129	0.176	0.110	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D09	31.1	-114.7	0.110	0.160	0.097	ND	ND	ND	ND	ND	ND

## Continuación ANEXO 2

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{ph}$ (412)	$a_{ph}$ (443)	$a_{ph}$ (488)	$a_{ph}$ (412) GIOP	$a_{ph}$ (443) GIOP	$a_{ph}$ (488) GIOP	$a_{ph}$ (412) GSM	$a_{ph}$ (443) GSM	$a_{ph}$ (488) GSM
<b>Septiembre 2012 – Zona de transición</b>											
D04	31.4	-114.2	0.039	0.054	0.036	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D05	31.3	-114.3	0.050	0.069	0.044	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D06	31.3	-114.4	0.050	0.071	0.047	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D07	31.2	-114.5	0.080	0.111	0.072	0.058	0.070	0.049	0.009	0.074	0.029
E02	31.4	-114.0	0.072	0.095	0.060	ND	ND	ND	ND	ND	ND
E01	31.4	-113.9	0.082	0.103	0.066	ED	ED	ED	ED	ED	ED
F01	31.4	-113.8	0.072	0.094	0.059	0.053	0.064	0.045	0.008	0.065	0.026
<b>Septiembre 2012 – NGC</b>											
F02	31.3	-113.9	0.046	0.061	0.039	0.043	0.054	0.038	0.006	0.054	0.021
F03	31.3	-114.0	0.047	0.062	0.038	0.019	0.025	0.018	0.003	0.021	0.008
F04	31.2	-114.1	0.035	0.050	0.032	0.017	0.023	0.016	0.002	0.018	0.007
G08	31.0	-114.4	0.041	0.052	0.033	0.026	0.034	0.024	0.004	0.032	0.012
G07	31.0	-114.3	0.044	0.057	0.038	0.026	0.033	0.023	0.004	0.031	0.012
G06	31.1	-114.2	0.029	0.038	0.025	0.021	0.027	0.019	0.003	0.024	0.009
G05	31.1	-114.1	0.038	0.052	0.036	0.020	0.026	0.018	0.003	0.023	0.009
G04	31.2	-114.0	0.025	0.036	0.025	0.016	0.021	0.015	0.002	0.017	0.007
G03	31.2	-113.9	0.051	0.066	0.041	0.028	0.036	0.026	0.004	0.034	0.014
H06	31.0	-114.1	0.033	0.045	0.029	0.019	0.026	0.018	0.003	0.021	0.008
H07	31.0	-114.2	0.031	0.041	0.027	0.021	0.028	0.020	0.003	0.025	0.010
H08	30.9	-114.3	0.027	0.039	0.026	0.016	0.021	0.015	0.002	0.020	0.008
H09	30.9	-114.4	0.036	0.045	0.030	ED	ED	ED	ED	ED	ED
H10	30.8	-114.5	0.060	0.074	0.048	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Junio 2013 – UGC</b>											
V5(X1)	31.6	-114.4	0.111	0.139	0.092	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V4(X2)	31.5	-114.5	0.181	0.207	0.132	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V3(X3)	31.5	-114.6	0.099	0.126	0.074	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V2(X4)	31.5	-114.7	0.063	0.098	0.064	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V1(X5)	31.4	-114.8	0.103	0.160	0.108	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V7(Z2)	31.7	-114.6	0.259	0.394	0.233	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A5(Y5)	31.6	-114.5	0.045	0.143	0.101	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A4(Y4)	31.6	-114.6	0.150	0.231	0.161	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A3(Y3)	31.6	-114.6	0.769	0.995	0.663	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A2(Y2)	31.5	-114.7	0.232	0.346	0.237	ND	ND	ND	ND	ND	ND

## Continuación ANEXO 2

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			a <sub>ph</sub> (412)	a <sub>ph</sub> (443)	a <sub>ph</sub> (488)	a <sub>ph</sub> (412) GIOP	a <sub>ph</sub> (443) GIOP	a <sub>ph</sub> (488) GIOP	a <sub>ph</sub> (412) GSM	a <sub>ph</sub> (443) GSM	a <sub>ph</sub> (488) GSM
<b>Junio 2013 – UGC</b>											
A1(Y1)	31.5	-114.8	0.246	0.325	0.217	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B04	31.4	-114.5	0.015	0.033	0.027	0.070	0.082	0.057	0.011	0.089	0.035
D08	31.0	-114.7	0.035	0.051	0.036	0.045	0.054	0.038	0.007	0.057	0.022
<b>Junio 2013 – Zona de transición</b>											
B03	31.4	-114.4	0.039	0.056	0.040	0.045	0.054	0.038	0.007	0.058	0.023
B05	31.3	-114.6	0.041	0.062	0.043	0.068	0.080	0.056	0.010	0.084	0.033
B06	31.3	-114.7	0.047	0.073	0.051	0.059	0.069	0.048	0.008	0.071	0.028
D07	31.1	-114.6	0.025	0.035	0.024	0.028	0.035	0.024	0.005	0.038	0.015
F02	31.3	-113.9	0.030	0.040	0.027	0.021	0.026	0.018	0.003	0.027	0.011
H01	31.3	-113.6	0.033	0.046	0.033	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Junio 2013 – NGC</b>											
B07	31.2	-114.8	0.068	0.099	0.068	0.094	0.110	0.076	0.015	0.124	0.049
D04	31.3	-114.3	0.023	0.032	0.023	0.019	0.024	0.017	0.003	0.028	0.011
D05	31.2	-114.4	0.027	0.038	0.027	0.014	0.017	0.012	0.003	0.022	0.009
D06	31.2	-114.5	0.030	0.044	0.031	0.017	0.022	0.015	0.003	0.025	0.010
F01	31.4	-113.8	0.039	0.052	0.036	0.023	0.028	0.019	0.003	0.027	0.011
F03	31.3	-114.0	0.032	0.040	0.026	0.018	0.023	0.016	0.003	0.022	0.009
F04	31.2	-114.1	0.013	0.019	0.013	0.013	0.017	0.012	0.002	0.014	0.006
F05	31.2	-114.2	0.005	0.010	0.007	0.015	0.019	0.013	0.002	0.017	0.007
F06	31.1	-114.3	0.020	0.013	0.007	0.012	0.016	0.011	0.002	0.016	0.006
G04	31.2	-114.0	0.022	0.030	0.021	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G03	31.2	-113.9	0.026	0.033	0.022	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G02	31.3	-113.8	0.026	0.036	0.025	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G01	31.3	-113.7	0.042	0.054	0.036	ND	ND	ND	ND	ND	ND
H02	31.2	-113.7	0.027	0.035	0.024	ND	ND	ND	ND	ND	ND
J11	30.7	-114.6	0.023	0.033	0.022	0.006	0.007	0.005	0.002	0.017	0.007
J10	30.8	-114.5	0.029	0.037	0.023	0.022	0.028	0.020	0.004	0.035	0.014
J09	30.8	-114.4	0.068	0.093	0.056	0.019	0.025	0.018	0.003	0.028	0.011
J08	30.9	-114.3	0.029	0.037	0.025	0.017	0.022	0.015	0.003	0.023	0.009
J07	30.9	-114.1	0.021	0.029	0.019	0.018	0.024	0.017	0.003	0.025	0.010
K05	31.0	-113.9	0.021	0.024	0.015	ND	ND	ND	ND	ND	ND

### Continuación ANEXO 2

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			a <sub>ph</sub> (412)	a <sub>ph</sub> (443)	a <sub>ph</sub> (488)	a <sub>ph</sub> (412) GIOP	a <sub>ph</sub> (443) GIOP	a <sub>ph</sub> (488) GIOP	a <sub>ph</sub> (412) GSM	a <sub>ph</sub> (443) GSM	a <sub>ph</sub> (488) GSM
<b>Junio 2013 – NGC</b>											
K06	30.9	-114.0	0.025	0.034	0.023	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K07	30.9	-114.1	0.018	0.023	0.015	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K08	30.8	-114.2	0.019	0.028	0.020	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K09	30.8	-114.3	0.023	0.030	0.020	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K10	30.7	-114.4	0.041	0.055	0.035	ED	ED	ED	ED	ED	ED
K06	30.9	-114.0	0.025	0.034	0.023	ND	ND	ND	ND	ND	ND

**ANEXO 3.** Base de datos utilizada para la evaluación del coeficiente de absorción de la materia disuelta y detrítica ( $a_{dg}(\lambda)$ ) *in situ* y satelital a 412, 443, 488 nm. (ND = No hubo dato, ED = Error en el dato, Letra roja = Datos extremos)

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{dg}$ (412)	$a_{dg}$ (443)	$a_{dg}$ (488)	$a_{dg}$ (412) GIOP	$a_{dg}$ (443) GIOP	$a_{dg}$ (488) GIOP	$a_{dg}$ (412) GSM	$a_{dg}$ (443) GSM	$a_{dg}$ (488) GSM
<b>March 2011 Cruise – UGC Region</b>											
Vaquita	31.1	-114.6	0.24	0.15	0.07	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C05	31.2	-114.7	0.29	0.18	0.09	0.32	0.18	0.08	0.41	0.21	0.08
B05	31.3	-114.7	0.14	0.10	0.05	0.23	0.13	0.06	0.32	0.17	0.06
A04	31.4	-114.7	0.22	0.13	0.07	0.16	0.09	0.04	0.26	0.13	0.05
A05	31.3	-114.8	0.25	0.16	0.08	0.17	0.10	0.04	0.25	0.13	0.05
G10	30.9	-114.7	0.26	0.15	0.07	0.23	0.13	0.06	0.05	0.15	ED
H11	30.8	-114.7	0.14	0.08	0.04	ED	ED	ED	ED	ED	ED
<b>March 2011 Cruise – Transition zone</b>											
E05	31.2	-114.3	0.10	0.05	0.02	ED	ED	ED	ED	ED	ED
F05	31.2	-114.3	0.41	0.26	0.14	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B04	31.3	-114.6	0.11	0.06	0.03	<b>0.29</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	0.36	0.19	0.07
G02	31.3	-113.9	0.11	0.08	0.04	0.17	0.10	0.04	0.20	0.10	0.04
H01	31.3	-113.7	0.67	0.42	0.21	<b>0.19</b>	<b>0.11</b>	<b>0.05</b>	<b>0.22</b>	<b>0.12</b>	<b>0.05</b>
H08	30.9	-114.4	0.29	0.18	0.09	ED	ED	ED	ED	ED	ED
<b>March 2011 Cruise – NGC Region</b>											
E04	31.3	-114.2	0.34	0.22	0.11	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D03	31.3	-114.4	0.10	0.06	0.02	ED	ED	ED	ED	ED	ED
D02	31.3	-114.3	0.25	0.15	0.07	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G03	31.2	-114.0	0.20	0.12	0.05	0.18	0.10	0.05	0.26	0.14	0.05
H09	30.9	-114.5	0.08	0.04	0.02	<b>0.43</b>	<b>0.25</b>	<b>0.11</b>	0.18	0.09	0.04
J06	31.0	-114.1	0.14	0.08	0.04	0.17	0.09	0.04	0.24	0.12	0.05
J05	31.1	-114.0	0.14	0.08	0.03	0.12	0.07	0.03	0.14	0.07	0.03
J04	31.1	-113.9	0.07	0.04	0.02	0.13	0.07	0.03	0.17	0.09	0.04
<b>August 2012 Cruise – UGC Region</b>											
BC02	31.0	-114.8	0.64	0.44	0.26	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D4	31.3	-114.7	0.53	0.36	0.20	ED	ED	ED	ED	ED	ED
D5	31.3	-114.6	0.36	0.26	0.16	<b>0.12</b>	<b>0.07</b>	<b>0.03</b>	0.24	0.12	0.05
D6	31.4	-114.5	0.62	0.42	0.25	<b>0.09</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	ED	0.11	ED
BC31	31.5	-114.3	0.33	0.21	0.23	0.32	0.18	0.08	0.04	0.23	ND

## Continuación ANEXO 3

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{dg}$ (412)	$a_{dg}$ (443)	$a_{dg}$ (488)	$a_{dg}$ (412) GIOP	$a_{dg}$ (443) GIOP	$a_{dg}$ (488) GIOP	$a_{dg}$ (412) GSM	$a_{dg}$ (443) GSM	$a_{dg}$ (488) GSM
<b>August 2012 Cruise – Transition zone</b>											
A4	31.1	-114.6	0.16	0.10	0.06	ED	ED	ED	ND	ED	ND
<b>August 2012 Cruise – NGC Region</b>											
A6	31.2	-114.4	0.35	0.23	0.13	0.09	0.05	0.02	0.15	0.08	0.03
<b>September 2012 Cruise – UGC Region</b>											
A05	31.4	-114.7	1.19	0.84	0.52	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B03	31.4	-114.4	0.39	0.27	0.16	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B04	31.4	-114.5	0.51	0.36	0.21	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B06	31.3	-114.7	0.50	0.33	0.19	0.14	0.08	0.04	0.27	0.14	0.05
B07	31.2	-114.8	0.81	0.56	0.33	ED	ED	ED	ED	ED	ED
C06	31.2	-114.7	0.38	0.26	0.15	ED	ED	ED	ND	ED	ND
D08	31.1	-114.6	0.38	0.25	0.14	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D09	31.1	-114.7	0.43	0.29	0.17	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>September 2012 Cruise – Transition zone</b>											
D05	31.3	-114.3	0.12	0.07	0.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D06	31.3	-114.4	0.14	0.09	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
D07	31.2	-114.5	0.17	0.11	0.06	0.05	0.03	0.01	0.00	0.05	ND
E02	31.4	-114.0	0.19	0.12	0.06	ND	ND	ND	ND	ND	ND
E01	31.4	-113.9	0.16	0.09	0.04	ED	ED	ED	ED	ED	ED
<b>September 2012 Cruise – NGC Region</b>											
F02	31.3	-113.9	0.12	0.07	0.04	0.06	0.03	0.01	0.09	0.05	0.02
F03	31.3	-114.0	0.05	0.03	0.01	0.04	0.02	0.01	0.05	0.02	0.01
F04	31.2	-114.1	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01
G08	31.0	-114.4	0.09	0.05	0.02	0.05	0.03	0.01	0.06	0.03	0.01
G07	31.0	-114.3	0.08	0.05	0.02	0.05	0.03	0.01	0.06	0.03	0.01
G06	31.1	-114.2	0.06	0.03	0.01	0.04	0.02	0.01	0.05	0.03	0.01
G04	31.2	-114.0	0.04	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01
H07	31.0	-114.2	0.09	0.05	0.02	0.04	0.03	0.01	0.05	0.03	0.01
H08	30.9	-114.3	0.06	0.03	0.01	ED	ED	ED	ED	ED	ED
H09	30.9	-114.4	0.05	0.02	0.01	ED	ED	ED	ED	ED	ED
H10	30.8	-114.5	0.12	0.07	0.04	ND	ND	ND	ND	ND	ND

### Continuación ANEXO 3

# Est	LAT (N)	LON (W)	Datos <i>in situ</i>			Datos Satelitales					
			$a_{dg}$ (412)	$a_{dg}$ (443)	$a_{dg}$ (488)	$a_{dg}$ (412) GIOP	$a_{dg}$ (443) GIOP	$a_{dg}$ (488) GIOP	$a_{dg}$ (412) GSM	$a_{dg}$ (443) GSM	$a_{dg}$ (488) GSM
<b>June 2013 Cruise – UGC Region</b>											
V5(X1)	31.6	-114.4	0.68	0.46	0.27	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V4(X2)	31.5	-114.5	0.90	0.63	0.38	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V7(Z2)	31.7	-114.6	3.42	2.38	1.43	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A4(Y4)	31.6	-114.6	2.32	1.65	1.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A2(Y2)	31.5	-114.7	2.65	1.87	1.16	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B04	31.4	-114.5	0.83	0.59	0.35	0.12	0.07	0.03	0.12	0.07	0.03
D08	31.0	-114.7	0.29	0.18	0.10	0.14	0.08	0.04	0.19	0.10	0.04
<b>June 2013 Cruise – Transition zone</b>											
F02	31.3	-113.9	0.05	0.02	0.01	0.13	0.07	0.03	0.15	0.08	0.03
<b>June 2013 Cruise – NGC Region</b>											
B07	31.2	-114.8	0.12	0.08	0.05	0.15	0.08	0.04	0.25	0.13	0.05
D05	31.2	-114.4	0.33	0.22	0.12	0.10	0.06	0.02	0.10	0.05	0.02
D06	31.2	-114.5	0.15	0.11	0.07	0.11	0.07	0.03	0.13	0.07	0.03
F01	31.4	-113.8	0.07	0.04	0.02	0.16	0.09	0.04	0.19	0.10	0.04
F03	31.3	-114.0	0.10	0.05	0.02	0.07	0.04	0.02	0.08	0.04	0.02
F06	31.1	-114.3	0.36	0.24	0.13	0.08	0.04	0.02	0.08	0.04	0.02
J11	30.7	-114.6	0.06	0.03	0.02	0.14	0.08	0.04	0.14	0.07	0.03
J09	30.8	-114.4	0.08	0.04	0.02	0.07	0.04	0.02	0.08	0.04	0.02