

Estimación de concentración clorofila-a, con técnicas de teledetección a partir de un derrame de petróleo*¹

[Estimation of chlorophyll-a concentration, with remote sensing techniques from an oil spill]

MÓNICA PRECIADO VARGAS², NORMA JOHANNA SILVA RODRÍGUEZ³

RECIBO: 20.08.2014 – APROBACIÓN: 06.03.2015

Resumen

Las comunidades de fitoplancton y demás seres fotosintéticos, representan la base para el desarrollo normal y equilibrado de la cadena trófica del ecosistema marino. La clorofila-a, es el compuesto de mayor presencia en los organismos fotosintéticos, por lo tanto, se relacionan de forma directa con la biomasa vegetal, permitiendo determinar el estado de deterioro o equilibrio del ecosistema. La concentración de clorofila-a sufre alteraciones por la presencia de procesos naturales y antropogénicos, ejemplos de estos últimos relacionados con el procesamiento de hidrocarburos. El estudio se realizó en el Golfo de México antes y después del derrame de crudo del año 2010, de esta forma se determinaron los impactos sobre el fitoplancton que permitieron la formulación de consideraciones sobre el estado general del ecosistema marino. La estimación de clorofila-a, se obtuvo de forma remota con imágenes Landsat y SeaWiFS empleando el algoritmo descomposición espectral (SDA) y el algoritmo de cuatro bandas (OC4)

* Modelo para la citación de este artículo:

PRECIADO VARGAS, Mónica & SILVA RODRÍGUEZ, Norma Johanna (2015). Estimación de concentración clorofila-a, con técnicas de teledetección a partir de un derrame de petróleo. En: Ventana Informática No. 32 (ene-jun). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 199-215. ISSN: 0123-9678

- 1 Artículo de investigación científica y tecnológica proveniente del proyecto *Metodología para estimar la concentración de clorofila-a, con Imágenes para evaluar los efectos del derrame de petróleo en el Golfo de México- Abril de 2010*, ejecutado en el periodo 2011-2012 [Proyecto de trabajo de grado para la opción de título de Ingeniera Topográfica de la segunda autora]
- 2 Ingeniera topográfica, Esp. en SIG, Magister en Desarrollo Sustentable. Profesora, Universidad del Valle. Correo electrónico: monica.preciado@correounivalle.edu.co.
- 3 Ingeniera Topográfica, Estudiante Especialización en SIG. Correo electrónico: njsilvar@gmail.com.

respectivamente. Los resultados evidencian una disminución de la concentración de clorofila-a de 0,4 a 0,34 mg/m³ para los años 2008 y 2010, en la zona exacta del evento.

Palabras claves: Clorofila-a, Landsat, SeaWiFS, descomposición espectral, algoritmo OC4.

Abstract

The communities of phytoplankton and other photosynthetic beings represent the basis for the normal and balanced development of the food chain of the marine ecosystem. The Chlorophyll-a is the compound of major presence in photosynthetic organisms, therefore, relate directly with plant biomass, allowing determine the state of deterioration or ecosystem balance. The concentration of Chlorophyll-a is altered by the presence of natural and anthropogenic processes, as the related ones to hydrocarbon processing. The study was realized in the Gulf of Mexico before and after the oil spill of crude oil in 2010, the impacts decided on the phytoplankton that they allowed the formulation of considerations on the general condition of the aquatic ecosystem. The estimation of chlorophyll-a was obtained remotely by images Landsat and SeaWiFS, using Spectral Decomposition Algorithm (SDA) and four bands algorithm (OC4) respectively. The results show a decrease in the chlorophyll-a concentration of 0.4 to 0.34 mg/m³ for the years 2008 and 2010, in the exact area of the event.

Keywords: Chlorophyll-a, Landsat, SeaWiFS, spectral decomposition algorithm OC4.

Introducción

La dinámica natural de los ecosistemas acuáticos, especialmente los marinos, presenta variaciones temporales de cada uno de los componentes indicadores de calidad y estabilidad, uno de estos indicadores de acuerdo con Varela et al. (2006, 273) es la concentración de clorofila-a, la cual puede presentar cambios significativos por la presencia de procesos antropogénicos como la pesca, el turismo, la disposición de residuos, la extracción de minerales e hidrocarburos y los derrames accidentales de hidrocarburos que son, por lo general, de máxima preocupación al poder originar una contaminación del lecho marino.

Los hidrocarburos se consideran persistentes por sus propiedades físicas que no permiten su fácil disipación en la superficie oceánica, generando un impacto sobre la vida marina por efectos tóxicos e impreg-

nación. La situación ambiental desencadena por el derrame de crudo en el medio ambiente oceánico, conduce a la necesidad de monitorear no solo el seguimiento de la posición y variación de la mancha sino la identificación de los posibles puntos de afectación de los componentes indicadores de calidad de los ecosistemas marinos. Mediante percepción remota es posible monitorear el comportamiento de diferentes componentes del ecosistema marino, abarcando un área extensa de estudio y con la frecuencia temporal ajustada a las características del conjunto de imágenes satelitales utilizadas, de acuerdo con Oyama et al. (2009, 73), esta técnica en muchos casos puede ser la única forma viable para controlar eficazmente la calidad del agua.

La concentración de clorofila-a, se estimó de forma remota con las bandas b1, b2 y b3 con longitudes de onda de 450nm-520nm, 520nm-600nm y 630nm-690nm respectivamente de las imágenes *Landsat* a partir del algoritmo de descomposición espectral (SDA), desarrollado por Oyama et al. (2009, 76). Para la estimación de clorofila-a con las imágenes *SeaWiFS* se empleó el algoritmo de cuatro bandas (OC4) desarrollado por la NASA (2010), a partir de las bandas b1-b5, con longitudes de onda 443nm, 490nm, 510nm y 550nm. La concentración de clorofila-a determinada con las imágenes mostró valores promedios de 0,4 mg/m³.

El documento muestra la metodología y los parámetros aproximados a las condiciones reales, para el procesamiento de imágenes *Landsat* y *SeaWiFS*, de esta forma, se tiene el valor anual promedio de clorofila-a en condiciones normales y bajo los efectos de un evento antropogénico de alto grado de contaminación como el derrame de petróleo, para este caso por la explosión de la plataforma *Deepwater Horizon* año 2010. Al no contar con datos de estaciones *in-situ*, los resultados obtenidos se validaron con los productos *Quality Assurance Browse Imagery* (MQABI-MODIS, por sus siglas en inglés) publicados por la NASA (2010).

1. Fundamento Teórico

1.1 Definición

La clorofila, de acuerdo con Allinger, Johnson & Lebel (1984, 34), es el pigmento verde que permite a las plantas (incluidas las algas) convertir la luz solar en compuestos orgánicos durante el proceso de fotosíntesis, permite la transferencia de energía entre las moléculas del compuesto y la oxidación química, su fórmula molecular es $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$. La clorofila-a, es el tipo de clorofila predominante en las algas. Una alta concentración de clorofila-a en el agua (cercana a 1mg/m³) es un in-

dicador de contaminación por nutrientes, porque existe un exceso de nutrientes que impulsa el crecimiento de las algas; por lo que la clorofila-a permite medir la cantidad de algas presentes en una zona específica y así establecer la cantidad del compuesto, que varía entre 0-1mg/m³, determinando si la cadena alimenticia se encuentra en equilibrio. Contar con un nivel adecuado de clorofila-a significa, según Loucks & Van Beek (2005, 381), que existen suficientes especies vegetales acuáticas para alimentar los organismos de la cadena trófica.

Falcowski et al. (1998, 4) señalan cómo la presencia de clorofila está relacionada con el fitoplancton⁴. Las algas determinan la estructura del ecosistema, su existencia es muy importante para el desarrollo del ecosistema y la explotación comercial de los recursos marinos. La diversidad de fitoplancton afecta los procesos de fotosíntesis directa e indirectamente, los efectos directos están relacionados con la propiedad de absorción óptica de las células y la diversidad taxonómica basada en la pigmentación, la composición de la pigmentación varía de acuerdo a la evolución de la especie y genera firmas espectrales detectadas de forma remota. Los cambios físicos y químicos en el océano, diarios, anuales y climatológicos, afectan la vida fotosintética, la concentración de nutrientes y la temperatura.

Los cambios físicos y químicos pueden conducir a la contaminación del agua⁵, pudiendo ser los contaminantes del agua de origen natural y antropogénico. Solís & López (2003, 106) presentan una clasificación de contaminación correspondiente por productos químicos (iones de metales pesados, desechos metalúrgicos, entre otros), productos orgánicos (materia orgánica biodegradable, plástico, hidrocarburos, aceites, detergentes, fenoles, plaguicidas), productos físicos (radiactividad, espuma, turbiedad, cambio térmico) y productos biológicos (baterías y otros microorganismos).

La calidad del agua oceánica monitoreada, especialmente en zonas costeras, con muestras *in-situ* puede ser complementada con teledetección espacial, «*técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales*» (Chuvienco, 1990, 27), lo cual supone, la existencia de interacción atmosférica entre la Tierra y el sensor por reflexión de energía solar y por emisión del cuerpo. Las imágenes empleadas en esta técnica

4 Seres acuáticos fotosintéticos, que se agrupa en especies procariotas 1500 aproximadamente y 28500 especies eucariotas sobre la tierra y 240000 especies de algas.

5 Considerada como la introducción o emisión de organismos patógenos o sustancias tóxicas que la convierten en insumo inapropiado, de esta forma, se considera la contaminación del agua como un cambio indeseable en las características químicas, físicas y/o biológicas del compuesto.

son tomadas con sensores remotos, que en la actualidad, los hay especializados en una o más coberturas, como *SeaWiFS* que evalúa el color del océano.

1.2 Antecedentes

Patch & Carder (2006, 16) estimaron la concentración de clorofila-a, en aguas costeras del oeste de la Florida y en Bahamas, centrándose en zonas con poca profundidad, donde es posible obtener un valor de reflectancia del fondo costero, utilizando imágenes *SeaWiFS* y longitudes de onda específicas para las bandas verde y azul. El estudio estableció la relación entre la reflectancia emitida por el fondo y la concentración de clorofila-a a partir de algoritmos empíricos, utilizando variables como la absorción y retrodispersión del agua (Ecuaciones 1 y 2) excluyendo la clorofila-a y los sedimentos disueltos. Los resultados mostraron el valor del fitoplacton (a_{ph}) con longitud de onda de 440nm y el índice de retrodispersión del modelo (b_{bp}) en la banda de longitud 550nm.

$$a = a_w + a_{ph} + a_{CDMO} \quad [1]$$

$$b_b = b_{bw} + b_{bp} \quad [2]$$

Al establecer las relaciones de las bandas adecuadas (400nm, 490nm y 560nm), con las características de la zona y la clasificación de óptica en aguas profundas y poco profundas, se determinó el valor de la clorofila total (Ecuación 3)

$$Chl = w(Chl_{deep}) + (1 - w)(Chl_{shallow}) \quad [3]$$

El resultado del estudio permitió enfocar la utilización de algoritmos empíricos para el cálculo de clorofila-a en zonas donde se presentan gran población de fitoplancton, así no sea posible identificar la reflectancia del fondo.

McKee, Cunningham & Dudek (2007, 829), determinaron la concentración de clorofila-a y de sedimentos en el mar Celta, con imágenes *SeaWiFS* a partir de dos algoritmos: el primero denominado OC4V4, basado en la hipótesis: *La mayor absorción es generada por el fitoplancton en las bandas verde y azul*, y compuesto por las ecuaciones 4 y 5; el segundo algoritmo fue el K(490), a partir de él, se relacionaron los niveles normalizados de radiancia sobre el agua en las bandas azul-verde y verde (Ecuación 6). Los datos de campo tomados previamente, permitieron validar el comportamiento de la clorofila-a en el agua clara y oscura obtenida con los algoritmos utilizados en las imágenes satelitales.

$$R = \log_{10} \left(\frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} \right) \quad [4]$$

$$Chl = 10^{(0.366 - 3.067R + 1.930R^2 + 0.649R^3 - 1.532R^4)} \quad [5]$$

$$K(490) = 0.016 + 0.15645 \left[\frac{nL_w(490)}{nL_w(555)} \right]^{-1.5401} \quad [6]$$

Dónde: R_{rs} representa la radiancia de las bandas, $\lambda_1= 433\text{nm}$ o 490nm o 510nm , puede ser banda verde o azul – verde, $\lambda_2= 555\text{nm}$, banda verde y nL_w = nivel normalizado de radiancia sobre el agua. Los valores numéricos, representan constantes calculadas de forma empírica, las cuales pueden ser utilizadas de forma global.

La estimación de clorofila-a, desarrollada por Duan et al. (2008, 768), permitió establecer los parámetros para determinar el nivel trófico⁶, de los lagos Chagan, Xinmiao y Kuli, localizados en el noreste de China. El estudio determinó la combinación adecuada de las bandas, roja e infrarroja de imágenes *Landsat TM*, complementando el trabajo de campo. Su desarrollo se realizó en tres partes: - Toma de muestras del agua para la identificación de clorofila-a y el PH, - Medición del campo espectral utilizando el espectroradiómetro, y - Toma de puntos de control GPS para la corrección geométrica de las imágenes. El cálculo del valor de clorofila-a, se determinó a partir de la ecuación lineal (Ecuación 7), como resultado del análisis de la absorción de la clorofila y el pico máximo de reflectancia. Para finalizar los cálculos se determinó el nivel de estado trófico (TSI) con la Ecuación 8. El resultado final, correspondió a mapas temáticos, donde se evidenció el nivel de estado trófico en función de los valores de clorofila-a de cada lago.

$$y = ax + b \quad [7]$$

$$TSI(Chl_a) = 10 \left(2.46 + \frac{\ln(Chl_a)}{\ln(2.5)} \right) \quad [8]$$

Dónde: $y=$ clorofila –a, $x=$ banda (nm), TSI= índice estado trófico

El SDA, desarrollado por Oyama et al. (2009, 80), se basa en la mezcla espectral lineal de agua pura, fitoplancton y sólidos en suspensión, para estimar la concentración de clorofila-a en ambientes con agua tipo II⁷. El estudio efectuado en el lago Kasumikagaura⁸ (Japón), utilizó imáge-

6 Cada eslabón de la cadena de alimenticia de un ecosistema.

7 Agua que contiene no solo fitoplancton, sino también sedimentos en suspensión, material orgánico disuelto y sustancias antropogénicas

8 Un lago eutrófico con altos niveles de concentración de sedimentos en suspensión, que dificultan con métodos convencionales la obtención de la concentración clorofila-a.

nes *Landsat-5 TM* de los años 1994 y 2006, además de 25 muestras *in-situ* para la validación de la reflectancia espectral, la concentración de clorofila-a y los sedimentos orgánicos en suspensión.

El algoritmo de descomposición espectral, requiere comprender la mezcla espectral de reflectancia⁹ (Ecuación 9), como una combinación lineal de tres componentes básicos: agua pura, fitoplancton y sólidos en suspensión libres de clorofila NPSS. A partir de este modelo y con los datos de la Tabla 1, se formó un sistema de ecuaciones 4x3, es decir, ecuación por banda y tres coeficientes; así, se construyó un sistema 3x3, para determinar el valor de cada coeficiente.

$$R_L(\lambda) = C_p \times SRS_p(\lambda) + C_n \times SRS_n(\lambda) + C_w \times SRS_w(\lambda) \quad [9]$$

Donde SRS_p , SRS_n , SRS_w , Reflectancia espectral estándar para fitoplancton, NPSS y agua pura, respectivamente. C_p , C_n , C_w , representan los coeficientes de fitoplancton, NPSS y agua pura, respectivamente.

Tabla 1. Datos de calibración SRS para Landsat-5 TM (Oyama, et al., 2009)

	Long.onda (nm)	Agua pura	NPSS	Fitoplancton	
Bandas	1	450-520	1,597	6,417	1,921
	2	520-600	0,177	11,296	2,657
	3	630-690	0,14	15,161	1,35
	4	760-900	0,001	6,441	0,588

2. Metodología

2.1 Zona de estudio

El Golfo de México se caracteriza por su forma de cuenca semicerrada que evidencia la existencia de un mar al interior del Océano Atlántico, ofrece en una zona relativamente pequeña, gran variedad de ambientes costeros templados, subtropicales y tropicales. En esta cuenca se almacena aproximadamente $2,3 \cdot 10^6$ Km³ de agua y es un espacio donde ocurren procesos físicos, químicos y biológicos que convierten la zona en un almacén de energía del sistema océano-atmosfera. Al Golfo de México desembocan ríos de gran importancia como Mississippi, Tennessee (hace parte la zona de estudio) y Colorado en Estados Unidos, además de Bravo, Pánuco, Papaloapan en el territorio mexicano. La

9 El SDA puede obtenerse en un tanque experimental pero la combinación de modelos bio-ópticos de reflectancia espectral se aplica directamente a las imágenes *Landsat* obteniendo resultados satisfactorios.

zona oriental del golfo (límites mexicanos y estadounidenses), presenta alta dinámica de circulación de agua, como respuesta a la presencia de frentes de corrientes oceánicas durante varios meses del año.

En cuanto a la circulación de aguas superficiales, sufren los efectos de las estaciones de otoño e invierno, de masas de aire polar y huracanes. La temperatura superficial marina varía entre los 28°C en verano, hasta 19°C en invierno. Zárate et al. (2004, 898), afirman que los ecosistemas y recursos del golfo de México, ofrecen servicios estratégicos, propicios para el desarrollo de actividades económicas asociadas entre otras, con la extracción, procesamiento y distribución de hidrocarburos.

La zona de estudio, se localiza en el oeste de la Península de la Florida y al sur de la costa de Luisiana, como se ilustra en la Figura 1, lo que corresponde a un área de gran importancia ecológica, por sus características geomorfológicas, que la convierten en un lugar apropiado para el estudio de la naturaleza y sus interrelaciones. Toledo Ocampo (2006, 32), afirma que aunque el golfo de México presenta zonas oligotróficas, también tiene áreas con niveles elevados de nutrientes y biomasa fitoplanctónica, producto de fenómenos de *surgencia* y el hábitat de ciertos bancos de peces tipo atún aleta azul.

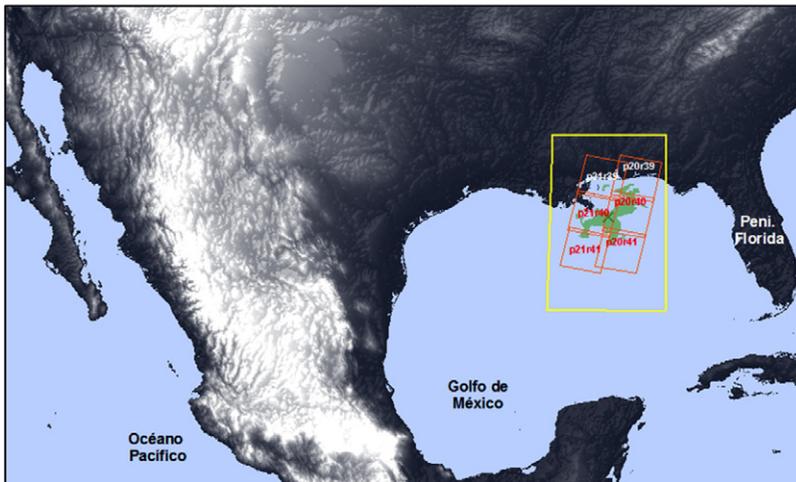


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, Posición de la mancha de crudo 9 de junio de 2010. (IMO, 2010)

En el proceso de la investigación, es necesario e importante determinar el punto explosión de la plataforma, al igual que la posición y forma aproximada de la mancha para el periodo de estudio, para tal fin, se

utilizan los datos de seguimiento, de propiedad del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, generados a partir de imágenes *Landsat*, libres de nube.

2.2 Selección de las imágenes

2.2.1 Imágenes Landsat. Este tipo de imágenes no se consideran especializadas para estudios sobre el océano, sin embargo, Oyama et al. (2009, 80), demuestran que el procesamiento de imágenes *Landsat* permite obtener buenos resultados en zonas con ciertas características ambientales. Para evaluar la utilidad de este tipo de imágenes, en estudios remotos oceánicos, se eligen desde el visor Glovis, imágenes *Landsat* 5 TM de los años 2008, 2009 y 2010, el periodo de evaluación se fija entre los meses de abril y junio de cada año, dada la necesidad de obtener imágenes con la menor cantidad de nubes y así evitar pérdida de información. Al igual que las imágenes SeaWiFS, la zona está delimitada por latitud 32° - 25° y la longitud -91° - -85 . El grupo de imágenes *Landsat* elegido para esta investigación, está conformado por seis por año, para un total de 18 imágenes.

2.2.2 Selección de imágenes SeaWiFS. Se consideran imágenes especializadas para estudios sobre el océano. Las imágenes se seleccionan desde el visor de OceanColor (2010), para lo cual se tiene en cuenta el tipo de imagen MLAC, en formato L1A, con resolución espacial de 1 Km; estas imágenes comprenden la zona Latitud 32° - 25° y la longitud -91° - -85° , de los años 2008 a 2010, en el mes de mayo. Las imágenes *SeaWiFS*, fueron corregidas empleando el modelo de irradiancia solar extraterrestre de acuerdo con Franz et al. (2012, 4).

2.3 Preprocesamiento

Las correcciones iniciales de las imágenes se trabajaron por separado, de acuerdo con el sensor.

2.3.1 Imágenes Landsat. El preprocesamiento del conjunto de imágenes *Landsat*, inicia con el cálculo de la radiancia, a partir de los coeficientes de calibración (Bias y Gain) del sensor (Tabla 2), los cuales forman parte de la Ecuación 10.

Tabla 2: Coeficientes de calibración del Sensor Landsat 5 TM para cálculo de Radiancia

Banda	Longitud onda (nm)	Gain	Bias
1	450-520	0,602431	-1,520000
2	520-600	1,171510	-2,840000
3	630-690	0,805765	-1,170000
4	760-900	0,814549	-1,510000

$$L_{sen} = GAIN * ND + BIAS \quad [10]$$

Donde L_{sen} es la radiancia del sensor, ND son los niveles digitales, $Gain$ y $Bias$ son los coeficientes de calibración del sensor *Landsat TM*.

La corrección atmosférica, de las imágenes *Landsat*, se realiza con la dispersión de Rayleigh (Menghua, 2005, 5652), la cual minimiza los efectos atmosféricos sobre las bandas visibles, como la azul y verde indispensables para el desarrollo de los algoritmos posteriores. El algoritmo Rayleigh, de aplicación en ambientes oceánicos, permite eliminar la absorción de gas, por presencia de ozono, vapor de agua, oxígeno, al igual que la dispersión, absorción de partículas contaminantes y las moléculas que generan proceso en la atmósfera (Ecuaciones 11 y 12). En el proceso de conversión de radiancia a parámetros físicos, se deben corregir las anomalías atmosféricas para garantizar los resultados posteriores.

$$\rho_r = \pi(L_{sat} - L_R) * d^2 / (E_0 \cos \theta_z) \quad [11]$$

$$L_R = E_0 * 1/d^2 * tr/4\pi * \cos \theta_s * e^{-tg/\cos \theta_s} * e^{-tg/\cos \theta_z} * P_2 + 0,052 * P_1 \quad [12]$$

Dónde: ρ_r : Dispersión de Rayleigh, L_{sat} : radiancia del sensor, L_r : Radiancia de Rayleigh, d : distancia Tierra-Sol, E_0 : Irradiancia espectral Extraterrestre, Tr : Taur *Landsat 5 TM*, Tg : Taug *Landsat*, θ_z : ángulo cenital solar, θ_s : ángulo cenital sensor, P_1 : phase -, P_2 : phase +

Los parámetros de la Ecuación 12 son propios de cada imagen, con datos como el día juliano, la distancia Tierra-Sol y el ángulo cenital solar. Esta información se encuentra consignada en sus metadatos. El cálculo de la reflectancia se trabaja con la Ecuación 13.

$$\rho = \pi \rho_r * d^2 / (E_0 \cos \theta_z) \quad [13]$$

Dónde: ρ : Reflectancia en la parte alta de la atmosfera, ρ_r : Radiancia con corrección atmosférica, π : Blanco Lambertiano, d : distancia Tierra-Sol, E_0 : Irradiancia espectral Extraterrestre, θ_z : ángulo cenital solar.

2.3.2 Imágenes seawifs. La primera corrección realizada a las imágenes es la eliminación de ruidos, con el cambio de formato L1 a L2. El proceso de transformación de formato, requiere parámetros de entrada como los archivos correspondientes a ozono, temperatura superficial marina, meteorología, máscaras de tierra, de agua y de hielo, los cuales

se obtienen desde los archivos de calibración del sensor almacenados en el software o el servidor web.

El proceso de transformación de formato L1 a L2, implica la eliminación de píxeles con anomalías como la presencia de nubes, brillo solar en exceso, entre otras. Este proceso implica la utilización de modelos matemáticos, Irradiancia solar Extraterrestre: radiación solar alcanzada por la Tierra, definidos en la Ecuación 14.

$$Es_{nnn} = F0_{nnn} * (t_{sol_{nnn}} * t_{oz_{sol_{nnn}}}) * \mu0 * fsol \quad [14]$$

Dónde: $t_{sol_{nnn}}$ = transmitancia difusa del sol al sensor, $t_{oz_{sol_{nnn}}}$ = Transmisión de energía desde el sol al sensor a través del ozono, $\mu0 = \cos(\text{solz})$, F_{sol} = distancia tierra-sol.

La normalización de niveles de radiancia (nL_w), permite definir la radiancia sobre la superficie del mar, bajo condiciones ideales, Ecuación 15.

$$nL_w = L_w / (t0 * \mu0 * fsol) * foob * brdf \quad [15]$$

Dónde: L_w = radiancia, $t0 =$, $\mu0 = \cos(\text{solz})$, $fsol$ = distancia tierra-sol, $foob$ = corrección de la respuesta de las bandas, $brdf$ = corrección bidireccional de reflectancia, solz = ángulo cenital solar, t_{sol} = transmitancia difusa del sol al sensor, $t_{oz_{sol}}$ = Transmisión de energía desde el sol al sensor a través del ozono.

La reflectancia fue calculada a partir de la Ecuación 16, este es un dato de entrada en la ejecución de algoritmos biofísicos derivados.

$$Rrs = nL_w / F0 \quad [16]$$

Dónde: $f0$: irradiancia solar, nL_w : radiancia normalizada

La corrección atmosférica consiste en la diferencia entre los componentes de dispersión atmosférica y la radiación total de las bandas b1-b5, para obtener la radiación del agua; la corrección de anomalías atmosféricas, requiere, el uso de datos meteorológicos auxiliares como la dirección del viento, la presión en la superficie, el vapor de agua y ozono; el espesor óptico del aerosol en la banda 6 y el ϵ de la corrección atmosférica en la banda b7 y b8 como lo presentan Franz et al. (2012, 5). La finalidad de esta transformación, es la recuperación de las propiedades ópticas oceánicas y la normalización de la radiancia del agua en las bandas b1-b6, con longitudes de onda de 412nm – 660 nm.

2.4 Estimación de la concentración de clorofila-a con imágenes Landsat

El cálculo de clorofila-a en el agua con imágenes *Landsat*, requiere la descomposición de coeficientes por pixel, dado que cada uno está conformado por fitoplancton, sólidos en suspensión y agua pura como lo muestra Oyama et al. (2009, 83). La clorofila absorbe longitudes de onda de 450nm-520nm, 520nm-600nm y 630nm-690nm, correspondiente a las bandas b1, b2 y b3, de acuerdo con Cotos, Tarela & Tobaoda (2002, 45). A partir de la Ecuación 9, es posible determinar el valor de cada coeficiente al construir el sistema de ecuaciones para generar un sistema 3X3.

El sistema, se resuelve mediante el método de Gauss Jordan, para lo cual, se elabora una matriz (Ecuación 17) y se obtiene la ecuación correspondiente al coeficiente de fitoplancton en el agua (Ecuación 18).

$$\begin{aligned} R_L(B1) &= 1,921C_p + 6,417C_n + 1,597C_w \\ R_L(B2) &= 2,657C_p + 11,296C_n + 0,177C_w \\ R_L(B3) &= 1,35C_p + 15,161C_n + 0,14C_w \end{aligned} \quad [17]$$

$$C_p = -0,0693 * R_L(B1) + 0,6623 * R_L(B2) - 0,4641 * R_L(B3) \quad [18]$$

Dónde: C_p = Coeficiente de fitoplancton, $R_L(B)$ = Reflectancia de las bandas indicadas

Una vez calculado el Coeficiente de fitoplancton para cada pixel, se espera que se comporte de forma lineal si se relaciona con la clorofila-a *in-situ*. La zona de estudio no cuenta con datos de campo, por esta razón se utilizaron los productos MODIS (NASA, 2010), teniendo en cuenta que correspondan con los requerimientos temporales y espaciales del estudio.

Para calibrar el modelo de clorofila-a; se cuenta con 40 puntos de muestra, localizados de forma aleatoria, con el único requisito que estos no coincidan con nubes ni tierra, para ninguno de los tres años de estudio.

A partir de los datos del año 2008 se genera la ecuación de la línea que se asemeja a la distribución de puntos, procedimiento que se realiza a partir de la regresión lineal (Ecuación 19); que permite el cálculo de clorofila-a.

$$Chl_a = 11358,696 \times C_p + 0,179 \quad [19]$$

Donde Chl_a es la concentración de clorofila a y C_p el coeficiente de fitoplancton

2.5 Estimación de la concentración de clorofila-a con imágenes SeaWiFS

El producto de clorofila-a es generado a partir del algoritmo OC4, que utiliza las bandas 443nm, 490nm, 510nm y 550nm. Cualquiera de las siguientes expresiones se consideran válidas: R_{rs443}/R_{rs555} , R_{rs490}/R_{rs555} o R_{rs510}/R_{rs555} (NASA, 2010). La concentración de clorofila-a, está determinada por las Ecuaciones 20 y 21. El producto de clorofila-a, es comparado con los resultados obtenidos con las imágenes *Landsat*.

$$R = \log_{10} \left(\frac{R_{rs443} > R_{rs490} > R_{rs510}}{R_{rs555}} \right) \quad [20]$$

$$Chl = 10^{(0.366 - 3.067R + 1.930R^2 + 0.649R^3 - 1.532R^4)} \quad [21]$$

Dónde: R_{rs} : radiancia de la banda indicada, Chl: concentración de clorofila-a

2.6 Validación

De cada imagen *Landsat* y *SeaWiFS* procesada, se toma una muestra de 65 puntos distribuidos de forma aleatoria, la ubicación de cada punto tiene como requisito estar localizado sobre el agua. El conjunto de datos, se analiza a partir de cálculos estadísticos, mostrando un comportamiento lineal para los años 2008 y 2009, con una correlación de 0,510 y 0,90, para el año 2010 los resultados no muestran correlación. Esta situación es similar al análisis de coeficiente de fitoplancton (Cp) con respecto a la concentración de clorofila-a, obtenida del producto MODIS.

3. Resultados

3.1 Descripción de resultados

La concentración de clorofila-a calculada con las imágenes *SeaWiFS*, presenta un comportamiento similar para los años 2008 y 2009, en los cuales se presentan condiciones ambientales normales, con valores del compuesto entre 0,2 y 0,5 mg/m³, sin embargo en zonas aledañas a la costa se presentan valores que oscilan entre 0,6-0,9 mg/m³. Semanas después de ocurrido el derrame, la concentración de clorofila-a se encuentra en su mayoría en un intervalo de 0,2 a 0,5 mg/m³ y las zonas aledañas a la costa, presentan disminución de la concentración con respecto a los dos años anteriores.

Los resultados obtenidos con las imágenes *Landsat* para los años 2008 y 2009 muestran una concentración de clorofila-a entre 0,2 y

1 mg/m³, con una media de 0,40 mg/m³ y 0,42 mg/m³. Para el año 2010 se presenta una concentración del compuesto en intervalos de 0,6-0,8 mg/m³. El área central de la zona de estudio, no tiene datos asociados al coeficiente de fitoplancton, zona en la cual, la presencia de los componentes del crudo alteran las condiciones naturales y las imágenes *Landsat* no permiten identificar el valor correcto de clorofila-a, presentandose valores fuera del rango que corresponde a un incremento no coherente con los valores presentados en la zona de estudio, este valor se define nulo para evitar inconsistencias.

De igual manera los resultados muestran en la zona costera y próxima a ella, valores de clorofila-a entre 0,2 y 0,4 mg/m³, con disminución de 0,123 mg/m³ y 0,056 mg/m³ para el año 2010. De acuerdo con el estudio realizado por Toledo Ocampo (2006, 32), el Golfo de México presenta zonas oligotróficas, es decir, zonas pobres en nutrientes, presentando niveles de concentración de clorofila-a cercano a 0,4 mg/m³.

3.2 Discusión de resultados

Los resultados de las imágenes *Landsat* permiten inferir que el SDA implementado, se desempeña adecuadamente bajo condiciones ambientales normales. Lo que no ocurre ante la existencia de un proceso antropogénico como el derrame de crudo ocurrido en el año 2010, para esta fecha la clorofila-a determinada por las imágenes *Landsat* no presenta correlación con los resultados del procesamiento de las imágenes *SeaWiFS* a partir del algoritmo OC4, ni con el producto MQABI-MODIS. Oyama et al. (2009, 82), utilizan el SDA en su estudio con resultados satisfactorios al correlacionarlos con muestras *in-situ*, en su periodo de análisis no se presentan eventos como un derrame de crudo.

El algoritmo requiere contar con datos de campo, que aporten para los procesos de calibración y validación, sin embargo al no contar con ellos, se utilizan productos MODIS, de esta forma, solo se cuenta con un promedio por pixel que abarca un área aproximada de 100 Has, en las cuales no se diferencian entre la profundidad de la muestra. Esta condición limita la precisión de los resultados obtenidos con respecto a otros estudios como el presentado por Oyama et al. (2009, 83), o el publicado por Duan et al. (2008, 767), quienes contaban con datos *in-situ*, permitiendo de esta manera identificar la mejor correlación lineal y a su vez la mejor ecuación para el cálculo de clorofila-a con imágenes *Landsat*. Las muestras ideales, requieren ser distribuidas a lo largo de la zona de estudio y contar con diferentes temporalidades y profundidades para garantizar no solo la estimación de clorofila superficial como se presenta en el estudio realizado por Varela et al. (2006, 281). Se cree,

que las muestras deben corresponder con la misma fecha de toma de la imagen para obtener los mejores resultados, sin embargo, Oyama, et al. (2009, 84) demuestran que no se requieren datos tomados de forma simultánea con la imagen y de esta forma, el resultado sigue siendo el esperado.

Es posible utilizar un modelo idéntico de estimación remota, en diferentes ambientes para distintos periodos de tiempo y así monitorear los parámetros de calidad del agua, incluso si no se cuentan con datos de campo tomados en forma simultánea con la fecha de captura de las imágenes, para procesos de calibración y validación. En terminos generales, la concentración de clorofila-a determinada con imágenes Landsat y SeaWiFS presenta buenos resultados. Sin embargo existen factores que pueden alterar de forma parcial los resultados en el área de estudio especialmente en las imágenes Landsat cuando las condiciones no son normales como la presencia de un evento de derrame de petróleo. Los valores obtenidos de forma remota, monitorean la concentración de clorofila-a superficial, es necesario, contar con datos de campo, que permitan realizar el análisis de clorofila-a en la columna de agua, para garantizar datos acordes a las condiciones de la zona en diferentes profundidades del océano.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos, muestran que el algoritmo de descomposición espectral, SDA, empleado en las imágenes *Landsat* permite monitorear adecuadamente el comportamiento de la clorofila-a superficial en condiciones normales, al igual que el algoritmo OC4 empleado para determinar la clorofila-a superficial en las imágenes *SeaWiFS*, aunque este algoritmo OC4 no muestra resultados en la zona exacta donde ocurrió el evento de estudio, si permite monitorear el comportamiento de la clorofila-a superficial en zonas cercanas un evento como un derrame de crudo. El estudio muestra resultados para la determinación de clorofila-a superficial, sin embargo para determinar el valor del compuesto en una columna de agua, es necesario contar con datos de estaciones *in-situ*.

5. Agradecimientos

Agradecimientos Francisco Luis Hernández Torres, profesor de la Universidad del Valle y Director de grupo de investigación en percepción remota GIPER, por su colaboración y aportes.

Referencias Bibliográficas

- ALLINGER, N.; JOHNSON, C.R. & LEBEL, N.A. (1984). Química orgánica. Barcelona (España): Reverte. 2 ed. 338 p. ISBN: 84-291-7015-4.
- CHUVIECO SALINERO, E. (1990). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid (España): RIALP. 453 p. ISBN: 843212680-2
- COTOS, Y.; TARELA, Á. & TOBOADA, J. (2002). Sistemas de teledetección espacial en Oceanografía. En: MIGUÉLEZ POSE, F. (2002). Teledetección de Pesquerías y predicción de Mareas Tóxicas. A Coruña (España): Netbiblio. 191 p. ISBN: 849745029-0
- DUAN, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, B.; SONG, K.; WANG, Z.; LIU, D. & LI, F. (2008). Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in Northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No. 3. Nottingham (UK): Remote Sensing and Photogrammetry Society. p. 767-786. ISSN: 0143-1161.
- FALCOWSKI, P.G.; BEHRENFELD, M.J.; ESAIAS, W.E.; BALCH, W.; CAMPBELL, J.W.; IVERSON, R.L.; KIEFER, D.A.; MOREL, A. & YODER, J.A. (1998). Satellite primary production data and algorithm development: a science plan for mission to planet Earth [online]. In: HOOKER, S.B. & FIRESTONES, E.R. (eds.) (1998). SeaWiFS Technical Report Series, Vol. 42, NASA/TM-1998-104566. Hannover (MD, USA): NASA Center for AeroSpace Information. 36 p. ISSN: 1522-8789. <ftp://ftp.nist.gov/pub/physics/lunarproject/References/SeaWiFS/PreLaunchTM-Series/PreLVol42.pdf> [consult: 14/11/2014]
- FRANZ, B.A.; BAILEY, S.W.; MEISTER, G. & WERDELL, P.J. (2012). Quality and Consistency of the NASA Ocean Color Data Record [online]. In: 21st Ocean Optics Conference 2012 (08-12/10/2012), Glasgow (Scotland): NASA. Proceedings of the Ocean Optics 2012, p. 1-21. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/staff/franz/papers/franz_et_al_2012_oo.pdf> [consult: 14/11/2014]
- LOUCKS, D.P. & VAN BEEK, E. (2005). 12. Water Quality Modelling and Prediction [online]. In: _____ (2005). Water Resources Systems Planning and Management. Paris (France): Unesco. p. 377-425. ISBN: 92-3-103998-9. <https://ecommons.library.cornell.edu/bitstream/1813/2804/9/12_chapter12.pdf> [consult: 04/03/2011]
- MCKEE, D.J.C.; CUNNINGHAM, A. & DUDEK, A.V. (2007). Optical water type discrimination and tuning remote sensing band-ratio algorithms: Application to retrieval of chlorophyll and Kd(490) in the Irish and Celtic Seas. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 73, No. 3-4. London (UK): Academic Press in association with the Estuarine and Brackish-water Sciences Association. p. 827-834. e-ISSN: 1096-0015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.028>, <http://strathprints.strath.ac.uk/5101/> [consult: 14/11/2014]
- MENGHUA W. (2005). A refinement for the Rayleigh radiance computation with variation of the atmospheric pressure [online]. In: International Journal of Remote Sensing. International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 24. Nottingham (UK): Remote Sensing and Photogrammetry Society. p. 5651-5663. ISSN: 0143-1161.
- NASA (2010). SeaWiFS Project [online] Seattle (WA, USA): NASA. <http://http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/> [consult: 02/01/2011]
- OCEANCOLOR (2010). Ocean Color Chlorophyll (OC) v6 [online]. Seattle (WA, USA): NASA. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/REPROCESSING/R2009/ocv6/> [consult: 28/03/2011]
- ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, IMO (2010). Evaluación del nivel de preparación para responder a un derrame de hidrocarburos debido al incidente de la plataforma costa afuera "DEEPWATER HORIZON" [en línea]: La Habana (Cuba): Contaminación Marina, Prevención y Preparación, S.A. <http://cep.unep.org/racrempeitc/activities/activities-2010_2011/deepwater-horizon-accident/Cuba%20Assessment%20Report%20100610%20by%20Klaus%20Essig.pdf> [consulta: 30/05/2011]
- OYAMA, Y.; MATSUSHITA, B.; FUKUSHIMA, T.; MATSUSHIGE, K. & IMAI, A. (2009). Application of spectral decomposition algorithm for mapping water quality in a turbid lake (Lake Kasumigaura, Japan) from Landsat TM data [online]. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64, No. 1 (Jan). Cambridge (MA, USA): Elsevier Inc. p 73-85. ISSN: 0924-2716 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271608000592> <doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.04.005> [consult: 14/11/2014]

- PATCH CANNIZZARO, J. & CARDER, K.L. (2006). Estimating chlorophyll a concentrations from remote-sensing reflectance in optically shallow waters [online]. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 101, No. 1 (mar). Cambridge (MA, USA): Elsevier Inc. p. 13-24. ISSN: 0034-4257 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425705004025>> [consulta: 14/11/2014]
- SOLÍS SEGURA, L.M. & LÓPEZ ARRIAGA, J.A. (2003). Principios básicos de contaminación ambiental. Ciudad de México (México): UAEM. 410 p. ISBN: 968-835-813-4.
- TOLEDO OCAMPO, A. (2006). Marco Conceptual: Caracterización ambiental del Golfo de México. En: BOTELLO, V.; RENDÓN VON OSTEN, J. GOLD BOUCHOT, G & AGRAZ HERNÁNDEZ, C. (eds.) (2006). Golfo de México: Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. 2 ed. México (México): Universidad Autónoma de Campeche – Universidad Nacional Autónoma de México – Instituto Nacional de Ecología. p. 25–52. ISBN: 968-572-237-4.
- VARELA, M.; BODE, A.; LORENZO, J.; ÁLVAREZ-OSSORIO M.T.; MIRANDA, A.; PATROCINIO, T.; ANADÓN, R.; VIESCA, L.; RODRÍGUEZ, N.; VALDÉS, L.; CABAL, J.; URRUTIA, A.; GARCÍA-SOTO, C.; RODRÍGUEZ, M.; ÁLVAREZ-SALGADO, X.A. & GROOM, S. (2006). The effect of the “Prestige” oil spill on the plankton of the N-NW Spanish coast [online]. In: Marine Pollution Bulletin, Vol. 53, No. 5-7 (nov). Cambridge (MA, USA): Elsevier Inc. p. 272-86. ISSN: 0025-326X <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X05004583>> [consult: 14/11/2014]
- ZÁRATE LOMELÍ, D.; YÁÑEZ-ARANCIBIA, A.; DAY, J.W.; ORTIZ PÉREZ, M.; LARA DOMINGUEZ, A.; OJEDA DE LA FUENTE, C.; MORALES ARJONA, L. & GUEVARA SADA, S. (2004). Lineamientos para el programa regional de manejo integrado de la zona costera del Golfo de México y Caribe [en línea]. En: CASO, M.; PISANTY, I & EZCURRA, E. (comp.) (2004). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. México (México): Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Instituto Nacional de Ecología – Instituto de Ecología, A.C. – Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. p 899-936. <http://www.icmyl.unam.mx/pdf/GRAMED/Assessments_Delivery-Item-1/New%20Assessments/Assessment_References/Other%20referencias/M%E9xico_pdf/INE-Diagn%F3stico%20ambiental%20del%20Golfo%20de%20M%E9xico%20V2.pdf> [consulta: 14/11/2014]