

Estimación de clorofila *a* en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8

REVISTA **MAPPING**

Vol. 27, 188, 4-14

marzo-abril 2018

ISSN: 1131-9100

Chlorophyll a estimation in Maracaibo's Lake, Venezuela using LANDSAT 8 images

Gustavo Morillo Díaz, Gerardo José Aldana Villasmil, Ángel Pineda, Giovanni Antonio Royero Orozco

Resumen

Los problemas de contaminación han generado manifestaciones graves de eutrofización en el Lago de Maracaibo, Venezuela; siendo necesario establecer patrones de detección de distribución espacial y temporal de producción primaria; para lo cual una alternativa es la observación y análisis de imágenes satelitales disponibles para el Lago de Maracaibo. La metodología del presente estudio consistió en seleccionar imágenes de las plataformas TERRA, AQUA y LANDSAT 8 durante el periodo 2011-2016, donde se calcularon los índices de vegetación NDVI y NRVI; Simultáneamente en el lago se determinó experimentalmente contenidos de clorofila *a*. Con estos valores se establecieron correlaciones entre los índices de vegetación con la concentración de clorofila *a* en tres zonas de muestreo en las costas este y oeste. Con los datos generados se desarrollaron ecuaciones que calculan a partir de datos satelitales la productividad primaria en la zona norte del lago. Los resultados obtenidos mostraron que es posible detectar productividad primaria en el Lago de Maracaibo a partir de imágenes LANDSAT 8, generando ecuaciones de predicción de concentración de clorofila *a* de tipo lineal: $Clor(a) = 13,053(NDVI) + 12,756$, con un r^2 igual a 0,94 y $Clor(a) = -16,051(NRVI) + 12,503$, con un r^2 igual 0,90 respectivamente.

Abstract

Pollution problems have generated manifestations of eutrophication in Maracaibo's Lake, Venezuela; it is necessary to establish patterns of detection of the spatial and temporal distribution of primary production; for which an alternative is the observation and analysis of satellite images available for the lake. The methodology of the study consisted in selecting the images of the platforms TERRA, AQUA and LANDSAT 8 during the period 2011-2016, where the vegetation indexes NDVI and NRVI were calculated; Simultaneously in the lake, chlorophyll *a* contents were determined experimentally. With these values correlations were established between the vegetation indexes with the chlorophyll concentration in three sampling zones on the east and west coast. The generated data, were used to calculate the primary productivity in the northern zone of the lake. The LANDSAT 8, generating equations for the prediction of linear chlorophyll *a* concentration: $Clor(a) = 13,053(NDVI) + 12,756$, with r^2 equal to 0.94 and $Clor(a) = -16,051(NRVI) + 12,503$, equal to 0.90, respectively.

Palabras clave: Lago de Maracaibo, LANDSAT 8, índices de vegetación, productividad primaria.

Keywords: Maracaibo's Lake, Landsat 8, Vegetation indexes, Primary production.

Centro de Investigación del Agua, Universidad del Zulia
gmorillo@fing.luz.edu.ve, gerardoaldana_21@hotmail.com,
doubtangel@gmail.com
Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, Universidad del Zulia
groyero@fing.luz.edu.ve

Recepción 10/01/2017
Aprobación 19/02/2018

1. INTRODUCCIÓN

El Lago de Maracaibo se encuentra al noroeste de Venezuela; entre los meridianos 70°30' y 73°24' de longitud oeste y los paralelos 8°22' y 11°51' de latitud norte, cuenta con una superficie aproximada de 12000 km², con una profundidad promedio de 25 m, y una máxima de 32 m en su zona central (Ávila, Gutiérrez, Ledo, Araujo y Sanguiz, 2010), su régimen caudal está conformado por 135 ríos que drenan hacia su interior. El Lago tiene un volumen acumulado de 224 000 m³ de agua, formada por una mezcla aproximada de 97% de agua dulce y un 3% de agua de mar (Hernán, 1997).

La cuenca del Lago de Maracaibo, representa una región de alto crecimiento poblacional, y por ende de crecimiento económico, no solo para Venezuela; la región Norte de Santander de la República de Colombia también forma parte de esta unidad geohistórica, que durante los siglos XVIII hasta principios del siglo XX utilizaban la red hídrica para el comercio y transporte de preciados productos agrícolas como el café y cacao, rubros de suma importancia para la economía de la región. Durante el siglo XX se establece precisamente en la región del Lago de Maracaibo las principales explotaciones de la industria petrolera, que serán la base de la economía del país hasta los tiempos actuales.

Siendo la cuenca del Lago de Maracaibo el foco de la principal industria del país, se generó en la región un crecimiento descontrolado de la población, con el consiguiente aumento en las actividades urbanas, industriales y de servicios en la zona; generando un aumento de las descargas de aguas residuales urbanas e industriales al Lago de Maracaibo. A partir de 1956 se produjo un aumento en la concentración salina (Rodríguez, 2001), originado en gran parte por la construcción y continuo dragado del canal de navegación. Estos factores en combinación han, generando la eutrofización del Lago; que consiste en la acumulación de nutrientes y de biomasa en su cuerpo de agua (Hernán, 1997).

En los años setenta del siglo XX era común observar a orillas del Lago mantos de color verde que correspondían a intensos afloramientos microalgales, reflejo del proceso de eutrofización (Parra, 1979). En el 2004, se presentó un desarrollo masivo de poblaciones de plantas acuáticas de la especie de *Lemna sp* que cubrió extensiones considerables del espejo de agua del Lago de Maracaibo, al extremo que podía visualizarse fácilmente mediante las imágenes de satélite. La especie fue identificada como *Lemna obscura* (López y Rodríguez, 2007).

Este problema de eutrofización, aunado a otros; son de vital relevancia para el desarrollo de las diferentes actividades socioculturales en la región, por lo que se hace necesario, aparte de establecer medidas de control y remediación de esta problemática, formas de detección temprana de las

manifestaciones del proceso de aumento de la productividad primaria, siendo la teledetección una alternativa rápida y eficaz para el monitoreo de estos procesos.

El empleo de diversas plataformas satelitales con capacidad de captar diferentes bandas de longitudes de onda de la energía reflejada en la superficie terrestre, permite el cálculo de cocientes entre estas bandas, aportando un valor numérico, que es característico para cada superficie; en el caso de la vegetación, estos cálculos se conocen como índices de vegetación; y permiten discriminar coberturas de vegetación. Los índices de vegetación muestran un claro comportamiento entre las bandas roja [R] (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano [IRC] (0.7 a 1.1 μm). Produciéndose un notable contraste espectral entre la banda R del espectro y la del IRC, lo que permite separar la vegetación sana de otras cubiertas (Kyung-Ae, Hwa-Jeong, y Ji-Eun, 2013).

Los índices de vegetación han tenido un tremendo impacto en el monitoreo, control y mejoramiento de áreas vegetales, que van desde bosques, reservas forestales, hasta cultivos de interés agrícola; la mayoría de los índices de vegetación han sido desarrollado en función a especies vegetales cultivadas; por tanto, en hábitats terrestres. En sistemas acuáticos, como es el caso del Lago de Maracaibo no existe una utilización amplia de estos índices de vegetación, haciéndose necesario investigar la aplicabilidad y la escogencia de la plataforma adecuada en función a las bandas espectrales de interés; del mejor índice, o los mejores índices que puedan dar una información relevante del estado trófico de capas de vegetación en cuerpos de agua como el Lago de Maracaibo, con lo que se desarrollaría un método de monitoreo de la contaminación para el Lago, de manera prácticamente en tiempo real, eficiente y de relativo bajo costo (Minoru, Shinod, y Maeda, 2013)

Se buscó con la utilización de imágenes de los sensores MODIS y OLI, detectar niveles de productividad primaria en el Lago de Maracaibo, mediante el cálculo de índices de vegetación obtenidos. En base a los resultados de estos índices y a datos de campo tomados en el Lago de Maracaibo se establecieron correlaciones entre estos datos que permitieron generar ecuaciones que a partir de imágenes satelitales indiquen el grado de desarrollo de la concentración de productores primarios en el referido cuerpo de agua.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Área de Estudio

Se realizó en zonas ubicadas en el Sistema del Lago de Maracaibo durante la estación seca y húmeda; en tres sitios de muestreo: 1) en la costa oriental del Lago, zona de Lagunillas; 2) en el estrecho del Lago, específicamente en las inmediaciones de la población de Santa Rita, y 3) en

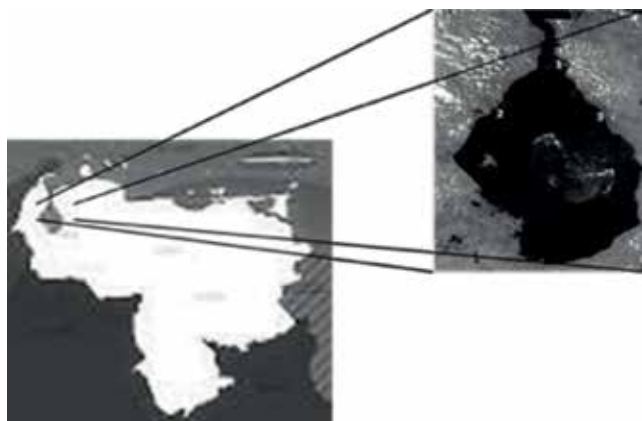


Figura 1. Lago de Maracaibo, con los puntos de muestreo: 1. Santa Rita. 2. Barranquitas y 3. Lagunillas

la costa occidental en la zona de Barranquitas (figura 1).

Los criterios utilizados para la selección de estos sitios fueron, presencia de productividad primaria, evaluar el crecimiento en las zonas occidental y costa oriental del Lago de Maracaibo donde se ha comprobado existe acumulación de masas de productividad primaria en las épocas de crecimiento, comparación de las zonas intervenidas o no y la posibilidad de acceso al sitio vía terrestre y marítima. En este caso se escogieron los sitios en base al conocimiento previo que se tenía de las zonas. Las estaciones de muestreo fueron ubicadas principalmente cercanas a estas zonas de producción. En cada estación, se georreferenció la zona con ayuda de un GPS, se tomaron muestras de agua de 1 L por triplicado y se transportaron al Centro de Investigación del Agua (CIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Para un total de 9 muestras de 1 L cada una por muestreo durante 18 meses para periodos seco y húmedo. En el CIA se procedió a realizar las mediciones de clorofila *a*.

2.2. Procesamiento de imágenes

Se revisaron las imágenes referentes al Lago de Maracaibo para las plataformas, AQUA, TERRA, y LANDSAT 8, se seleccionaron durante el período 2011 al 2016 aquellas imágenes donde se detectó productividad primaria y se solicitaron vía Web para su almacenamiento y posterior tratamiento. Las imágenes LANDSAT 8 y AQUA-TERRA se escogieron en base a las ventajas comparativas de estos satélites, al abarcar la zona en estudio en una o dos imágenes, resolución temporal y fácil acceso a las mismas; además de ser imágenes ampliamente utilizadas en el cálculo de índices de vegetación con buenos resultados (Powel, Jakeman y Crokee, 2014).

2.2.1. LANDSAT 8

En el portal del servicio geológico de los Estados

Unidos (USGS, 2013) se hizo una revisión de las diferentes imágenes y se solicitaron aquellas de interés; estas imágenes fueron luego descargadas al computador como un archivo comprimido de extensión .RAR. Este archivo se descomprimió y se desplegaron 16 archivos, correspondientes a las 16 bandas que componen una imagen LANDSAT 8. Por lo cual se procedió a trabajar con las primeras ocho bandas, que son las utilizadas en esta investigación.

El primer paso al abrir los archivos fue realizar la edición de metadatos de las bandas a partir de una imagen inicial que presentó la mejor visualización de la zona de estudio, posteriormente, con la ayuda del programa ENVI® se realizaron los preprocesamientos correspondientes a fusión de bandas, georreferenciación y mosaico de imágenes, para así obtener una imagen completa correspondiente al espejo de agua del Lago de Maracaibo.

Simultáneamente se generó un vector del área del Lago utilizando el programa *Global Mapper*, para ello se tomó un vector del Lago de Maracaibo realizado por López y Rodríguez (2007) y se sobrepuso sobre una imagen LANDSAT 8 actual, allí se fueron editando los bordes del vector en función a los cambios en la línea de costa que ocurrieron en los últimos años; este vector se guardó con extensión .evf para poder ser leído en el programa ENVI.

Con el vector generado, se procedió en cada imagen a demarcar un área de interés que correspondiera a la zona del Lago evaluada, para ello se superpuso el vector sobre cada imagen y se eliminó la parte de la imagen fuera del vector, quedando en cada caso únicamente el área del Lago, este procedimiento fue necesario para disminuir el tamaño de la imagen y no generar ocupación de memoria excesiva en el computador, además de que al dejar solo el área del Lago, existe menos probabilidad de error de tomar píxeles de la imagen que correspondan a tierra firme.

Con la utilización del programa de procesamiento de imágenes ENVI®, se procedió a realizar cálculos de prueba con diferentes índices de vegetación; de estos índices se seleccionaron según los resultados obtenidos los siguientes:

Cociente simple (Ci): Relación entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo.

$$C_i = \frac{IRC}{R}$$

Dónde: IRC, Reflectancia del infrarrojo cercano.
R, Reflectancia del rojo

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

$$RVI = \frac{R}{IRC}$$

Índice de vegetación de cociente (RVI).

$$RVI = \frac{R}{IRC}$$

Dónde: IRC, Reflectancia del infrarrojo cercano.
R, Reflectancia del rojo

Índice de vegetación cociente normalizado (NRVI).

$$NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$$

Dónde: IRC, Reflectancia del infrarrojo cercano.
R, Reflectancia del rojo

2.2.2. Procesamiento de las imágenes MODIS

Igualmente realizando una revisión en el portal de la NASA para imágenes MODIS se seleccionaron aquellas donde se observó la totalidad del espejo de agua del Lago de Maracaibo (NASA, 2017). Ya adquiridas las imágenes, se realizaron los diferentes procesamientos, como la georreferenciación, generación del ROI (*Region of Interest*), y cálculo de los diferentes índices; el procedimiento es similar al realizado para LANDSAT 8, cuidando en este caso que para MODIS la banda roja es la número 1 y la infrarroja la número 2.

Determinados los diferentes índices, se procedió a establecer correlaciones estadísticas entre los índices y las concentraciones de clorofila *a* determinadas en campo, y así seleccionar el o los índices que mejor representen el nivel de clorofila encontrado en el Lago.

Para la realización de las clasificaciones, como no existe un parámetro definido de clasificación de productividad primaria en el Lago de Maracaibo en función de índices de vegetación, se tomó como referencia las investigaciones de Meera et al. (2015) y en base a ello se establecieron 4 rangos de valores de NDVI; los cuales son: de -1 a 0 material en suspensión inerte; de 0 a 0,1 primeros indicios de productividad; de 0,1 a 0,4 productores primarios estándar como fitoplancton; y de 0,4 a 1: concentraciones altas de productores primarias, posiblemente *Lemna*.

Finalmente, se realizaron clasificaciones, que permitió la elaboración de mapas de las áreas de cobertura de la productividad primaria en el Lago de Maracaibo en función al índice de vegetación.

3. RESULTADOS

3.1. Clorofila *a*

La figura 2 muestra la influencia de la zona de muestreo en la producción de clorofila *a*; se observa que en Lagunillas y Santa Rita la mayor concentración de este pigmento, lo que está relacionado con un mayor nivel de nutrientes en estos puntos, comparados con Barranquitas (Tablas 3 y 4). La producción de clorofila *a* fue superior para los periodos T1, T3 y T4, siendo menor la actividad de crecimiento durante T2, equivalente a la época de sequía; así estos niveles de nutrientes fueron suficientes para la actividad celular y por ende producción de clorofila *a* (Parra, 1979). Según Lau et al. (1995) y Chacón et al. (2006) el contenido de pigmentos se encuentra directamente relacionado con la densidad celular, ya que los pigmentos son un indicador directo de la productividad primaria.

Los valores de pigmento están en correspondencia con los reportados por Parra (1979) y Gardner et al. (1998).

Las altas concentraciones de clorofila *a* reportadas en las inmediaciones de la costa oriental del Lago por Parra (1979), están en coincidencia a la tendencia reportada en esta investigación; aunque en la actualidad se reportan mayores valores de concentración de clorofila *a*. Este fenómeno de altas concentraciones de este pigmento, como reporta Parra-Pardi, está íntimamente ligado al alto grado de desarrollo urbano e industrial de la zona, cuyas aguas residuales aportan una gran cantidad de nutrientes relacionadas al proceso de eutrofización. Igualmente el alto nivel de nutrientes que aporta el río Motatán, por efectos de corrientes van a incidir directamente en esta zona de la costa oriental, aumentando así las concentraciones del pigmento.

3.2. Determinación de diferentes índices de vegetación para las imágenes satelitales seleccionadas

Realizado el procedimiento para el cálculo de los diferentes índices de vegetación en el programa ENVI, se obtuvieron los siguientes resultados:

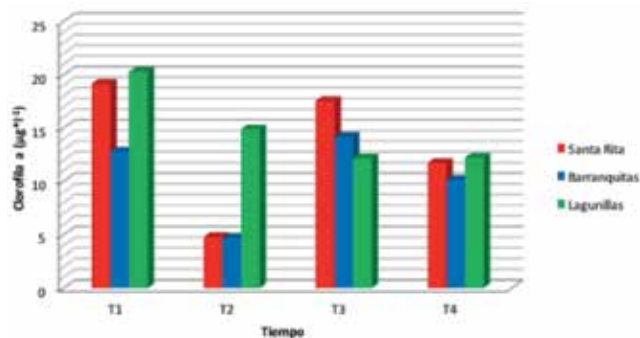


Figura. 2. Clorofila *a* en los diferentes sitios de muestreo

3.2.1. Imágenes LANDSAT 8 e imágenes AQUA/TERRA

Se evaluaron variadas imágenes, para el caso de LANDSAT 8 entre los años 2013 a 2016, escogiendo en principio 41 imágenes, de las cuales finalmente se seleccionaron 21 imágenes para el análisis, esto en función de las correcciones atmosféricas y buscando aquellas imágenes con la menor proporción de nubes, que pudiesen interferir en datos erróneos de los índices de vegetación (Powel, Jake-man y Crokee, 2014) (Christopher, Holden y Woodcock, 2016); en el caso de AQUA/TERRA se evaluaron 56 imágenes entre los años 2011 a 2013, para un final de 28 imágenes; debido a la imposibilidad de muestrear simultáneamente en el Lago en el día de paso del satélite, se escogió esta metodología; igualmente investigadores como Zhu y Liu (2014); quienes trabajaron en la determinación del nivel de biomasa en una región forestal, utilizando una serie de imágenes LANDSAT TM, al sureste de Ohio, Estados Unidos; encontraron en su investigación que los valores del NDVI calculados a partir de serie de imágenes son más precisos y evitan los efectos temporales o estacionales, que cuando se evalúa el NDVI a partir de una sola imagen. Por su parte Borro et al. (2014) también reportaron la conveniencia del uso de estudios multitemporales para la evaluación de cuerpos de agua como lagos y lagunas, ya que a mayor cantidad de imágenes evaluadas, el error de una mala interpretación se minimiza.

3.2.1.1. LANDSAT 8

Relación simple

El cálculo de la relación simple en LANDSAT 8, ofreció como resultado imágenes donde se observa bien y de manera contrastada la productividad primaria, en la imagen

aparece de color blanco (figura 3); sin embargo al obtener los datos numéricos de esta imagen, los valores presentan un rango muy amplio, lo que impide realizar una buena clasificación de las zonas reales donde se observa productividad primaria.

Índice de vegetación de diferencia Normalizada (NDVI)

Para el caso del NDVI en imágenes LANDSAT 8, también se obtuvieron imágenes con una buena resolución, donde se observa claramente las zonas de productividad primaria que puedan existir en el Lago de Maracaibo (figura 4).

La ventaja comparativa entre los resultados de un procesamiento de NDVI versus un procesamiento SR; es que los datos del NDVI al ser normalizados, presentan mejor discretización, y para efectos de clasificación se obtienen rangos de valores más precisos y confiables.

Las imágenes productos del cálculo del NDVI permiten una diferenciación marcada de las masas de productores primarios de lo que es el cuerpo de agua del Lago y de otras formaciones como nubes; al hacer una evaluación de los valores del NDVI, se permite claramente diferenciar productores primarios (valores positivos) de cualquier otro elemento, como nubes, material en suspensión inerte, y agua (valores negativos).

El cálculo y posterior elaboración de mapas en base a los valores obtenidos del NDVI, permitió detectar fácilmente, zonas de productividad primaria en el Lago de Maracaibo; así como identificar la dinámica de estos productores primarios, como se observa en las figuras 5 y 6; de donde se pueden obtener información relevante como porcentaje y superficie de área cubierta por productores primarios.

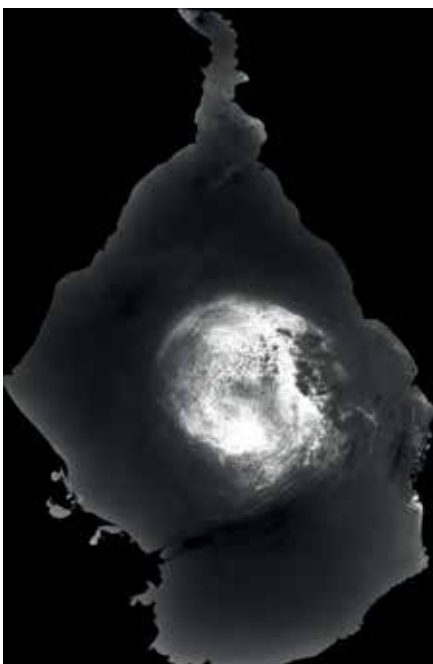


Figura 3. Imagen producto ENVI, reflejando el SR para una imagen LANDSAT 8 del día 221 de 2015

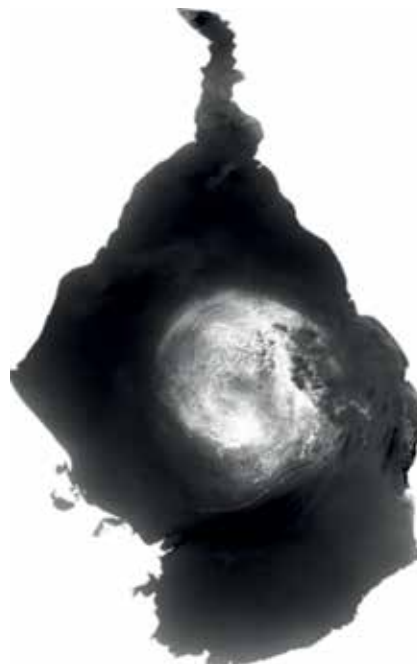


Figura 4. Imagen producto ENVI, reflejando el NDVI para una imagen LANDSAT 8 del día 221 de 2015

En el mapa del NDVI, para el 13 de junio de 2013, se observa una alta productividad primaria en la zona central del Lago, siendo el efecto de corrientes producto del cono hipolimnetico sustancialmente conformado por formas de nitrógeno y fósforo, y también una alta productividad en las zonas costeras eutrofizadas, principalmente en la costa oriental del Lago, en concordancia con los valores de clorofila *a* reportados.

Los valores del NDVI reportados para el 2 de julio de 2013, siguen mostrando una alta productividad en el centro del Lago y costa oriental del Lago; con un aumento en las zonas costeras de la región sur.

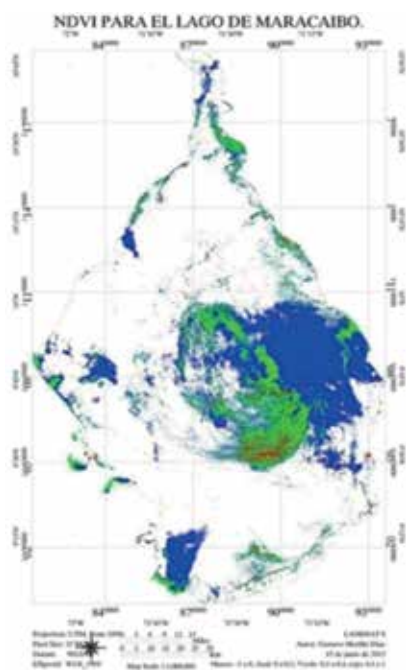


Figura 5. Mapa del NDVI para el Lago de Maracaibo del 13 de junio de 2013

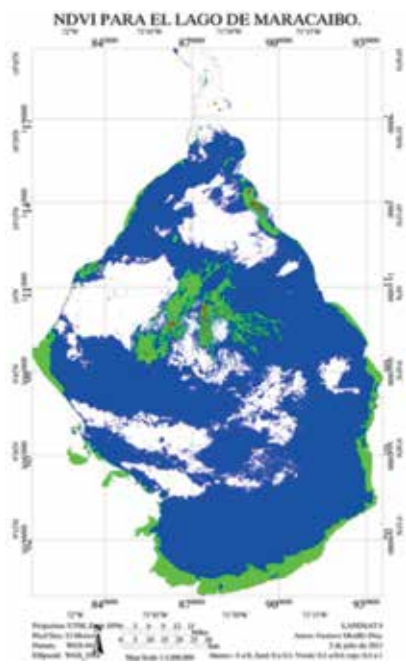


Figura 6. Mapa del NDVI para el Lago de Maracaibo del 2 de julio de 2013

Índice de vegetación de cociente (RVI)

El cálculo del RVI resultó en imágenes donde no se pudo distinguir con claridad la diferencia entre nubosidad y cualquier otro parámetro existente en el Lago, (figura 7) además, el amplio rango de valores obtenidos por este índice dificulta la obtención de patrones que permitan realizar una clasificación de elementos dentro del ecosistema estudiado.

Índice de vegetación de cociente normalizado (NRVI)

Para el caso del NRVI visualmente se presentan las mismas dificultades de apreciación que el RVI (figura 8), sin embargo, al igual que en caso del NDVI, los valores son normalizados y esto permite obtener rangos de valores para una buena clasificación y estudio de la imagen. El valor del NRVI es prácticamente el valor negativo del NDVI.

3.2.1.2. Imágenes AQUA/TERRA

En el caso de las imágenes AQUA/TERRA, se presentaron en función a los índices calculados las mismas apreciaciones en los cuatro índices calculados: SR, NDVI, RVI y NRVI. (figura 9).

En base a los resultados obtenidos en los cuatro índices de vegetación tanto para imágenes LANDSAT 8, como AQUA/TERRA, se seleccionaron los índices NDVI y NRVI para realizar los cálculos y correlaciones de productividad primaria en el Lago de Maracaibo, ya que ambos índices presentan rangos de valores normalizados, que permiten realizar una clasificación con mayor precisión, diferenciando bien las masas de productores primarios de cualquier otro elemento en la imagen.

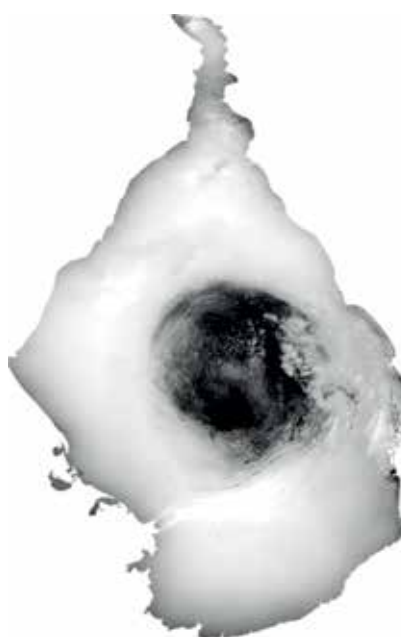


Figura 7. Imagen producto ENVI, reflejando el RVI para una imagen LANDSAT 8 del día 221 de 2015

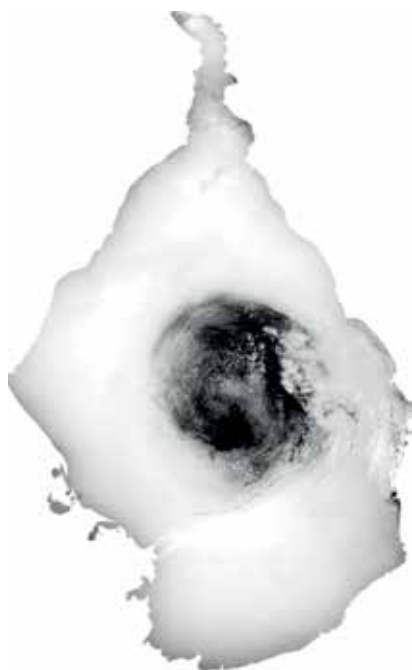


Figura 8. Imagen producto ENVI, reflejando el NRVI para una imagen LANDSAT 8 del día 221 de 2015

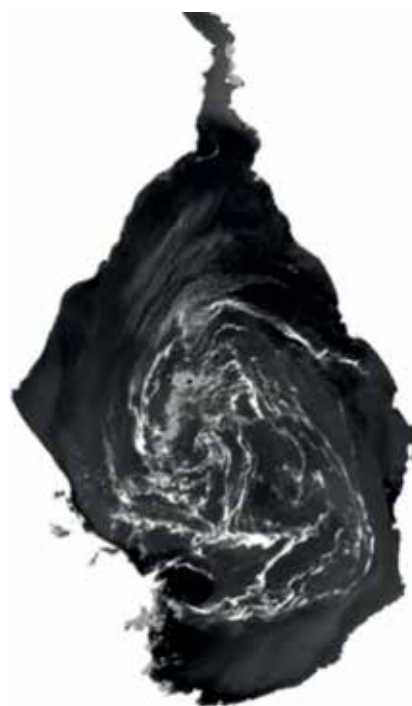


Figura 9. Imagen producto ENVI, reflejando el NDVI para una imagen AQUA del día 15 de enero de 2011

3.2.2. Comparación de los valores de los diferentes índices de vegetación y valores de clorofila *a*, para establecer el adecuado en la detección de productividad primaria

3.2.2.1. Imágenes LANDSAT 8

Para el caso de las imágenes LANDSAT 8 se presentan en la tabla 1 los valores promedios de clorofila *a*, NDVI y NRVI así como los valores del índice de correlación entre estas variables (Chaoyang, Zheng, Quan y Wenjiang, 2008).

Se observa en la tabla 19, que en los valores del

Tabla 1. Valores de Clorofila *a*, NDVI y NRVI para los tres sitios de muestreo

	Clorofila <i>a</i>	NDVI	NRVI
Barranquitas	10,452	-0,182	0,129
Lagunillas	14,885	0,124	-0,146
Santa Rita	13,296	0,086	-0,053
	r^2	0,88	0,84

índice de correlación son bastantes similares entre el NDVI y NRVI, sin embargo, es ligeramente mayor para el caso del NDVI, lo que induce a establecer este índice como el que mejor representa la productividad primaria para el caso del Lago de Maracaibo. Estos resultados son comparables a los hallados por Ferral (2012), quien evaluó los valores de clorofila *a*, en el embalse San Roque, en la región de Córdoba, Argentina, encontrando índices de correlación de 0,92 entre los valores de clorofila *a* y el NDVI calculado a partir de imágenes LANDSAT TM. También comparables a los reportados por Zenghum et al. (2008), quienes reportan índices de correlación entre los valores de clorofila *a* y el valor de NDVI de 0,79 a 0,85; y valores de correlación de 0,90 a 0,95 entre los valores de clorofila *a* y el NRVI. Por su parte Borro et al. (2008) presenta valores calculados del NDVI para humedales de la zona del río Paraná en Brasil, con valores alrededor de 0,07 a 0,34; comparables a los hallados en esta investigación.

Por su parte Gómez (2015), reporta índices de correlación de 0,6 entre el valor de clorofila *a* y la banda infrarroja de una imagen SPOT, en una evaluación en el lago Guadalupe, en las inmediaciones de la ciudad de México.

Fusili et al. (2013) menciona la conveniencia de los estudios multitemporales con índices de vegetación a través del cálculo de los valores medios de las series temporales, como un indicador del estado trófico en ecosistemas acuáticos.

Aunque se cuenta con un buen índice de correlación entre el NDVI y concentración de clorofila *a*, caso particular se da para Barranquitas, donde a pesar de existir concentraciones apreciables de clorofila *a*, el valor promedio de NDVI y NRVI sugieren la no presencia de productividad primaria (figura 41 y 42; Tablas 20 y 21); caso similar fue reportado por Guoming et al. (2015), quienes evaluaron la productividad primaria en un análisis multitemporal en el lago Erie, utilizando imágenes LANDSAT 8; estos investigadores sugieren estas inconsistencias como producto de condiciones locales desconocidas o interferencia de nubosidad

Tabla 2. Valores de clorofila *a*, NDVI y NRVI para imágenes MODIS

	Clorofila <i>a</i>	NDVI	NRVI
Barranquitas	10,452	-0,315	0,483
Lagunillas	14,885	-0,447	0,447
Santa Rita	13,296	-0,383	0,383
	r ²	0,47	0,22

que pueden llegar a alterar el valor del índice; o en el caso particular de Barranquitas al presentar los menores valores de clorofila *a*, estos no llegan a ser detectados por el programa.

3.2.2.2. Imágenes Aqua/Terra

En el caso de las imágenes AQUA/TERRA, también se contrastaron los valores entre concentración de clorofila *a* e índices de vegetación, los mismos pueden ser visualizados en la tabla 2.

Según el índice de correlación (tabla 2), para el caso de imágenes AQUA/TERRA el valor de clorofila *a* determinado en los tres sitios de muestreo no se ajusta bien a los valores de NDVI o NRVI; adicional a ello, según los valores calculados en los dos índices de vegetación, no se detecta presencia de productividad primaria en los tres sitios de muestreo, por lo que en esta investigación, las imágenes AQUA/TERRA no resultan ser adecuadas para detectar productividad primaria en el Lago de Maracaibo, al menos en el caso de fitoplancton; esto seguramente en base al tamaño de pixel, concordando con lo reportado por Yuchao et al. (2016), Nichol et al. (2011), Powell et al. (2014) y Hu (2009). Por lo que el análisis se continuó únicamente con las imágenes LANDSAT 8. Fisher et al. (2016) en estudios de cuerpos de agua al sur de Australia, realizaron comparaciones de diferentes índices de vegetación calculados con imágenes LANDSAT TM y LANDSAT OLI; no encontrando diferencias entre los índices calculados en ambos sensores, por lo que predicen una alta efectividad en el seguimiento de monitoreos ambientales utilizando imágenes LANDSAT, con un rango de seguimiento de más de 30 años (Aguilar et al., 2012), (Jwan et al., 2013), (Peng et al., 2014).

Los resultados encontrados para el valor del NDVI en imágenes MODIS contrastan en parte con lo reportado por Lawrence y Walker (2009), quienes evaluaron una serie de imágenes MODIS entre los años 2004 y 2006; estos investigadores reportan una alta efectividad de las imágenes MODIS para detectar *Lemna sp* en el Lago de Maracaibo, con porcentajes de cubrimiento de hasta el 11% de la superficie del Lago; resultados

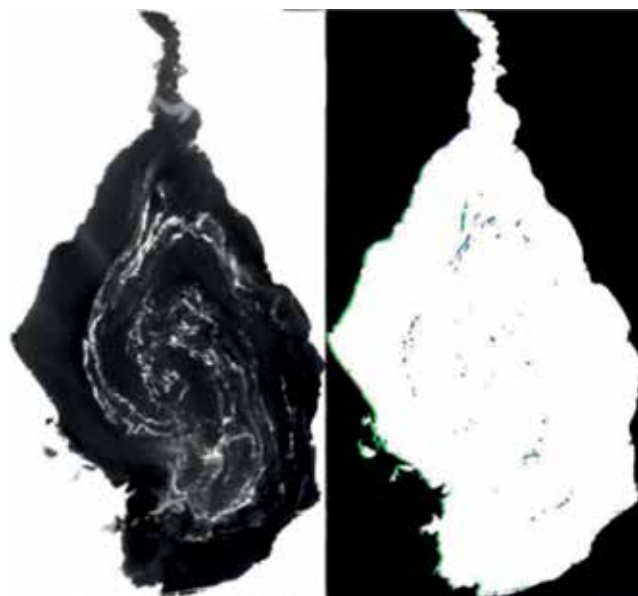


Figura 10. Imagen AQUA con el cálculo del NDVI y a la derecha, valores positivos del NDVI para la misma imagen

similares fueron reportados por López y Rodríguez (2007), para serie de imágenes MODIS, donde se hizo una clasificación en base al color verde de la imagen; esta aparente contradicción de valores, puede ser explicada, ya que en el caso de esas investigaciones, fueron realizadas entre los años 2004 y 2006; cuando el fenómeno de reproducción de *Lemna* en el Lago de Maracaibo estaba en su apogeo; en el caso de esta investigación, realizada entre los años 2011 a 2016, el fenómeno de cubrimiento de *Lemna* en el Lago de Maracaibo, prácticamente había desaparecido, por lo que poco se observa valores de NDVI, que en gran medida corresponderían es a fitoplancton en las imágenes evaluadas (figura 10).

El cálculo del NDVI no llega a precisar si todas esas masas son realmente algún tipo de productores primarios; lo que lleva a asumir que en el caso de MODIS, por su tamaño de pixel, deben realmente ser grandes masas consolidadas de productores primarios para que realmente puedan ser detectados, al menos, como un valor de NDVI.

En relación a la comparación entre los índices de vegetación y los sitios de muestreo experimental, se presenta una mejor correlación entre la zona de Lagunillas y el valor tanto de NDV y de NRVI; esto se podría explicar, ya que en esta zona de la costa oriental del Lago, llega de manera casi directa por efectos de la hidrodinámica del Lago todos los aportes de los ríos de la zona sur, y a su vez se encuentra allí con diferentes descargas propias de zonas con alta productividad industrial y urbana, como lo es la costa oriental del Lago.

3.3. Proposición de ecuaciones que permitan estimar niveles de productividad primaria en el Lago de Maracaibo, a partir de los índices de vegetación

Dado que los análisis de regresión establecidos entre los diferentes parámetros medidos en campo y según los índices de vegetación seleccionados, se realizaron comparaciones de ecuaciones, realizando correlaciones únicamente entre el valor de clorofila *a* y el valor del índice de vegetación; sea éste NDVI o NRVI calculadas a partir de imágenes LANDSAT 8; ya que como reporta Chernetskiy et al. (2009), el establecimiento de relaciones entre índices de vegetación y valores de clorofila *a*, permite de una manera directa el monitoreo eficiente del nivel trófico de variados ecosistemas de interés de manera rápida y económica, al establecer las diferentes ecuaciones que relacionan clorofila *a* con el valor del índice de vegetación, una ecuación lineal se presenta como la mejor aproximación al cálculo del valor de clorofila *a*, según el índice de vegetación; dichas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\text{Clor}_{(a)} = 13,053(\text{NDVI}) + 12,756$$

$$r^2 = 0,94$$

$$\text{Clor}_{(a)} = -16,051(\text{NRVI}) + 12,503$$

$$r^2 = 0,90$$

Según el índice de correlación, el NDVI parece ser el índice de vegetación que mejor predice al concentración de clorofila *a* en el Lago de Maracaibo; además, el NRVI también predice acertadamente cerca del 90%.

Estos resultados obtenidos, se comparan a los reportados por Zhaofei et al. (2017), quienes encontraron una alta correlación entre los valores del NDVI y datos de clorofila *a*, para un estudio sobre la cobertura vegetal en las mesetas de Mongolia; estos investigadores también reportan la conveniencia del estudio multitemporal de valores de NDVI, y sugieren un ajuste de los datos a través de transformaciones matemáticas para mejorar las correlaciones.

Por su parte Barillé et al. (2010), estableció fórmulas de predicción de biomasa de macrófitas a partir del valor del NDVI para la Bahía de Bournefout en Francia, la fórmula propuesta en este caso fue de tipo exponencial con un índice de correlación de 0,97.

Van derWal et al. (2014), estableció correlaciones entre valores de clorofila *a* y valores de NDVI para macroalgas bentónicas, en el estuario de Oosterschelde en el sur de Holanda, estos investigadores propusieron ecuaciones lineales que partiendo del valor del NDVI podrían calcular la concentración de clorofila *a*, con un índice de correlación de 0,97.

4. CONCLUSIONES

- La mayor concentración de clorofila *a* se encontró asociada a la zona de Lagunillas (12,159 a 20,281 µg/l), en la costa oriental del Lago, por lo que se presume que esta región es una zona de alta productividad primaria.
- La plataforma satelital LANDSAT 8, permitió una evaluación acertada de los niveles de productividad primaria en el Lago de Maracaibo en función a los índices de vegetación, ya que presentó correlación significativa y positiva (r^2 igual a 0,88) con la concentración de clorofila *a* para el Lago de Maracaibo.
- La plataforma satelital AQUA y TERRA, no muestran resultados consistentes referentes a productividad primaria evaluados a través de índices de vegetación, presumiblemente en función al tamaño del pixel e interferencias radiométricas.
- El NDVI, es el índice que para el caso del Lago de Maracaibo permitió realizar una estimación y monitoreo de productividad primaria.
- Los mayores valores de NDVI (0,6 a 0,8) se observaron con mayor frecuencia en la zona central del Lago y costa oriental del Lago, en concordancia a las características hidrodinámicas y ecológicas del ecosistema.
- A pesar de que los resultados exhiben una buena relación entre los valores del NDVI y concentraciones de clorofila; para el caso de Barranquitas, el valor del NDVI, no la muestra como una zona de alta productividad primaria.
- Las correlaciones establecidas entre los valores del NDVI calculados a partir de imágenes MODIS y los valores de clorofila *a* (0,42 y 0,22), sugieren que las imágenes de los satélites AQUA y TERRA no logran detectar con eficiencia productividad primaria generada por el fitoplancton en el Lago de Maracaibo.
- Según los índices de correlación, es factible establecer ecuaciones lineales que predigan la concentración de clorofila *a*, a partir del valor del NDVI calculado a partir de imágenes LANDSAT 8, con una certeza del 94%
- La generación de productos cartográficos a partir del valor del NDVI en imágenes LANDSAT 8, permite realizar un monitoreo rápido y eficiente de la dinámica de crecimiento y transporte de productores primarios en el Lago de Maracaibo.
- Los productos cartográficos demuestran la alta dinámica que presenta la productividad primaria en el Lago de Maracaibo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Fondo nacional para la ciencia y la Tecnología, (FONACIT), a través del programa de Estímulo al Investigador (PEI), institución que aportó los recursos económicos para la realización de la presente investigación.

Igualmente expresar agradecimiento a la Facultad de ingeniería de la Universidad del Zulia, a través de sus Dependencias: División de Postgrado, Centro de Investigación del Agua y Laboratorio de Geodesia Física y Satelital por aportar los espacios y equipos para la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Avila, H., Gutierrez, E., Ledo, H., Araujo, M., y Sanguiz, M. (2010). *Distribución de metales pesados en sedimentos superficiales del Lago de Maracaibo (Venezuela)*. Revista Técnica de la Facultad de ingeniería de la Universidad del Zulia, 33(2), 122-129.
- Adrian, F., Flood, N., y Danaher, T. (2016). *Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia TM/ETM data*. Remote Sensing of Environment, 167-182.
- Aguilar, C., Zinnertb, J., Polo, M., y Young, D. (2012). *NDVI as indicator for change in water availability to woody vegetation*. Ecological Indicators, 290-300.
- Barille, L., Robin, M., Harin, N., Bargain, A., & Launeau, P. (2010). *Increase in seagrass distribution at Bourneuf Bay (France) detected by spatial remote sensing*. Aquatic Botany, 185-194.
- Borro, M., Morandeira, N., Salvia, M., Minotti, P., Perna, P., y Kandus, P. (2014). *Mapping shallows lakes in a large South American floodplain: A frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data*. Journal of hidrology, 39-52.
- Chacón, C., Charity, A., Cárdenas, C., Araujo, I., y Morales, E. (2006). *Uso de Chlorella sp y Scenedesmus sp en la remoción de nitrógeno y fósforo y DQO de afuás residuales urbanas de Maracaibo*. Revista Técnica de la Facultad de ingeniería, 45-49.
- Chaoyang, W., Zheng, N., Quan, T., y Wenjiang, H. (2008). *Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation*. Agricultural and Forest Meteorology, 1230-1241.
- Chernetskiy, M., Shevymogov, A., Shevnina, S., Vysotsaya, G., y Sidko, A. (2009). *Investigations of the Krasnoyarsk Reservoir water based on the multispectral satellite data*. Advance in space research, 206-213.
- Christopher, E., Holden, C., y Woodcock, E. (2016). *An analysis of Landsat 7 and Landsat 8 underflight data and the implications form time series investigations*. Remote sensing of Environment., 1-21.
- Ferral, A. (2012). *Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales*. Córdoba, Argentina.: Instituto de Altos Estudios Espaciales mario Gulich.
- Fusilli, L., Collins, M., Laneve, G., Palomboi, A., Pignatti, S., y Santinic, F. (2013). *Assessment of the abnormal growth of floating macrophytes in Winam Gukf (Kenya) by using MODIS imagery in time series*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 33-41.
- Gardner, W., Cavaletto, J., Bootsma, H., Lavrentyev, P., y Troncone, F. (1998). *Nitrogen cycling rates and light effects in tropical Lake Maracaibo, Venezuela*. Limnology and Oceanography., 1814-1825.
- Gómez, R. (2015). *Análisis espectral del lago Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos in situ*. Boletín del Insatituto de geografía de la UNAM, 15-24.
- Guoming, G., Huan, L., Yanfeng, G., y Xiuping, J. (2015). *Normalizes difference phytoplankton index (NDPI) and spatio-temporal cloud filtering for multitemporal cyanobacteria pollution analisis on Erie lake in 2014*.
- Hernán de Bautista, S. (1997). *Proceso de salinización en el Lago de Maracaibo*. Maracaibo: Instituto para la conservación de la cuenca del lago de Maracaibo ICLAM.
- Hu, C. (2009). *A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans*. Remote sensing of Environment, 2118-2129.
- Jwan, A.-d., Mansor, S., Helmi, Z., y Mohd, S. (2013). *NDVI Differencing and Post-classification to detect vegetation changes in Halabja city, Iraq*. Journal of Applied Geology and Geophysics, 1-10.
- Kyung-Ae, P., Hwa-Jeong, C., y Ji-Eun, P. (2013). *Characterics of satellite chlorophyll-a coincentration speckles and a removal method in a composite process in the East Japan Sea*. International Journal of Remote sensing, 4610-4635.
- Lau, P., Tam, N., y Wong, Y. (1995). *Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater*. Environmental pollution, 59-66.
- Lawrence, K., y Walker, N. (2009). *Using NDVI from MODIS to monitor ducweed bloom in Lake Maracaiboi, Venezuela*. Water Reservoir Manage, 1125-1135.
- López, A., y Rodriguez, D. (2007). *Metodología para cuantificar el área cubierta por Lmena sp sobre el lago de maracaibo a través de imágenes satelitales*

- del sensor MODIS*. Maracaibo: Universidad del Zulia.
- Meera, G., Parthiban, G., Thummalu, N., y Christy, A. (2015). *NDVI: Vegfetatation change detection using remote sensing and GIS- A case study of Vellore District*. *Procedia computer science*, 1199-1210.
- Minoru, G., Shinod, M., y Maeda., T. (2013). *Classification of arid lands, including soil degradation and irrigated areas, based on vegetation and aridity indices*. *International Journal of Remote sensing.*, 6701-6722.
- National Aero space Agency (NASA). (15 de enero de 2017). *Moderate resolution Imagin Spectroradiometry*. Recuperado el 28 de febrero de 2017, de Rapid Response MODIS: <https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db>
- Nichol, L., Rahman, S., y Janet, E. (2011). *Improved forest biomass estimating using ALOS AVNIR-2 texture indices*. *Remote sensing of Environment*, 968-977.
- Parra Pardi, G. (1979). *Estudio integral sobre la contaminación del lago de Maracaibo y sus afluentes*. Caracas: Cronotip.
- Peng, L., Luguang, J., y Zhiming, F. (2014). *Cross-comparisons of vegetation indices derived from Landsat 7 enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) and Landsat 8 operational land imager (OLI) sensors*. *Remote Sensing*, 310-329.
- Powel, S., Jakeman, A., y Crokee, B. (2014). *Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominate floodplain wetlands?* *Ecological indicators*, 486-493.
- Rodríguez, G. (2001). *El Lago de Maracaibo como cuenca anaerobia natural: uso de líneas base históricas en estudios de impacto ambiental*. *Interciencia.*, 1-9.
- U. S. Geologic Survey (USGS). (13 de Abril de 2013). *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*. Recuperado el 3 de Febrero de 2017, de U. S. Ge4ologic Survey (USGS): <https://eros.usgs.gov/>
- Van derWal, D., Van Dalen, J., Wielemaker-van, D., Dijkstra, J., y Ysebaert, T. (2014). *Biophysical control of intertidal benthic macroalgae revelead by high-frequency multispectral camera images*. *Journal of Sea Research*, 111-120.
- Yuchao, Z., Ronghua, M., Hongtao, D., Steven, L., Minwei, Z., y Jindou, X. (2016). *A novel MODIS algorithm to estimate chlopophyll a concentration in eutrophic turbid lakes*. *Ecological indicators*, 138-151.
- Zhaofei, W., Shengjun, W., Jilong, C., y Lü, M. (2017). *NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their response to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China*. *Scienced of the Total Environment*, 947-959.
- Zhengjun, W., Hong, J., y Du, G. (2008). *Use of satellite imagery to asses the trophic state of Miyun Reservoir, Beijing, China*. *Environmental pollution*, 13-19.
- Zhu, X., y Liu, D. (2014). *Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time series*. *Journal of Photogrammetry and Remote sensing.*, 1-10.

Sobre los autores

Gustavo Morillo Díaz

Doctor en Ingeniería Ambiental por la Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela. Magister en Ingeniería Ambiental (LUZ), Ingeniero Agrónomo (LUZ). Profesor Titular, adscrito al Centro de Investigación del Agua (LUZ). Miembro del comité de zonas costeras y ordenamiento del territorio del Ministerio de Ecosocialismo y Aguas.

Angel David Pineda

Ingeniero Geodesta y Agrimensor (LUZ), Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental (LUZ), investigador PEII (A-1) acreditado por ONCTI en 2012-2013 y 2015-2016. Operador de equipos GNSS-RTK y Acústicos submarinos. Asesor Especialista de Percepción Remota para aplicaciones geodésicas y Colaborador de extensión del LGFS y del CIA (LUZ).

Gerardo José Aldana Villasmil

Philosophy of Doctor in Environmental Engineering, Universidad de Surrey UniS, Inglaterra; Magister Scientiarum en Ingeniería Ambiental (LUZ), Ingeniero Civil (LUZ), Profesor Titular Facultad de Ingeniería LUZ, Presidente del Instituto para la Conservación de la cuenca del lago de Maracaibo (ICLAM) 2005-2006, Director de: HIDROLAGO, PLANIMARA 2005-2006, Director de la División de Investigación de la Facultad Ingeniería, LUZ 1999-2000.

Giovanni Antonio Royero Orozco

Post Doctor en Gerencia en las Organizaciones Universidad Rafael Belloso Chacín (URBE). Doctor en Ciencias Gerenciales (URBE). Magíster Scientiarum en Ingeniería Geodésica (LUZ). Ingeniero Geodesta (LUZ). Director de la División de Investigación de La Facultad de Ingeniería de LUZ y Miembro de la Comisión Científica del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico-CONDES – LUZ. Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería de LUZ.