

**MONITOREO DE FACTORES FÍSICO-QUÍMICOS QUE INCIDEN EN LAS  
FLORACIONES DE ALGAS NOCIVAS EN EL MAR CARIBE COLOMBIANO,  
USANDO IMÁGENES SATELITALES.**

**CLAUDIA PATRICIA VIDAL PUERTA  
JOHAN STEVEN MURILLO MONSALVE**



**Universidad del Valle**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI  
2017**

**MONITOREO DE FACTORES FÍSICO-QUÍMICOS QUE INCIDEN EN LAS  
FLORACIONES DE ALGAS NOCIVAS EN EL MAR CARIBE COLOMBIANO,  
USANDO IMÁGENES SATELITALES.**

**CLAUDIA PATRICIA VIDAL PUERTA  
JOHAN STEVEN MURILLO MONSALVE**

**Trabajo de grado en modalidad de tesis para optar al título de Ingeniero Topográfico**

**Director  
FRANCISCO LUIS HERNÁNDEZ TORRES**



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI  
2017**

**NOTA ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado primordialmente a Dios por darnos la sabiduría, paciencia y capacidad para ejercerlo, a nuestros padres por el apoyo, comprensión y confianza que nos brindaron durante este proceso y a la Universidad del Valle por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente y prestarnos el espacio necesario para desarrollar las actividades que esto implica.

## **AGRADECIMIENTOS**

La culminación de este trabajo de grado significa estar más cerca de convertirnos en Ingenieros Topográficos. Y es este el momento propicio para agradecer a las personas que contribuyeron en este proceso.

Agradecemos principalmente a nuestra familia, fuente de apoyo constante e incondicional en los duros años de carrera profesional, lo que permitió lograr el objetivo trazado para un futuro mejor.

Gracias al director del trabajo de grado Francisco Luis Hernández Torres por todas sus enseñanzas, sus orientaciones, su paciencia y motivación que fueron fundamentales para nuestra formación, así como también por encaminarnos en el área de conocimiento de la percepción remota.

Al Ingeniero Michael Arredondo y profesor David Arango por sus orientaciones en el campo de la programación, lo cual fue esencial en el desarrollo del trabajo.

Finalmente agradecemos a nuestros compañeros del grupo de investigación de percepción remota por el apoyo, la motivación y optimismo durante estas últimas semanas.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1. RESUMEN.....                                                 | 1  |
| 2. INTRODUCCIÓN .....                                           | 2  |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                             | 3  |
| 4. OBJETIVOS.....                                               | 4  |
| 4.1. OBJETIVO GENERAL.....                                      | 4  |
| 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                | 4  |
| 5. JUSTIFICACIÓN.....                                           | 4  |
| 6. MARCO TEÓRICO.....                                           | 5  |
| 6.1. MARCO CONCEPTUAL .....                                     | 5  |
| 6.1.1. Eutrofización .....                                      | 5  |
| 6.1.2. FAN.....                                                 | 6  |
| 6.1.3. Karenia Brevis.....                                      | 6  |
| 6.1.4. Campañas oceanográficas .....                            | 6  |
| 6.1.5. Clorofila-a (Chl-a).....                                 | 6  |
| 6.1.7. Temperatura Superficial del Mar .....                    | 6  |
| 6.1.8. Concentraciones de nitratos .....                        | 6  |
| 6.1.9. Salinidad.....                                           | 7  |
| 6.2. MARCO TEÓRICO .....                                        | 7  |
| 6.2.1. Estimación de Clorofila-a (Chl-a).....                   | 7  |
| 6.2.2. Estimación de Temperatura Superficial del Mar (SST)..... | 8  |
| 6.2.3. Estimación de Concentraciones de Nitratos.....           | 8  |
| 6.2.4. Estimación de la Salinidad .....                         | 9  |
| 6.2.5. Recuperación de Karenia Brevis .....                     | 9  |
| 6.3. MARCO REFERENCIAL.....                                     | 10 |
| 7. METODOLOGÍA .....                                            | 12 |
| 7.1. ÁREA DE ESTUDIO .....                                      | 14 |
| 7.2. MATERIALES .....                                           | 15 |
| 7.2.1. Imágenes satelitales.....                                | 15 |
| 7.2.2. Datos de campo .....                                     | 15 |
| 7.3. MÉTODOS .....                                              | 15 |
| 7.3.1. PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES .....                  | 15 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.3.2. PROCESAMIENTO Y ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS .....                                                               | 15 |
| 7.3.2.1. Estimación de la Clorofila-a .....                                                                             | 16 |
| 7.3.2.2. Estimación de la Temperatura Superficial del Mar .....                                                         | 18 |
| 7.3.2.3. Estimación de Concentraciones de Nitratos .....                                                                | 19 |
| 7.3.2.4. Estimación de la Salinidad .....                                                                               | 20 |
| 7.3.3. ESTIMACIÓN DE ÍNDICES. ....                                                                                      | 22 |
| 7.5.1. Estimación del Índice RBD .....                                                                                  | 22 |
| 7.5.2. Estimación del Índice KBBI.....                                                                                  | 22 |
| 7.3.5. CALCULO DE PROMEDIOS DE LAS VARIABLES. ....                                                                      | 23 |
| 7.3.6. VALIDACIÓN.....                                                                                                  | 25 |
| 7.3.6.1. Clorofila.....                                                                                                 | 25 |
| 7.3.6.2. Temperatura superficial del Mar (SST).....                                                                     | 26 |
| 7.3.6.3. Nitratos .....                                                                                                 | 28 |
| 7.3.6.4. Salinidad .....                                                                                                | 30 |
| 7.3.7. RELACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y FAN.....                                                                | 33 |
| 8. RESULTADOS .....                                                                                                     | 33 |
| 8.1. MAPAS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LOS<br>PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....                                | 34 |
| 8.2. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS<br>Y LAS FAN. ....                                     | 44 |
| 9. DISCUSIÓN.....                                                                                                       | 56 |
| 10. CONCLUSIONES.....                                                                                                   | 58 |
| 11. RECOMENDACIONES .....                                                                                               | 59 |
| 12. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                     | 60 |
| 13. ANEXOS .....                                                                                                        | 67 |
| Anexo 1. Datos utilizados para la validación de Chl-a (mg/m <sup>3</sup> ) para el periodo 2013....                     | 67 |
| Anexo 2. Datos utilizados para la validación de Chl-a (mg/m <sup>3</sup> ) para el periodo 2014....                     | 68 |
| Anexo 3. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Chl-a mediante el modelo<br>OC4V4 y los datos de campo. .... | 69 |
| Anexo 4. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC4V4 y<br>los datos de campo. ....           | 70 |
| Anexo 5. Correlación de Pearson para los datos estimados de Chl-a con el modelo<br>OC4V4 y los datos de campo. ....     | 70 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 6. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Chl-a mediante el modelo OC4V4 y los datos de campo. ....           | 71 |
| Anexo 7. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC4V4 y los datos de campo, periodo 2014.....        | 71 |
| Anexo 8. Correlación de Pearson para los datos estimados de Chl-a con el modelo OC4V4 y los datos de campo, periodo 2014. .... | 72 |
| Anexo 9. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Chl-a mediante el modelo OC3M y los datos de campo.....             | 72 |
| Anexo 10. Coeficiente de Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC3M y los datos de campo.....        | 72 |
| Anexo 11. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC3M y los datos de campo, periodo 2013.....        | 73 |
| Anexo 12. Gráfico de dispersión de Chl-a con el modelo OC3M y los datos de campo, para el periodo 2014. ....                   | 73 |
| Anexo 13. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC3M y los datos de campo, periodo 2014.....        | 74 |
| Anexo 14. Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC3M y los datos de campo, periodo 2014. ....        | 74 |
| Anexo 15. Gráfico de dispersión de Chl-a con el modelo OC2M y los datos de campo, para el periodo 2013. ....                   | 74 |
| Anexo 16. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC3M y los datos de campo, periodo 2013.....        | 75 |
| Anexo 17. Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC2M y los datos de campo, periodo 2013. ....        | 75 |
| Anexo 18. Gráfico de dispersión de Chl-a con el modelo OC2M y los datos de campo, para el periodo 2014. ....                   | 76 |
| Anexo 19. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC2M y los datos de campo, periodo 2014.....        | 76 |
| Anexo 20. Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC2M y los datos de campo, periodo 2014. ....        | 76 |
| Anexo 21. Datos utilizados para validar la SST para el periodo 2013. ....                                                      | 77 |
| Anexo 22. Datos utilizados para validar la SST en el periodo 2014. ....                                                        | 79 |
| Anexo 23. Datos utilizados para validar los Nitratos en el periodo 2013. ....                                                  | 81 |
| Anexo 24. Datos utilizados para la validación de Nitratos periodo 2014.....                                                    | 82 |
| Anexo 25. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2013.....           | 85 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 26. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2014..... | 85 |
| Anexo 27. Datos utilizados para validar la Salinidad en el periodo 2013. ....                                        | 86 |
| Anexo 28. Datos utilizados para validar la Salinidad en el periodo 2014. ....                                        | 87 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) para los datos estimados de Chl-a con los tres modelos matemáticos y los datos de campo, para el año 2013. .... | 26 |
| Tabla 2. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) para los datos estimados de Chl-a con los tres modelos matemáticos y los datos de campo, para el año 2014. .... | 26 |
| Tabla 3. Correlación de Pearson para los datos estimados de SST y los datos de campo para el periodo 2013. ....                                                                                  | 27 |
| Tabla 4. Correlación de Pearson para los datos estimados de SST y los datos de campo para el periodo 2014. ....                                                                                  | 28 |
| Tabla 5. Correlación de Pearson para los valores estimados de Nitratos y los datos de campo, periodo 2013. ....                                                                                  | 29 |
| Tabla 6. Correlación de Pearson para los valores estimados de Nitratos y los datos de campo, periodo 2014. ....                                                                                  | 30 |
| Tabla 7. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) de los datos estimados de Salinidad mediante los dos modelos y los datos de campo para el periodo 2013. ....    | 33 |
| Tabla 8. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) de los datos estimados de Salinidad mediante los dos modelos y los datos de campo para el periodo 2014. ....    | 33 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema metodológico .....                                                                    | 13 |
| Figura 2. Área de estudio.....                                                                          | 14 |
| Figura 3. Estimación de la Clorofila-a mediante el algoritmo OC4V4 para el mes de octubre de 2014. .... | 16 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4. Estimación de la Clorofila-a mediante el algoritmo OC3M para el mes de octubre de 2014 .....                                                | 17 |
| Figura 5. Estimación de la Clorofila-a mediante el algoritmo OC2M para el mes de octubre de 2014. ....                                                | 17 |
| Figura 6. Estimación de la SST para el mes de abril del año 2014. ....                                                                                | 18 |
| Figura 7. Estimación de Nitratos mediante la Ecuación (8) para el mes de abril de 2014..                                                              | 19 |
| Figura 8. Estimación de Nitratos mediante la Ecuación (9) para el mes de abril de 2014..                                                              | 20 |
| Figura 9. Estimación de la salinidad superficial del Mar a partir del modelo de (Binding & Bowers, 2003) para el mes de abril de 2013.....            | 21 |
| Figura 10. Estimación de la salinidad superficial del Mar mediante el modelo de (Keith, Lunetta & Schaeffer, 2016) para el mes de abril de 2014. .... | 21 |
| Figura 11. Estimación del índice RBD para el mes de junio del año 2013. ....                                                                          | 22 |
| Figura 12. Estimación del índice KBBI para el mes de septiembre año 2013 .....                                                                        | 23 |
| Figura 13. Presencia de nubes en los 7 días julianos de octubre del año 2013 .....                                                                    | 24 |
| Figura 14. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de SST y los datos de campo, para el periodo 2013. ....                                     | 27 |
| Figura 15. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de SST y los datos de campo, para el periodo 2014. ....                                     | 28 |
| Figura 16. Gráfico de dispersión de los valores y diagrama de cajas, obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2013.....            | 29 |
| Figura 17. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2014.....            | 30 |
| Figura 18. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2013.....           | 31 |
| Figura 19. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2014.....           | 31 |
| Figura 20. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2013.....           | 32 |
| Figura 21. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2014.....           | 32 |
| Figura 22. Comportamiento de la clorofila-a para el año 2013.....                                                                                     | 34 |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23. Distribución espacial de la SST para el año 2014.....                                                                         | 37 |
| Figura 24. Comportamiento de los Nitratos para el año 2013.....                                                                          | 39 |
| Figura 25. Distribución espacio-temporal de la Salinidad en el año 2014.....                                                             | 42 |
| Figura 26. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para junio de 2013.                                                  | 44 |
| Figura 27. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de junio de 2013. ....     | 45 |
| Figura 28. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para septiembre de 2013. ....                                        | 46 |
| Figura 29. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de septiembre de 2013..... | 47 |
| Figura 30. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para septiembre de 2014. ....                                        | 48 |
| Figura 31. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de septiembre de 2014..... | 49 |
| Figura 32. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para octubre de 2014. ....                                           | 50 |
| Figura 33. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de octubre de 2014. ....   | 51 |
| Figura 34. Histograma de frecuencia del índice KBBI y las variables, para junio de 2013. ....                                            | 52 |
| Figura 35. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice KBBI para el mes de junio de 2013.....     | 53 |
| Figura 36. Histograma de frecuencia del índice KBBI y las variables, para agosto de 2014. ....                                           | 54 |
| Figura 37. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice KBBI para el mes de agosto de 2014. ....   | 55 |

## **1. RESUMEN**

Para monitorear la distribución espacio-temporal de las variables físico-químicas que inciden en las floraciones de algas nocivas en el Mar Caribe Colombiano, se estudió la relación existente entre las algas nocivas y las concentraciones de clorofila-a, temperatura, salinidad y nitratos. Estas variables sirven como indicadores para conocer las posibles zonas donde podría presenciarse eventualmente una floración. Para esto, se usaron técnicas de sensoramiento remoto con imágenes MODIS, procesando alrededor de 2300 bandas espectrales y considerando un período de estudio de 2 años (2013-2014) en la zona de estudio. Con la finalidad de que los productos obtenidos de este estudio sean usados como insumos de un posible programa de monitoreo, se obtuvieron las imágenes de recuperación de las variables para realizar un análisis multitemporal que permita establecer cuáles son las variables que mayor relación tienen con las algas nocivas. Los resultados evidencian que en la zona de estudio se presentan las condiciones necesarias para una eventual aparición de floraciones de algas nocivas, especialmente del dinoflagelado *Karenia Brevis* del que ya existen reportes en el Caribe. Se obtuvo que durante las épocas climáticas de transición y húmeda de la segunda parte del año, se encuentra una correlación significativa entre la salinidad y la temperatura con los índices de algas nocivas RBD y KBBI, en contraste con correlaciones más bajas con nitratos y la clorofila-a. Estos resultados permiten el acercamiento al monitoreo de alerta temprana de un fenómeno que se encuentra en constante crecimiento en diversos lugares del mundo.

## 2. INTRODUCCIÓN

En condiciones normales en ambientes acuáticos existen células vegetales microscópicas denominadas fitoplancton o microalgas, que en ciertas ocasiones pueden producir una floración en el agua de mar o río, de color rojiza, café, etc., este evento es conocido como marea roja y corresponde a la proliferación de algas nocivas, es decir, especies tóxicas que pueden provocar la mortalidad de especies acuáticas y considerando el orden de la cadena alimenticia pueden afectar también a seres humanos (Cofepris, 2004).

Los procesos actuales de monitoreo de eventos de algas nocivas, están basados en muestreos de campo tradicional que tienen como principal inconveniente la limitación espacial y de frecuencia temporal (Siswanto et al. 2013), por lo que resulta complicado mitigar los impactos de las floraciones. Con base en estas deficiencias, y en la necesidad latente de detectar, controlar y predecir el desarrollo y desplazamientos de estos fenómenos, la utilización de tecnología de teledetección disponible actualmente se considera como una buena herramienta para tratar la problemática (Yu-Hwan & Palanisamy, 2006).

Para monitorear espacial y temporalmente las floraciones de algas nocivas a través de imágenes satelitales, se han diseñado una amplia gama de algoritmos y modelos que estudian tanto las variables relacionadas con el fenómeno como su distribución a lo largo de las costas. Estos algoritmos aprovechan el rango espectral de las bandas del espectro visible y el infrarrojo cercano, para observar y analizar las propiedades de los distintos componentes de color en la superficie del océano incluyendo fitoplancton, materia orgánica disuelta y sedimentos en suspensión, posibilitando la detección adecuada de algas nocivas (Yu-Hwan & Palanisamy, 2006). De esta manera, se puede obtener información espacial a través del tiempo de las variables que influyen el fenómeno, que servirían de base para el diseño e implementación de un programa de monitoreo que se convierta en alerta temprana, permitiendo ayudar a las entidades encargadas de vigilar y controlar fenómenos de este tipo.

Este estudio se realizó usando como base imágenes MODIS MYD09 para el período 2013-2014, correspondientes a la zona del Caribe Colombiano. Como método de recuperación de las distintas variables consideradas (Temperatura Superficial del Mar, Salinidad, Clorofila-a y Nitratos) se emplearon varios modelos de estimación por factor, de manera que a través de la validación con datos de campo se eligiera el algoritmo que mejor se ajuste a las condiciones de la zona de estudio. La estimación de floraciones algales nocivas se realizó a partir del cálculo de dos índices de recuperación denominados como RBD y KBBI (Amin et al. 2009), lo que permitiría establecer cuáles son los factores que inciden con mayor relevancia en la proliferación de algas tóxicas para el Caribe Colombiano al emplear el método de Correlación de Pearson.

Se encontró que las variables más influyentes en el estudio fueron la salinidad y la temperatura superficial del mar, dado que se correlacionaban fuertemente con los índices de algas nocivas RBD y KBBI usados para conocer la dinámica espacio-temporal del fenómeno. Según Brand, Campbell & Bresnan, (2012), los factores mencionados son los más influyentes en la aparición de los florecimientos algales, ya que clorofilas y nitratos se relacionan

directamente con la concentración del florecimiento algal. Esto explica la presencia esporádica de algas tóxicas que se encuentra en el Caribe Colombiano al encontrar coeficientes de correlación bajos para estas variables. Sin embargo, se confirma que las condiciones óptimas para floraciones nocivas existen en la zona y que deben tomarse medidas en caso de eventuales apariciones. En cuanto al período de tiempo óptimo para el fenómeno, se presenta como resultado la coincidencia que existe con otras zonas del mundo en donde se presencia el dinoflagelado con mayor frecuencia; se resaltan las épocas de transición y húmeda del año como las más atractivas para este evento (Brand, Campbell & Bresnan, 2012).

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A lo largo de las últimas décadas el incremento de algas nocivas en aguas costeras se ha ganado un lugar significativo dentro del escenario científico global, con el propósito de entender las causas y efectos de la distribución espacial y temporal de las especies que las conforman, ya que provocan alteraciones en la vida marina, repercusiones para la salud humana, pérdidas económicas y problemas sociales (Mancera, Gavio & Arencibia 2009). Las Floraciones de Algas Nocivas (FAN) son fenómenos naturales que se propagan explosivamente dependiendo de la interacción de múltiples factores biológicos, físicos y químicos; y suelen producir cambios en la coloración de las aguas desde tonalidades amarillentas a rojos intensos por lo cual son denominadas comúnmente como “mareas rojas.

En Estados Unidos, las floraciones de algas nocivas han generado pérdidas de aproximadamente \$ 2,2 mil millones al año, debido a la degradación de agua dulce (Dodds et al., 2008), lo que ha originado programas de vigilancia en cada estado, que emiten avisos de salud o cierres de áreas recreativas por los riesgos potenciales de FAN (Graham, Loftin, & Kamman, 2009). Entre los años 1972 y 2000, en el cono suramericano, se han registrado alrededor de 580 intoxicaciones por veneno paralizante en seres humanos, incluyendo 26 casos fatales (Sar, Ferrario & Reguera, 2002). En Colombia, los eventos de FAN han sido reportados tanto para el Caribe como para el Pacífico desde hace más de 40 años. Sin embargo, es poco el conocimiento que se tiene sobre este tipo de fenómenos y sus amenazas a diferentes escalas. En términos generales, las poblaciones costeras colombianas se encuentran expuestas en un alto grado, a ser afectadas por un evento de este tipo (UNAL, 2015). Según la FAO, en las últimas dos décadas las intoxicaciones marinas se han multiplicado en frecuencia, intensidad y distribución geográfica, representando una amenaza directa a la seguridad alimentaria y nutricional y los sectores público y turístico de la región (Mancera, Celis & Gavio, 2015).

En Colombia, la información base para la identificación de las FAN se obtiene mediante campañas oceanográficas que consisten en la recolección de muestras rutinarias de los parámetros de calidad del agua (Sar, Ferrario & Reguera, 2002), que carecen de certeza sobre las potenciales áreas con proliferaciones, debido a que este tipo de monitoreo no permite conocer la dinámica de su distribución espacio-temporal (Lunetta et al., 2015; Trescott, 2012; Yu-Hwan & Palanisamy, 2006). Por lo que resulta necesario implementar herramientas tecnológicas actuales como método alternativo para obtener información de los factores que

inciden en las floraciones. De ahí que este estudio se enfoca en dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cómo monitorear los factores físico-químicos que inciden en la proliferación de las FAN con un alto grado de precisión, amplia cobertura espacial, optimización de tiempo y de bajo costo?

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Monitorear la distribución espacio-temporal de los factores físico-químicos que inciden en las floraciones de algas nocivas en el mar Caribe Colombiano, usando imágenes satelitales.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el comportamiento de las variables físico-químicas óptimas para la proliferación de FAN, a lo largo de la zona de estudio.
- Identificar la relación entre los parámetros físico-químicos (clorofila-a, temperatura superficial del mar, nitratos y salinidad) y la distribución espacio-temporal de algas nocivas.
- Evaluar la precisión de los datos obtenidos con la metodología propuesta con mediciones en campo.

## **5. JUSTIFICACIÓN**

En Colombia los eventos de mortalidad de organismos acuáticos e intoxicaciones alimentarias de origen marino causados por proliferación masiva de algas nocivas son frecuentes; sin embargo, las estrategias de prevención, control y mitigación de este fenómeno, tienen un alcance limitado respecto a su variabilidad espacial y por la falta de recursos para disponer de un plan de gestión frente a esta amenaza (Mancera, Gavio & Arencibia, 2009).

Una visión regional de la zona que permita abordar esta problemática es obtenida a través de las imágenes satelitales ya que facilitan el estudio de fenómenos que no pueden ser detectados constantemente con observaciones en el sitio. En la actualidad, la teledetección se está usando cada vez más como una herramienta para el seguimiento de estos eventos en aguas cercanas a la costa por ser insumos de libre disponibilidad que suministran información de superficies

amplias en tiempo real (Matthew, Bernard & Winter, 2010; Kahru, Savchuk & Elmgren, 2007; Simis, Peters & Gons, 2005; Alikas, Kangro & Reinart, 2010; Wynne, et al., 2010; Gómez, Alonso & García, 2011; Matthews, Bernard & Robertson, 2012; Duan, Ma & Hu, 2012).

Los productos de este estudio son mapas de distribución espacio-temporal de los factores relacionados con las FAN, tales como: temperatura superficial del mar, la salinidad, la clorofila-a y nitrógeno, de tal manera que, al superponer las variables, se pueda estudiar la relación directa que existe entre las variables en cuestión y el fenómeno de algas nocivas en las costas del Mar Caribe Colombiano. A partir de estos productos, puede obtenerse una serie de beneficios que, como principal prioridad, corresponden al diseño e implementación de un programa de monitoreo que se convierta en alerta temprana, permitiendo ayudar a los administradores y tomadores de decisiones al ajustar estrategias efectivas, verificables y responsables para el control de algas en respuesta al cambio climático futuro y escenarios de impacto humano.

Además, el uso de información de otro tipo de fuente, como las imágenes satelitales, posibilita la obtención de mapas específicos de las variables físico-químicas que pueden servir de insumos independientes para otro tipo de estudios en el que intervengan los parámetros y que no necesariamente estén ligados a la detección de algas nocivas.

Entre las entidades que estarían interesadas en estos productos se encuentran el Instituto Nacional de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), que se encarga de formular políticas, tomar decisiones y elaborar planes o proyectos que conducen al desarrollo del ecosistema oceánico y marino; y La Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), entidad encargada de ejecutar políticas pesqueras y de acuicultura. También están La Comisión Colombiana del Océano y el grupo HAB-ANCA (Algas Nocivas del Caribe) de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO, quienes actualmente trabajan en conjunto para posicionar el tema de FAN a nivel nacional y avanzar hacia la implementación de acciones enfocadas a la gestión del riesgo frente a las amenazas generadas por estos organismos.

## **6. MARCO TEÓRICO**

### **6.1. MARCO CONCEPTUAL**

En esta sección se hace una revisión de un conjunto de conceptos básicos para la comprensión del estudio.

#### **6.1.1. Eutrofización**

Es un proceso natural que consiste en el aumento de nutrientes en cuerpos de agua, producido por actividades del hombre, que incrementa las floraciones de algas y fitoplancton. Durante este proceso, estos organismos se ocupan de retener grandes cantidades de oxígeno en el agua deteriorando su calidad.

#### 6.1.2. FAN

Las algas son organismos acuáticos que viven en agua dulce o marina, realizan fotosíntesis para obtener oxígeno y se pueden clasificar en no nocivas y nocivas. Las algas nocivas poseen características tóxicas y se reconocen tres clases: diatomeas, dinoflagelados y las cianobacterias. Las FAN (floraciones de algas nocivas) son fenómenos naturales producto del crecimiento de microalgas en grandes cantidades, que alteran el color del agua y pueden ocasionar muerte en los seres humanos, la flora y fauna marina.

#### 6.1.3. Karenia Brevis

Es una especie de alga nociva que está contenida dentro del grupo de los dinoflagelados y es causante de las mareas rojas. Provoca altos índices de mortandad de peces y es el origen de intoxicaciones humanas por consumo de moluscos bivalvos. La ubicación geográfica por excelencia de esta especie es en las costas de Florida y el Golfo de México, pero ya ha aparecido en otras partes del mundo, así como especies cercanas con características muy similares.

#### 6.1.4. Campañas oceanográficas

Es un método de investigación que consiste en la observación y muestreo de datos oceanográficos, llevada a cabo en jornadas correspondientes a casi todo un día de captura de datos. La recolección de muestras se hace a mar abierto a bordo de buques.

#### 6.1.5. Clorofila-a (Chl-a)

Es un pigmento que absorbe la luz solar que permite realizar el proceso de fotosíntesis de las plantas y algas. Refleja la parte media del espectro, la correspondiente al color verde que se encuentra entre los 500 y 600nm. Al estimar las concentraciones de clorofila-a de un hábitat marino, se pueden conocer de forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, por lo que esta variable es un buen indicador de presencia de algas nocivas.

#### 6.1.7. Temperatura Superficial del Mar

La temperatura superficial del mar (SST) hace referencia a la capa más cercana a la superficie marina y que, por ende, se encuentra en contacto directo y constante con la atmósfera. Refleja la región espectral del infrarrojo térmico entre los 8 y 15 micrómetros. Durante el desarrollo de las algas una variable muy influyente es la SST, dado que contribuye en sus procesos metabólicos y reproductores.

#### 6.1.8. Concentraciones de nitratos

El nitrato es un compuesto inorgánico con presencia natural en aguas superficiales o subterráneas producto de ciclo natural del nitrógeno, no obstante, en algunas zonas su concentración se eleva considerablemente consecuencia del excesivo uso de abonos nitrogenados en actividades antrópicas y se propaga en los mares principalmente por el arrastre de los ríos hasta la desembocadura. Los nitratos son una forma de nitrógeno que todas las plantas necesitan para crecer, incluyendo las algas. En medios acuáticos con mucha

presencia de nitrógeno debido a altos niveles de nitrato el alga que tiende a aparecer es marrón o rojiza, por lo que las concentraciones de esta variable serán consideradas en este trabajo.

#### 6.1.9. Salinidad

Corresponde al contenido salino en los suelos o en el agua. Esta variable tiene como característica principal que en medios marinos suele presentar poca variabilidad espacial; sin embargo, una variación notable en el medio puede suponer un indicador negativo para la presencia de algas nocivas por lo que es necesario considerar la variable para este estudio.

### 6.2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se hará una breve lista de los algoritmos y modelos requeridos para la ejecución de la metodología empleada en el estudio.

#### 6.2.1. Estimación de Clorofila-a (Chl-a)

Para la extracción de valores de Clorofila-a de las imágenes satelitales se usaron los algoritmos OC4V4 (Ecuación 1) tomado de O'Reilly et al., (2000), OC3M (Ecuación 3) y OC2M (Ecuación 5), pertenecientes a la familia de algoritmos OC, para los cuales es necesario calcular el factor R de cada algoritmo a través de las Ecuaciones (2), (4) y (6) respectivamente. (O'Reilly et al., 1998):

$$Chl = 10^{0.366-3.067R+1.930R^2+0.649R^3-1.532R^4} \quad (1)$$

Donde R es el logaritmo en base 10 de la razón entre las reflectancias de las bandas azul y verde:

$$R = \log_{10} \left\{ \frac{R(490)}{R(555)} \right\} \quad (2)$$

Donde,  $R_{rs}(490)$  y  $R_{rs}(555)$  corresponden a las bandas 10 y 12 respectivamente del sensor MODIS.

El algoritmo OC3M (Bastidas, Rodríguez & Ortiz, 2006), perteneciente a la familia OC de algoritmos de recuperación de clorofila, posee ciertas variaciones puntuales en comparación al OC4V4, dentro de lo que se puede resaltar el uso de la banda 9 en lugar de la banda 10 (Ecuación 3 y 4):

$$Chl = 10^{0.283-2.753R+1.457R^2+0.659R^3-1.403R^4} \quad (3)$$

Donde R es el logaritmo en base 10 de la razón entre las reflectancias de las bandas 9 y 12 de MODIS:

$$R = \log_{10} \left\{ \frac{R(443)}{R(555)} \right\} \quad (4)$$

Donde,  $R_{rs}$  (443) y  $R_{rs}$  (555) corresponden a las bandas 9 y 12 respectivamente del sensor MODIS.

El algoritmo OC2M presentado en este estudio es el usado por la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) para calcular el producto de MODIS correspondiente a la clorofila OC2 (Ecuación 5 y 6)

$$chl = 10^{0.250 - 2.4752R + 1.4061R^2 - 2.8233R^3 - 0.5405R^4} \quad (5)$$

Donde R es el logaritmo en base 10 de la razón entre las reflectancias de las bandas azul y verde

$$R = \log_{10} \left\{ \frac{R(488)}{R(547)} \right\} \quad (6)$$

Donde,  $R_{rs}$  (448) y  $R_{rs}$  (547) corresponden a las bandas 10 y 12 respectivamente del sensor MODIS.

#### 6.2.2. Estimación de Temperatura Superficial del Mar (SST)

La fórmula empleada para el cálculo sistemático de la Temperatura Superficial del Mar, (SST) se puede aplicar con la Ecuación (7), correspondiente a un algoritmo operativo que usa las técnicas de split-window y cocientes de radiancias (Kharraz & Sobrino, 2003):

$$TSM = T_{31} + a_0(T_{31} - T_{32}) + a_1(T_{31} - T_{32})^2 + a_2 \quad (7)$$

Donde,  $a_0=2.75$ ,  $a_1=0.67$ ,  $a_2=0.36$  y las temperaturas de brillo en grados Kelvin correspondientes a las bandas 31 y 32 del sensor MODIS corresponden a  $T_{31}$  y  $T_{32}$  respectivamente.

#### 6.2.3. Estimación de Concentraciones de Nitratos

Para estimar las concentraciones de nitratos a lo largo de la zona de estudio, se emplea el modelo descrito en la Ecuación (8), aplicado sobre la imagen de recuperación de Temperatura Superficial del Mar procesadas anteriormente:

$$NO_3 = 4.575e^{-0.1761T} \quad (8)$$

Donde  $T$  es la temperatura superficial del mar. La variable obtenida se mide en  $\mu\text{mol/L}$ , micromol por litro (Yin et al., 2014).

Además, se usó también el algoritmo de recuperación de nitratos en la superficie del mar (Ecuación 9) usado por Sarangi et al. (2011), en el que se estima la variable en función de la clorofila y la temperatura superficial del mar:

$$NO_3 = 497.057 + (-37.3578 * T) + (0.907864 * Chl) + (0.701177 * T^2) + (1.94781 * C^2) \quad (9)$$

#### 6.2.4. Estimación de la Salinidad

Para la recuperación de esta variable se empleó el modelo propuesto por Binding & Bowers (2003), que usa el cálculo de la concentración de la sustancia amarilla CDOM presente en los hábitats marinos aprovechando su estrecha relación con el contenido de sal disuelta que se puede hallar en ellos (Ecuación 10 y 11):

$$Salinidad = (-11.5 * CDOM) + 35.6 \quad (10)$$

Donde

$$CDOM = \left( 0.635 * \frac{Rrs(670)}{Rrs(490)} \right) + 0.013 \quad (11)$$

En la que  $Rrs(670)$  y  $Rrs(490)$  corresponden a las bandas 13 y 10 del sensor MODIS respectivamente.

También se empleó el modelo óptico propuesto por Keith, Lunetta & Schaeffer (2016), para recuperar la salinidad del mar con base en coeficientes de absorción de CDOM (Ecuación 12 y 13):

$$Salinidad = 33.686 * 10^{-0.374 * aCDOM} \quad (12)$$

Donde:

$$aCDOM = \left( 1.3307 * \frac{Rrs(665)}{Rrs(489)} \right) - 0.1246 \quad (13)$$

#### 6.2.5. Recuperación de Karenia Brevis

Para obtener la distribución espacial de las floraciones de Karenia Brevis debe usarse el algoritmo de clasificación de K. Brevis llamado KBBI, expresado en la Ecuación (14) (Amin et al., 2009). El algoritmo funciona bajo el principio de que la retrodispersión total de partículas de las floraciones de Karenia Brevis es distinta a la de otros tipos de floraciones, por lo que, al aplicar el modelo, se tiene que los valores más altos corresponden a floraciones de Karenia y los bajos no.

$$KBBI = \frac{[nL_w(678) - nL_w(667)]}{[nL_w(678) + nL_w(667)]} \quad (14)$$

Donde:

$$nL_w(678) = Rrs(678) * 148.052 \quad (15)$$

$$nL_w(667) = Rrs(667) * 152.255 \quad (16)$$

En donde a su vez,  $Rrs(678)$  es igual a la reflectancia de la banda 14 de MODIS y  $Rrs(667)$  equivale a la banda 13 del mismo sensor.

Se considera por el mismo autor que el KBBI debe ser estimado luego de obtener el índice RBD, que corresponde a una detección de florecimientos algales de cualquier tipo usando la Ecuación (17):

$$RBD = nL_w(678) - nL_w(667) \quad (17)$$

### 6.3. MARCO REFERENCIAL

Las algas son organismos acuáticos que viven en agua dulce o marina, realizan fotosíntesis para obtener oxígeno y se pueden clasificar en no nocivas y nocivas. Las algas nocivas poseen características tóxicas y se reconocen tres clases: diatomeas, dinoflagelados y las cianobacterias (Aké, 2010). Las FAN son fenómenos naturales que se propagan explosivamente cuando se presentan condiciones ambientales favorables para su desarrollo, tales como las variaciones de temperatura, salinidad y aportes de nutrientes de los ríos producto de actividades antrópicas. También suelen producir cambios en la coloración de las aguas desde tonalidades amarillentas a rojos intensos, dependiendo de la cantidad y la especie que prolifere, por lo que las FAN son denominadas comúnmente como “mareas rojas”. El inicio, desarrollo y desaparición de una FAN depende de la interacción de múltiples factores biológicos, físicos y químicos, cuyos mecanismos de acción pueden ser diferentes en espacio y tiempo (Orduña, 2012).

La aplicación de sensores remotos ha brindado una visión de gran alcance para el estudio de los ecosistemas marinos y de agua dulce. Desde 1970, los científicos utilizan la información satelital para detectar las firmas ópticas de las aguas superficiales (Ekstrand, 1992; O'Reilly et al., 1998). Las mediciones por satélite son útiles especialmente para la detección del fitoplancton por las características espectrales de los pigmentos fotosintéticos que se correlacionan altamente con las algas (Richardson, 1996). A medida que la frecuencia e intensidad de las floraciones de algas nocivas (FAN) ha aumentado en todo el mundo en las últimas décadas (Sellner, Doucette & Kirkpatrick, 2003), la utilización de imágenes se ha convertido en una alternativa para los programas de vigilancia de las FAN porque proporcionan información sobre grandes áreas con resoluciones inalcanzables por el muestreo de campo (Park & Ruddick, 2007); además, a un costo relativamente bajo, se puede estimar la distribución de las algas nocivas, incluso en zonas que podrían ser inaccesibles (Trescott, 2012).

Con el fin de aumentar el conocimiento de la aparición y extensión de la eutrofización y las FAN, la teledetección se está utilizando cada vez más como una herramienta para el seguimiento de estos fenómenos en aguas interiores y próximos a las costas (Matthews, Bernar & Winter, 2010). Los parámetros comúnmente detectados incluyen las concentraciones de chl-a (Simis, Peters & Gons, 2005, Kutser et al, 2006 y Moses et al,

2009); las concentraciones de sólidos en suspensión totales (TSS) (Onderka & Pekarova, 2008); indicadores de la claridad del agua, tales como la turbidez y la profundidad del disco de Secchi (ZSD) (Giardino et al, 2001 y Chen, Hu & Muller-Karger, 2007); la temperatura superficial del mar (Mooij et al., 2007 y Johnk et al., 2008) y concentraciones de nutrientes como: el nitrato y el fosfato (Molinet et al., 2003, Fraga et al., 2004, Akselman, Reguera & Lion, 2008, Bravo et al., 2008, Puigserver et al., 2009, Bravo et al., 2010a, Bravo et al., 2010b, Escalera et al., 2010, Fraga et al., 2011, Sierra-Beltrán, et al., 2012).

La facilidad de acceso, unida a la alta frecuencia temporal y bajo coste han facilitado que el uso de imágenes de satélite haya crecido de forma considerable en los últimos años en muchos campos científicos (López et al., 2011), convirtiéndose en una herramienta estratégica para el seguimiento del cambio climático a nivel local y global. Sin embargo, para aplicar la información estimada por satélite a modelos globales, es necesario evaluar las incertidumbres de los datos comparando las estimaciones con mediciones en campo, cuya relación está fuertemente influenciada por el estado del mar, las condiciones meteorológicas y la oceanografía local (Donlon et al. 2002; Smale & Wernberg, 2009).

Varios satélites en diversos niveles de resolución espacial, espectral y temporal se han utilizado para la medición de la propagación de algas como: OCM (Dash et al., 2011), Landsat (Vincent, et al. 2004), AVHRR (Kahru et al., 2007), MODIS (Becker, et al. 2009; Wynne et al, 2013), y MERIS (Binding, et al. 2011; Matthews, Bernard & Winter, 2010; Ruiz-Verdú et al, 2008; Wynne et al., 2008). El escáner de color de las zonas costeras de la NASA (CZCS), fue el primer sensor diseñado específicamente para observar la productividad biológica en los océanos del mundo, (McClain et al., 1998). Con solo tres bandas en el espectro visible, se detectó concentraciones de clorofila mediante el algoritmo Global Process-switching (GPs). Gitelson et al. (1996) utilizó combinaciones de bandas para detectar la clorofila en el sureste del Mediterráneo, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.88 entre lo medido y la concentración de clorofila obtenida con imágenes CZCS. Posteriormente, se desarrollaron algoritmos del color del océano (OC) para imágenes SeaWiFS y más tarde para MODIS. Hyde et al. (2007; 2008) modificó el modelo OC4 para determinar la producción de algas, usando imágenes SeaWiFS y datos de campo en la bahía de Massachusetts y encontró que se sobreestiman las concentraciones de Chl-a debido a la baja resolución espacial del satélite.

La estimación de concentraciones de Chl-a es una de las aplicaciones más tradicionales y significativas de la teledetección, para la evaluación de los ecosistemas acuáticos y el seguimiento de la eutrofización (Matthews, Duncan & Davison, 2001; Cauwer, et al. 2004; Zimba & Gitelson, 2006; Schalles, 2006; Ibrahim, Mabuchi & Murakami, 2009). Recientemente, las imágenes de satélite con alta resolución espectral que abarcan el espectro visible a bandas del infrarrojo térmico se han utilizado y las grandes dificultades se asocian a las correcciones atmosféricas y a la materia orgánica disuelta (Ha, Koike, & Nhuan, 2013). Morel & Prieur, 1977 propusieron un algoritmo sensible a la Chl-a en aguas oceánicas; sin embargo, solo detecta concentraciones mayores a  $30\text{mg/m}^3$ . Por lo anterior, O'Reilly et al. (1998, 2000) desarrolló el algoritmo OC3M que es el modelo más utilizado mundialmente para la estimación de Chl-a.

La estimación de la SST por MODIS está basada en la información captada por el sensor en las regiones del infrarrojo medio (Bandas 20, 22, 23) y del infrarrojo térmico (Bandas 31 y

32). Las bandas situadas en el infrarrojo medio muestran una alta sensibilidad y están ubicadas en una ventana del espectro donde la influencia de la columna de vapor de agua es mínima. Para el cálculo de la Temperatura Superficial del Mar de manera sistemática se puede aplicar por un lado, el algoritmo MCSST (Multichannel Sea Surface Temperature), y por otro lado, se puede aplicar el algoritmo NLSST (NonLinear Sea Surface Temperature), que ofrecen adecuadas correlaciones entre las estimaciones por satélite y datos in situ (Brown & Minnett, 1999, Siegel, et al. 2006, Reinart & Reinhold, 2008, Crosman & Horel, 2009,) que son utilizados para recuperar la SST en los productos MODIS. Sin embargo, un algoritmo perteneciente a la familia de Split-window, es usado para extraer la información de SST a partir de datos satelitales. Este modelo permite obtener estimaciones de SST con errores inferiores a 0.5K a partir de datos MODIS (Kharraz & Sobrino, 2003).

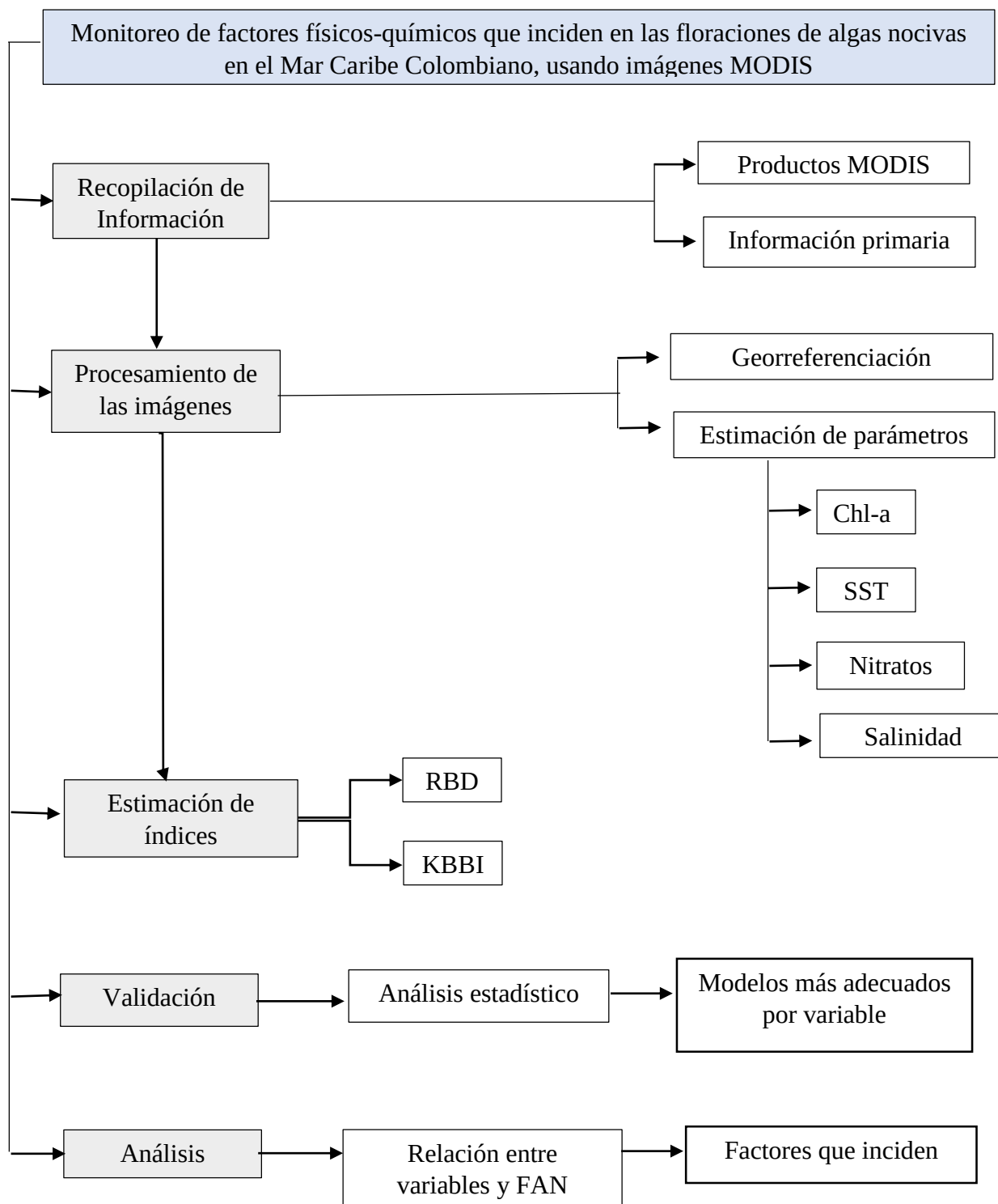
Las actividades antrópicas generan desbalance de nutrientes en el medio marino, como pueden ser los nitratos y fosfatos, que alteran condiciones que favorecen la incidencia de FAN (Muciño, 2010). Se han realizado muchos estudios para mapear las variaciones regionales o globales de la concentración de nitratos utilizando la relación inversa entre el nitrato y la temperatura superficial del mar (relación N-SST) en el océano (Strickland, 1970; Suess & Thiede, 1983; Dugdale et al. 1989; Babin, Therriault & Legendre, 1991; Switzer, Kamykowski & Zentara, 2003). Aunque los algoritmos empíricos derivados de la relación N-SST se han utilizado durante mucho tiempo, su aplicabilidad se ha restringido a ciertos períodos y áreas. La función de potencia de la relación N-T se usa para estimar rápidamente la concentración de nitrato de la superficie del mar, en combinación con los datos de temperatura superficial del mar obtenidos por teledetección (Yin, et al. 2014), así como la relación encontrada entre la concentración de nitratos y las variaciones de temperatura y clorofila-a en un medio marino, establecida por Sarangi et al., (2011).

La condición de la calidad del agua ha sido tradicionalmente evaluada utilizando una serie de indicadores que se relacionan directamente con el estrés de un ecosistema o pueden servir como indicador del estrés. La salinidad determina la densidad del agua de mar y gobierna los procesos biológicos, químicos y físicos que determinan los tipos y localizaciones de plantas y animales en los ecosistemas estuarinos y costeros. Por esto, toma importancia la estimación de la salinidad que se efectúa con el modelo óptico de recuperación de la variable propuesto por Keith, Lunetta & Schaeffer, (2016).

## **7. METODOLOGÍA**

En la Figura 1 se presenta el diseño metodológico que se ha adoptado en el estudio, para dar cumplimiento a los objetivos planteados.

Figura 1. Esquema metodológico



## 7.1. ÁREA DE ESTUDIO

La Figura 2 muestra el área de estudio que corresponde al Mar Caribe bajo jurisdicción colombiana, enmarcado dentro de las coordenadas geográficas 9°N-13°N y 71°W-78°W, sobre la costa de los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Atlántico, Magdalena y Guajira. Esta zona se elige debido a la constante frecuencia de FAN principalmente en la Bahía de Cartagena, Ciénaga Grande de Santa Marta y la isla de San Andrés (Mancera & Vidal 1994; Mancera & Vidal, 2007, Mancera, Gavio & Arencibia, 2009).

Figura 2. Área de estudio



De acuerdo con el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH, 2016), en la zona de estudio se presentan cuatro periodos climáticos durante el año, la época seca o época de verano (diciembre a marzo), dos épocas húmedas o épocas de invierno (abril a primera quincena de junio y agosto a noviembre) y la época de transición (segunda quincena del mes de mayo a julio).

Según el Informe técnico de REDCAM (2014), los resultados de calidad de aguas en las estaciones marino-costeras del Caribe mostraron que la salinidad durante la época lluviosa 2013 y seca 2014 fluctuó entre 0 y 64,5; la temperatura superficial para las épocas lluviosa de 2013 y seca de 2014 en promedio fue de  $29,5 \pm 2,4$  °C. Las concentraciones de Nitratos ( $\text{NO}_3$ ) fluctuaron entre 0,4 y 5.270  $\mu\text{g/L}$ .

## 7.2. MATERIALES

### 7.2.1. Imágenes satelitales

Para el desarrollo de la metodología se usaron imágenes MODIS MYD09 y MYD03, con resolución espacial de 1km con el propósito de cubrir la totalidad del área de estudio. Se descargaron 295 imágenes para el periodo 2013-2014, compuestas cada una por las bandas 1, 9, 10, 12, 13, 14, 31 y 32, lo que equivale a un total de 2360 bandas espectrales.

Las imágenes MODIS se obtuvieron de la página web <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/> mediante el programa Wget, el cual es una herramienta libre que permite descargar contenido desde servidores web de una forma simple.

### 7.2.2. Datos de campo

Se obtuvieron datos de campo para las variables de clorofila-a, salinidad, nitratos y temperatura superficial del mar a partir de las estaciones de tres proyectos del Sistema de Información Global de los Océanos-Colombia, a través de la página web (<http://cambioclimatico.invemar.org.co/en/modulo-de-informacion>).

Estos datos se usaron como fuente de validación de variables estimadas sobre las imágenes de percepción remota.

## 7.3. MÉTODOS

### 7.3.1. PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Debido a que las imágenes MODIS MYD09 no tenían asociado un sistema de referencia fue necesario realizar un proceso de georreferenciación basado en la herramienta MRTSwath en el programa RStudio versión 3.3.2, para ello se requirió utilizar los productos MYD03 que contienen las coordenadas geográficas, el cenit solar y del satélite y los ángulos acimutales permitiendo georeferenciar los diferentes productos de MODIS. Se debe tener en cuenta que para los dos tipos de productos debe coincidir el año, el día Juliano y la hora de toma del sensor. Finalmente, se realiza el recorte de las imágenes usando el programa Python.

La herramienta MRTSwath permite transformar los productos MODIS de nivel 2 con formato HDF-EOS a una imagen con grilla uniforme debidamente georeferenciada de acuerdo con los parámetros de proyección y remuestreo especificados por el usuario.

### 7.3.2. PROCESAMIENTO Y ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS

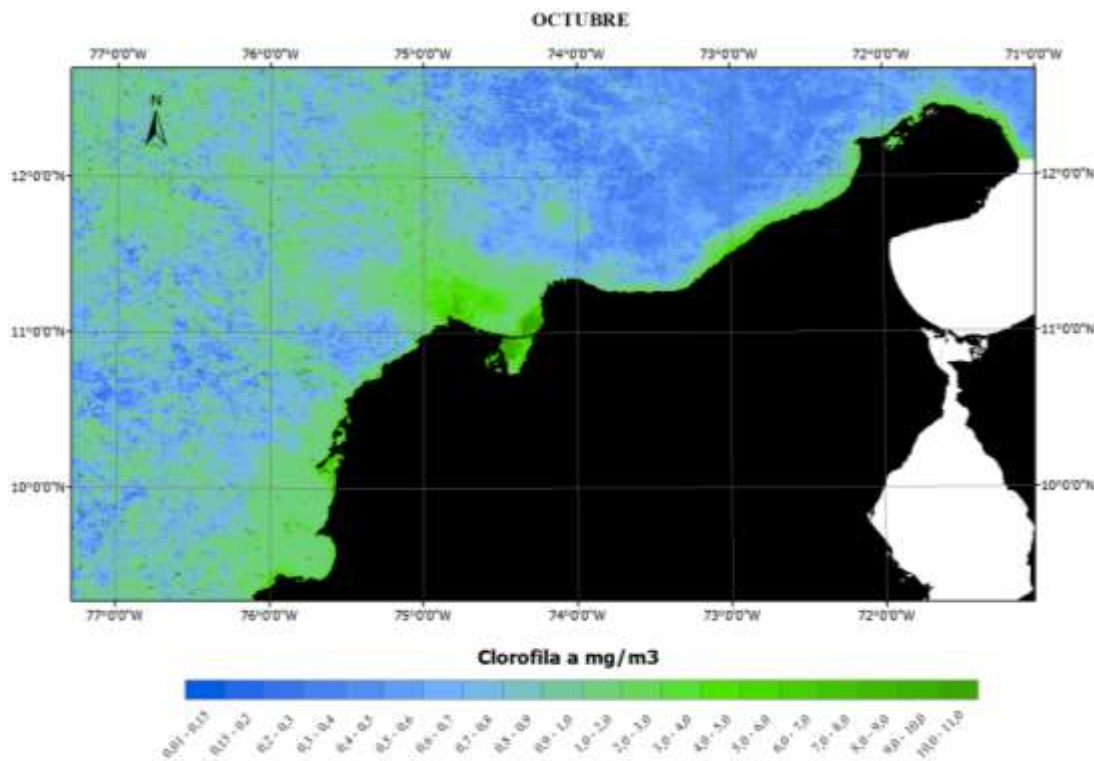
Para la estimación de los parámetros que inciden en la proliferación de algas nocivas, se emplearon varios algoritmos por cada variable con el propósito de conocer cuál es el que presenta mejor ajuste con respecto a los datos de campo.

#### 7.3.2.1. Estimación de la Clorofila-a

Debido a que la concentración de clorofila-a se utiliza para estimar en forma indirecta el fitoplancton, que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas (Gregor & Maršálek, 2004) y un parámetro básico a determinar en un programa de seguimiento de fitoplancton nocivo (Sar, Ferrario, & Reguera, 2002), es de suma importancia conocer la distribución espacio-temporal de la variable en la zona de estudio, para así determinar su relación con las FAN.

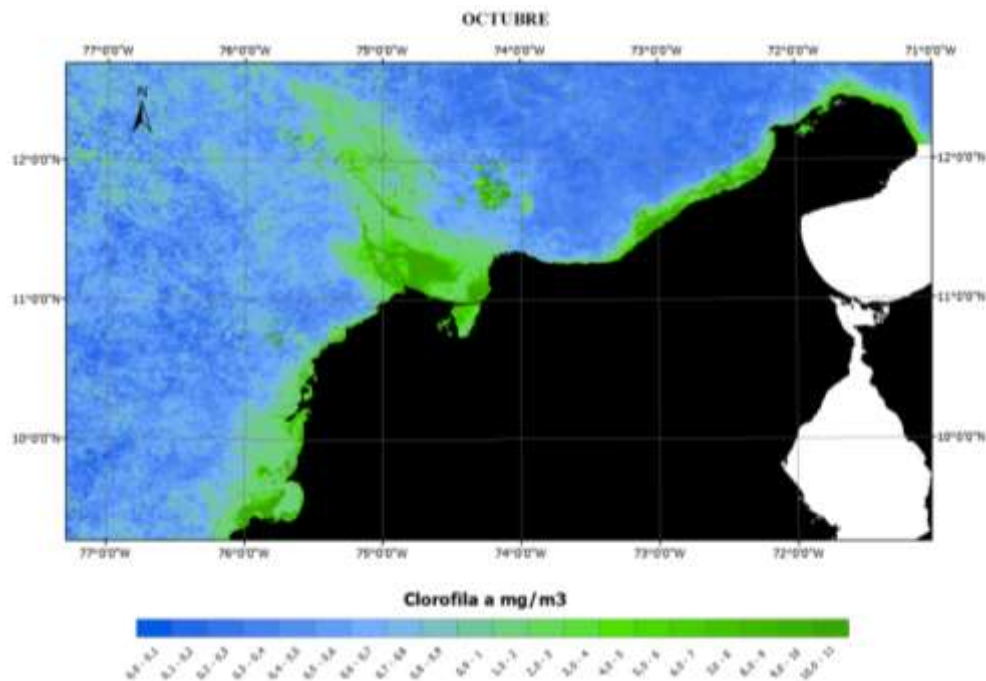
Para la estimación de la Clorofila-a en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) se utilizaron tres modelos matemáticos pertenecientes a la familia de los algoritmos OC para el sensor MODIS. Estos algoritmos son el OC4V4 que se obtuvo mediante la Ecuación (1), el OC3M calculado a partir de la Ecuación (3) y el OC2M estimado por la expresión (5).

Figura 3. Estimación de la Clorofila-a mediante el algoritmo OC4V4 para el mes de octubre de 2014.



La Figura 3 muestra los valores de clorofila-a a partir del modelo OC4V4 en unidades  $\text{mg}/\text{m}^3$ , donde se observa que cerca de las costas se presentan los valores más altos. En la Figura 4 se puede observar que los valores de clorofila-a fluctúan entre 0,2 hasta  $11 \text{ mg}/\text{m}^3$ , calculados a partir del modelo OC3M.

Figura 4. Estimación de la Clorofila-a mediante el algoritmo OC3M para el mes de octubre de 2014



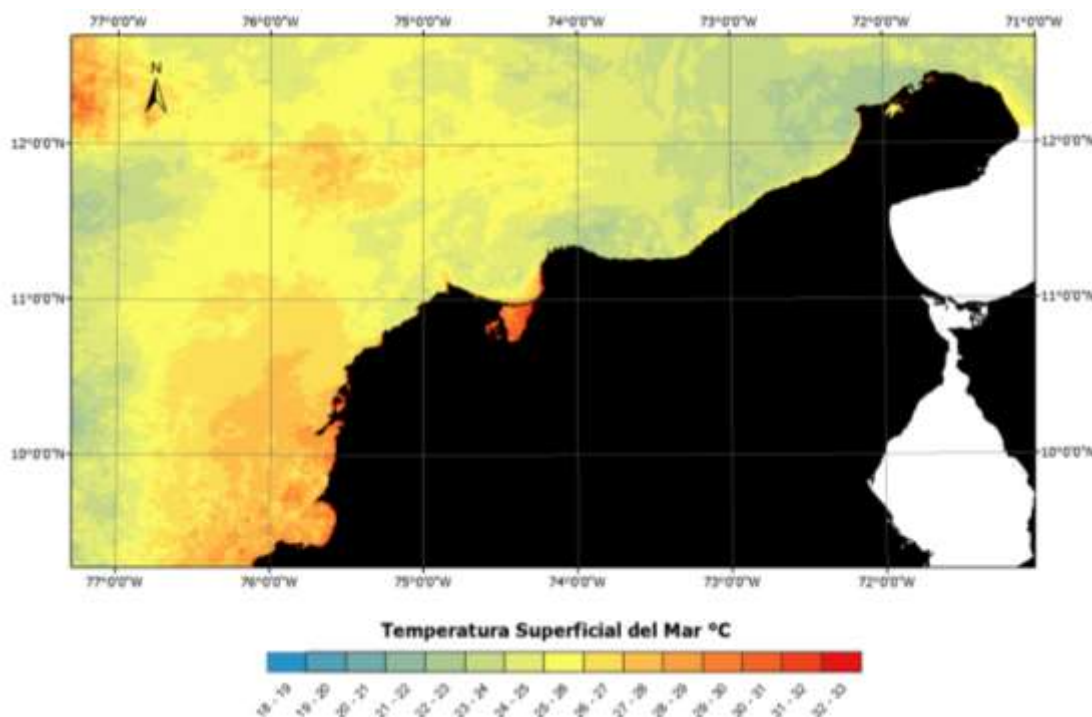
Al revisar los resultados obtenidos por los tres modelos matemáticos, se evidencia valores altos de clorofila-a estimados con el modelo OC3M en algunas regiones de la costa caribe, caso contrario ocurre con el modelo OC2M, la presencia de valores altos de clorofila-a es escasa y muy localizada en algunas regiones de la costa. El modelo OC4V4 acentúa la presencia de clorofila-a en las zonas costeras superando al modelo OC2M pero sin llegar a los resultados del modelo OC3M. La selección del modelo a aplicar se realizó con la comparación de los datos estimados con las imágenes MODIS y los datos de campo.

#### 7.3.2.2. Estimación de la Temperatura Superficial del Mar

Debido a que la temperatura superficial del mar tiene una fuerte influencia en el crecimiento y aparición de las FAN (Orduña, 2012), es necesario calcularlo para conocer su relación en la zona de estudio.

En el proceso de estimación de la Temperatura Superficial del Mar, se tiene en cuenta un algoritmo de la familia Split-Window descrito en la Ecuación (7), cuyo producto equivale a la imagen de SST procesada con valores en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Para aplicar el algoritmo fue necesario utilizar la temperatura de brillo del sensor contenida en las bandas 31 y 32. Al estimar la SST con el modelo, se recuperaron valores en grados  $^{\circ}\text{K}$  por lo que fue necesario realizar la conversión a grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) para facilitar el proceso de validación con los datos de campo.

Figura 6. Estimación de la SST para el mes de abril del año 2014.



En la Figura 6, se puede observar los valores de temperatura superficial del Mar en grados Celsius, los cuales fluctúan entre 20 hasta 32 °C. Se presentan mayores temperaturas en la Ciénaga Grande de Santa Marta y en la costa de los departamentos de Córdoba, Sucre y Bolívar.

#### 7.3.2.3. Estimación de Concentraciones de Nitratos

La contaminación del Mar por los excesos de nitratos y fósforo, proveniente de los fertilizantes agrícolas y de las aguas residuales urbanas e industriales, han provocado el aumento de la eutrofización lo que ha alterado de maneras específicas y diferentes las condiciones de crecimiento de las microalgas (Suárez & Guzmán, 1992); por esta razón, es necesario conocer el comportamiento de los nitratos para posteriormente analizar su relación con las FAN.

En la generación de imágenes de Concentración de nitratos sobre la superficie marina, se emplean dos algoritmos mediante las Ecuaciones (8) y (9). El primer modelo estima las concentraciones como una variable en función de la temperatura superficial del mar, mientras que, el segundo modelo añade los valores de clorofila-a.

En la Figura 7 se observan los valores de nitratos calculados a partir de la Ecuación (8), los cuales varían entre 1 a 11  $\mu\text{g/L}$ .

Figura 7. Estimación de Nitratos mediante la Ecuación (8) para el mes de abril de 2014

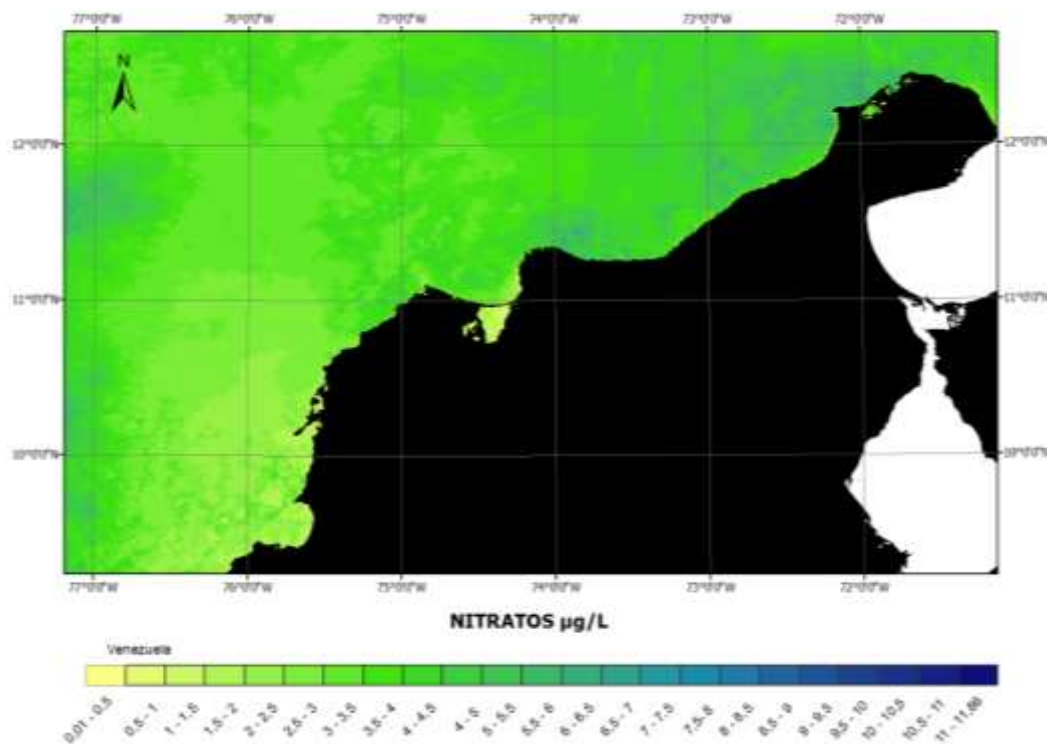
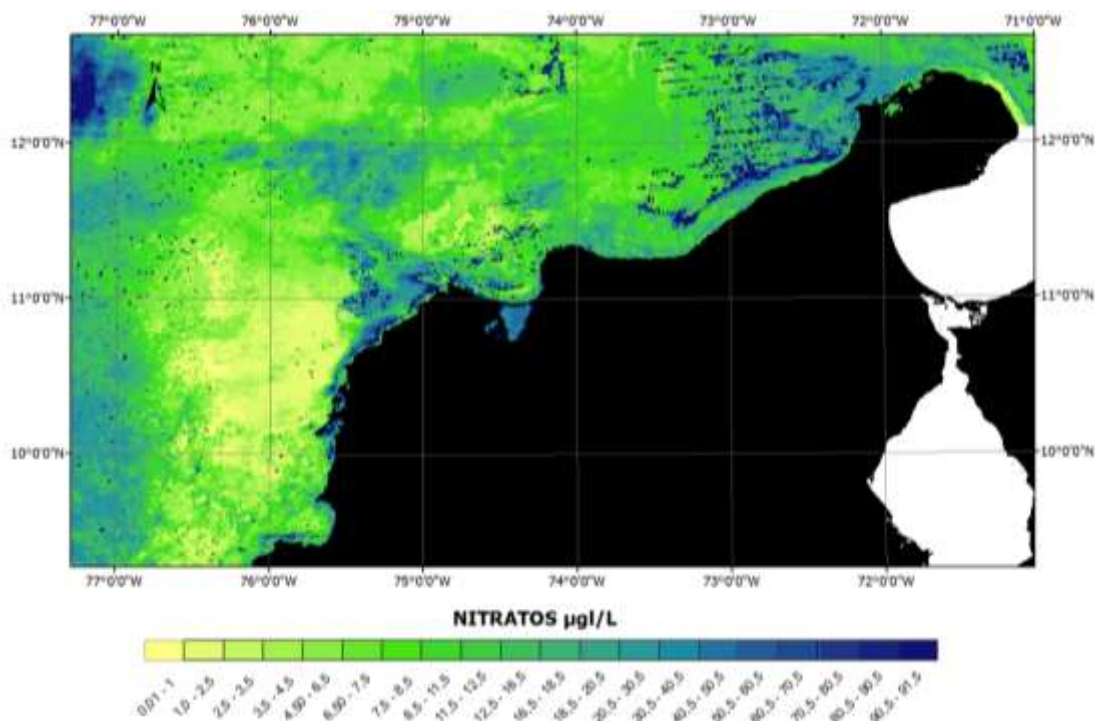


Figura 8. Estimación de Nitratos mediante la Ecuación (9) para el mes de abril de 2014



En la Figura 8 se observa que los valores de nitratos oscilan entre 2,5 y 90  $\mu\text{g/L}$ , presentando gran diferencia respecto al modelo (8). Para determinar cuál algoritmo estima de mejor manera la variable se recurre a los resultados de la validación con datos de campo.

#### 7.3.2.4. Estimación de la Salinidad

Debido a que la dinámica de la comunidad de los dinoflagelados se relaciona en gran medida por el grado de movimiento del agua y la salinidad (Bagnis et al., 1985; Hallegraeff, 2010), es importante determinar su distribución espacio-temporal para entender el papel que juega al momento de correlacionar las variables con las FAN.

Para la estimación de la Salinidad se utilizaron los modelos matemáticos (10) y (12), los cuales relacionan la absorción de la materia orgánica disuelta (aCDOM) presente en las aguas implementando los algoritmos (11) y (13), con la salinidad superficial de las costas. En la Figura 9 y 10, se puede observar que los valores de la variable fluctúan entre 25 y 35 PSU para ambos modelos, sin embargo, se decide utilizar el segundo modelo (Keith, Lunetta & Schaeffer, 2016) por presentar mayor concordancia con los datos de campo.

La salinidad se expresa sin unidad, de acuerdo con la escala práctica de salinidad PSS-78.

Figura 9. Estimación de la salinidad superficial del Mar a partir del modelo de (Binding & Bowers, 2003) para el mes de abril de 2013

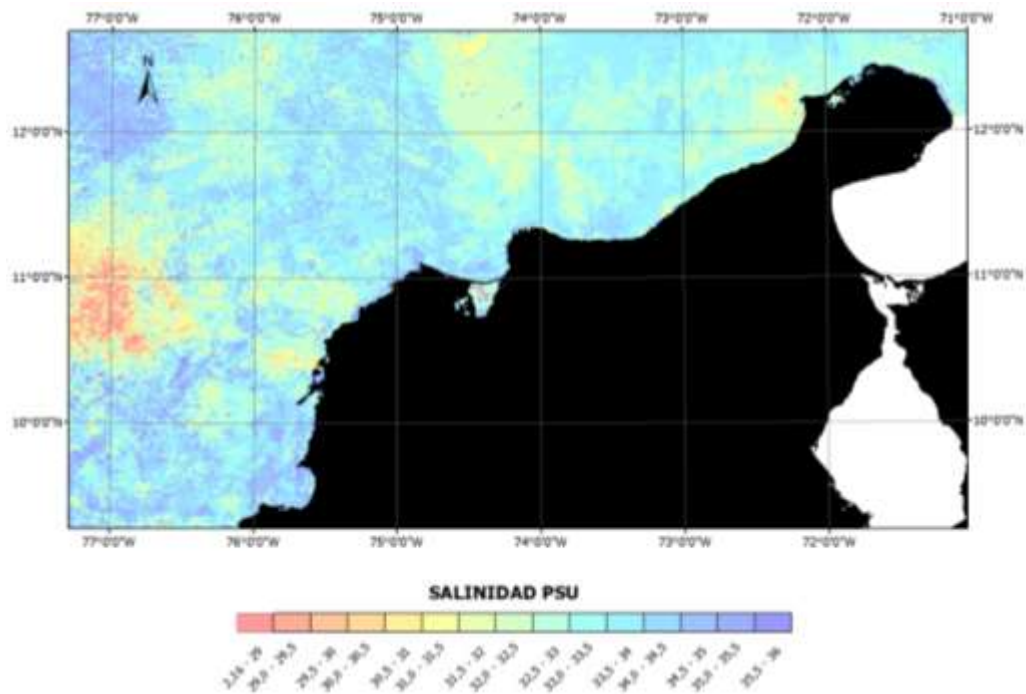
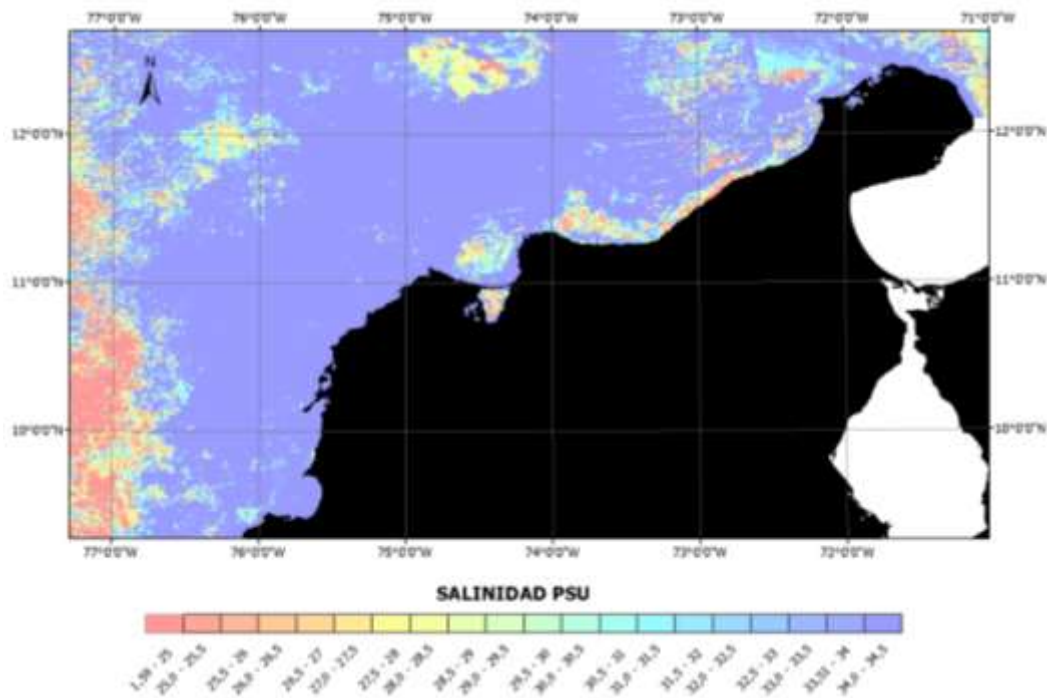


Figura 10. Estimación de la salinidad superficial del Mar mediante el modelo de (Keith, Lunetta & Schaeffer, 2016) para el mes de abril de 2014.



### 7.3.3. ESTIMACIÓN DE ÍNDICES.

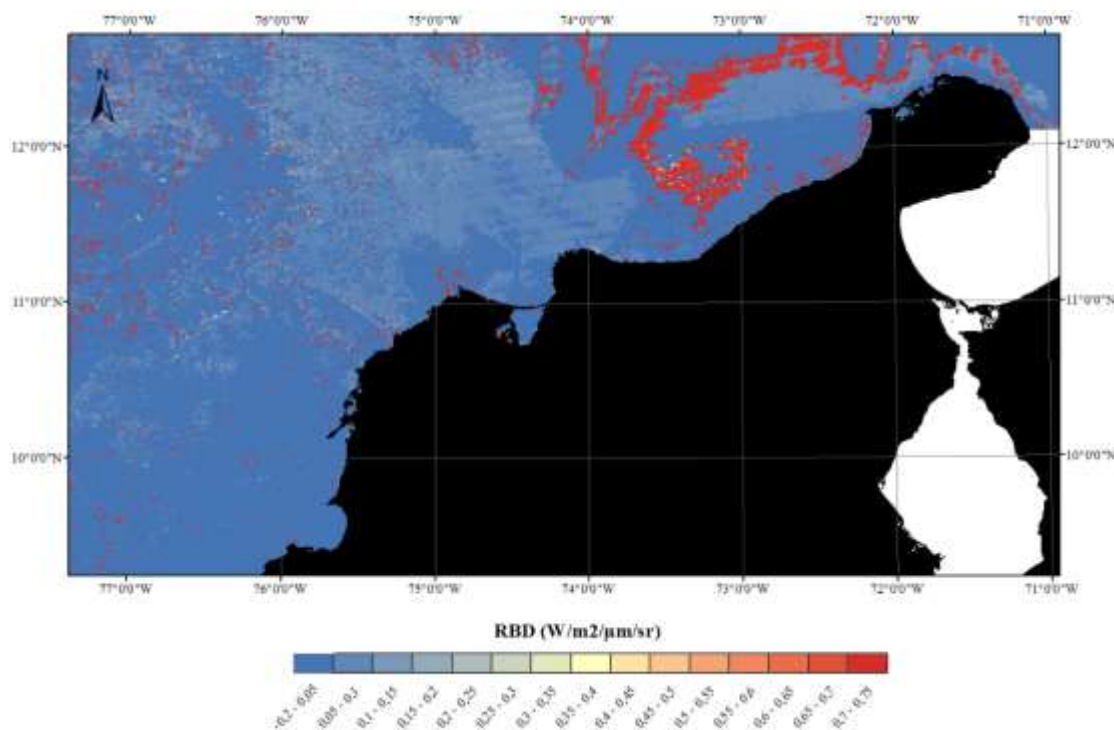
Debido a que las especies de *Karenia Brevis* se encuentran en todo el mundo (Brand, Campbell & Bresnan, 2012) y que también existe en Colombia según la agencia de Noticias UNAL (2015). Se estiman los índices RBD y KBBI, lo cual es fundamental para conocer la relación entre las FAN y las variables físico-químicas.

#### 7.5.1. Estimación del Índice RBD

Se estima el índice RBD usando la Ecuación (17) porque es especializado en detectar Floraciones de Algas Nocivas de la especie *Karenia Brevis*, sin embargo, también es capaz de detectar otras especies. Por lo que, es necesario implementar un algoritmo de discriminación para estimar las zonas con posible presencia de *Karenia Brevis*.

La Figura 11 muestra el comportamiento del índice RBD para el mes de abril de 2014, donde se observa que en la Ciénaga Grande de Santa Marta se presenta valores altos de posible presencia de FAN.

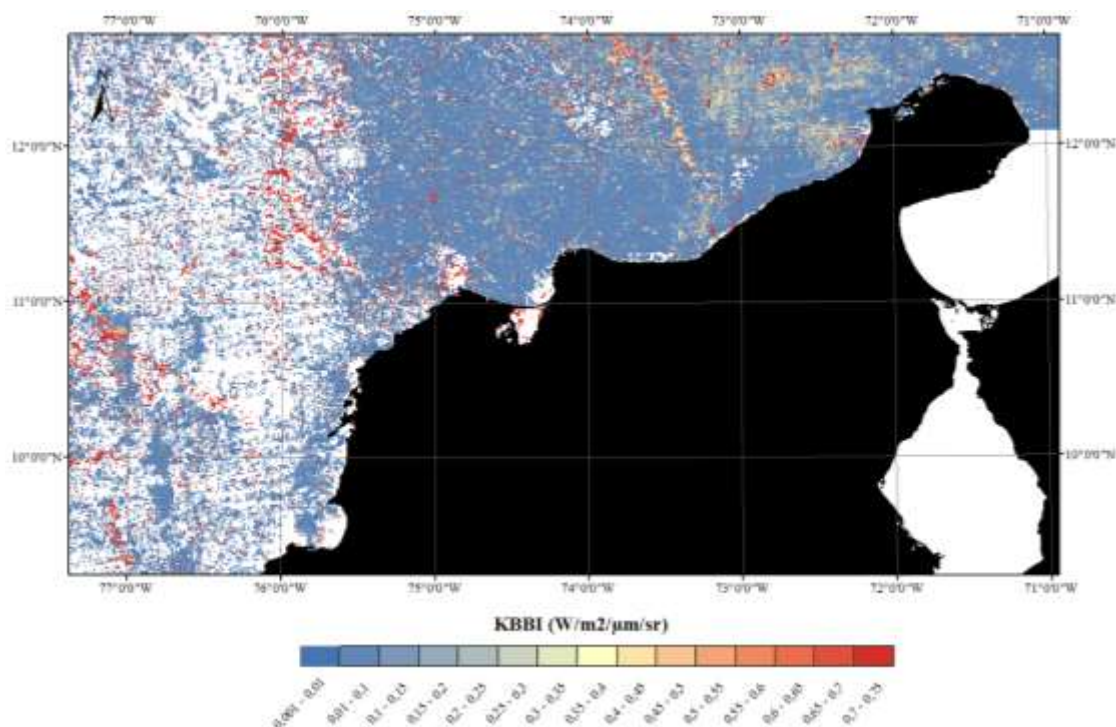
Figura 11. Estimación del índice RBD para el mes de junio del año 2013.



#### 7.5.2. Estimación del Índice KBBI

Se estima el índice KBBI mediante la Ecuación (14) ya que distingue los dinoflagelados de la especie *Karenia Brevis*, disminuyendo la sobreestimación de la variable. En la Figura 12, se observa el comportamiento del índice para el mes de septiembre de 2013.

Figura 12. Estimación del índice KBBI para el mes de septiembre año 2013



#### 7.3.4. MÁSCARA DE NUBES

La presencia de nubes es un obstáculo que afecta la transmisión de la energía entre objetos terrestres y los sensores de los satélites, lo que disminuye la precisión para estimar parámetros terrestres o atmosféricos. (Li, Lu & Yang, 2011; Kazantzidis, Eleftheratos & Zerefos, 2011; Kazantzidis et al., 2013). A causa de ello, en este trabajo se generó una máscara de nubes en cada una de las imágenes que componen la serie de tiempo de un mes, partiendo de identificar píxeles nubes, lo cual es sencillo al tener calculadas las variables debido a que el valor en presencia de nubes varía significativamente.

La máscara de nubes se deriva a partir de las imágenes de temperatura superficial del Mar debido a que es más simple determinar que pixel es nube por su valor, es decir, la temperatura de las nubes es mucho más baja que la del resto de la imagen en zonas tropicales. A los píxeles nubes se les atribuye un valor NoData para representar la ausencia de datos y mediante el cálculo de promedios obtener una imagen con menos cobertura nublada.

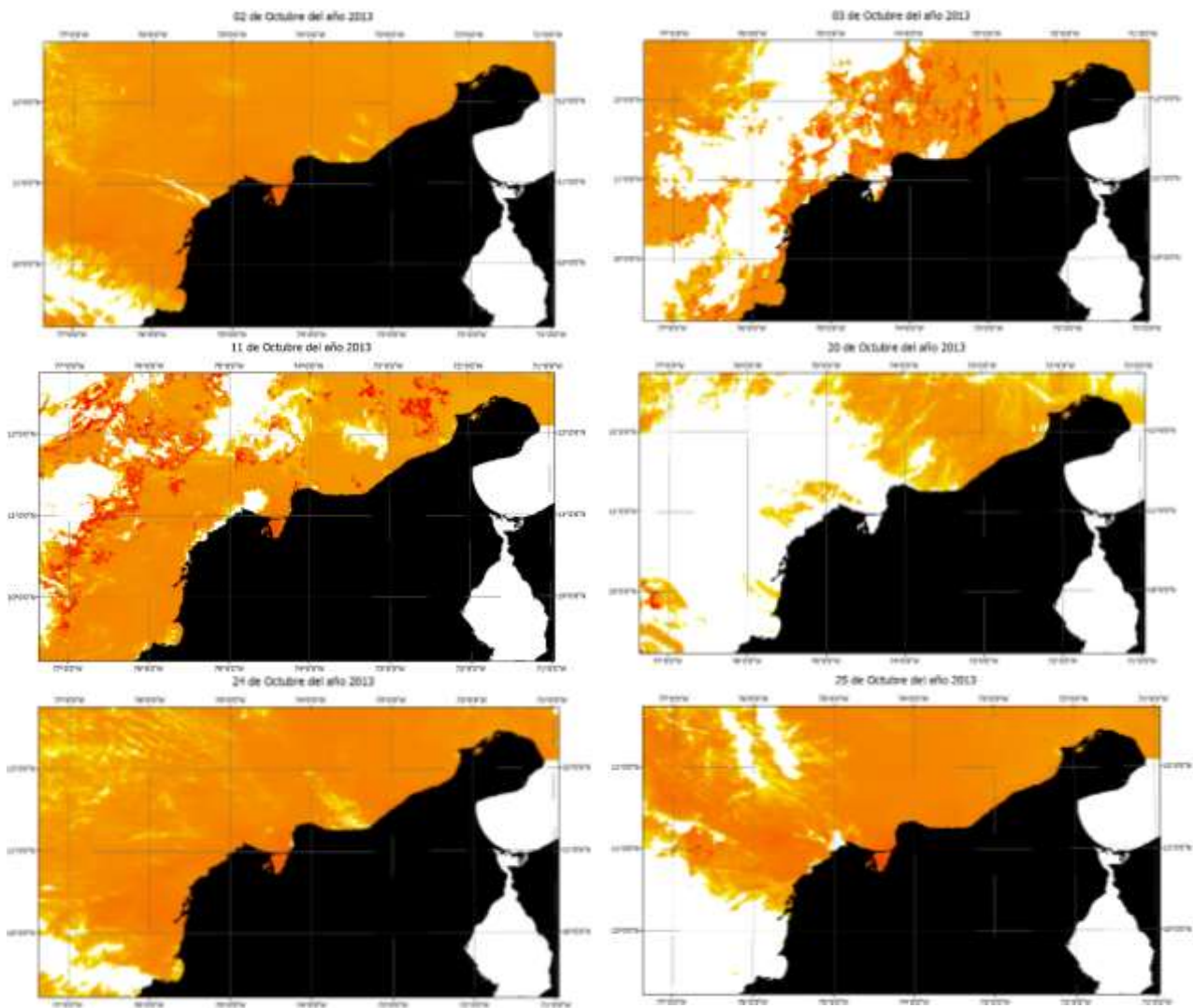
#### 7.3.5. CALCULO DE PROMEDIOS DE LAS VARIABLES.

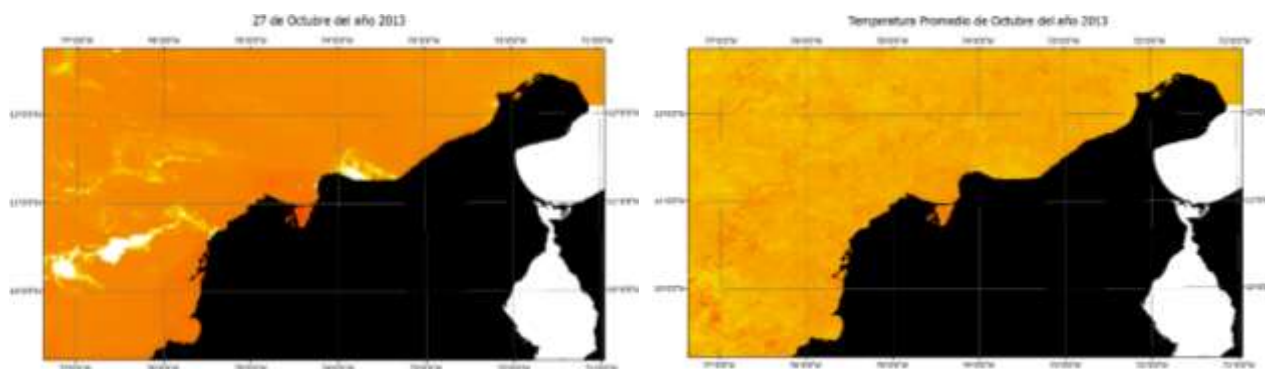
Para la generación de imágenes mensuales con menor presencia de nubes, es necesario conocer la cobertura nublada presente en cada una de las imágenes que componen la serie de tiempo y se realiza un promedio estadístico teniendo en cuenta el número de veces que un pixel corresponda a nube y las veces que este se repita.

Entre más nubes tengan las imágenes menos preciso será la imagen mensual, puesto que más píxeles son eliminados y al mismo tiempo son estimados con menor información. También se debe considerar que existen píxeles nubes durante toda la serie de tiempo, por lo que, es imposible estimar el valor de la variable y, por tanto, se les atribuye un valor digital de 0, lo que no afecta el cálculo del promedio estadístico. Sin embargo, la imagen mensual tendrá una proporción de nubes mucho menor. Este proceso se realizó para cada uno de los 24 meses del periodo de estudio.

La Figura 13 muestra la cantidad de nubes presente en las estimaciones de la SST para el periodo octubre 2013 y la imagen mensual obtenida mediante la máscara de nubes y el cálculo del promedio.

Figura 13. Presencia de nubes en los 7 días julianos de octubre del año 2013





Para la generación de las salidas gráficas se crea una máscara del área de tierra colombiano y parte de territorio venezolano mediante 6 imágenes satelitales Landsat 8. Se realiza una técnica de reducción de la información denominada componentes principales y una clasificación no supervisada en el programa Erdas Imagine 2014, con el propósito de extraer los valores que corresponden a las zonas que no son de interés.

### 7.3.6. VALIDACIÓN

Una vez obtenidos los resultados anteriores se debe comparar para validar el grado de exactitud de estos al compararlos con mediciones in situ. La validación se realiza con datos de campo tomados por el Instituto de Investigaciones Marino y Costeras “José Benito Vives de Andréis” de los proyectos Red de vigilancia de la calidad de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM), Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático (INAP) y el proyecto de Gestión Integral del Riesgo como medida de adaptación al Cambio Climático (GIR-CC), para el periodo de estudio 2013-2014.

Para que no hubiese problema al momento de correlacionar los valores de los parámetros estimados mediante las imágenes MODIS, se descargaron los datos de campo con una temporalidad mensual. La validación se realiza por año porque había meses donde se tomaban pocas muestras.

#### 7.3.6.1. Clorofila

Se obtuvieron un total de 55 datos para el año 2013 y 38 para el año 2014, (Ver Anexo 1 y 2), los cuales fueron seleccionados de manera aleatoria. Para cada periodo se obtuvo información de estaciones distintas debido a que se incluyeron para el año 2014 las estaciones de los proyectos INAP y GIR-CC, que toman más muestras por mes.

En la Tabla 1 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre el conjunto de datos de campo y los valores estimados con los tres modelos matemáticos para el año 2013. Este proceso se realizó en el programa estadístico RStudio y se obtuvo que el algoritmo OC4V4 presenta una alta tendencia lineal positiva indicando que los valores obtenidos de clorofila-a con el modelo y los datos de campo varían de forma parecida. Las comparaciones revelan que el algoritmo OC3M tiende a sobreestimar los promedios de clorofila-a en relación con los valores medidos en campo.

Tabla 1. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para los datos estimados de Chl-a con los tres modelos matemáticos y los datos de campo, para el año 2013.

| <b>Modelo Matemático</b> | <b>Correlación de Pearson</b> | <b>Coeficiente de determinación</b> |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| OC4V4                    | 0,9641461                     | 0,9296                              |
| OC3M                     | 0,7880234                     | 0,621                               |
| OC2M                     | 0,9455849                     | 0.8941                              |

Tabla 2. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para los datos estimados de Chl-a con los tres modelos matemáticos y los datos de campo, para el año 2014.

| <b>Modelo Matemático</b> | <b>Correlación de Pearson</b> | <b>Coeficiente de determinación</b> |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| OC4V4                    | 0,8613312                     | 0,7419                              |
| OC3M                     | 0,7397077                     | 0.5472                              |
| OC2M                     | 0,831395                      | 0,6912                              |

En la Tabla 2 se presenta de forma resumida la relación entre los datos de campo y los valores estimados de clorofila-a con los tres algoritmos para el periodo 2014. Se obtuvo que la correlación entre las concentraciones promediadas de la variable con el modelo OC4V4 y los datos de campo es la más alta, lo que indica que el algoritmo expresa adecuadamente los cambios temporales y espaciales del parámetro. Con los anteriores resultados se puede inferir que el mejor modelo para la estimación de la clorofila-a es el algoritmo OC4V4 para ambos años.

Desde el Anexo 3 hasta el Anexo 20, se presenta en detalle los gráficos de dispersión y diagramas de cajas entre los datos en campo y las estimaciones de la clorofila-a por los tres modelos matemáticos para el periodo de estudio.

#### 7.3.6.2. Temperatura superficial del Mar (SST)

Para conocer que tan confiable son las estimaciones mediante imágenes satelitales para recuperar la SST, teniendo en cuenta que los datos de campo son la fuente más precisa, se realiza la validación con 100 puntos para el año 2013 y 90 puntos para el 2014. En los Anexos 21 y 22, se presentan los valores tomados en campo de la variable con los que se realiza la validación para el periodo de estudio.

En la Figura 14, se muestra el comportamiento de las estimaciones y los datos de campo, en el que se observa una tendencia lineal positiva con un coeficiente de determinación de 0.87.

Figura 14. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de SST y los datos de campo, para el periodo 2013.

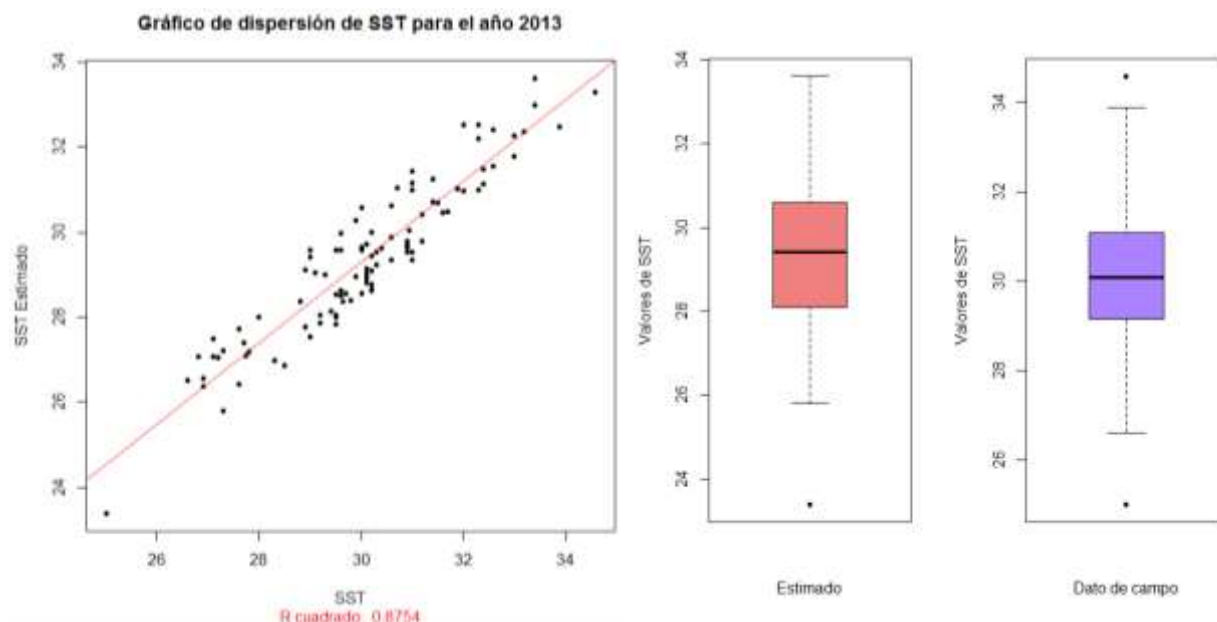


Tabla 3. Correlación de Pearson para los datos estimados de SST y los datos de campo para el periodo 2013.

| Correlación de Pearson | Pixel     | Dato de campo |
|------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                  | 1         | 0.9356361     |
| Dato de campo          | 0.9356361 | 1             |

La Tabla 3 muestra la correlación de Pearson con un valor de 0.93 el cual indica una correlación lineal entre los valores estimados y los datos de campo para el periodo 2013.

En la Figura 15, se muestra el comportamiento de las estimaciones y los datos de campo para el periodo 2014, en el que se observa una tendencia lineal positiva con un coeficiente de determinación de 0.86 indicando que el 86% de los datos siguen una tendencia lineal.

Figura 15. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de SST y los datos de campo, para el periodo 2014.

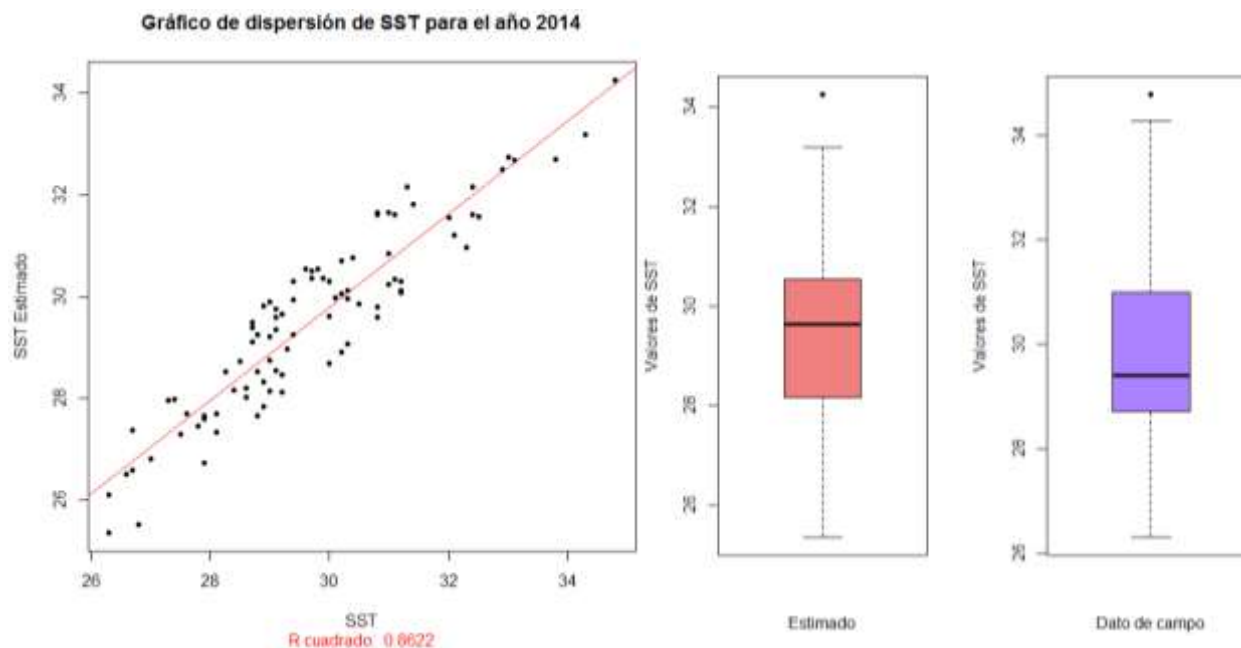


Tabla 4. Correlación de Pearson para los datos estimados de SST y los datos de campo para el periodo 2014.

| Correlación de Pearson | Pixel     | Dato de campo |
|------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                  | 1         | 0.9285517     |
| Dato de campo          | 0.9285517 | 1             |

La Tabla 4 muestra una correlación de Pearson significativa con un coeficiente de 0.92, el cual indica una tendencia lineal positiva entre los dos conjuntos de datos.

#### 7.3.6.3. Nitratos

Para la validación de las estimaciones de Nitratos con los dos modelos matemáticos se utilizaron 51 puntos para el año 2013 y 71 datos para el periodo 2014. En los Anexos 23 y 24, se presenta los valores necesarios para realizar la validación.

En los Anexos 25 y 26 se muestra el comportamiento de los datos estimados a partir del modelo de Yin et al. (2014), observando que no existe una relación lineal entre el conjunto de datos, por lo que el modelo no es apto para la zona de estudio.

En la Figura 16 y 17 se muestra el comportamiento de las estimaciones de Nitratos mediante el modelo Sarangi et al. (2011) y los datos de campo para ambos años. Se observa una tendencia lineal débil con un coeficiente de determinación de 0.69 para el año 2013 y 0.79 para el periodo 2014.

Figura 16. Gráfico de dispersión de los valores y diagrama de cajas, obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2013.

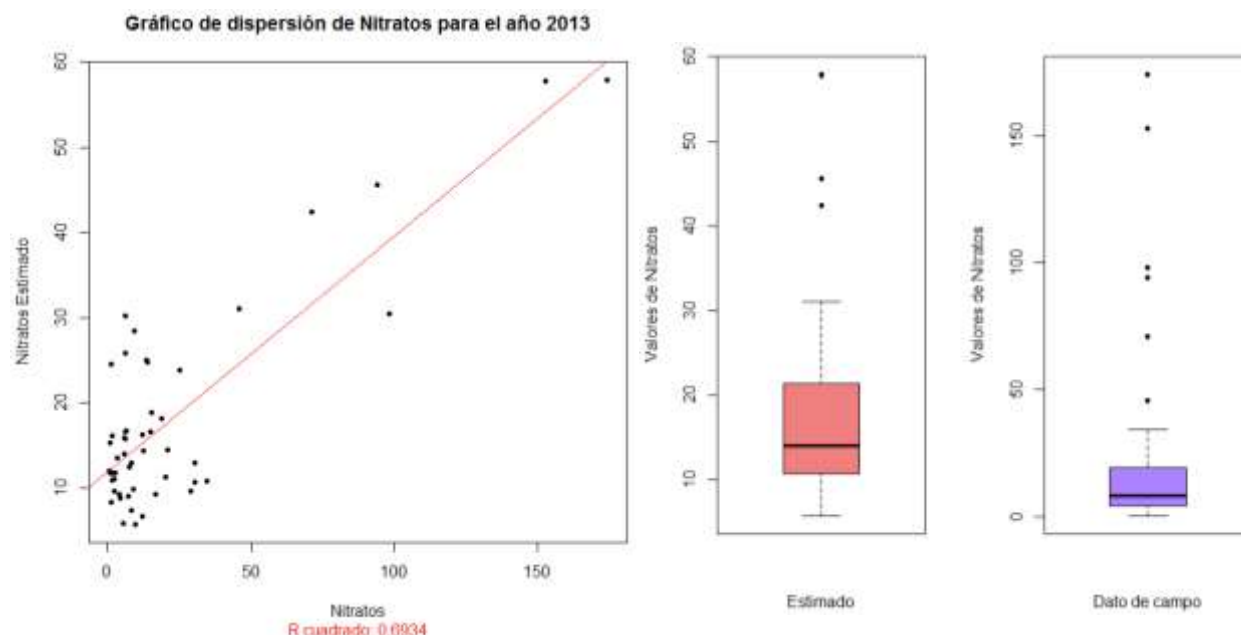


Tabla 5. Correlación de Pearson para los valores estimados de Nitratos y los datos de campo, periodo 2013.

| <b>Correlación de Pearson</b> | Pixel     | Dato de campo |
|-------------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                         | 1         | 0.8326916     |
| Dato de campo                 | 0.8326916 | 1             |

En la Tabla 5 y 6, se muestra los valores de correlación de Pearson de las estimaciones de Nitratos con el modelo y los datos de campo, obteniendo un valor de 0.83 para el periodo 2013 y 0.89 para el año 2014, indicando que a medida que aumenta el valor de la variable tomado por dato de campo, aumenta ligeramente el valor estimado con las imágenes.

Figura 17. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2014.

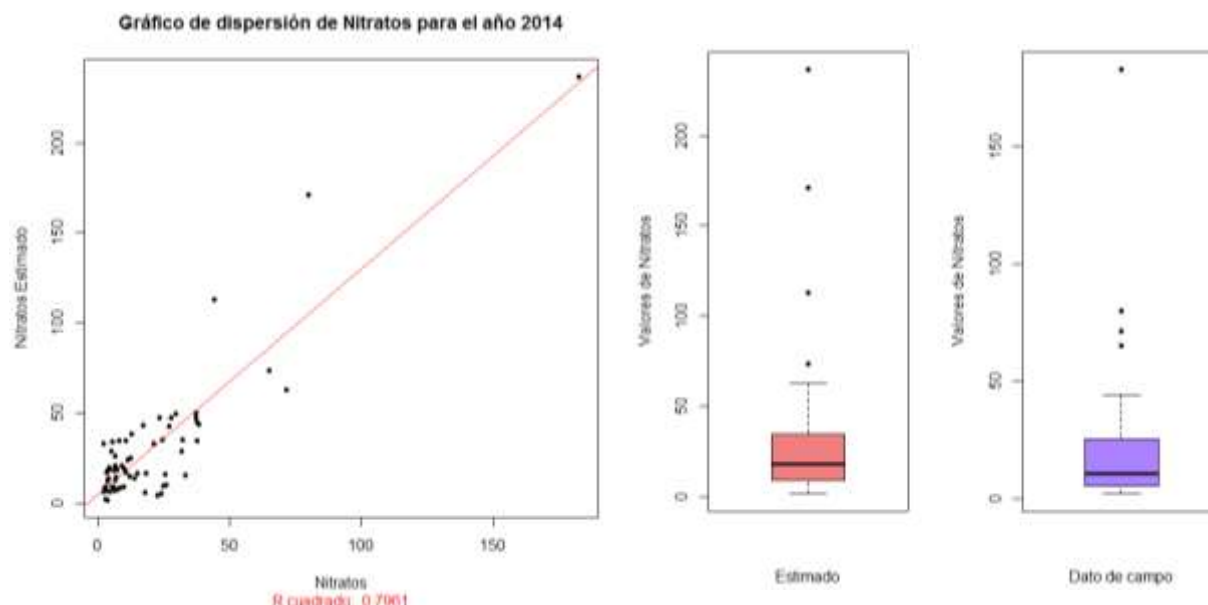


Tabla 6. Correlación de Pearson para los valores estimados de Nitratos y los datos de campo, periodo 2014.

| <b>Correlación de Pearson</b> | Pixel     | Dato de campo |
|-------------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                         | 1         | 0.8922714     |
| Dato de campo                 | 0.8922714 | 1             |

De los resultados anteriores se infiere que el mejor modelo para la zona de estudio, corresponden al desarrollado por Sarangi et al. (2011).

#### 7.3.6.4. Salinidad

Para la validación de las estimaciones de Salinidad con los dos algoritmos implementados, se tomaron 54 datos para el año 2013 y 55 datos para el año 2014. En los Anexos 27 y 28, se presentan los datos utilizados para este proceso, en el que las columnas llamadas Sal\_1 y Sal\_2 corresponde a los valores estimados de la variable con el método de Binding & Bowers (2003) y Keith, Lunetta & Schaeffer, (2016) respectivamente.

En la Figura 18 y 19, se observa el comportamiento de las estimaciones de Salinidad mediante el modelo de Binding & Bowers (2003) y los datos de campo para el periodo de estudio, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.80 y 0.85 respectivamente.

Figura 18. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2013.

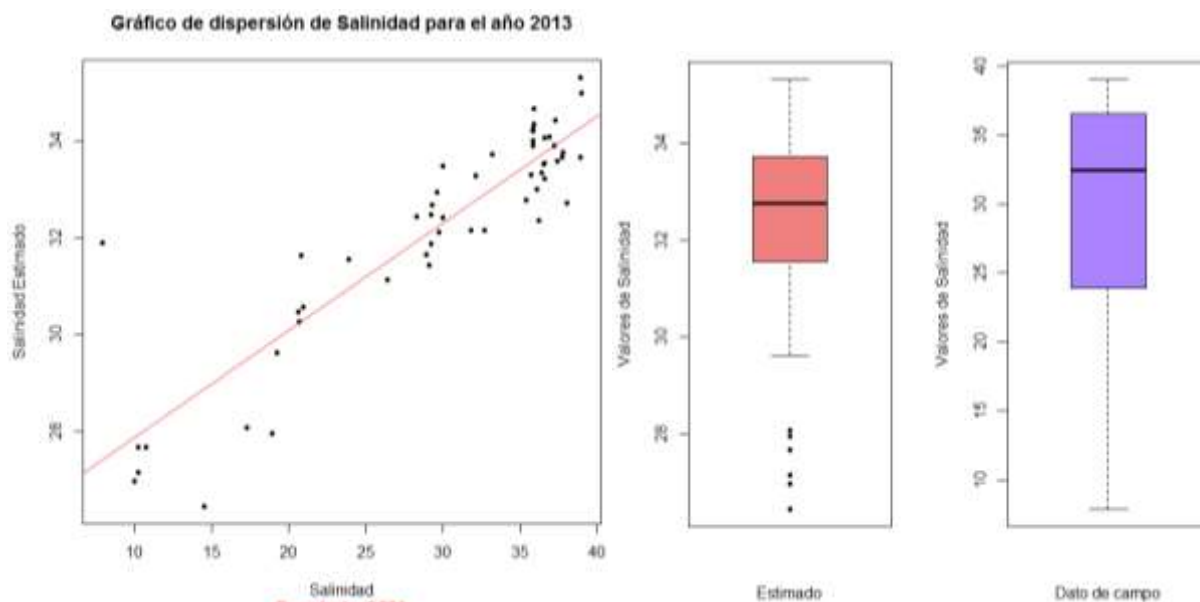


Figura 19. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2014.

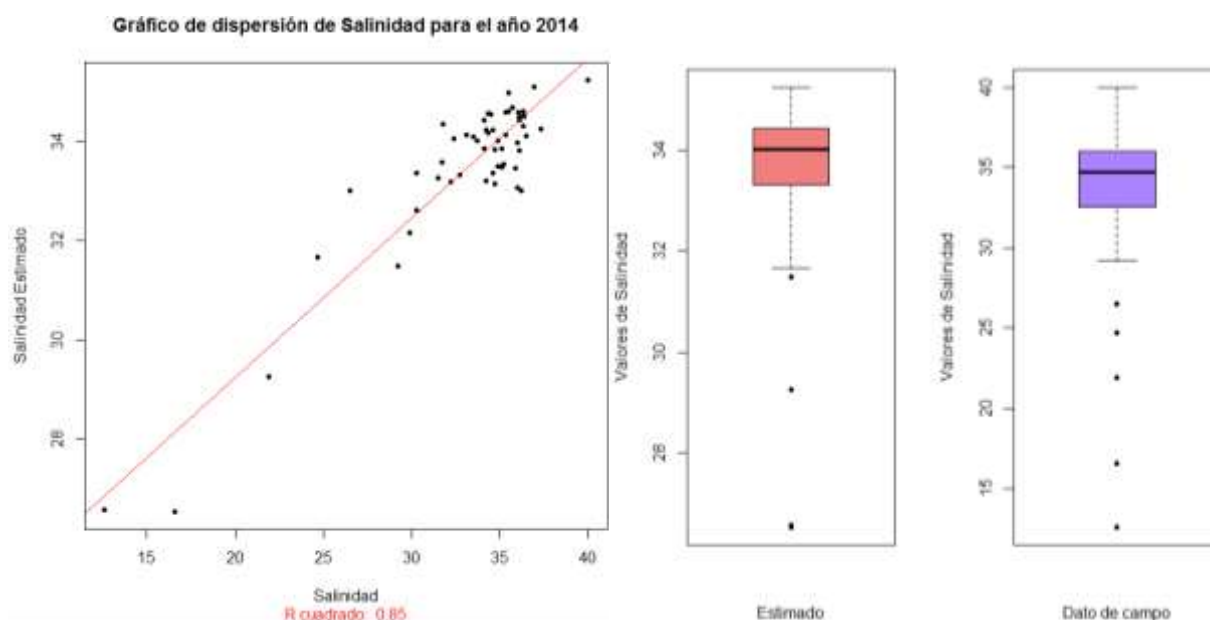


Figura 20. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2013.

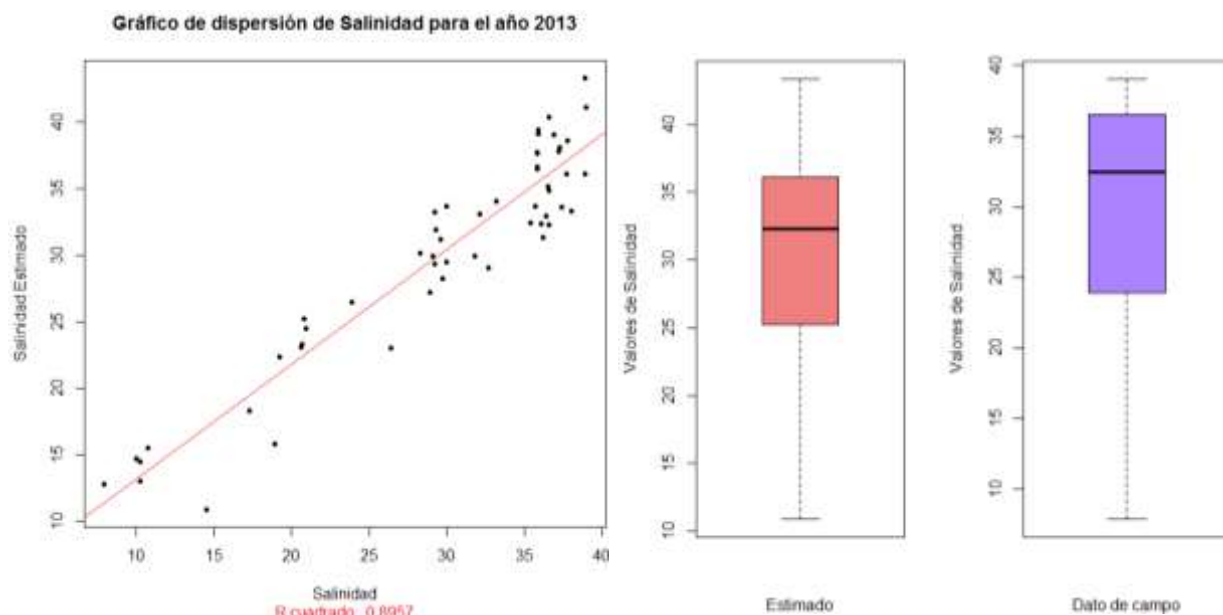
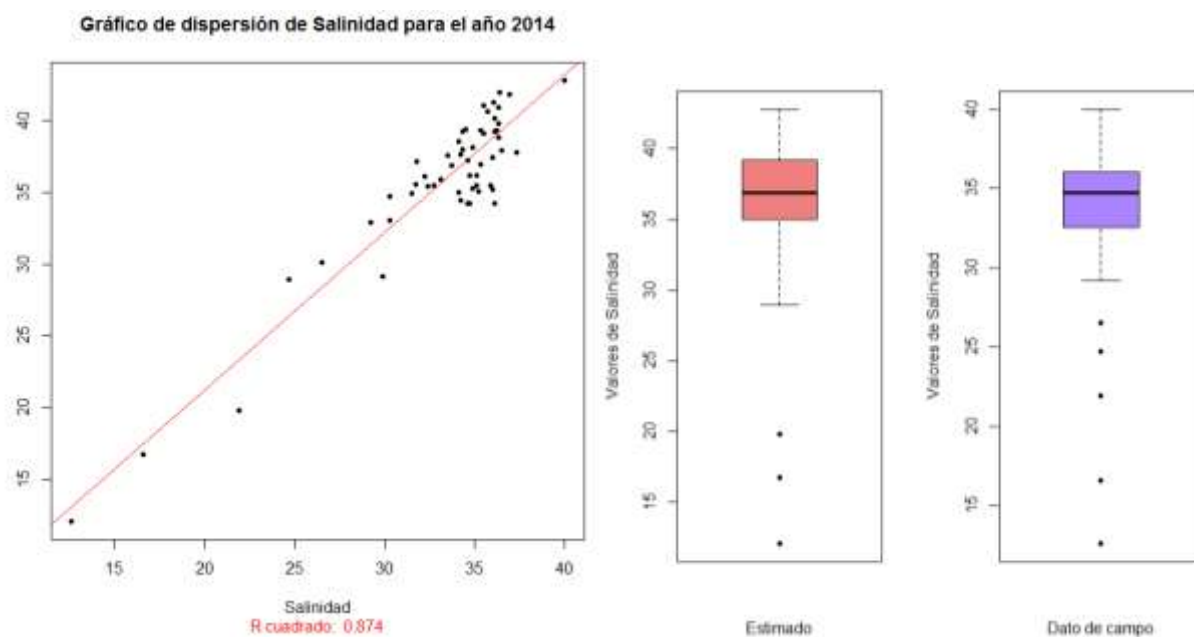


Figura 21. Gráfico de dispersión y diagrama de cajas, de los valores obtenidos de Salinidad y los datos de campo, para el periodo 2014.



En la Figura 20 y 21, se observa el comportamiento de los datos, obteniendo un coeficiente de determinación del 0.89 lo que significa que un 89% de los valores estimados con las imágenes MODIS cumplen con la tendencia de linealidad. Para el periodo 2014, se obtiene un coeficiente de determinación del 0.87.

Tabla 7. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de los datos estimados de Salinidad mediante los dos modelos y los datos de campo para el periodo 2013.

| <b>Modelo Matemático</b>                     | <b>Correlación de Pearson</b> | <b>Coeficiente de determinación</b> |
|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Modelo de Binding & Bowers (2003)            | 0,8966515                     | 0,804                               |
| Modelo de Keith, Lunetta & Schaeffer, (2016) | 0,9464044                     | 0,8957                              |

Tabla 8. Correlación de Pearson y Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de los datos estimados de Salinidad mediante los dos modelos y los datos de campo para el periodo 2014.

| <b>Modelo Matemático</b>                     | <b>Correlación de Pearson</b> | <b>Coeficiente de determinación</b> |
|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Modelo de Binding & Bowers (2003)            | 0,9219496                     | 0,85                                |
| Modelo de Keith, Lunetta & Schaeffer, (2016) | 0,9348607                     | 0,874                               |

En la Tabla 7 y 8 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre los datos de campo y los valores estimados por los modelos de Binding & Bowers (2003) y Keith, Lunetta & Schaeffer, (2016). Las correlaciones más altas corresponden a las estimaciones con el modelo de Keith, Lunetta & Schaeffer, (2016), presentando una tendencia lineal positiva para ambos años lo que indica que los valores obtenidos con el algoritmo y los datos de campo varían de forma parecida.

### 7.3.7. RELACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y FAN

Para determinar la relación de los cuatro parámetros físico-químicos y las FAN, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson entre cada variable y se determina cuál es el factor más incidente en las floraciones de *Karenia Brevis*, para ello se implementa el lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico llamado R.

## 8. RESULTADOS

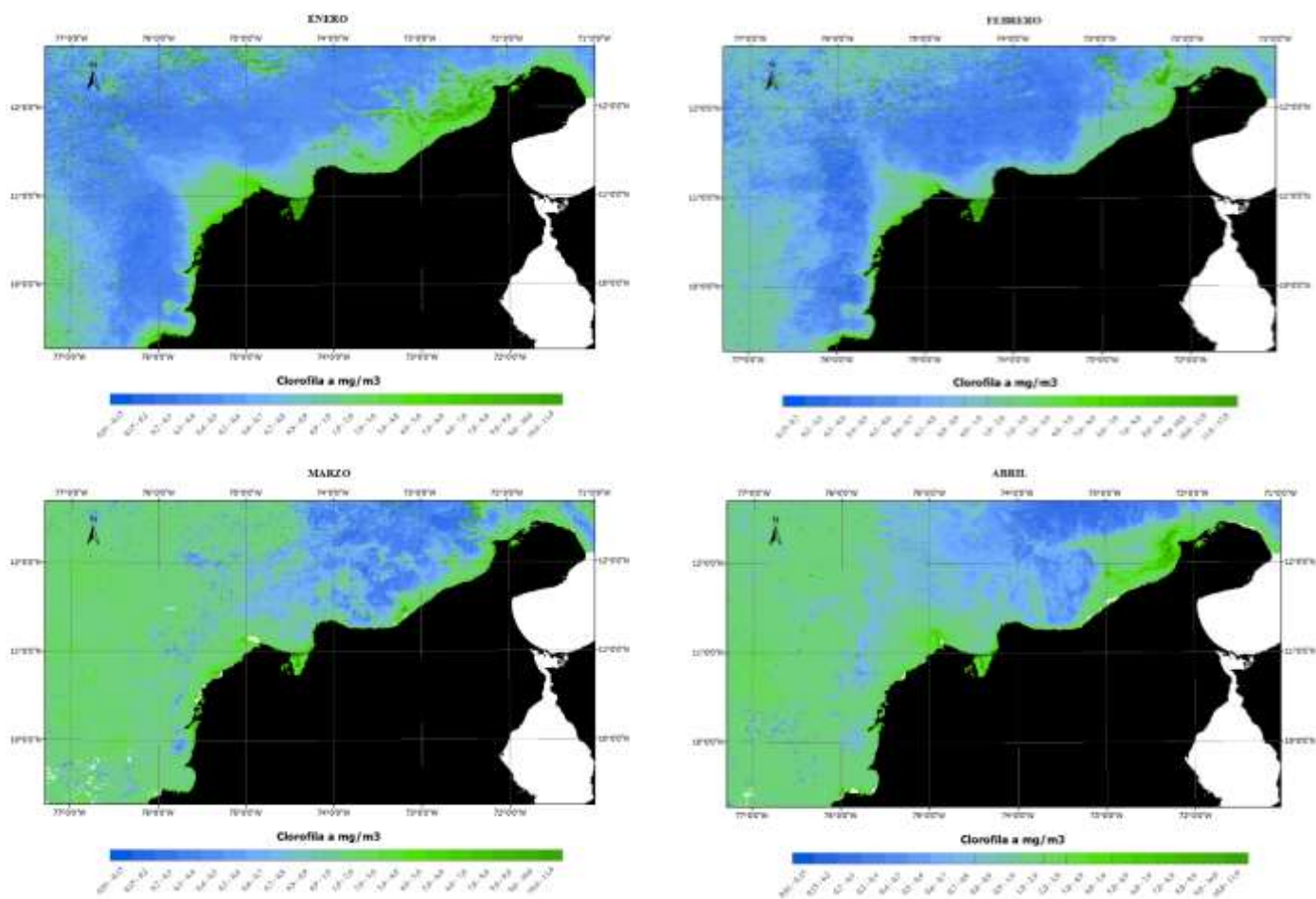
Se obtuvieron dos productos finales que corresponden a información espacial mensual de las variables físico-químicas en el periodo 2013-2014 para conocer su comportamiento y el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre los cuatro posibles parámetros que

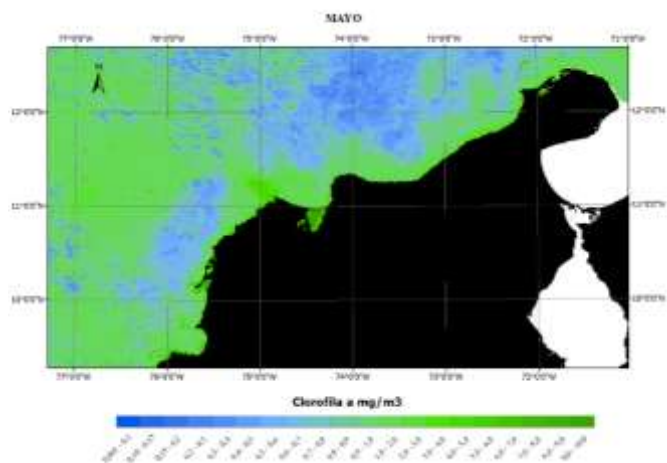
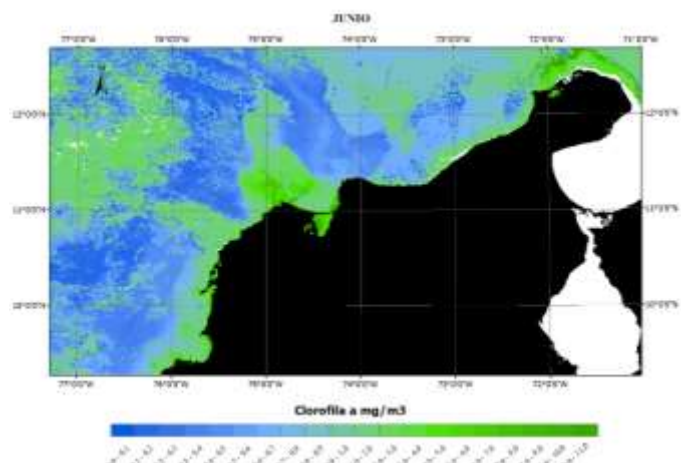
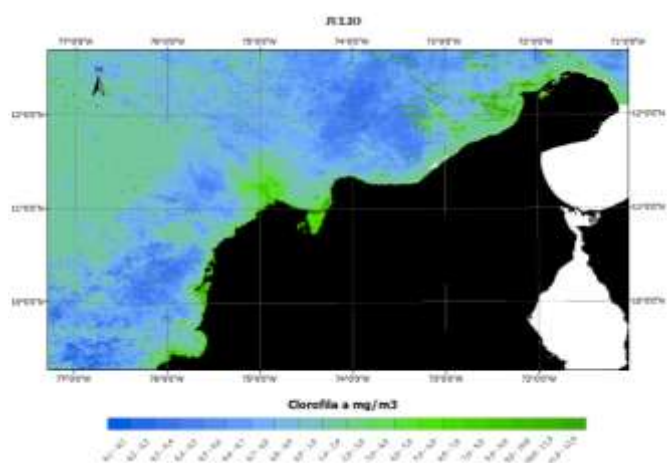
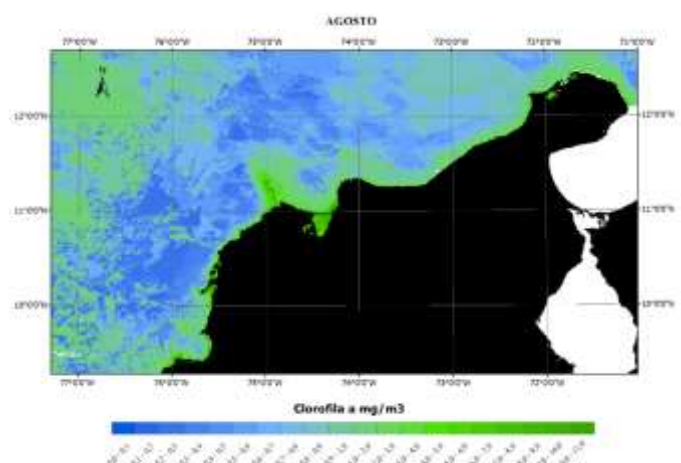
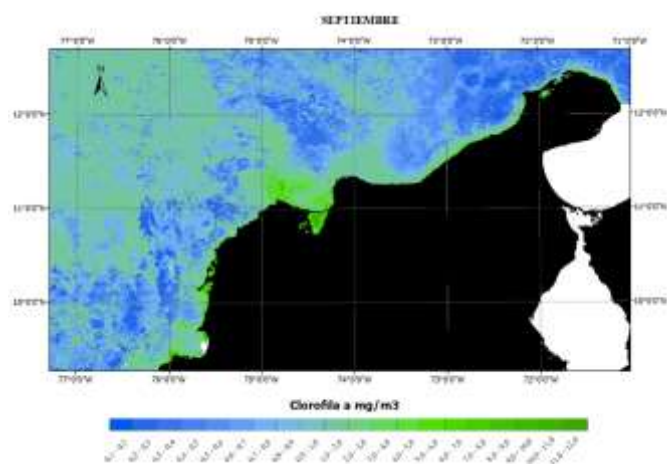
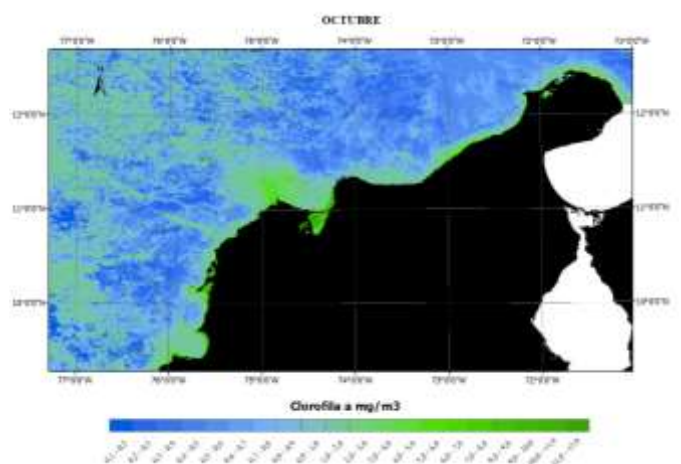
inciden en las FAN y los dos índices estimados RBD y KBBI, con el propósito de identificar cuales factores se relacionan más con las floraciones de algas nocivas para la zona de estudio.

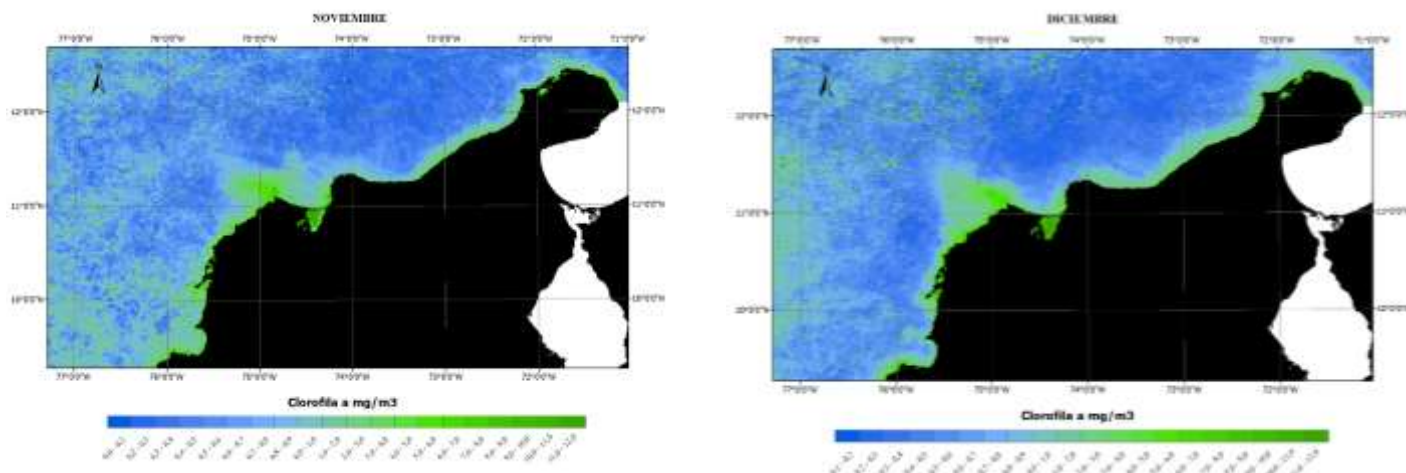
### 8.1. MAPAS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.

Los mapas de distribución espacio-temporal de las variables se estimaron con el propósito de conocer el comportamiento y los cambios de estas en los años de estudio.

Figura 22. Comportamiento de la clorofila-a para el año 2013







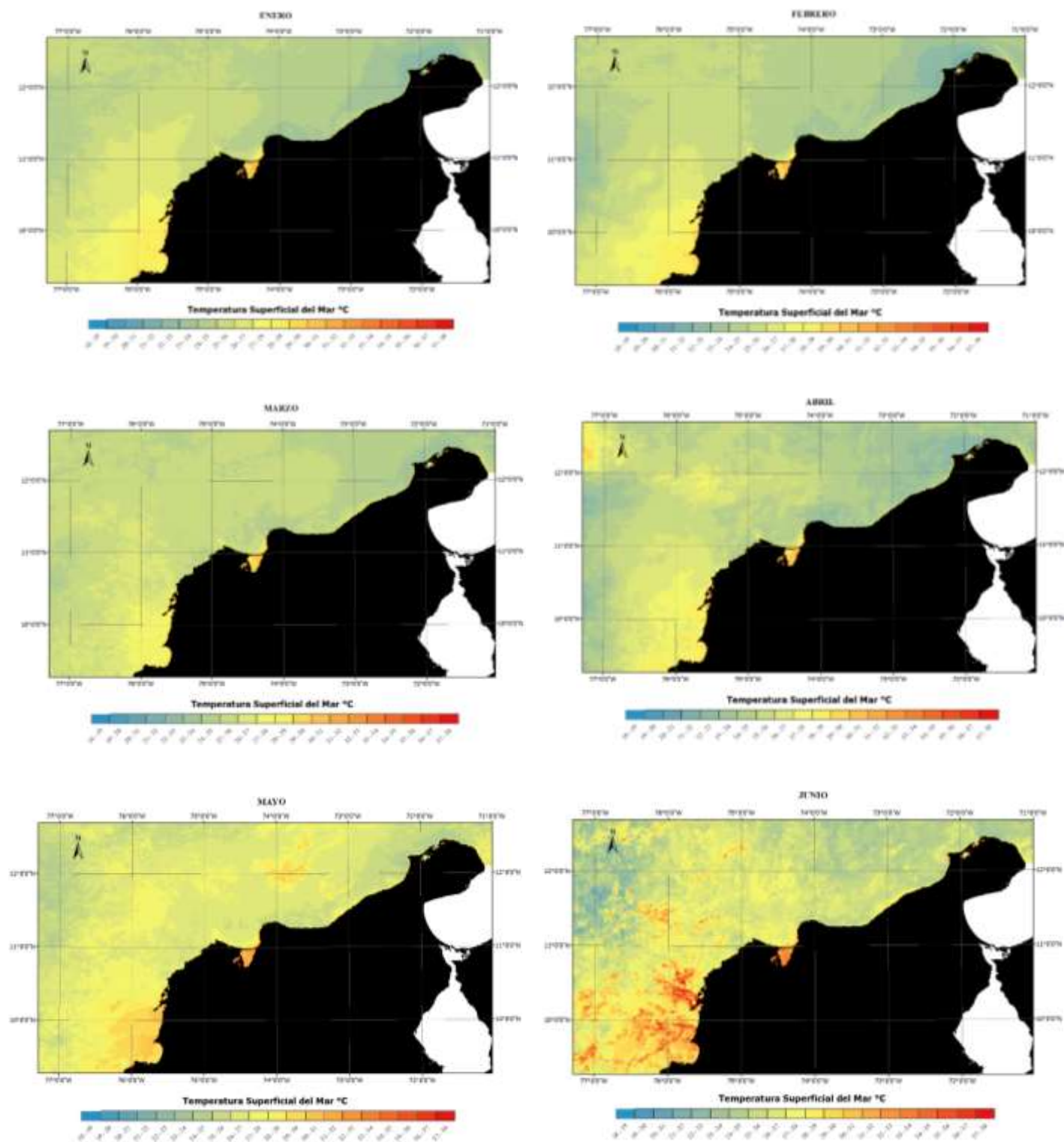
En la Figura 22 se muestra la variabilidad espacial y temporal de los promedios mensuales de la concentración de clorofila-a para el año 2013. Se observa que en las aguas costeras se presentan los valores más altos para la variable, principalmente en la Ciénaga Grande de Santa Marta y en la Ciénaga de la Virgen con valores mayores a 10mg/m<sup>3</sup>, este comportamiento estaría influenciado por las descargas de los arroyos que drenan en estos sistemas estuarinos. En los meses de marzo, abril y mayo se presentaron valores de clorofila-a bajos y mayor dispersión (0 - 1mg/m<sup>3</sup>) manifestando pequeños niveles de fitoplancton y escasa productividad fotosintética en estos meses.

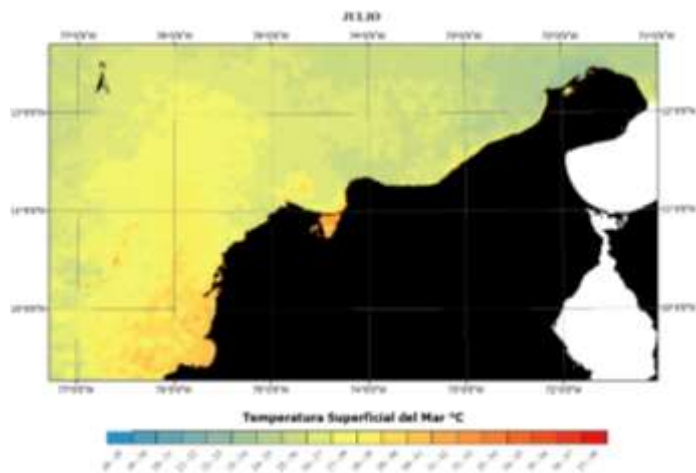
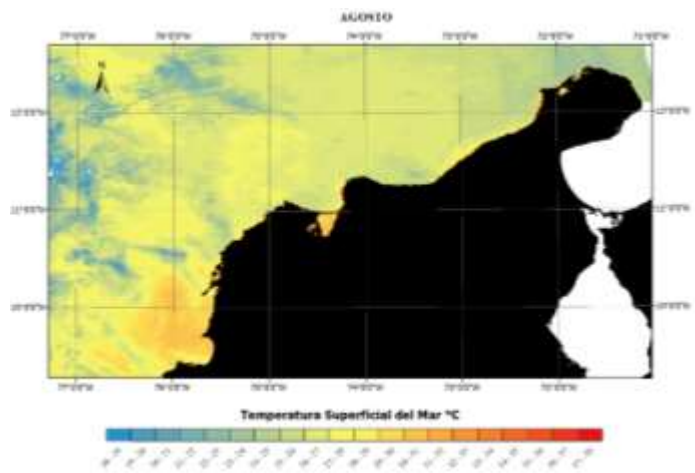
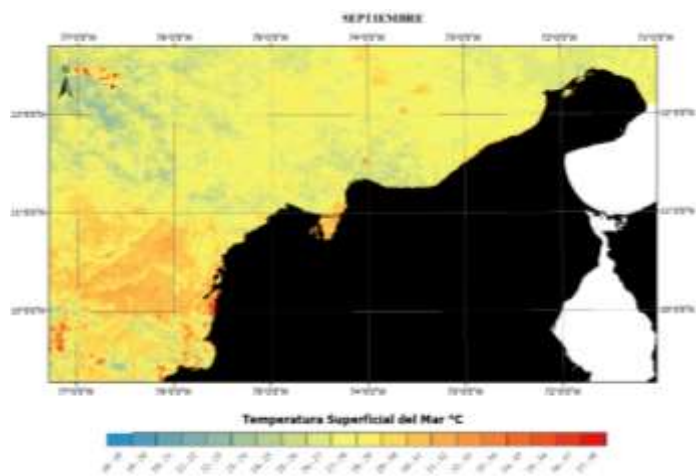
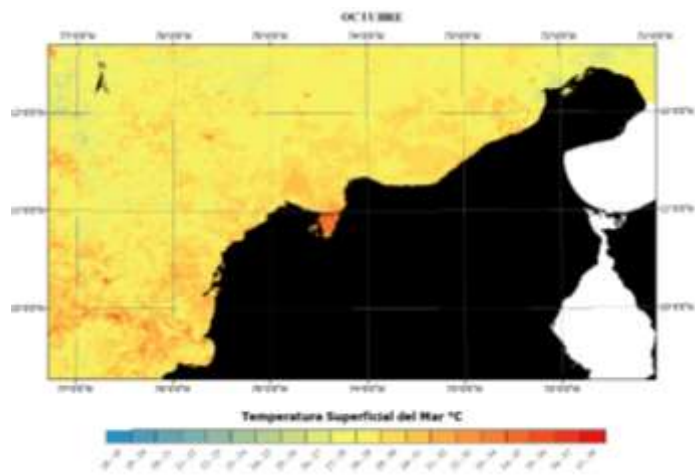
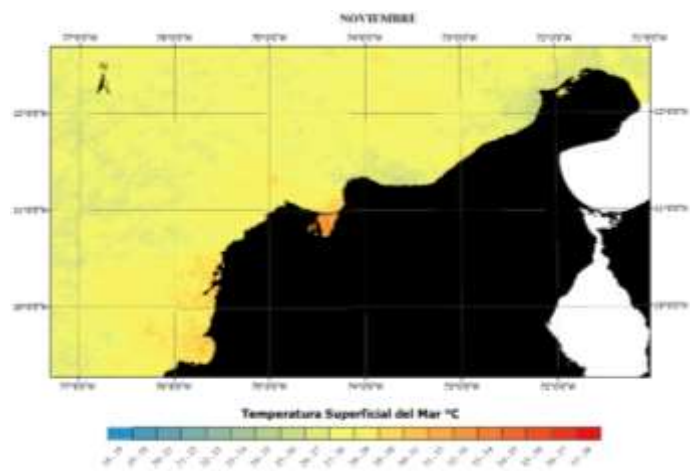
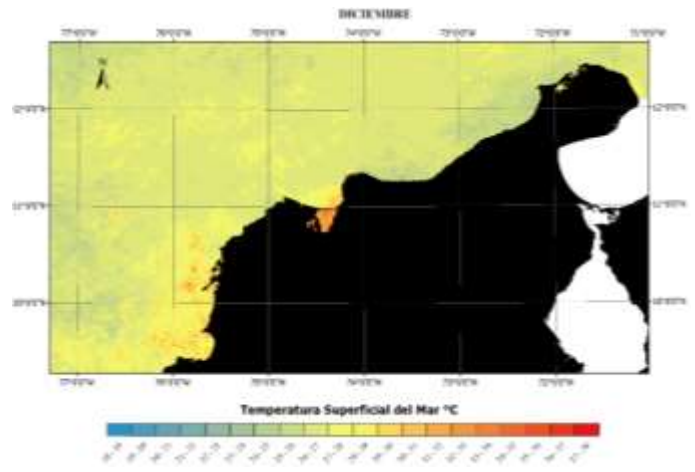
En la Figura 23 se evidencia la variación de la Temperatura superficial del mar para el año 2014, donde en la Ciénaga Grande de Santa Marta se presentan valores superiores de 33°C, que corresponden a los valores más altos para la zona. En el mes de junio se presentan las mayores extensiones de las altas temperaturas.

Los valores más bajos de temperatura (alrededor de 19°C) se presentaron en los meses junio y agosto que corresponde a las épocas húmedas o épocas de invierno, en los departamentos de La Guajira y Magdalena, zonas donde se presentan los dos eventos de surgencia más importantes del Caribe colombiano.

En la Ciénaga de la Virgen, se presentaron variaciones de la temperatura superficial del mar entre la época lluviosa y seca de 2014 como respuesta a la acción de los vientos y el oleaje propio de la región, además de la influencia de las precipitaciones y descargas continentales provenientes del Canal del Dique. En el mes de octubre se presentaron altos valores de temperatura en grandes extensiones de la zona de estudio.

Figura 23. Distribución espacial de la SST para el año 2014



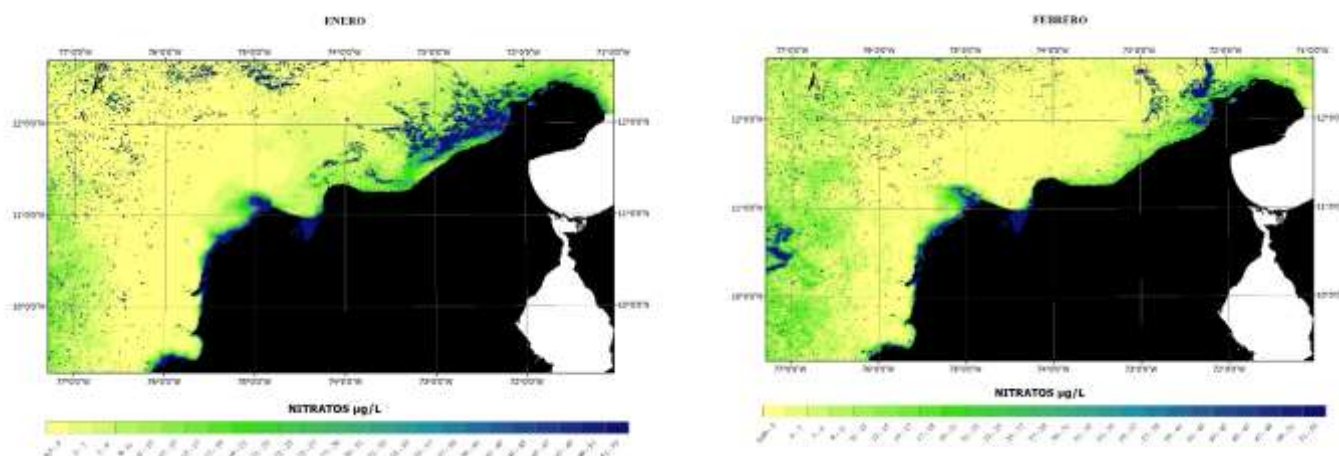


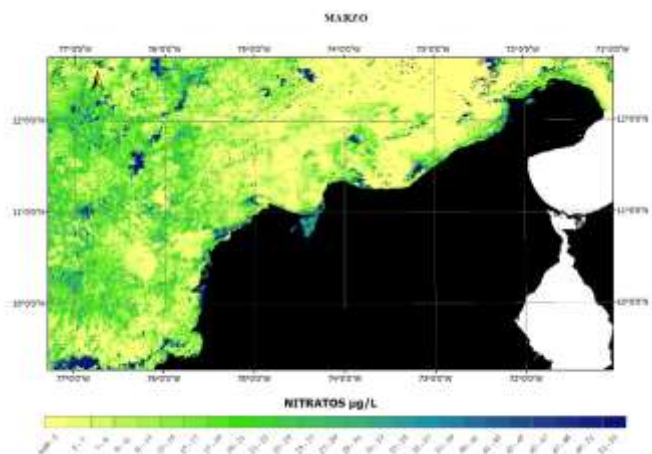
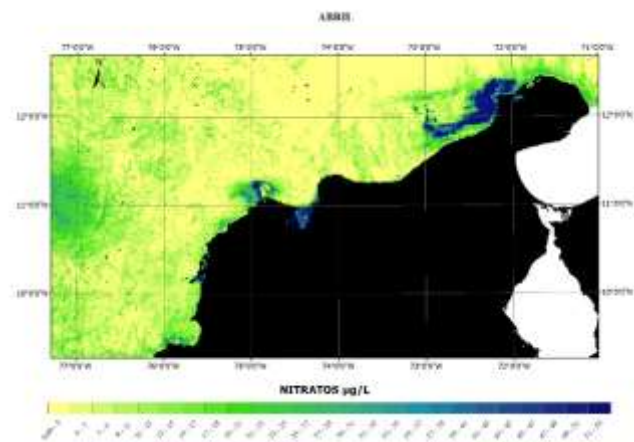
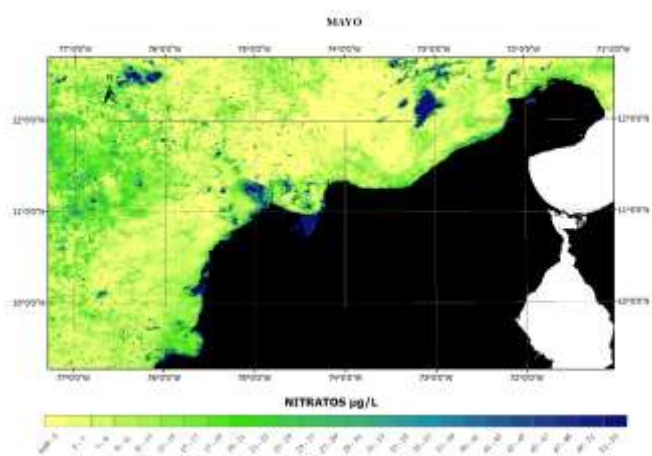
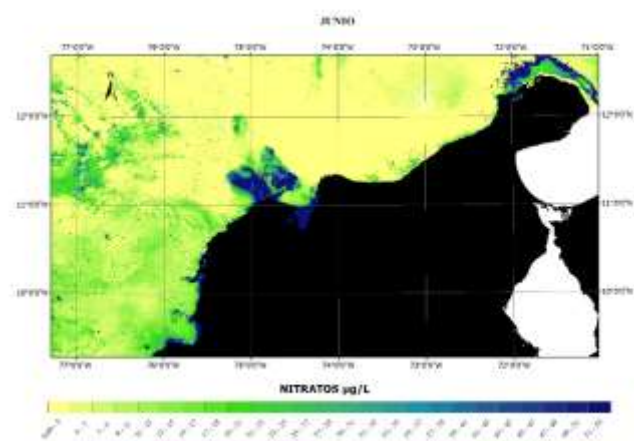
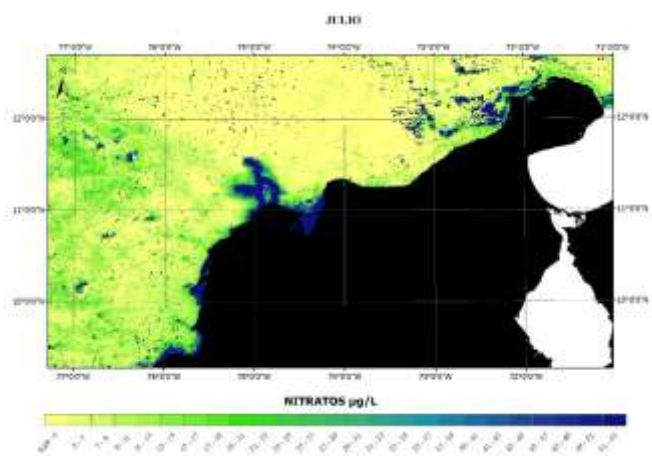
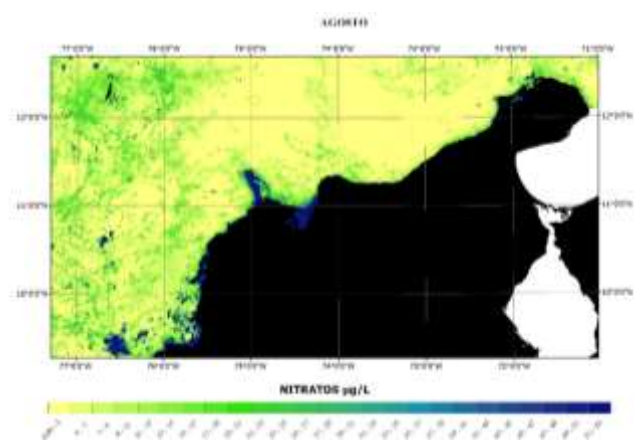
En la Figura 24 se observa el comportamiento de las concentraciones de Nitratos para el año 2013, en donde las mayores concentraciones se presentaron en la Ciénaga Grande de Santa Marta para todo el año, con valores superiores a 40  $\mu\text{g/L}$ , debido a los aportes de nutrientes del Río Magdalena, seguido por los ríos que provienen de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. En la zona de Salamanca se observa las mayores dispersiones de los valores altos para la época húmeda, sin embargo, en esta época se presentaron los valores más bajos de nitratos, con valores entre 0 a 2  $\mu\text{g/L}$ .

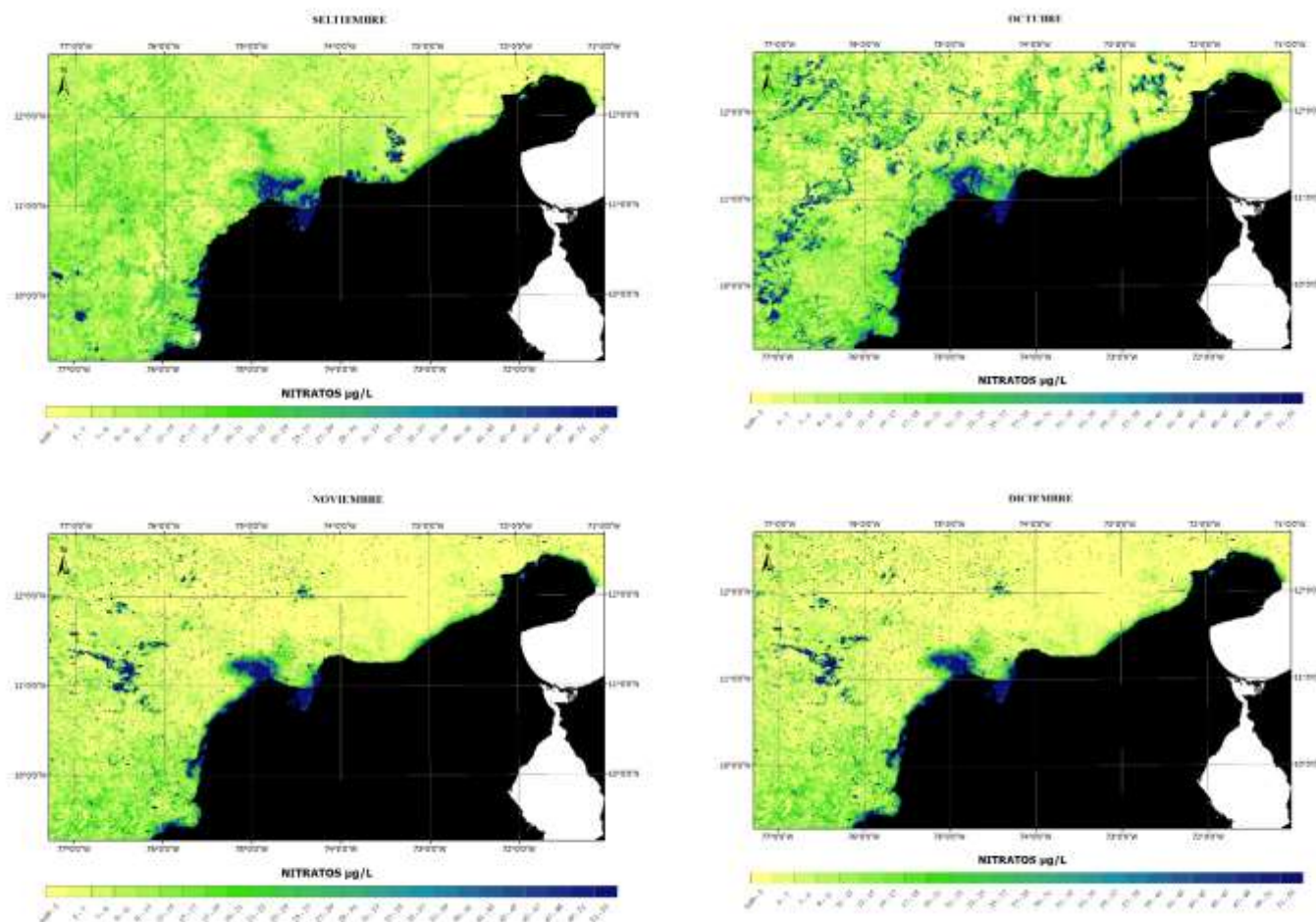
En las aguas costeras del departamento del Atlántico, las concentraciones de nitratos fueron altas durante la época seca de 2013, lo que se relaciona con el uso de fertilizantes durante las actividades agrícolas, incrementadas con las descargas domésticas e industriales.

En el departamento de La Guajira se presentaron valores altos de nitratos y mayor dispersión en los meses de enero, febrero, abril y junio, que corresponden a la época seca y época de transición. En la Ciénaga de la Virgen en el departamento de Bolívar las concentraciones de nitratos fueron altas para todo el año.

Figura 24. Comportamiento de los Nitratos para el año 2013



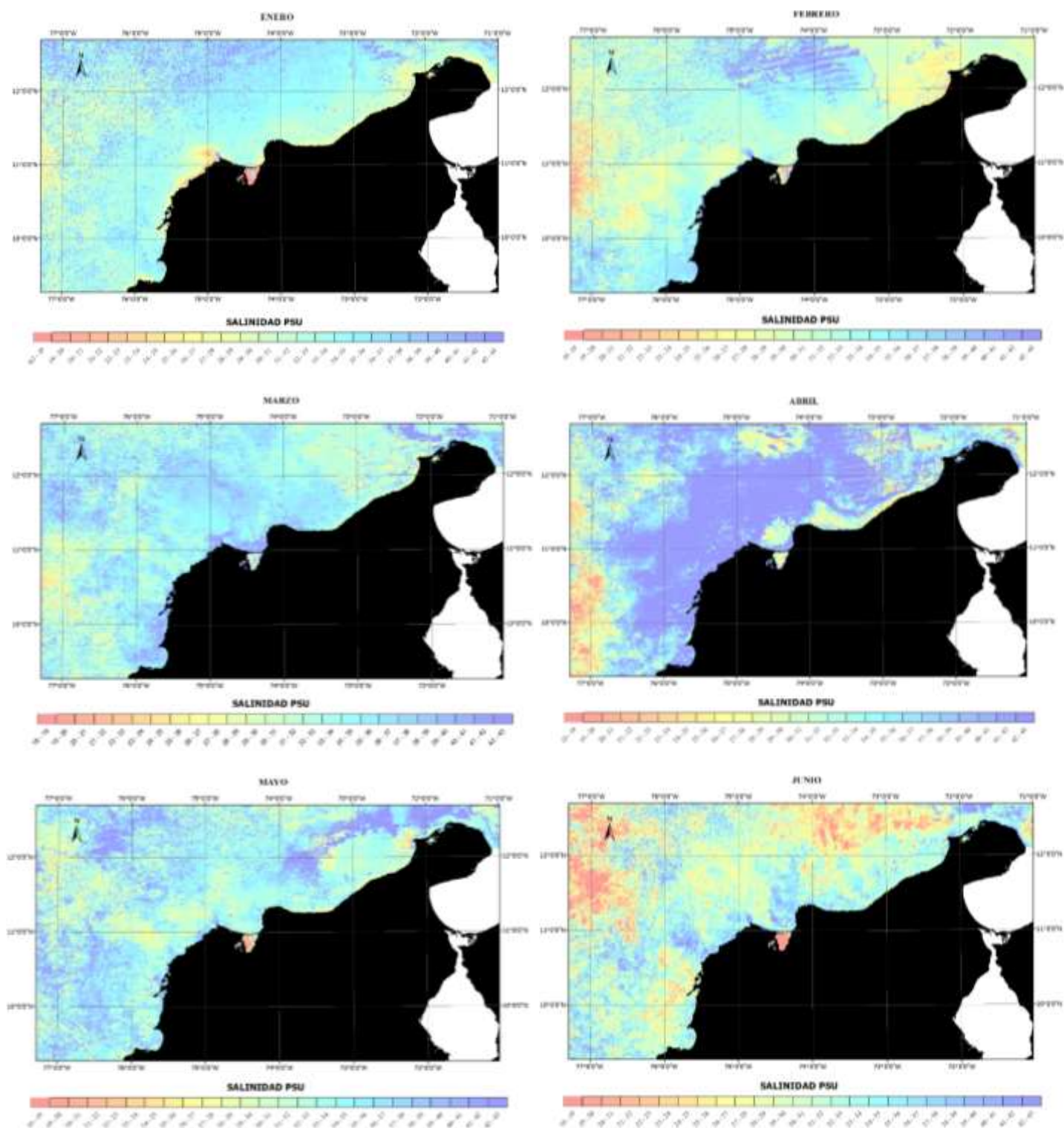


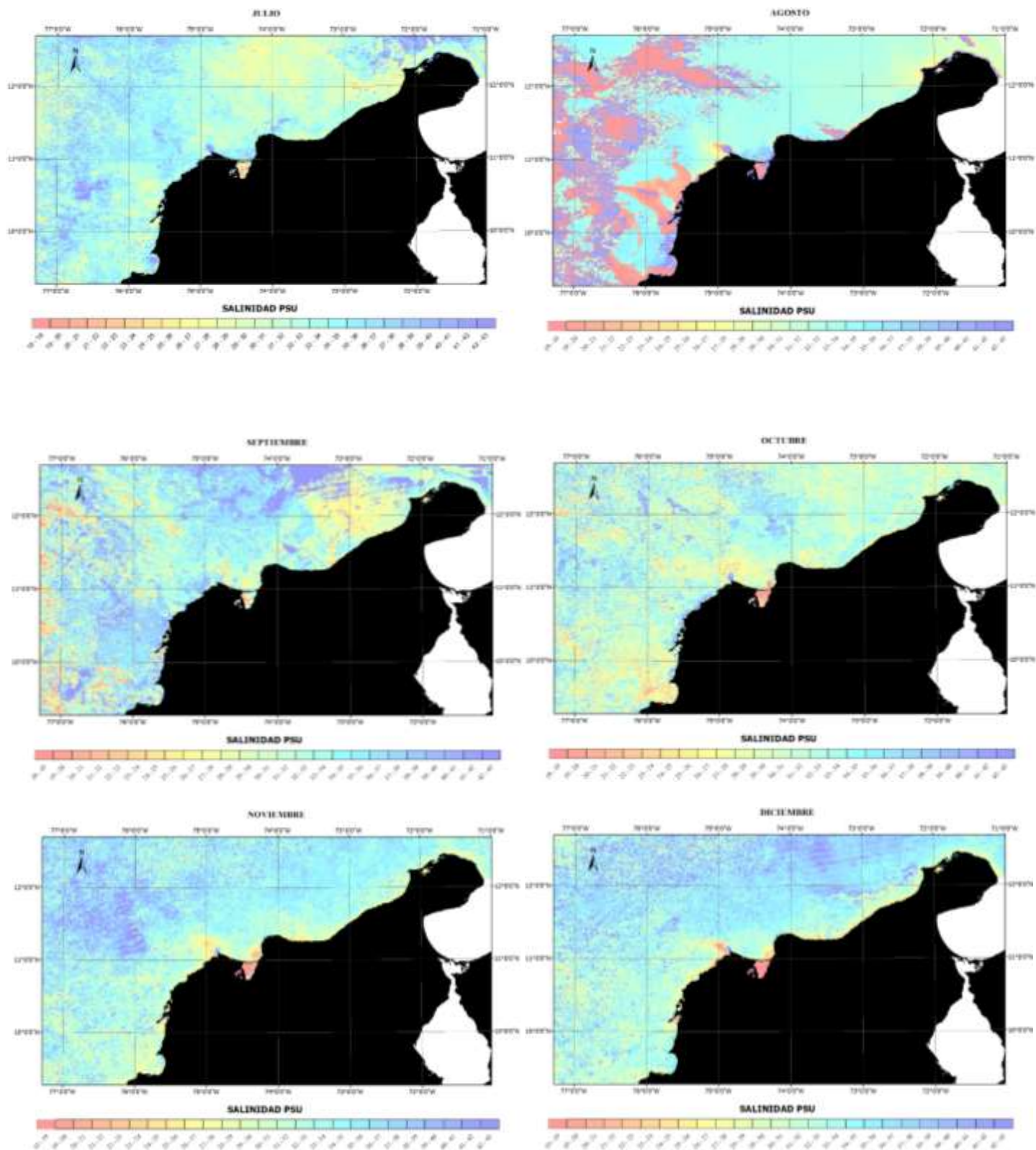


En la Figura 25 se puede observar la distribución espacio-temporal de la salinidad en el año 2014 presentándose bajas concentraciones en las aguas costeras y principalmente en la Ciénaga Grande de Santa Marta. La salinidad fue altamente variable en el mes de agosto, presentándose valores mínimos de hasta 1 PSU y superiores a 40 PSU, debido a que este mes se presentan cambios en el régimen de lluvias, la descarga de agua dulce de los ríos, períodos de sequía y por procesos oceanográficos como la surgencia, que se activa por acción de los vientos alisios, produciendo el desplazamiento de la masa de agua superficial y el ascenso de aguas subsuperficiales que tienen mayor salinidad.

Para los meses de enero y diciembre, que corresponden a la época seca o época de verano se presentaron concentraciones de salinidad bajas alrededor de 5PSU. En abril se presentó mayor dispersión de los valores altos en las aguas alejadas de la costa.

Figura 25. Distribución espacio-temporal de la Salinidad en el año 2014



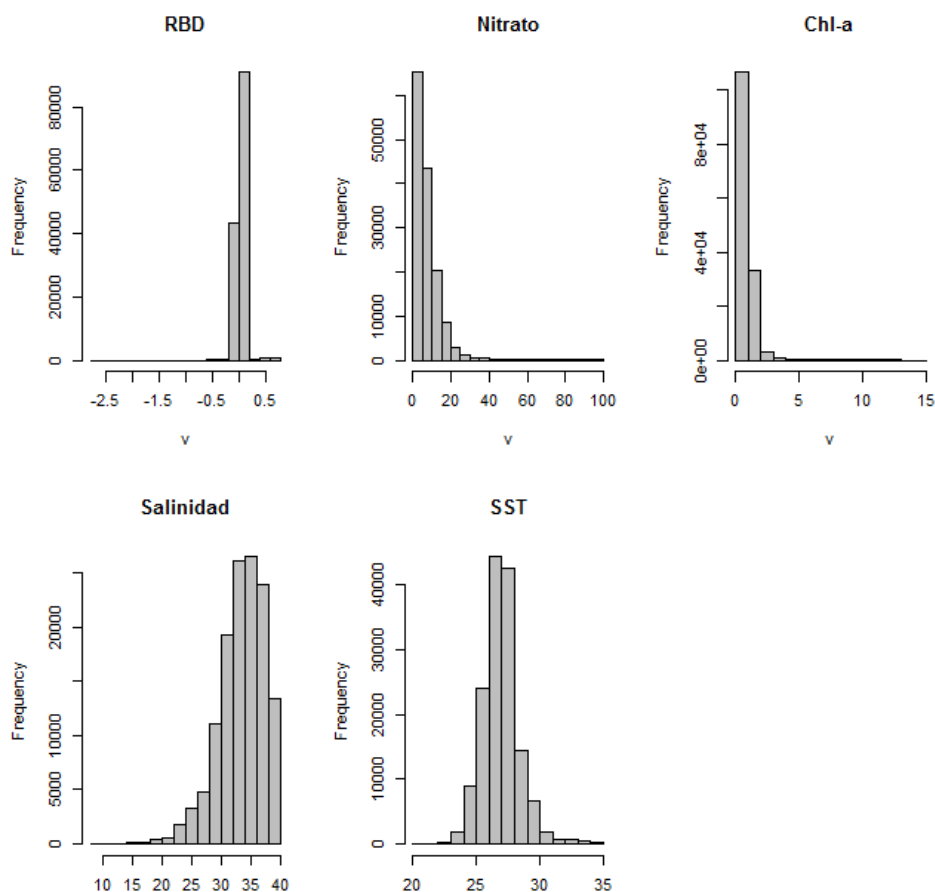


## 8.2. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS Y LAS FAN.

Se realiza un análisis estadístico mediante la correlación de Pearson entre las cuatro variables físico-químicas y las floraciones de *Karenia Brevis*, lo que permite conocer cuáles son los parámetros que mejor explican las floraciones y que tipo de relación presentan.

La Figura 26 muestra el histograma de frecuencia de los factores para el mes de junio 2013, en el que se puede observar el rango de valores en el que oscila las variables. Para el caso del índice RBD los valores fluctúan entre -0,5 a 0,5  $W/m^2/\mu m/sr$  y se presenta con más frecuencia valores superiores a 0. Las estimaciones de Nitrato varían entre 0 a 40  $\mu g/L$  reiterándose valores entre 0 a 10  $\mu g/L$ . Para la zona de estudio se pueden encontrar valores de salinidad entre 10 y 40 PSU estimaciones de SST entre 25 y 35  $^{\circ}C$  y valores de clorofila-a entre 0 y 10  $mg/m^3$ .

Figura 26. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para junio de 2013.

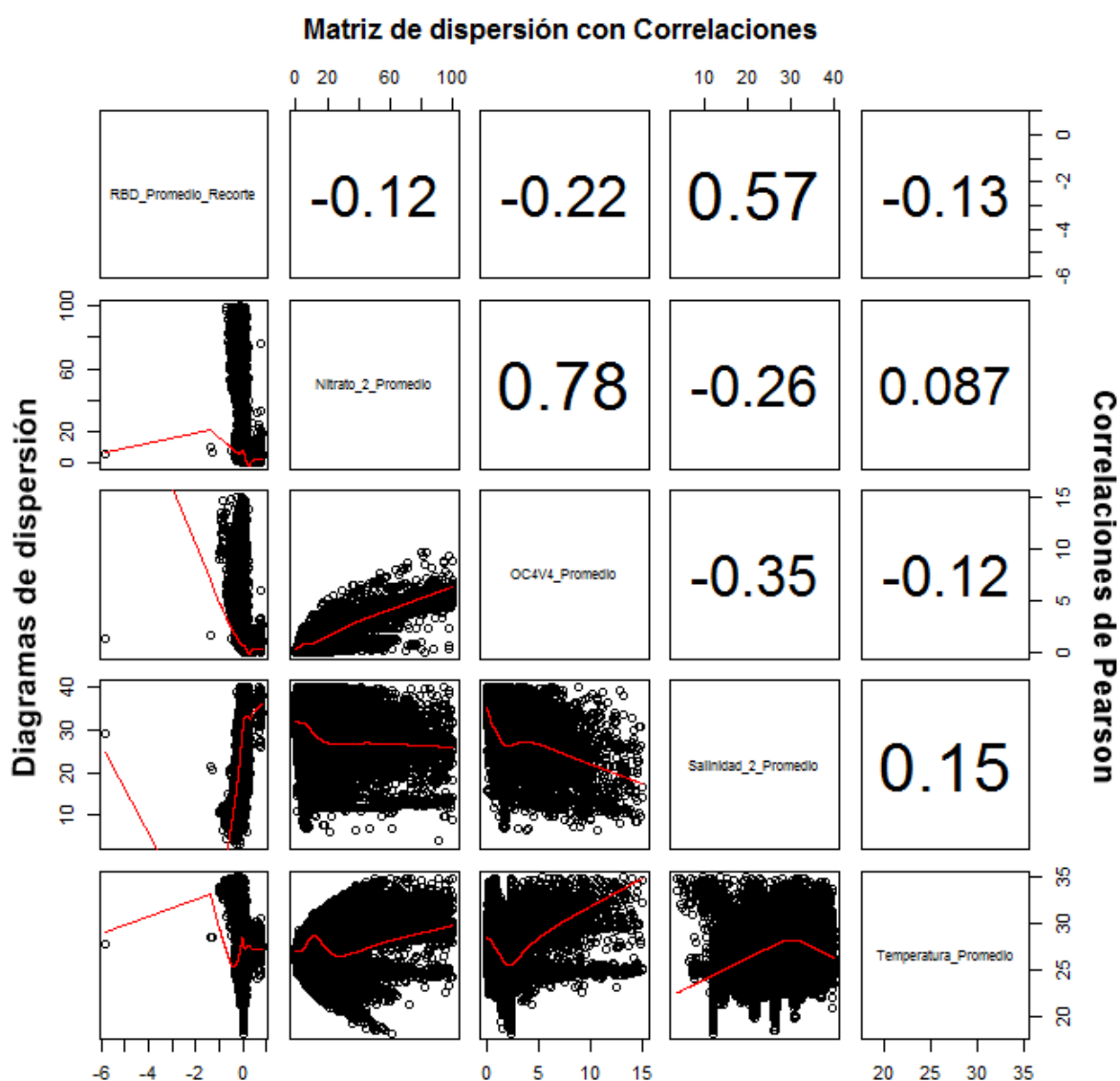


De la Figura 26, se observa que la clorofila-a y las concentraciones de nitratos presentan una misma forma de distribución sesgada hacia la derecha, lo que significa que para la zona de estudio es más frecuente valores generalmente bajos, contrario a las variables de salinidad y

RBD en la que su distribución tiene un sesgo hacia la derecha y para el caso de la temperatura superficial del mar, se muestra una distribución aproximadamente simétrica

Para el año 2013, el índice RBD en los meses de enero, febrero, marzo, abril, julio, agosto y diciembre presenta baja correlación respecto a las variables físico-químicas, mientras que, para el mes de mayo, junio, octubre y noviembre se puede observar una correlación parcial respecto a la variable salinidad. Los meses donde se presenta mayor relación corresponden a la época climática de transición y segunda época húmeda para el Caribe Colombiano. A pesar de obtenerse correlaciones parciales se debe tener en cuenta que este es un porcentaje global para la imagen.

Figura 27. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de junio de 2013.



En la Figura 27 se presenta la matriz de diagramas de dispersión de las cuatro variables físico-químicas y el índice RBD para determinar si existen relaciones entre las variables del conjunto de datos. En la diagonal se identifican cada una de las variables, por debajo de la diagonal principal se muestran los gráficos de dispersión y por encima, los valores de las correlaciones entre cada par de variables y los números de los ejes corresponden a cada rango de valores de las variables. Se observa que existe una buena relación lineal positiva entre la clorofila-a y los nitratos y entre el índice RBD y la salinidad, mientras que, la relación del índice RBD con las otras variables es muy baja. De lo anterior, se infiere que la salinidad es una de las variables que inciden directamente con el índice RBD el cual puede detectar floraciones de algas nocivas con baja retrodispersión como lo son las denominadas mareas rojas.

La Figura 28 permite apreciar los rangos en los que los valores de las variables fluctúan para la fecha. La estimación de RBD presenta valores cercanos a 0 W/m<sup>2</sup>/μm/sr, los valores de Nitrato fluctúan entre 0 a 20 μg/L con mayor frecuencia. La variable clorofila-a varía de 0 a 5 mg/m<sup>3</sup> con mayor reiteración, la salinidad oscila entre 20 a 40 PSU y la SST presenta valores entre 25 y 30°C con mayor frecuencia. Se observa que la distribución de la salinidad esta sesgada a la izquierda lo que significa que los valores de la variable tienden a ser altos.

Figura 28. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para septiembre de 2013.

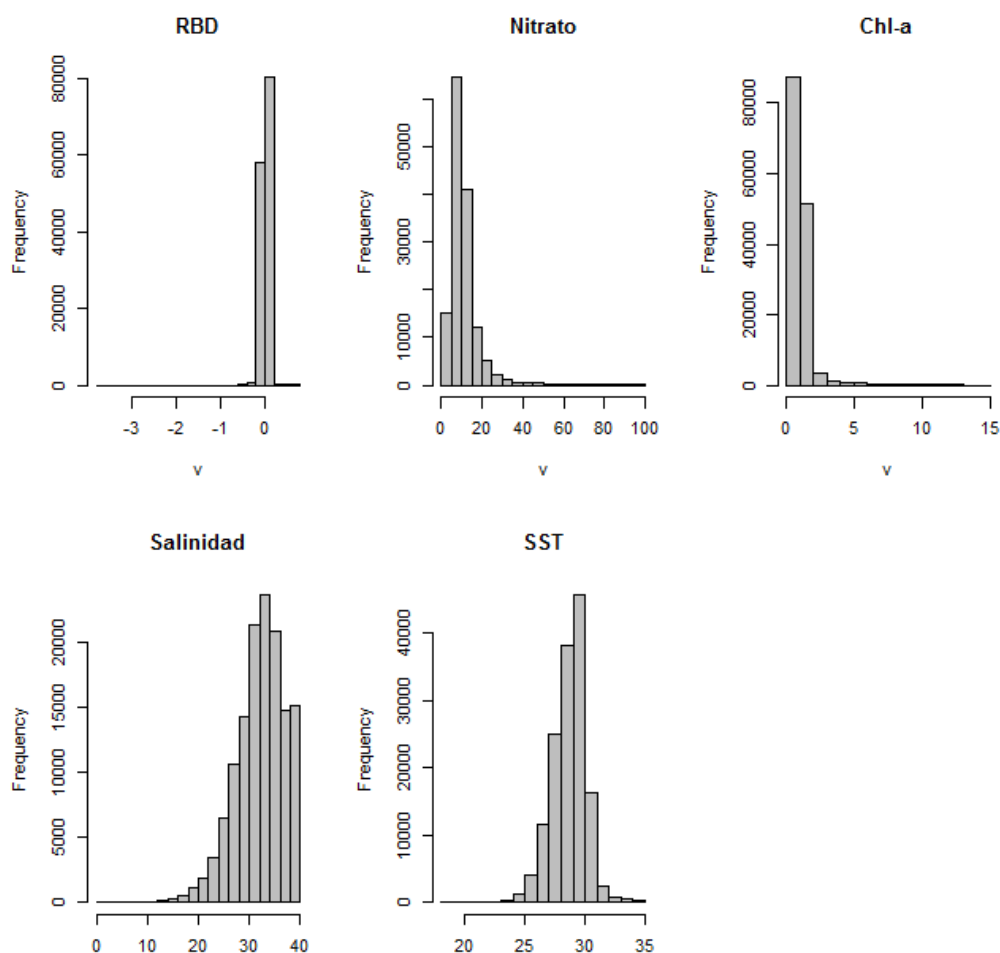
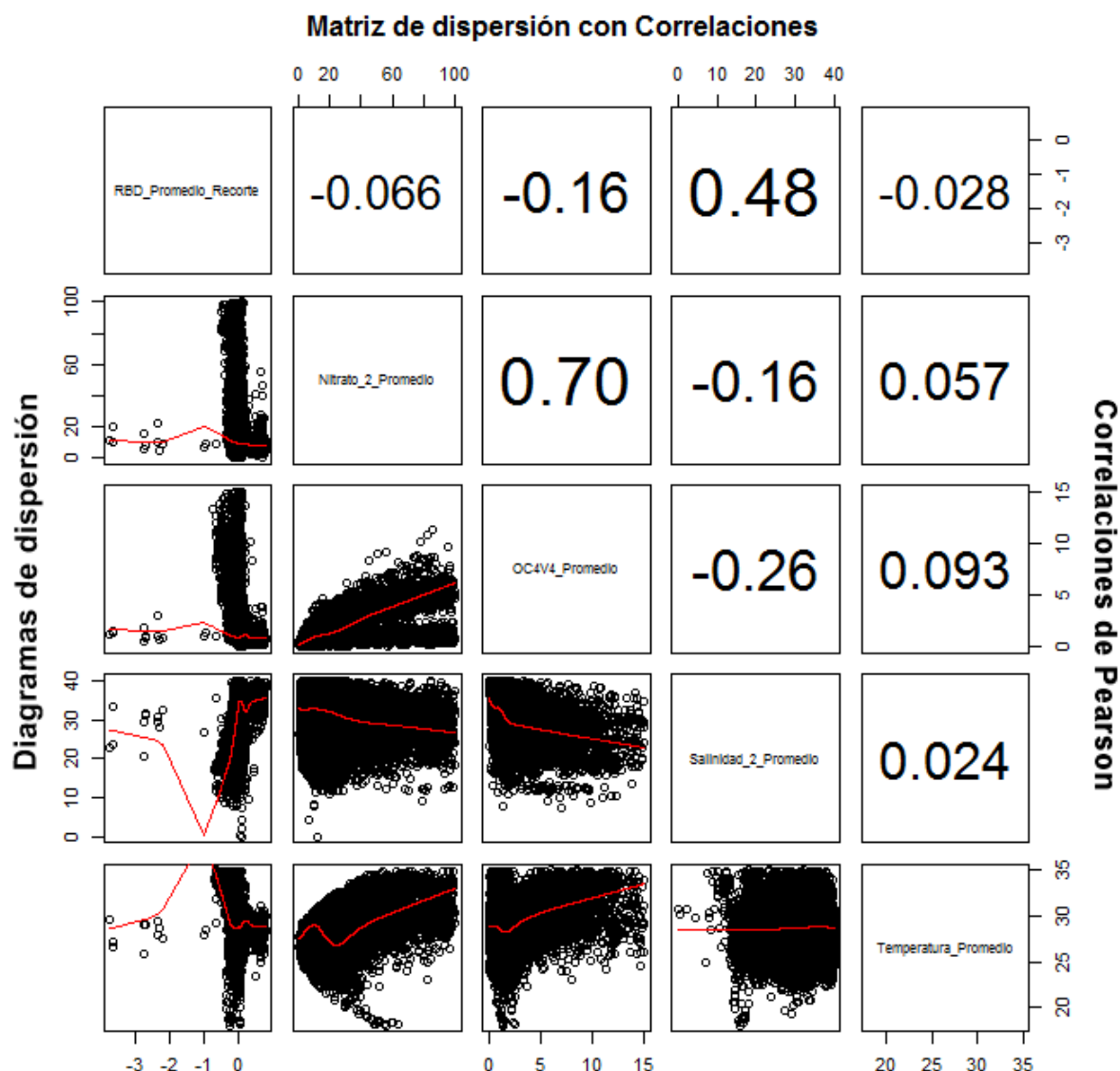


Figura 29. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de septiembre de 2013.



En la Figura 29 se observa las relaciones lineales entre las variables, representadas en una matriz de diagramas de dispersión, en el que existe una buena correlación entre el índice RBD y la salinidad, lo que significa que la salinidad sigue siendo la variable con la correlación más alta respecto al índice inclusive en el mes de septiembre, correspondiente ya a la época húmeda, con un coeficiente de Correlación de Pearson de 0.48, por lo que se reconoce como la variable con más influencia sobre el fenómeno. Por otro lado, los nitratos y clorofila-a poseen un coeficiente de -0.066 y -0.16 respectivamente, que es demasiado bajo en relación con el índice RBD y la SST presenta diferencia tan solo en la variabilidad con relación al RBD. Adicional, en la matriz se observa las relaciones entre las variables físico-químicas, presentando alta correlación entre la clorofila-a y los nitratos.

En la Figura 30 se evidencia el comportamiento de las variables en cuestión para el mes de septiembre de 2014, correspondiente a la segunda época húmeda del año. Con relación a los valores de junio del año anterior, se observa que los valores de RBD oscilan en un rango más alto y que los valores de salinidad son un poco más bajos, entre 10 y 35 PSU. Los valores de clorofila-a fluctúan entre 0 a 5 mg/m<sup>3</sup> presentándose mayor frecuencia valores entre 0 a 3mg/m<sup>3</sup>, las concentraciones de nitratos oscilan entre 0 y 20µg/L y la SST presenta una distribución aproximadamente simétrica con valores entre 23 y 33°C.

Figura 30. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para septiembre de 2014.

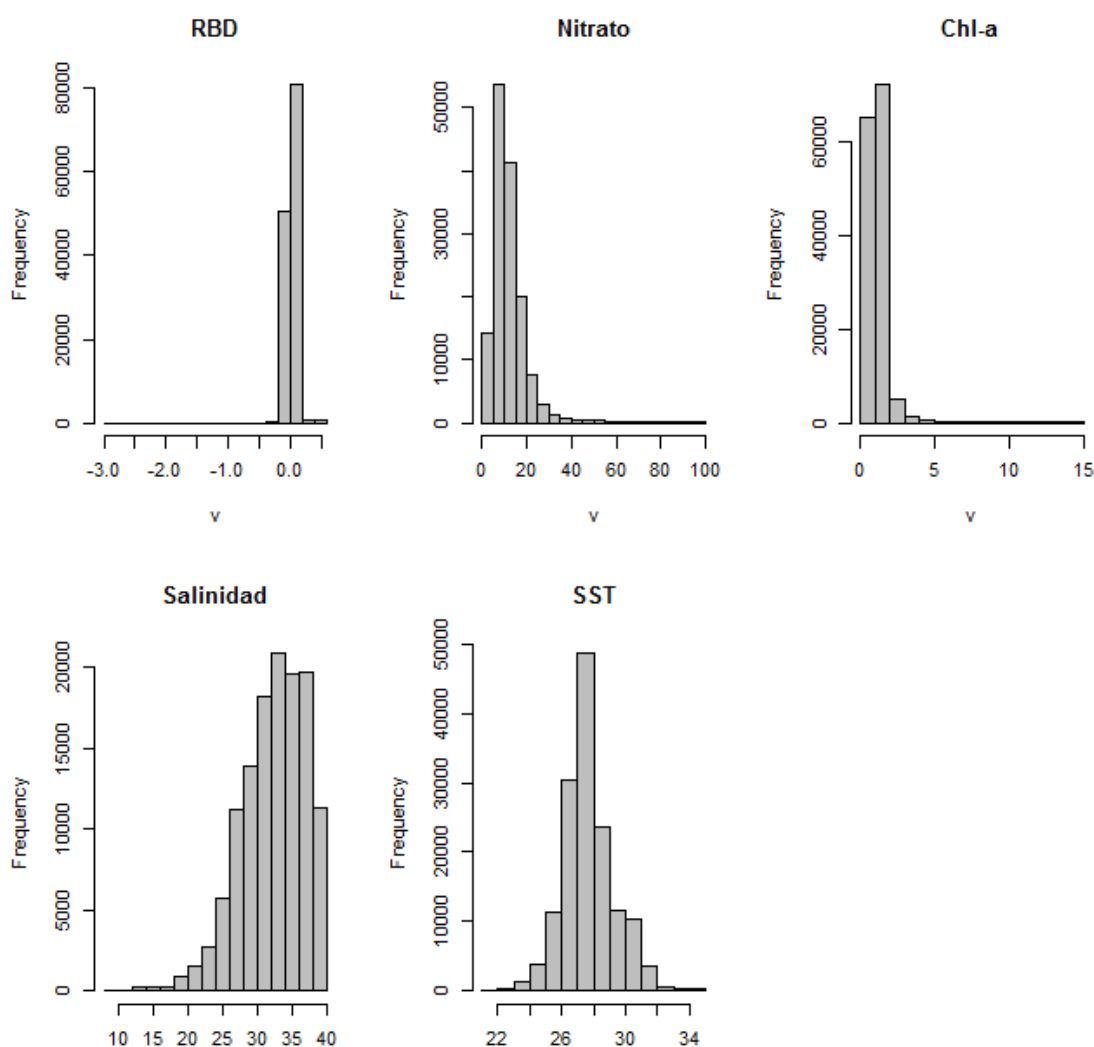
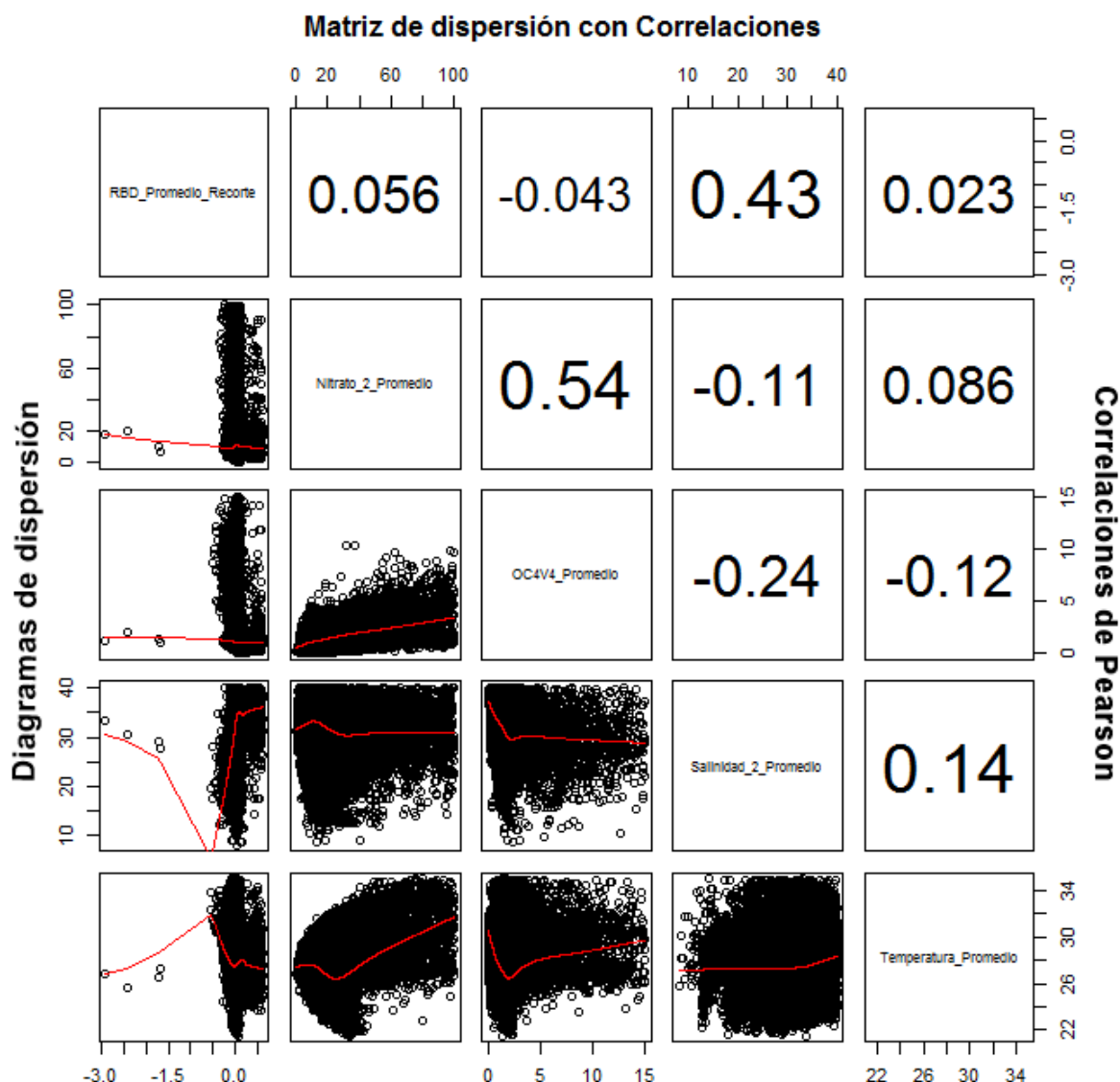


Figura 31. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de septiembre de 2014.

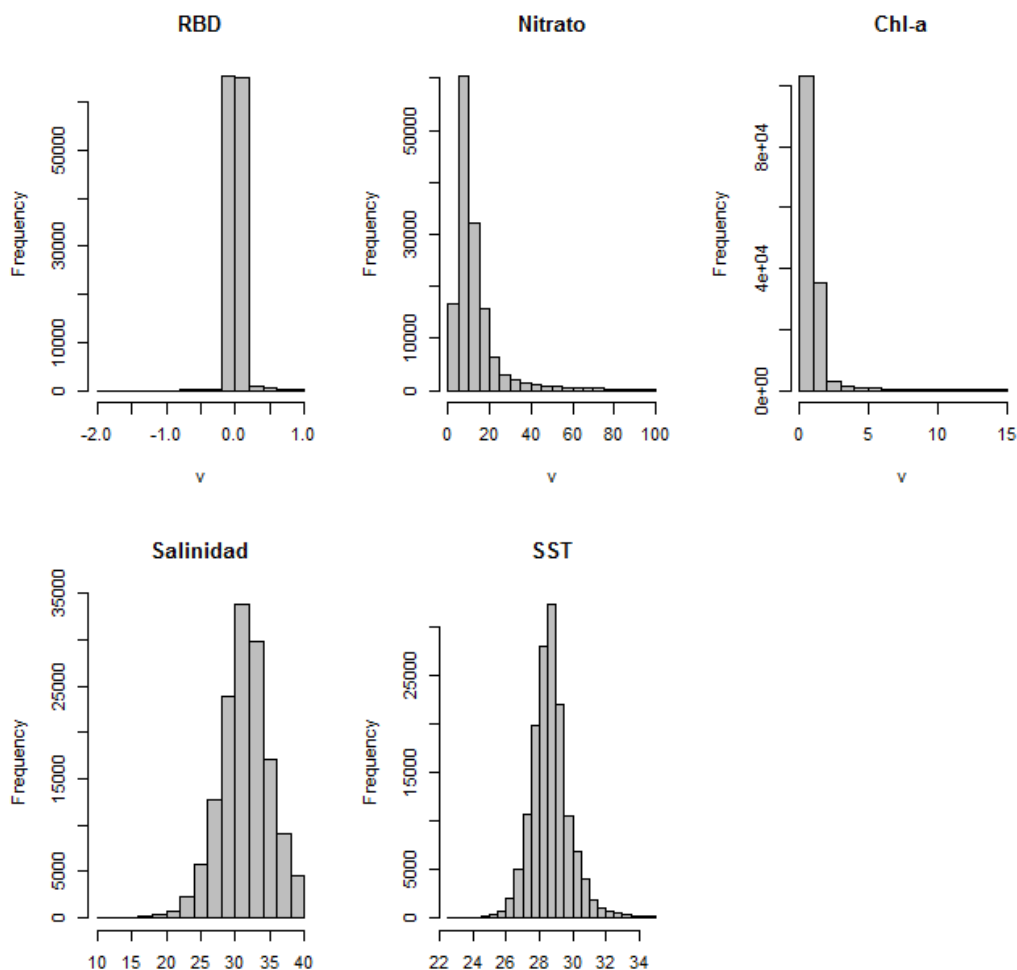


En la Figura 31 se presenta la matriz de diagramas de dispersión que representa la variabilidad de los datos analizados para el mes de septiembre de 2014 y las correlaciones de Pearson entre las variables y el fenómeno. Se observa que la salinidad se mantiene como la variable más explicativa con un coeficiente de Pearson de 0.43 y la clorofila-a, los nitratos y la SST presentan correlaciones de 0.056, -0.043 y 0.023 respectivamente, valores muy bajos indicando una incidencia mínima en las floraciones algales. Se presenta una alta relación lineal entre la clorofila-a y los nitratos con una correlación del 0.54.

En la Figura 32 se observa el comportamiento de las variables para el mes de octubre de 2014, con la principal variación de que la clorofila-a aumenta su concentración en la zona de estudio. El resto de las variables se mantienen en los rangos normales de fluctuación. Además, puede notarse que la temperatura promedio asciende alrededor de los 29°C por lo

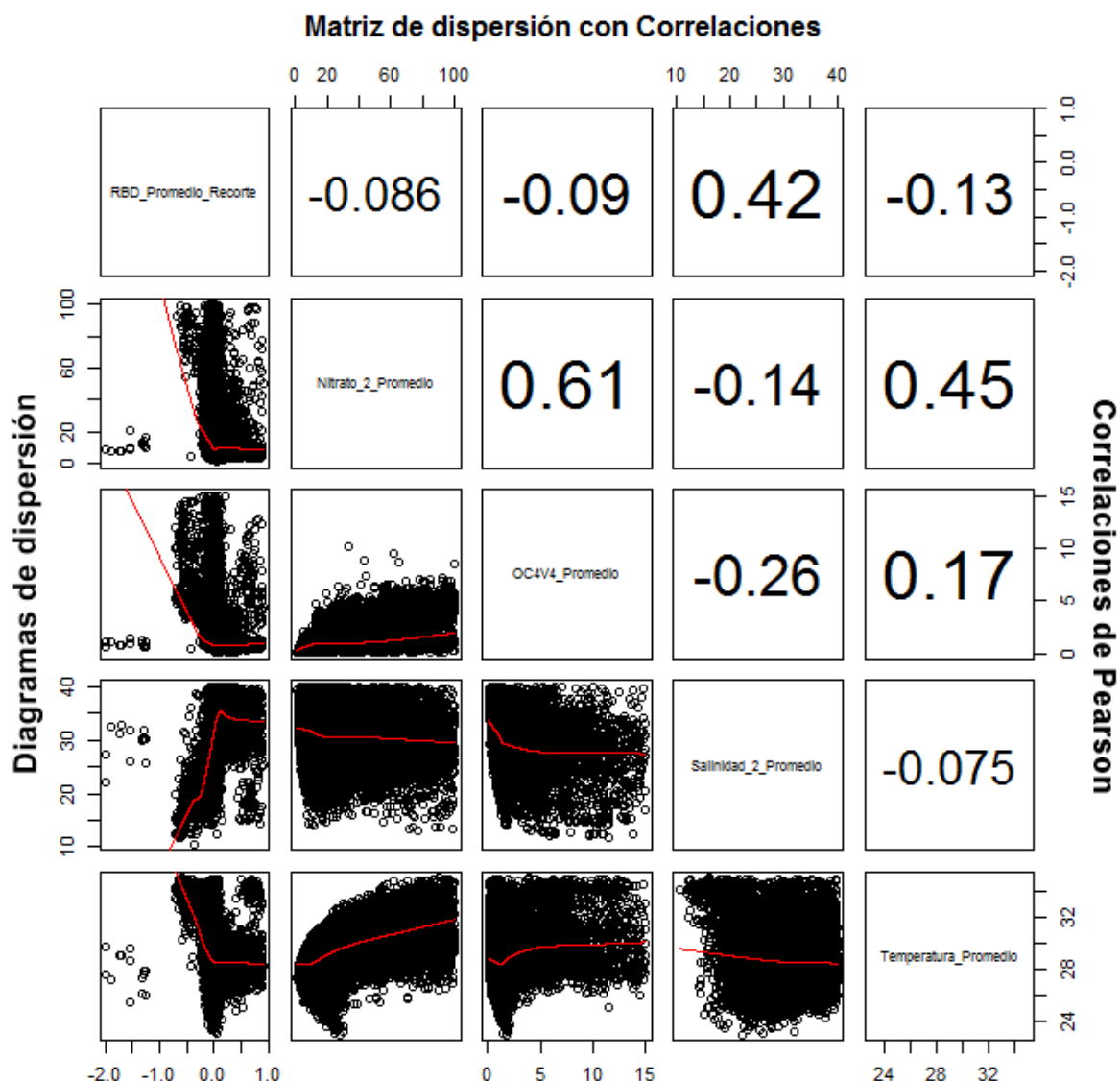
que la correlación podría indicar algo distinto a los anteriores meses con estas nuevas variaciones.

Figura 32. Histograma de frecuencia del índice RBD y las variables, para octubre de 2014.



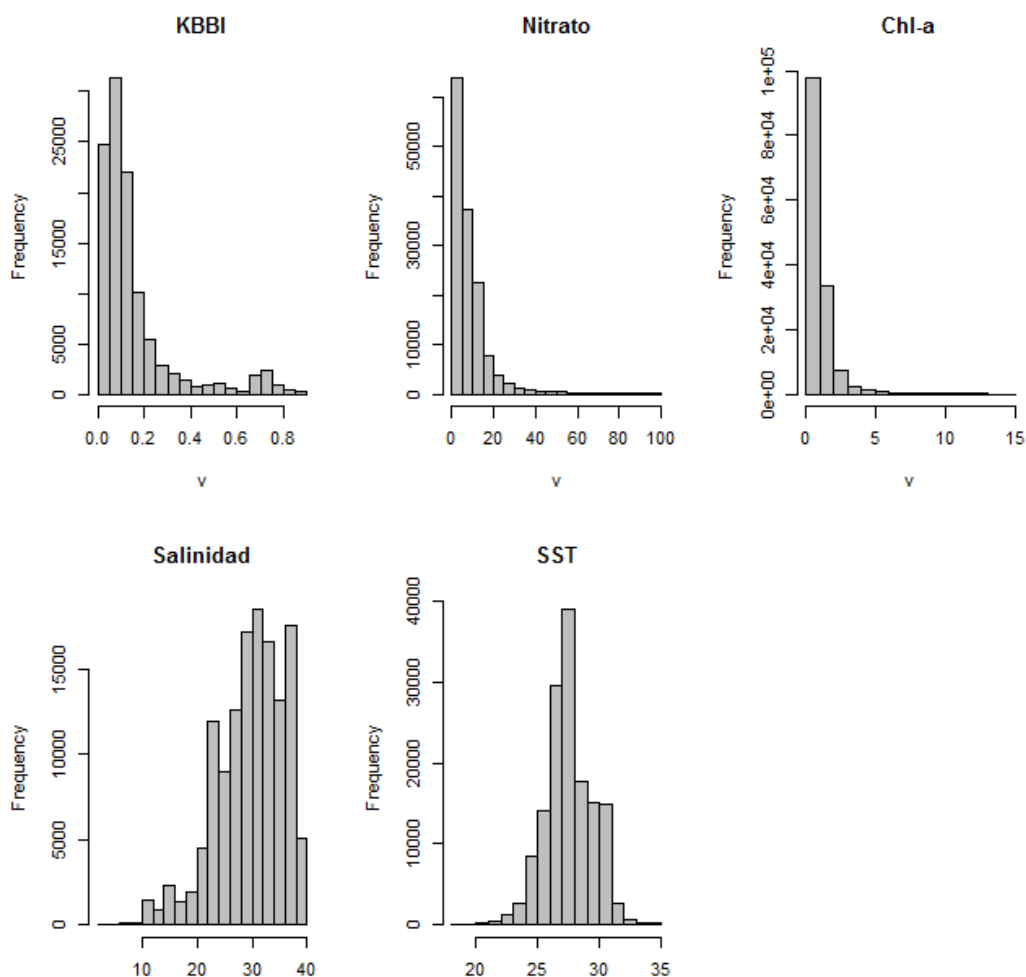
En la Figura 33 se presenta la matriz de dispersión para el mes de octubre del 2014, en la que se cruzan todas las variables del estudio y se observa las relaciones y dependencias entre las mismas. Se presenta el mismo patrón de salinidad correlacionada en buena medida con el índice RBD. Además, es notable el crecimiento de la correlación de la SST en comparación con otros meses del período de estudio. Los nitratos y clorofila-a se mantienen muy bajos con valores de -0.086, -0.09, por lo que se siguen considerando como variables con poca significancia. Se observa una buena correlación entre la clorofila-a y los nitratos, al igual que la SST y los nitratos, con valores de 0.61 y 0.45 respectivamente.

Figura 33. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice RBD para el mes de octubre de 2014.



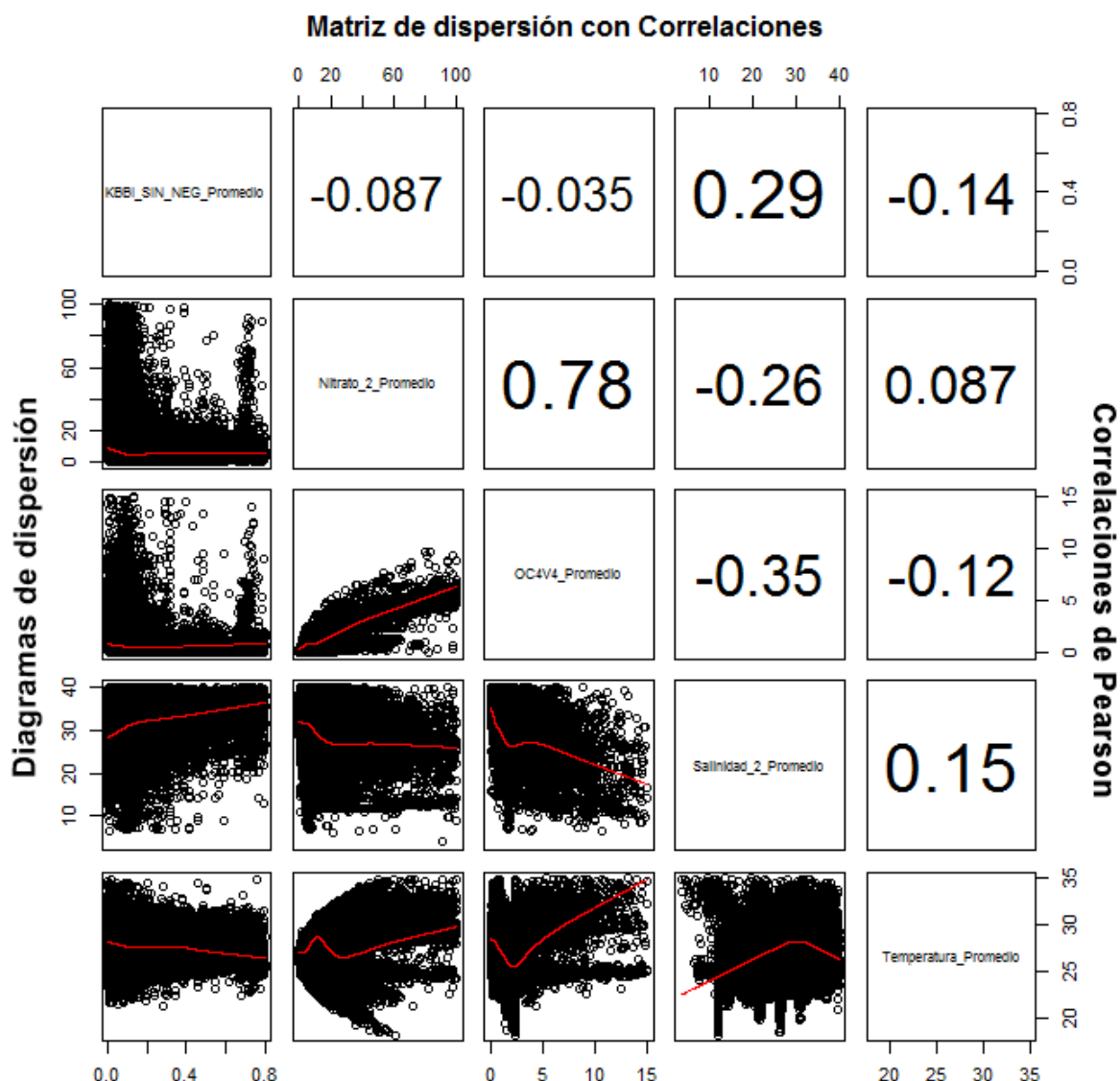
En la Figura 34 se evidencia el comportamiento de las variables objeto de estudio y el índice KBBI correspondiente a la detección en la zona de floraciones de algas nocivas del género *Karenia Brevis* para el mes de junio de 2013. Los más altos valores de presencia de *Karenia* pueden observarse en la parte norte de la costa caribeña colombiana, por lo que se puede constatar de que las condiciones para que proliferen la especie están dadas. También se hace más notable la concentración de nitratos en las zonas cercanas a desembocaduras de ríos importantes de la región, encargados de suministrar un alto contenido de nutrientes al océano. Se observa la frecuencia en la que fluctúan los distintos valores de las variables mencionadas, en las que se puede destacar la baja frecuencia de valores altos de KBBI. Esto es, que existe presencia pero en bajas cantidades. La distribución de la clorofila-a y los nitratos presentan igual comportamiento con un sesgo positivo, mientras que la SST presenta una distribución aproximadamente simétrica.

Figura 34. Histograma de frecuencia del índice KBBI y las variables, para junio de 2013.



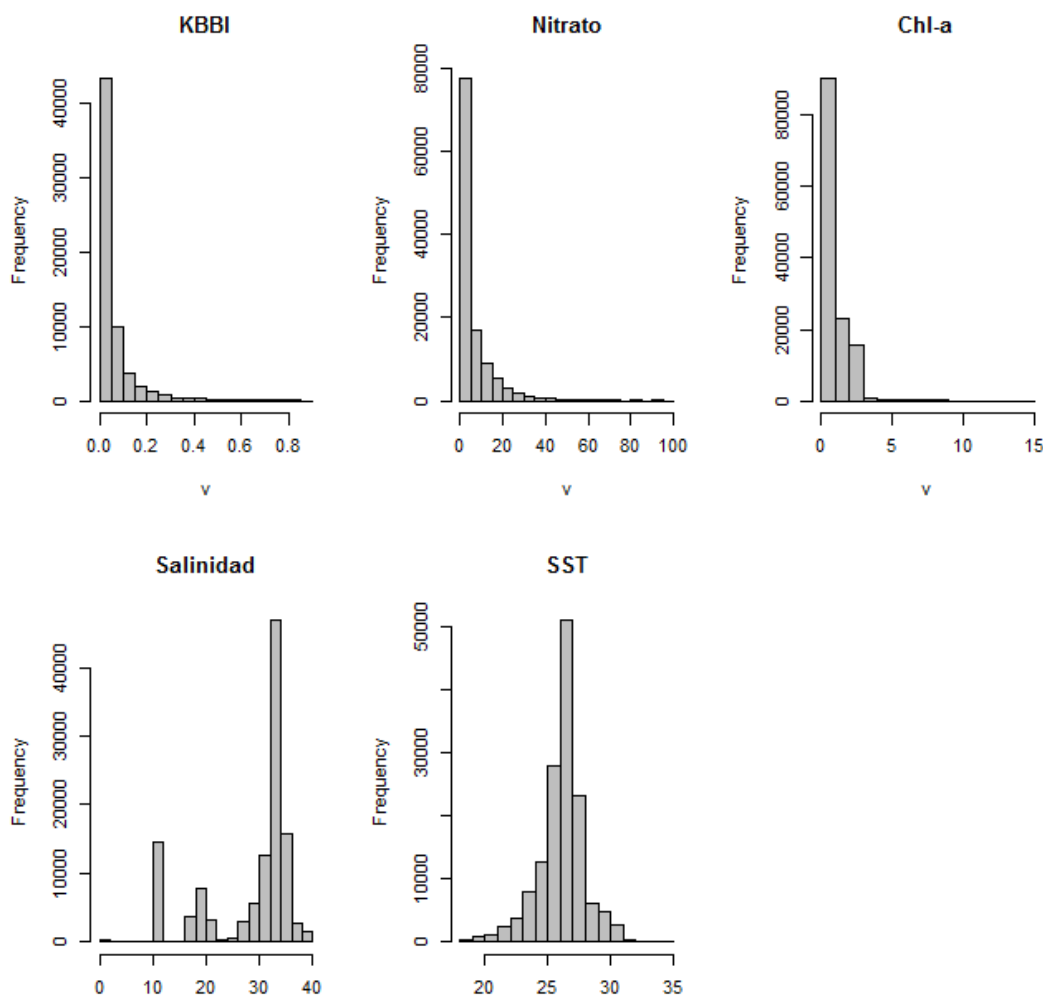
En la Figura 35 se presentan los valores de Correlación de Pearson asociados al índice de *Karenia Brevis* por cada variable mediante la matriz de dispersión. La salinidad con un coeficiente de 0.29, al igual que con el RBD, es la variable con mayor significancia en relación al fenómeno. Además, la temperatura con -0.14 como correlación, está mucho más relacionada con este índice que con el anterior, a pesar de que la correlación sea inversamente proporcional, es decir, mayor presencia de algas nocivas a menores temperaturas. Se presenta una buena correlación entre la clorofila-a y los nitratos como en todos los meses del estudio, y además se observa una correlación débil de -0.35 entre la clorofila-a y la salinidad relación que no se había presentado en los otros meses.

Figura 35. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice KBBI para el mes de junio de 2013.



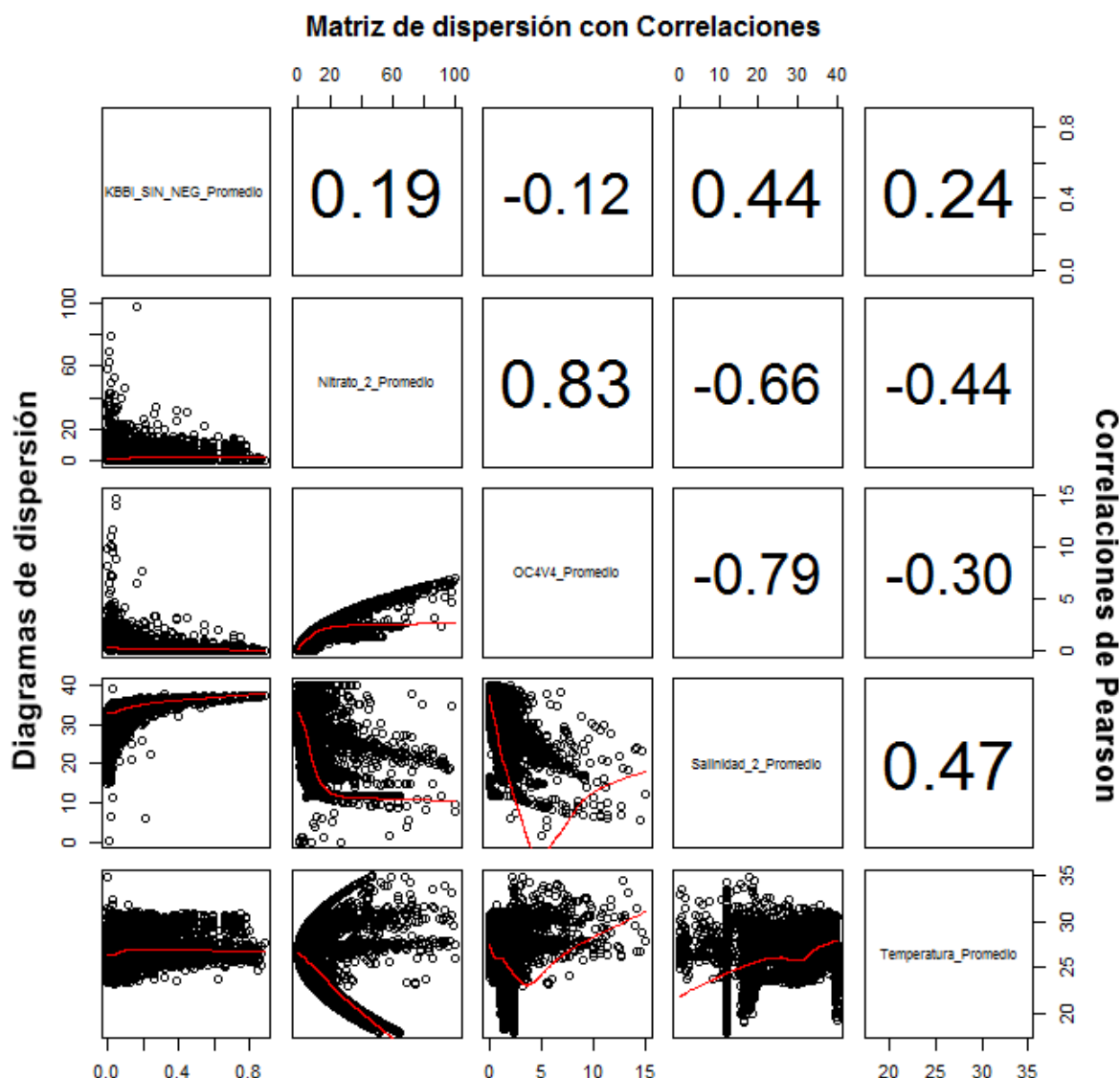
En la Figura 36 se presenta el comportamiento de las variables y el índice KBBI para el mes de agosto de 2014, en el que se observa una menor presencia de algas nocivas. Se destaca que visualmente el contenido de nitratos cercanos a las desembocaduras de ríos relevantes disminuye para este período. Esto la cantidad promedio de nitratos que oscila entre 5 y 10  $\mu\text{g/L}$ . La clorofila-a fluctúa entre 0 y 3 $\text{mg/m}^3$ , la SST sigue presentado una distribución aproximadamente simétrica con valores entre 20 y 30°C.

Figura 36. Histograma de frecuencia del índice KBBI y las variables, para agosto de 2014.



En la Figura 37 se encuentran las correlaciones de las variables en contraste con el KBBI, en la que cabe destacar que la SST presenta una correlación de 0.24, que marca un cambio significativo en la tendencia de correlaciones inversamente proporcionales que venían dándose para esta variable. La salinidad con una correlación de 0.44 continúa siendo la variable que más influye estadísticamente en el estudio. La clorofila-a y los nitratos no son muy significativas a diferencia de la ya mencionada discrepancia entre la salinidad como variable independiente de mayor peso.

Figura 37. Matriz dispersión de correlaciones entre las variables físico-químicas y el índice KBBi para el mes de agosto de 2014.



Se puede observar que ambos índices tienen las correlaciones más altas para el mes de junio y para la segunda época húmeda del año comprendida entre los meses de agosto y noviembre. Las correlaciones más significativas entre el índice RBD y la salinidad, se presentaron en los meses de junio y septiembre con valores de 0.57 y 0.48 respectivamente, para el año 2013. En el año 2014, las mejores correlaciones se observaron en los meses de octubre con una relación de 0.43 y diciembre con 0.42 con la misma variable química. Respecto al índice KBBi las altas correlaciones se presentaron en el mes de junio y agosto con valores de 0.29 y 0.44 respectivamente. La presencia de condiciones óptimas para la proliferación de florecimientos algales nocivos está garantizada por los índices expuestos. La salinidad y la SST son las variables que más inciden en las floraciones de *Karenia Brevis*.

Como resultados se obtuvo que en algunos meses los índices RBD y KBBI generan falsos positivos, es decir, zonas en la imagen donde se presentan valores sobreestimados de *Karenia Brevis* que abarcan grandes extensiones en mar abierto con áreas superiores a 10 000Km<sup>2</sup>, lo que significa el 0.36% del Mar Caribe. La prueba de ello es que si existieran floraciones de tal magnitud ya habrían generado una alerta en las comunidades costeras. Otra causa de ello son los promedios mensuales usados por variable para estimar los florecimientos algales, que ocasionan la pérdida de precisión en la recuperación del parámetro, dado que el tiempo de permanencia del fenómeno sobre las costas no es tan prolongado. En el mes de agosto de 2014, se obtuvo un área aproximada de 500Km<sup>2</sup> con presencia de *Karenia* y en el mes de junio de 2013 un área inferior de 400Km<sup>2</sup>.

## 9. DISCUSIÓN

En este estudio se monitoreó la distribución de ciertas variables físico-químicas que inciden en las FAN, determinando su comportamiento e identificando la relación existente entre estas y las algas nocivas. Se hizo uso de técnicas de percepción remota para la recuperación de los factores, soportado por un proceso de validación con datos de campo de alta correspondencia. El procedimiento empleado para establecer la relación entre variables y FAN, permitió conocer las correlaciones correspondientes y la variación de los valores a lo largo de la zona de estudio, mediante la representación de matrices de correlación e histogramas, respectivamente.

La recuperación de la clorofila a partir de imágenes satelitales sigue siendo un desafío en las aguas costeras, e incluso puede ser una tarea imposible en algunos casos, especialmente cuando el material particulado suspendido es alto (Amin et al. 2009). Para la estimación de Chl-a se usaron tres algoritmos de la familia de algoritmos OC, de lo que se obtuvo mediante la validación por datos de campo que el algoritmo OC4V4 es el más preciso para recuperar la clorofila-a en la zona de estudio con un coeficiente de Correlación de Pearson de 0.96, situación similar a la manifestada por Dogliotti (2007), donde expresa que el algoritmo bio-óptico OC4V4, es uno de los algoritmos que mejor estima la concentración de Chl-a en comparación con los datos tomados en campo.

La SST es una variable física que influye en gran medida en todos los procesos biológicos que se presentan en el ecosistema, por lo que, en este orden de ideas, es de suma relevancia estimar esta variable con el mayor grado de precisión. De acuerdo al proceso de validación usado con datos de campo, se obtuvo coeficientes de correlación de 0.93 de precisión para el algoritmo empleado, de igual manera, Kharraz & Sobrino, (2003) estimaron con un alto grado de precisión la SST, de manera que obtuvieron errores menores a 4°C, usando el mismo algoritmo de Split-window empleado en este estudio. Por esto, se asegura la veracidad de los datos de temperatura recuperados de las imágenes satelitales.

Sarangi et al. (2011), valida su algoritmo de concentración de nitratos con datos in-situ y obtiene un valor de correlación de 0.508 que es menor al valor de 0.83 obtenido en este

estudio con los datos de campo del INVEMAR para el modelo basado en temperatura y clorofila-a, dando cuenta de que se ajusta mejor al Caribe Colombiano. A partir del otro modelo que estima la concentración de nitratos en función de tan solo la SST, Yin et al., (2014) obtuvo un valor más bajo en el coeficiente de determinación por lo que se descartó del estudio.

La recuperación de la salinidad a través de algoritmos de sensoramiento remoto no es una práctica muy frecuente en comparación con modelos de clorofilas y temperaturas. Keith, Lunetta & Schaeffer (2016) usan un algoritmo basado en el cálculo de la salinidad a partir del CDOM, que arroja resultados con coeficientes de determinación del 70% entre la información resultante y los datos de campo. Para el Caribe Colombiano este modelo supera al algoritmo de Binding & Bowers (2003) con coeficientes de determinación de 0.89 sobre 0.85.

En la zona de estudio se definen cuatro períodos climáticos teniendo en cuenta las fases de transición en el desplazamiento de la Zona Intertropical de Convergencia (ZCIT): Época seca mayor (diciembre - marzo), época lluviosa menor (abril - junio), época seca menor o de transición (junio - julio) y lluviosa mayor (agosto - noviembre). Las áreas con florecimientos algales nocivas de mayor extensión detectadas en toda el área de estudio fueron más grandes durante la época lluviosa mayor con floraciones de hasta 500Km<sup>2</sup> y algunos durante la época seca mayor de 400Km<sup>2</sup>, pero la aparición más frecuente fue para el mes de junio que corresponde a la época de transición. La aparición de Floraciones de *Karenia Brevis* en el hemisferio norte son muy esporádicas en espacio y tiempo, aunque la mayoría tienden a ocurrir en los meses de verano y otoño normalmente de junio a noviembre (Brand, Campbell & Bresnan, 2012), lo que se puede contrastar con los meses de la época lluviosa mayor y junio, que son los que más presentaron apariciones del fenómeno en este estudio.

Además, de los resultados obtenidos, se puede deducir que la salinidad y la temperatura superficial del mar son las variables que tienen mayor incidencia en las floraciones de *Karenia Brevis* tal como lo indica (Magaña & Villareal, 2006; Brown et al., 2006; Vargo, 2009) quienes observaron que la SST óptima para el crecimiento de este tipo de algas es de 7 a 33°C, y generalmente crecen entre salinidades de 18 a 45 PSU, con una tasa de crecimiento máxima entre 30 y 34 PSU (Magaña & Villareal, 2006; Brown et al., 2006; Vargo, 2009). En este estudio se encontraron temperaturas de 19 a 33°C por lo general, y valores de salinidad entre 25 y 40 PSU, sustentando la factibilidad de floraciones de algas nocivas en el Caribe Colombiano.

Según la hipótesis planteada por Brand, Campbell & Bresnan (2012), los factores físicos son los principales responsables del desplazamiento y concentración de las células de *Karenia* en la costa, mientras que los nutrientes productos de actividades antrópicas determinan el tamaño de las floraciones. Si la hipótesis llegara a ser correcta, las floraciones de *Karenia* aparecerían esporádicamente y las más devastadoras podrían ocurrir bajo ciertas condiciones físicas donde la eutrofización antropogénica libera más nutrientes en las aguas costeras; de esta manera, habría sido más evidente la relación entre nutrientes y los índices de algas nocivas explorados en este estudio, que no presentó valores de correspondencia considerables. Estos valores obtenidos reafirman lo planteado por Davidson et al. (2014),

quién plantea que las FAN no son un fenómeno nuevo, pueden ocurrir de forma natural con una amplia distribución geográfica previa al enriquecimiento de nutrientes en las aguas costeras, lo que demuestra claramente que el enriquecimiento antropogénico provocado, no es un requisito previo para la ocurrencia de las mareas rojas; explicando los bajos valores de correlación obtenidos para los nitratos.

La revisión de Cannizzaro et al., (2008) establece que en el caso de los florecimientos de *Karenia brevis*, estos inician típicamente en aguas pobres en nutrientes localizadas a varios kilómetros de la costa, posteriormente, vientos y corrientes transportan los florecimientos hacia las zonas costeras donde a menudo son mantenidos allí a lo largo de frentes físicos y posteriormente son potenciados por fuentes de nutrientes adicionales, por lo que podría darse explicación a aparentes valores positivos de *Karenia Brevis* encontrados en zonas lejanas a las costas colombianas, sin embargo sus extensiones sobrestimadas por aproximadamente 10.000Km<sup>2</sup> no se verían justificadas en su totalidad .

## 10. CONCLUSIONES

Los resultados expuestos indican que al monitorear la distribución espacio-temporal de los diferentes factores físico-químicos que pueden incidir en las floraciones de algas nocivas en el mar Caribe Colombiano, la salinidad y la temperatura son las variables que mejor se correlacionan con el fenómeno. La influencia encontrada apunta a que la salinidad puede influir fuertemente cuando sus valores oscilan entre 25 y 40 PSU, y la SST entre 27 y 31°C.

El algoritmo OC4V4, es el modelo que más se aproxima en estimación de clorofila-a para la zona de estudio, con un coeficiente de correlación de 0.96 contra datos de campo. Sin embargo, esta estimación podría mejorarse si se hiciera uso de una corrección por material particulado en la columna de agua, puesto que este es el factor que imposibilita que las aplicaciones de sensores remotos para clorofila-a sean adoptadas en mayor medida para el control de este tipo de problemáticas.

La recuperación de nitratos en la zona de estudio puede verse mejorada en la medida en que la clorofila-a sea una variable estimada con mayor precisión. Así mismo, es una variable que no influye tanto en la manifestación de una floración de algas nocivas, sino en el aumento de su concentración una vez se establecen en las costas. Es posible que, en un eventual caso de floraciones de algas tóxicas, estas se asienten con más facilidad donde haya una desembocadura de un río con descarga de nutrientes considerable.

Se concluye que la *Karenia Brevis* no es un fenómeno que dependa de condiciones específicas de estaciones del año, sino que coincide puntualmente en los mismos meses en los que el fenómeno se manifestó en el hemisferio norte. Es decir, de junio a noviembre los florecimientos aparecerían tanto en las zonas ya predilectas de Norteamérica, como en el Caribe Colombiano. De nuevo, se considera fundamental la necesidad de contemplar tanto

variables que modelen la hidrodinámica o los vientos de la zona, como algunos nutrientes adicionales.

## 11. RECOMENDACIONES

Se debe implementar un proceso más acertado para la recuperación de variables en zonas donde hay presencia de nubes, ya que el método empleado de promedio elimina correctamente las nubes de los productos, pero condiciona a usar un periodo mensual en el proyecto cuando no necesariamente el fenómeno posea esa misma temporalidad.

Para estudios posteriores, se recomienda la inclusión de diferentes variables físico-químicas que puedan intervenir en la aparición de FAN, como el contenido de fosfatos y oxígeno disuelto, el viento, las corrientes oceánicas. Adicionalmente, es de suma importancia incluir las características y la composición del fondo marino, usando batimetría.

Para esta zona de estudio es necesario implementar algoritmos que permitan estimar la presencia de dinoflagelados tropicales de la especie *Gambierdiscus sp* por ser la microalga más frecuente y la productora de la enfermedad Ciguatera.

Se recomienda para estudios de esta índole poseer información de campo del fenómeno nocivo, dado que esta información no es muy manejada por las entidades actualmente, al tener un impacto muy leve. Sin embargo, las condiciones para que la problemática aparezca se dan en el Caribe Colombiano por lo que con ello podría realizarse un mejor análisis y obtener información de mayor veracidad.

## 12. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Noticias UN. (16 de junio de 2015). Toxinas en el mar podrían predecirse. Unimedios. 605. Recuperado de la página <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/toxinas-en-el-mar-podrian-predecirse.html>
- Aké-Castillo, J. A. (2010). Darwin y la decoloración del mar: Marea Roja y FAN. Revista de divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana. Volumen XXIII No 2.
- Akselman, R., Reguera, B. & Lion, M. (2008) HAB-MAPs of toxic marine microalgae in coastal Waters of South America. In: Proceeding of the 12th International Conference on Harmful Algae. International Society for the Study of Harmful Algae and the Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Copenhagen, 243-245
- Alikas, K., Kangro, K., & Reinart, A. (2010). Detecting cyanobacterial blooms in large North European lakes using the Maximum Chlorophyll Index. *Oceanología*, 52, 237–257.
- Amin, R., Zhou, J., Gilerson, A., Gross, B., Moshary, F., & Ahmed, S. (2009). Novel optical techniques for detecting and classifying toxic dinoflagellate *Karenia brevis* blooms using satellite imagery. *Optics express*, 17(11), 9126-9144.
- Babin M., Therriault J., Legendre L. (1991). Potential utilization of temperature in estimating primary production from remote sensing data in coastal and estuarine waters. *Estuar. Coast. Shelf S ci.* 33, 559-579.
- Bagnis, R., Bennett, J., Barsinas, M., Chebret, M., Jacquet, G., Lechat, I., Mitermite, Y., Perolat, H. & Rongeras, S. (1985). Epidemiology of ciguatera in French Polynesia from 1960 to 1984.
- Bastidas, M. L., Rodríguez, E., & Ortiz, J. R. (2006). Obtención y validación de clorofila en la cuenca pacífica colombiana a partir de imágenes satelitales. *Boletín Científico CCCP*, 33-40.
- Becker, R., Sultan, M., Boyer, G., Twiss, M., & Konopko, E. (2009). Mapping cyanobacterial blooms in the Great Lakes using MODIS. *Journal of Great Lakes Research*, 35, 447–453.
- Binding, C., & Bowers, D. (2003). Measuring the salinity of the Clyde Sea from remotely sensed ocean colour. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(4), 605-611.
- Binding, C., Greenberg, T., Jerome, J., Bukata, R., & Letourneau, G. (2011). An assessment of MERIS algal products during an intense bloom in Lake of the Woods. *Journal of Plankton Research*, 33, 793–806.
- Brand, L. E., Campbell, L., & Bresnan, E. (2012). *Karenia*: the biology and ecology of a toxic genus. *Harmful Algae*, 14, 156-178.
- Bravo, I., Vila, M., Masó, M., Figueroa, R. I. y Ramilo, I. (2008). *Alexandrium catenella* and *Alexandrium minutum* blooms in the Mediterranean Sea: Toward the identification of ecological niches. *Harmful Algae* 7, 515-522.
- Bravo, I., Vila, M., Masó, M., Figueroa, R., & Ramilo, I. (2008). *Alexandrium catenella* and *Alexandrium minutum* blooms in the Mediterranean Sea: toward the identification of ecological niches. *Harmful algae*, 7(4), 515-522.
- Bravo, I., Fraga, S., Figueroa, R., Pazos, Y., Massanet, A. & Ramilo, I. (2010a). Bloom dynamics and life cycle strategies of two toxic dinoflagellates in a coastal upwelling

- system (NW Iberian Peninsula). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 57, 222-234.
- Bravo, I., Figueroa, R., Garcés, E., Fraga, S., & Massanet, A. (2010b). The intricacies of dinoflagellate pellicle cysts: The example of *Alexandrium minutum* cysts from a bloom-recurrent area (Bay of Baiona, NW Spain). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 57, 166-174
- Brown, A., Dortch, Q., Van Dolah, F., Leighfield, T., Morrison, W., Thessen, A., Steidinger, K., Richardson, B., Moncreiff, C., & Pennock, J., 2006. Effect of salinity on the distribution, growth, and toxicity of *Karenia* spp. *Harmful Algae* 5 (2), 199–212.
- Brown, O., Minnett, P., (1999). MODIS infrared sea surface temperature algorithm theoretical basis document, version 2.0. Report ATBD25, FL 33149–1098. University of Miami, Miami.
- Cannizzaro, J., Cardera, K., Chena, R., Heilb, C., & Vargo, G. (2008). A novel technique for detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*, in the Gulf of Mexico from remotely sensed ocean color data. *Continental Shelf Research*, 28, 137–158.
- Cauwer, V., Ruddick, K., Park, Y., Nechad, B., Kyramarios, M. (2004). Optical remote sensing in support of eutrophication monitoring in the southern North Sea. *European Association of Remote Sensing Laboratories (3rd )*, 208–221.
- Chen, Z., Hu, C., & Muller-Karger, F. (2007). Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109, 207–220.
- CIOH Oceanografía Operacional (2016) Climatología del Caribe. Recuperado de <https://www.cioh.org.co/meteorologia/ClimatologiaCaribe.php>
- Crosman, E., Horel, J., (2009). MODIS-derived surface temperature of the Great Salt Lake. *Remote. Sens. Environ.* 113, 73–81.
- Cofepris (2004), Plan de comunicación de riesgo Proliferación de algas nocivas (FAN) (Marea Roja), Comisión de fomento sanitario. 1-30.
- Dash, P., Walker, N., Mishra, D., Hu, C., Pinckney, J., & D'Sa, E. (2011). Estimation of cyanobacterial pigments in a freshwater lake using OCM satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3409–3423.
- Davidson, K., Gowen, R. J., Harrison, P. J., Fleming, L. E., Hoagland, P., & Moschonas, G. (2014). Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters. *Journal of environmental management*, 146, 206-216.
- Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., . . . Thornbrugh, D. J. (2008). Eutrophication of US freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environmental Science & Technology*, 43(1), 12-19.
- Dogliotti. (2007). Estimación de la biomasa fitoplanctónica mediante sensoramiento remoto del color del mar y datos de campo en la plataforma continental patagónica. Buenos Aires: Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Buenos Aires.
- Donlon, C., Minnett, P., Gentemann, C., Nightingale, T., Barton, I., Ward, B., Murray, M. (2002). Toward improved validation of satellite sea Surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4): 353-369.
- Duan, H., Ma, R., & Hu, C. (2012). Evaluation of remote sensing algorithms for cyanobacterial pigment retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China. *Remote Sensing of Environment*, 126, 126–135.

- Dugdale R., Morel A., Bricaud A., Wilkerson F. (1989). Modeling new production in upwelling centers: a case study of modeling new production from remotely sensed temperature and color. *Journal of Geophysical Research*. 94, 18119-18132.
- Ekstrand, S. (1992). Landsat TM based quantification of chlorophyll a during algae blooms in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 1913-1926.
- Escalera, L., Reguera B., Moita T., Pazos Y., Cerejo M., Cabanas J. M. & Ruiz-Villarreal M. (2010). Bloom dynamics of *Dinophysis acuta* in an upwelling system: In situ growth versus transport. *Harmful Algae*. 9, 312-322
- Fraga, S. Bravo, I. González, R., Sampedro, N., Garcés, E., Vila, M., Masó, M., Giacobbe, M., Luglié, A. y Gotsis, O. (2004). Diversity of the dinoflagellate genus *Alexandrium* in the Mediterranean Sea. *Rapp Comm int Mer Médit* 37:358
- Fraga, S., Rodríguez, F., Caillaud, A., Diogène, J., Raho, N. & Zapata, M. (2011). *Gambierdiscus excentricus* sp. nov. (Dinophyceae), a benthic toxic dinoflagellate from the Canary Islands (NE Atlantic Ocean) *Harmful Algae*. 11, 10-22
- Giardino, C., Pepe, M., Brivio, P., Ghezzi, P., & Zilioli, E. (2001). Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *The Science of the Total Environment*, 268, 19–29.
- Gitelson, A., Karmieli, A., Goldman, N., Yacobi, Y., & Mayo, M. (1996). Chlorophyll estimation in the Southeastern Mediterranean using CZCS images: adaptation of an algorithm and its validation. *Journal of Marine Systems*, 9, 283-290.
- Gómez, J., Alonso, C., & García, A. (2011). Remote sensing as a tool for monitoring water quality parameters for Mediterranean Lakes of European Union water framework directive (WFD) and as a system of surveillance of cyanobacterial harmful algae blooms (SCyanoHABs). *Environmental Monitoring and Assessment*, 181, 317–334.
- Graham, J., Loftin, K., & Kamman, N. (2009). Monitoring recreational freshwaters. *Lakeline: North American Lake Management Society*, 18–24.
- Gregor, J., & Maršálek, B. (2004). Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. *Water Research*, 38(3), 517-522.
- Ha, N. T., Koike, K., & Nhuan, M. (2013). Improved accuracy of chlorophyll-a concentration estimates from MODIS imagery using a two-band ratio algorithm and geostatistics: As applied to the monitoring of eutrophication processes over Tien Yen Bay (Northern Vietnam). *Remote Sensing*, 6(1), 421-442.
- Hallegraeff, G. M. (2010). Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge. *Journal of phycology*, 46(2), 220-235.
- Hyde, K., O'Reilly, J., & Oviatt, C. (2007). Validation of SeaWiFS chlorophyll a in Massachusetts Bay. *Continental Shelf Research*, 27, 1677–1691.
- Hyde, K., O'Reilly, J., & Oviatt, C. (2008) Evaluation and application of satellite primary production models in Massachusetts Bay. *Continental Shelf Research*, 28, 1340–1351.
- Ibrahim, A., Mabuchi, Y., & Murakami, M. (2009). Remote sensing algorithms for monitoring eutrophication in Ishizuchi storm water reservoir in Kochi Prefecture, Japan. *Hydrol. Sci. J.* 50, 525–542.

- Johnk, K., Huisman, J., Sharples, J., Sommeijer, B., Visser, P., & Stroom, J. (2008). Summer heat waves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 14, 495–512.
- Kazantzidis, A., Eleftheratos, K. & Zerefos, C. (2011), Effects of cirrus cloudiness on solar irradiance in four spectral bands, *Atmos. Res.*, 102, 452–459.
- Kazantzidis, A., Tzoumanikas, P., Bais, A., Fotopoulos, S. & Economou, G. (2013), Cloud detection and classification with the use of whole-sky ground-based images, in *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, pp. 80–88, Springer, Berlin.
- Kahru, M., Savchuk, O., & Elmgren, R. (2007). Satellite measurement of cyanobacteria bloom frequency in the Baltic Sea: Interannual and spatial variability. *Marine Ecology Progress Series*, 343, 15–23.
- Keith, D., Lunetta, R., & Schaeffer, B. (2016). Optical Models for Remote Sensing of Colored Dissolved Organic Matter Absorption and Salinity in New England, Middle Atlantic and Gulf Coast Estuaries USA. *Remote Sensing*, 8(4), 283.
- Kharraz, J., & Sobrino, J. A. (2003). Estimación de la temperatura de la superficie terrestre y del contenido total en vapor de agua atmosférico a partir de datos MODIS. *Revista de Teledetección*, 59-64.
- Kutser, T., Metsamaa, L., Strömbeck, N., & Vahtmäe, E. (2006). Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67, 303–312.
- Li, Q., Lu, W., & Yang, J. (2011), A hybrid thresholding algorithm for cloud detection on ground-based color images, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28, 1286–1296,
- López, G., Colditz, R., Cruz M., Ressler, R., Mas, J. (2011). Herramientas para el análisis de los datos de MODIS. *Aplicaciones del Sensor MODIS para el Monitoreo del Territorio, México*. 71-93.
- Lunetta, R., Schaeffer, B., Stumpf R., Keith, D., Jacobs, S., Murphy, M. (2015). Evaluation of cyanobacteria cell count detection derived from MERIS imagery across the eastern USA. *Remote Sensing of Environment*, 157, 24–34.
- Magaña, H., Villareal, T., 2006. The effects of environmental factors on the growth rate of *Karenia brevis* (Davis) G. Hansen and Moestrup. *Harmful Algae* 5, 192–198.
- Mancera, J., & Vidal, L. (1994). Florecimiento de microalgas relacionado con mortandad masiva de peces en el complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costera Invemar*, 3, 103 -117.
- Mancera, J. & Vidal, L. (2007). Informe de Colombia. 27-30. En: Mancera, J. E. (Ed.). *IOC Regional Science Planning Workshop on Harmful Algal Blooms in Iocaribe- ANCA-IV*. Universidad Nacional de Colombia sede Caribe, San Andrés. 81.
- Mancera, J., Gavio. B. y Arencibia, G. (2009), Floraciones algales nocivas, intoxicación por microalgas e impactos en el desarrollo regional: el caso de San Andrés isla, Caribe Colombiano. *Cuadernos del Caribe*, 13, 46-62.
- Mancera, J., Celis, B. y Gavio, B. (2015), Intoxicación por microalgas marinas en San Andrés isla, potencial amenaza para el desarrollo regional. *Cuadernos del Caribe*, 15.
- Matthews, A., Duncan, A., Davison, R. (2001). An assessment of validation techniques for estimating chlorophyll-a concentration from airborne multispectral imagery. *Int. J. Remote Sens.* 22, 429–447.

- Matthews, M., Bernard, S., & Winter, K. (2010). Remote sensing of cyanobacteria dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2070–2087.
- Matthews, M., Bernard, S., & Robertson, I. (2012). An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacteria-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 124, 637–652.
- McClain, C., Cleave, M., Feldman, G., Gregg, W., Hooker, S., & Kuring, N. (1998) Science quality SeaWiFS data for global biosphere research. *Sea Technology Reprint*. 10-16.
- Molinet, C., Lafon, A., Lembeye, G. & Moreno C. (2003). Patrones de distribución espacial y temporal de floraciones de *Alexandrium catenella* (Whedon & Kofoid) Balech 1985, en aguas interiores de la Patagonia noroccidental de Chile. *Rev. chil. hist. nat.* 76, 681-698.
- Mooij, W., Janse, J., De Senerpont Domis, L., Hülsmann, S., & Ibelings, B. (2007). Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PC Lake. *Hydrobiology*, 584, 443–454.
- Morel, A., and Prieur, L. (1977) Analysis of variation in ocean. *Limnology and Oceanography*, 22, 709-722.
- Moses, W., Gitelson, A., Berdnikov, S., & Povazhnyy, V. (2009). Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS—The Azov Sea case study. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6, 845–849.
- Muciño Márquez, R. E. (2010). Variación estacional de la comunidad fitoplanctónica en granjas atuneras en la Bahía de La Paz, Baja California Sur (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- O'Reilly, J., Maritorena, S., Mitchell, B., Siegel, D., Carder, K., & Garver, S. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(24), 937-953.
- O'Reilly, J., Maritorena, S., Siegel, D. A., O'Brien, M. C., Toole, D., Mitchell, B. G., & Cota, G. (2000). Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part, 3, 9-23.
- Onderka, M., & Pekarova, P. (2008). Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data. *Science of the Total Environment*, 397, 238–243.
- Orduña, R. (2012). Patrones de distribución y abundancia del fitoplancton nocivo en la zona costera de Tuxpan Veracruz, México. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana.
- Park, Y., & Ruddick, K. (2007). Detecting algae blooms in European waters. *Envisat Symposium 2007*, ESA SP-636.
- Puigserver, M., Moneris, N., Pablo, J., Alós, J. y Moyá, G. (2009). Análisis multivariante sobre la distribución del fitoplancton tóxico en aguas costeras del archipiélago balear (Mar Mediterráneo). Dept. de Biología, Univ. Illes Balears, Mallorca, España.
- REDCAM (2014). Informe Técnico. Diagnóstico y Evaluación de Calidad de Aguas Marinas y Costeras en el Caribe y Pacífico Colombianos.
- Reinart, A. & Reinhold, M., (2008). Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data. *Remote. Sens. Environ.* 112, 603–611.
- Richardson, L. (1996). Remote sensing of algal bloom dynamics. *BioScience*, 46, 492-501.

- Ruiz-Verdú, A., Simis, S., Hoyos, C., Gons, H., & Peña-Martínez, R. (2008). An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3996–4008.
- Sar, E. A., Ferrario, M. E., & Reguera, B. (2002). Floraciones algales nocivas en el Cono Sur Americano: Instituto Español de Oceanografía.
- Sarangi, R., Thangaradjou, T., Kumar, A y Balasubramanian, T. (2011). Development of nitrate algorithm for the Southwest Bay of Bengal water and its implication using remote sensing satellite datasets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4, 983-991.
- Schalles, J. (2006) Optical Remote Sensing Techniques to Estimate Phytoplankton Chlorophyll-a Concentrations in Coastal Waters with Varying Suspended Matter and CDOM Concentrations. *Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes: Science and Management Application*. 9, 27–79.
- Sellner, K., Doucette, G. & Kirkpatrick, G. (2003). Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30, 383-406.
- Siegel, H., Gerth, M., Tiesel, R., Tschersich, G., (2006). Sea Surface Temperature development of the Baltic Sea in the period 1990–2004. *Oceanologia* 48, 119–131.
- Sierra-Beltrán A.P, Lluch-Cota D. B, Lluch-Cota S.E, Cortés-Altamirano R, Cortés-Lara M.C. y Castillo-Chávez M. (2012). Dinámica espacio-temporal de organismos precursores de marea roja en la costa Pacífica de América del Norte y Centroamérica. *Revista de biología tropical*. 52.
- Simis, S., Peters, S., & Gons, H. (2005). Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. *Limnology and Oceanography*, 50, 237–245.
- Siswanto, E., Ishizaka, J., Tripathy, S., Miyamura, K. (2013). Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. *Remote sensing of environment*. 129, 185-196.
- Switzer A., Kamykowski D., Zentara S. (2003). Mapping nitrate in the global ocean using remotely sensed sea surface temperature. *J . Geophys . Res . – Oceans*. 108, 280-291.
- Smale, D. & Wernberg, T. (2009). Satellite-derived SST data as a proxy for water temperature in nearshore benthic ecology. *Marine Ecology, Prog. Ser.*, 387(2): 27-37.
- Strickland J D H. (1970). The Ecology of the Plankton Off La Jolla, California, in the Period April Through September, 1967. University of California Press, California, USA. 1-22
- Suárez, B. & Guzmán, L. (1992). Floraciones de algas nocivas. Mareas rojas y toxinas marinas. *Revista de Sanidad de la Defensa Nacional*, 9, 133-138
- Suess E & Thiede J. (1983). Coastal Upwelling Its Sediment Record. Springer US, New York, USA. 61-83.
- Trescott, A. (2012). Remote sensing models of algal blooms and cyanobacteria in Lake Champlain. *Environmental & water resources engineering Master projects*. 48, 1-56.
- UNAL (2015), I seminario taller sobre florecimientos algales nocivos: impactos en el desarrollo local, regional y nacional. Tomado de la página oficial de la Comisión Colombiana del Océano. Página web. <http://www.cco.gov.co/documentos/pdf/Algas%20Nocivas.pdf>
- Vargo, G., 2009. A brief summary of the physiology and ecology of *Karenia brevis* Davis (G. Hansen and Moestrup comb. nov.) red tides on the West Florida Shelf and of

- hypotheses posed for their initiation, growth, maintenance, and termination. *Harmful Algae* 8, 573–584.
- Vincent, R., Qin, X., Mckay, R., & Miner, J. (2004). Phycocyanin detection from Landsat TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 89, 381–392.
- Wynne, T., Tomlinson, M., Warner, R., Tester, P., Dyble, J., & Fahnensteil, G. (2008). Relating spectral shape to cyanobacterial blooms in the Laurentian Great Lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3665–3672.
- Wynne, T., Stumpf, R., Tomlinson, M., & Dyble, J. (2010). Characterizing a cyanobacterial bloom in western Lake Erie using satellite imagery and meteorological data. *Limnology and Oceanography*, 55, 2025–2036.
- Wynne, T., Stumpf, R., Tomlinson, M., Fahnensteil, G., Dyble, J., Schwab, D., & Joseph-Joshi, S. (2013). Evolution of a cyanobacteria bloom forecast system in western Lake Erie: Development and initial evaluation. *Journal of Great Lakes Research*. 39, 90–99.
- Yin, J., Lin, L., Wang, Y. y Du, J. (2014). Temporal variability of temperature-nitrate relationship in a coastal region. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 32, 879–885.
- Yu-Hwan, A. & Palanisamy, S. (2006) Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters. *Remote sensing of environment* 103, 419–437
- Zimba, P., Gitelson, A. (2006). Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, 256, 272–286.

### 13. ANEXOS

Anexo 1. Datos utilizados para la validación de Chl-a (mg/m3) para el periodo 2013

| <b>Parámetro Chl-a 2013</b> |            |                      |              |             |             |
|-----------------------------|------------|----------------------|--------------|-------------|-------------|
| <b>Estación</b>             | <b>Mes</b> | <b>Dato de Campo</b> | <b>OC4V4</b> | <b>OC3M</b> | <b>OC2M</b> |
| C47005033                   | ENERO      | 23.700               | 16.854       | 14.583      | 10.259      |
| C47003037                   | FEBRERO    | 0.800                | 1.317        | 2.348       | 1.077       |
| C47002003                   | FEBRERO    | 0.800                | 2.411        | 4.735       | 1.790       |
| C47003028                   | FEBRERO    | 1.200                | 5.480        | 10.947      | 3.567       |
| C47003046                   | FEBRERO    | 1.700                | 3.256        | 5.719       | 2.305       |
| C47002002                   | FEBRERO    | 1.900                | 4.193        | 7.483       | 2.843       |
| C47003016                   | FEBRERO    | 2.200                | 4.869        | 7.692       | 3.218       |
| C47002006                   | FEBRERO    | 2.300                | 7.058        | 25.749      | 3.843       |
| C47003001                   | FEBRERO    | 3.800                | 4.767        | 26.768      | 3.182       |
| C47004003                   | FEBRERO    | 4.300                | 8.990        | 4.734       | 6.526       |
| C47005026                   | FEBRERO    | 11.500               | 7.429        | 25.330      | 4.659       |
| C47005028                   | FEBRERO    | 13.700               | 23.425       | 13.205      | 18.248      |
| C47005027                   | FEBRERO    | 14.700               | 10.519       | 15.345      | 6.627       |
| C47005032                   | FEBRERO    | 16.000               | 35.371       | 24.440      | 50.949      |
| C08002014                   | MARZO      | 1.400                | 2.784        | 2.605       | 2.058       |
| C08002007                   | MARZO      | 5.100                | 2.323        | 1.919       | 1.778       |
| C47005033                   | MARZO      | 8.010                | 18.048       | 2.695       | 13.039      |
| C70001004                   | ABRIL      | 0.400                | 2.323        | NA          | 1.778       |
| C70002026                   | ABRIL      | 0.700                | 3.099        | 5.296       | 2.244       |
| C70002041                   | ABRIL      | 0.800                | 2.798        | 2.084       | 2.062       |
| C70002019                   | ABRIL      | 2.200                | 1.280        | 1.096       | 1.063       |
| C47005032                   | ABRIL      | 49.700               | 36.263       | 97.271      | 28.783      |
| C47005032                   | JUNIO      | 132.200              | 141.991      | 104.870     | 232.805     |
| C70002019                   | JULIO      | 0.220                | 0.902        | 17.111      | 0.765       |
| C70001004                   | JULIO      | 0.260                | 3.436        | 16.860      | 2.406       |
| C70002026                   | JULIO      | 0.290                | 3.685        | 10.317      | 2.516       |
| C23002001                   | JULIO      | 0.940                | 9.495        | 15.523      | 5.776       |
| C70002040                   | JULIO      | 0.960                | 6.420        | 8.994       | 4.089       |
| C47005033                   | JULIO      | 2.140                | 6.194        | 3.854       | 3.968       |
| C23002002                   | JULIO      | 2.240                | 5.610        | 18.588      | 3.612       |
| C23002006                   | JULIO      | 2.820                | 13.587       | 32.638      | 8.520       |
| C47002003                   | AGOSTO     | 0.220                | 1.841        | 1.532       | 1.465       |
| C47003046                   | AGOSTO     | 0.330                | 2.764        | 2.371       | 2.032       |
| C47002006                   | AGOSTO     | 0.370                | 4.820        | 3.291       | 3.169       |
| C47002002                   | AGOSTO     | 0.390                | 10.076       | 13.719      | 6.321       |
| C47003037                   | AGOSTO     | 0.740                | 1.815        | 1.629       | 1.454       |
| C47003001                   | AGOSTO     | 0.750                | 8.373        | 4.577       | 5.160       |
| C47003016                   | AGOSTO     | 0.870                | 4.987        | 6.016       | 3.284       |

|           |            |        |        |        |        |
|-----------|------------|--------|--------|--------|--------|
| C23001003 | AGOSTO     | 2.370  | 8.867  | 7.128  | 5.435  |
| C23001002 | AGOSTO     | 5.680  | 9.256  | 5.225  | 5.654  |
| C47004003 | AGOSTO     | 9.940  | 12.210 | 4.205  | 7.608  |
| C47005032 | AGOSTO     | 16.000 | 21.138 | 12.168 | 12.703 |
| C08002007 | SEPTIEMBRE | 0.410  | 5.902  | 5.833  | 3.812  |
| C08002019 | SEPTIEMBRE | 0.670  | 2.180  | 1.902  | 1.689  |
| C08002011 | SEPTIEMBRE | 1.410  | 3.518  | 3.819  | 2.474  |
| C08002014 | SEPTIEMBRE | 1.630  | 4.347  | 8.982  | 2.906  |
| C44002025 | OCTUBRE    | 1.250  | 3.110  | 6.077  | 2.231  |
| C44002019 | OCTUBRE    | 1.480  | 3.659  | 44.304 | 2.545  |
| C44003006 | OCTUBRE    | 2.200  | 2.113  | 2.033  | 1.645  |
| C13002025 | OCTUBRE    | 3.230  | 3.034  | 3.559  | 2.196  |
| C44003019 | OCTUBRE    | 4.370  | 3.044  | 7.135  | 2.203  |
| C13002013 | OCTUBRE    | 18.050 | 32.487 | 60.021 | 34.527 |
| C13002014 | OCTUBRE    | 20.440 | 21.324 | 55.966 | 14.383 |
| C47005033 | NOVIEMBRE  | 29.600 | 46.928 | 19.793 | 65.201 |
| C47005028 | DICIEMBRE  | 11.300 | 23.763 | 25.558 | 26.997 |

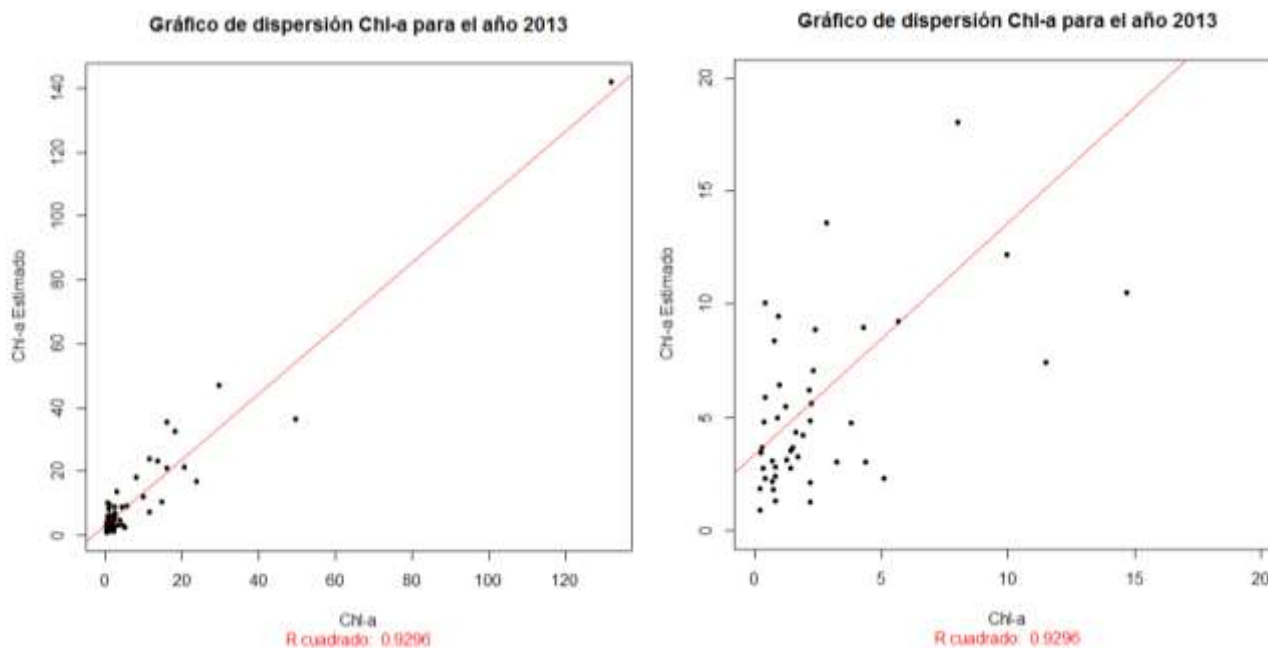
Anexo 2. Datos utilizados para la validación de Chl-a (mg/m3) para el periodo 2014.

| <b>Parámetro Chl-a 2014</b> |            |                      |              |             |             |
|-----------------------------|------------|----------------------|--------------|-------------|-------------|
| <b>Estación</b>             | <b>Mes</b> | <b>Dato de Campo</b> | <b>OC4V4</b> | <b>OC3M</b> | <b>OC2M</b> |
| C47005033                   | ENERO      | 38.400               | 8.789        | 5.760       | 5.692       |
| C08002007                   | FEBRERO    | 0.620                | 3.656        | 3.641       | 2.558       |
| C08002011                   | FEBRERO    | 1.220                | 4.166        | 5.495       | 2.833       |
| C08002014                   | FEBRERO    | 13.260               | 4.486        | 14.719      | 3.013       |
| C08002019                   | FEBRERO    | 24.390               | 3.392        | 3.382       | 2.409       |
| C08003042                   | FEBRERO    | 28.800               | 6.605        | 7.271       | 4.193       |
| C47005032                   | FEBRERO    | 88.100               | 78.573       | 34.640      | NA          |
| C47005033                   | MARZO      | 0.070                | 9.503        | 4.131       | 6.387       |
| C23001002                   | MARZO      | 0.470                | 4.183        | 6.046       | 2.825       |
| C23001003                   | MARZO      | 0.480                | 6.995        | 10.644      | 4.436       |
| C23002001                   | MARZO      | 0.690                | 2.663        | 2.776       | 1.979       |
| C23002002                   | MARZO      | 0.900                | 2.323        | NA          | 1.778       |
| C23002006                   | MARZO      | 1.540                | 2.358        | 2.790       | 1.800       |
| C70001004                   | MARZO      | 1.930                | 1.910        | 2.875       | 1.497       |
| C47002002                   | ABRIL      | 0.200                | 2.748        | 2.119       | 2.025       |
| C47002003                   | ABRIL      | 0.300                | 1.990        | 1.671       | 1.562       |
| C47003001                   | ABRIL      | 0.300                | 2.630        | 2.679       | 1.905       |
| C47003037                   | ABRIL      | 0.800                | 1.709        | 3.092       | 1.346       |
| C47003046                   | ABRIL      | 2.100                | 1.573        | 1.013       | 1.218       |
| C47004003                   | ABRIL      | 4.300                | 3.106        | NA          | 2.238       |
| O_40                        | JUNIO      | 0.573                | 1.545        | 2.112       | 1.235       |
| C47005033                   | JUNIO      | 33.100               | 6.125        | NA          | 3.908       |

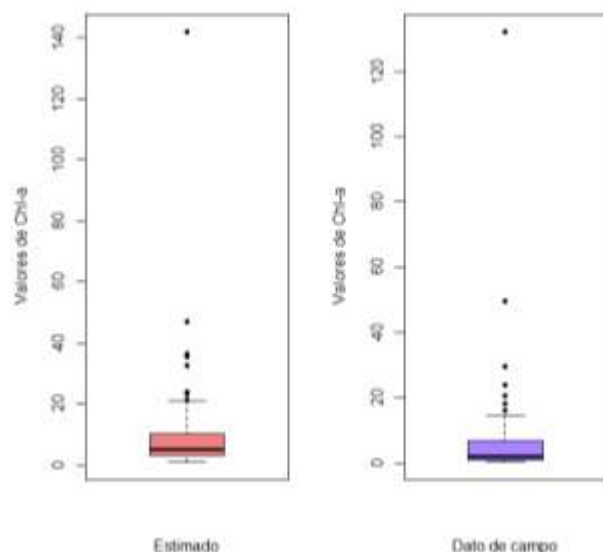
|           |            |        |        |        |        |
|-----------|------------|--------|--------|--------|--------|
| C47005027 | JUNIO      | 48.100 | 61.548 | NA     | NA     |
| O_40      | JULIO      | 0.428  | 1.915  | 3.364  | 1.490  |
| O_40      | AGOSTO     | 0.529  | 0.846  | 0.726  | 0.758  |
| O_40      | SEPTIEMBRE | 0.440  | 1.905  | 1.762  | 1.510  |
| C47005033 | SEPTIEMBRE | 4.000  | 8.619  | 7.887  | 5.312  |
| C47005033 | OCTUBRE    | 6.400  | 8.939  | 6.460  | 5.475  |
| C47005026 | OCTUBRE    | 23.500 | 3.796  | 2.208  | 2.624  |
| C47005032 | OCTUBRE    | 96.100 | 59.430 | 59.941 | 80.422 |
| C47005033 | NOVIEMBRE  | 3.000  | 20.336 | 31.654 | 13.867 |
| C44002019 | NOVIEMBRE  | 4.300  | 4.300  | 12.529 | 2.906  |
| C44002025 | NOVIEMBRE  | 6.600  | 3.741  | 7.959  | 2.584  |
| C44003006 | NOVIEMBRE  | 7.600  | 3.117  | 15.496 | 2.242  |
| O_40      | DICIEMBRE  | 0.369  | 1.457  | 1.568  | 1.181  |
| C13001010 | DICIEMBRE  | 1.330  | 4.417  | 6.293  | 2.980  |
| C13001012 | DICIEMBRE  | 2.780  | 9.878  | 23.448 | 6.066  |
| C13003048 | DICIEMBRE  | 3.250  | 4.171  | 6.866  | 2.836  |
| C13004035 | DICIEMBRE  | 3.600  | 2.328  | 13.722 | 1.755  |
| C47005026 | DICIEMBRE  | 16.800 | 7.613  | 3.753  | 4.808  |

Debido a que se presentan datos atípicos, se generan gráficos con un límite de datos para observar de mejor manera el comportamiento de los datos.

Anexo 3. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Chl-a mediante el modelo OC4V4 y los datos de campo.



Anexo 4. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC4V4 y los datos de campo.



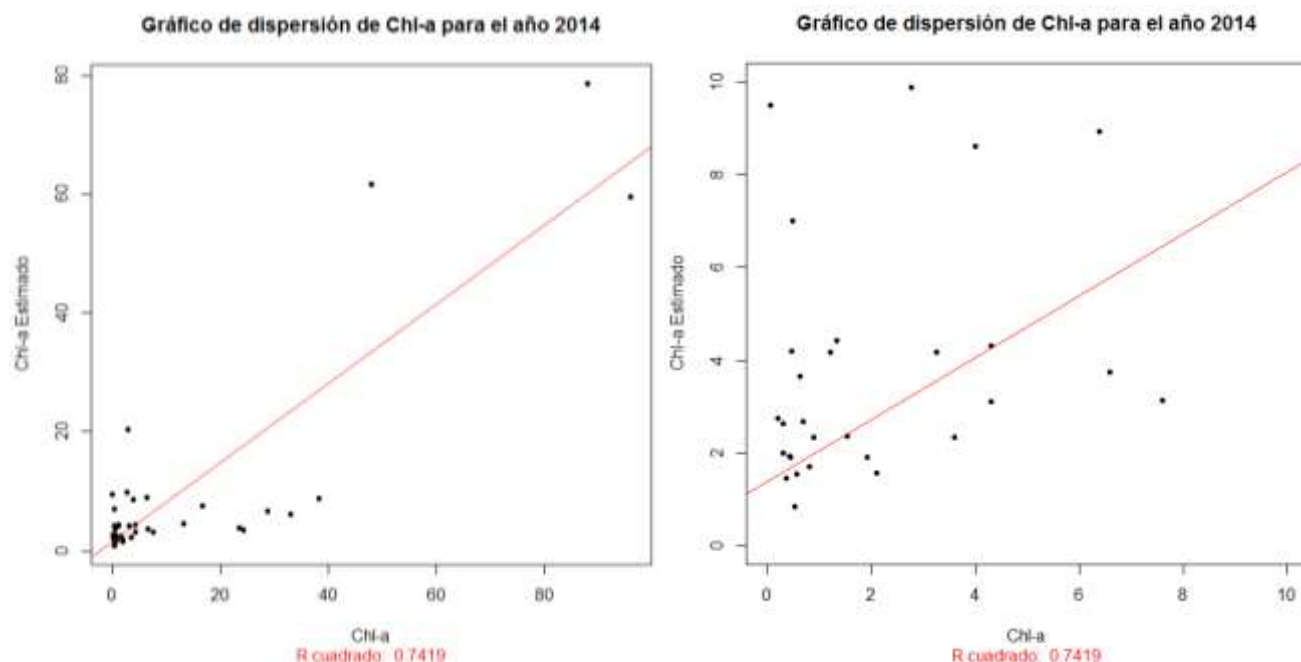
Anexo 3. Correlación de Pearson para los datos estimados de Chl-a con el modelo OC4V4 y los datos de campo.

| <b>Correlación de Pearson</b> | Pixel     | Dato de campo |
|-------------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                         | 1         | 0.9641461     |
| Dato de campo                 | 0.9641461 | 1             |

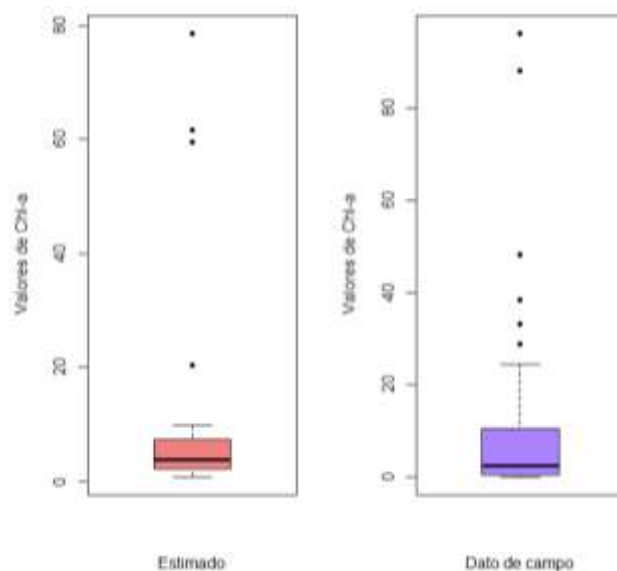
En el Anexo 5 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson entre el conjunto de datos para el modelo OC4V4. Se obtuvo una correlación de 0.96 con una tendencia lineal positiva indicando que los valores obtenidos con el modelo y los datos de campo varían de forma parecida. En los Anexos 3 y 4, se observa el comportamiento de los datos, obteniendo un coeficiente de determinación del 0.92, lo que significa que un 92% de los valores estimados con las imágenes MODIS cumplen con la tendencia de linealidad. Para el periodo 2014, se obtiene un coeficiente de determinación del 0.74 y un coeficiente de correlación de 0.86, lo que se puede observar en los Anexos 6, 7 y 8.

En el Anexo 6 se puede observar el gráfico de dispersión de los valores estimados de Chl-a aplicando el modelo OC4V4 y los datos de campo obtenidos, para el periodo 2014.

Anexo 6. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Chl-a mediante el modelo OC4V4 y los datos de campo.



Anexo 7. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC4V4 y los datos de campo, periodo 2014.

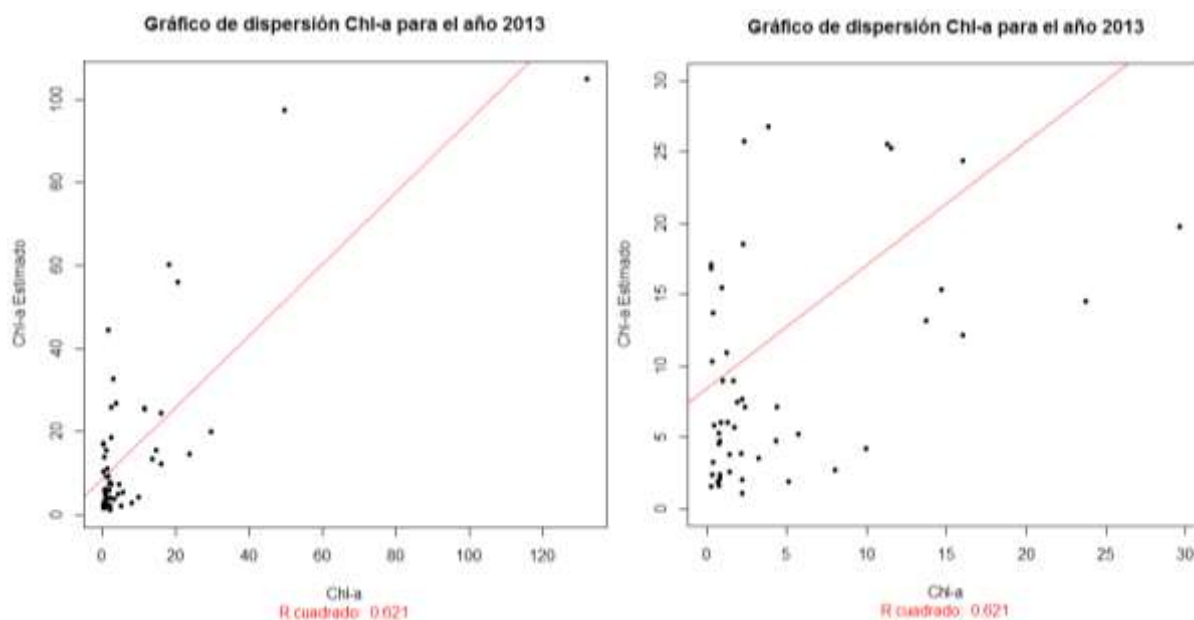


Anexo 4. Correlación de Pearson para los datos estimados de Chl-a con el modelo OC4V4 y los datos de campo, periodo 2014.

| Correlación de Pearson | Pixel     | Dato de campo |
|------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                  | 1         | 0.8613312     |
| Dato de campo          | 0.8613312 | 1             |

En los Anexos 9 y 11 se observa el comportamiento de los datos estimados con el algoritmo OC3M para el periodo 2013. Se obtuvo un coeficiente de determinación del 0.62 lo que sustenta que el 62% de los datos cumplen con la tendencia lineal. En el Anexo 10, se muestra que la correlación de Pearson es el 0.78 indicando una correlación lineal positiva. En los Anexos 12 y 13 se presenta el comportamiento de los datos para el periodo 2014, con un R cuadrado de 0.54.

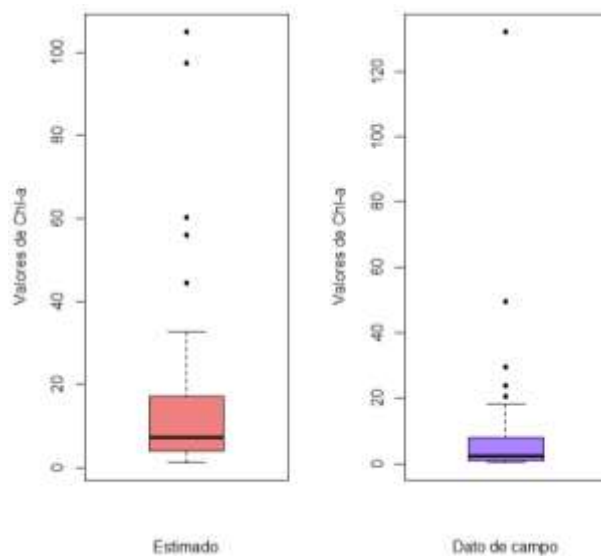
Anexo 9. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Chl-a mediante el modelo OC3M y los datos de campo.



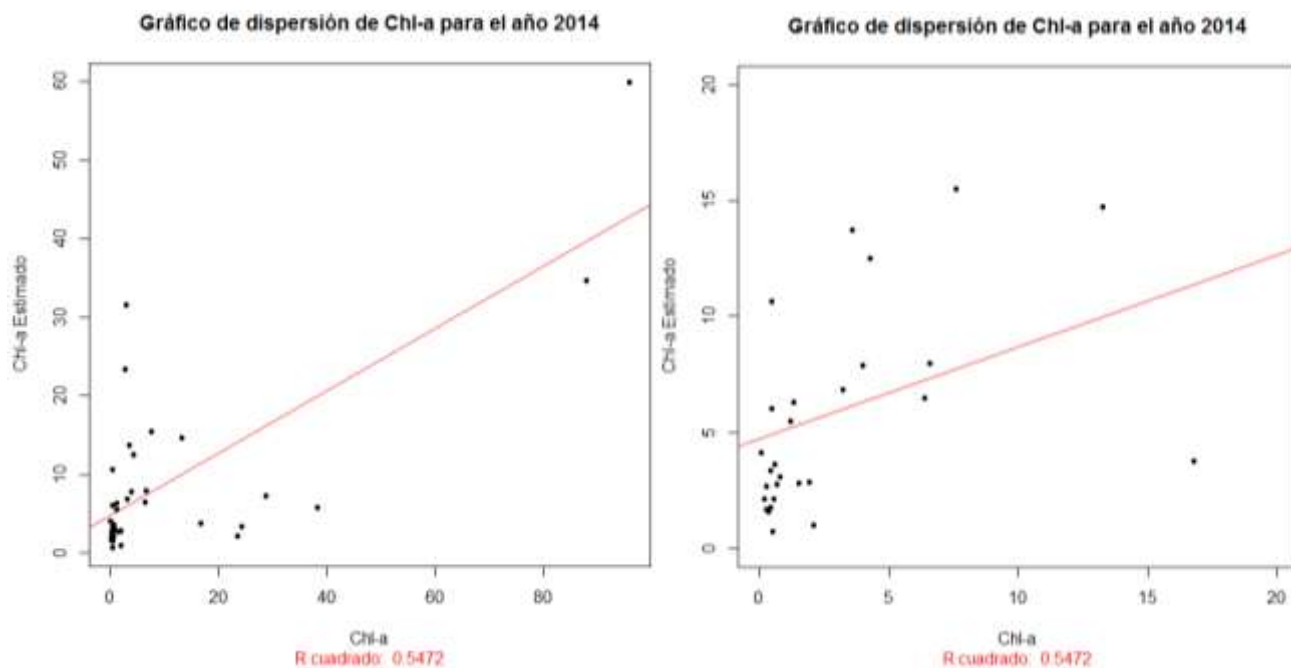
Anexo 5. Coeficiente de Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC3M y los datos de campo.

| Correlación de Pearson | Pixel     | Dato de campo |
|------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                  | 1         | 0.7880234     |
| Dato de campo          | 0.7880234 | 1             |

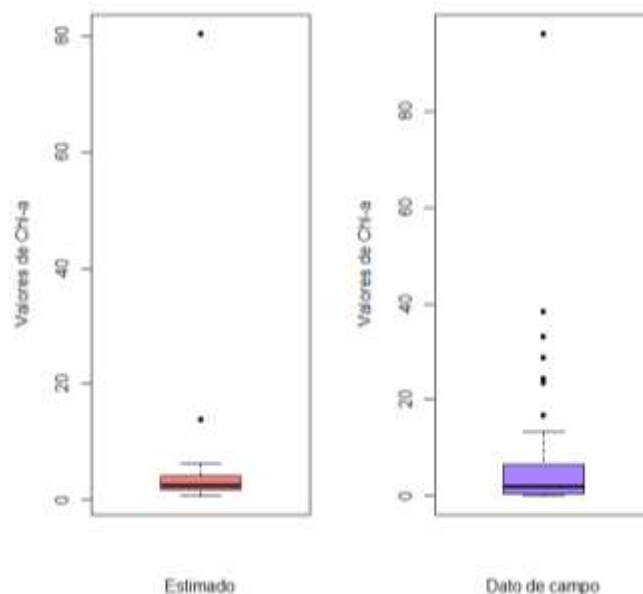
Anexo 11. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC3M y los datos de campo, periodo 2013.



Anexo 12. Gráfico de dispersión de Chl-a con el modelo OC3M y los datos de campo, para el periodo 2014.



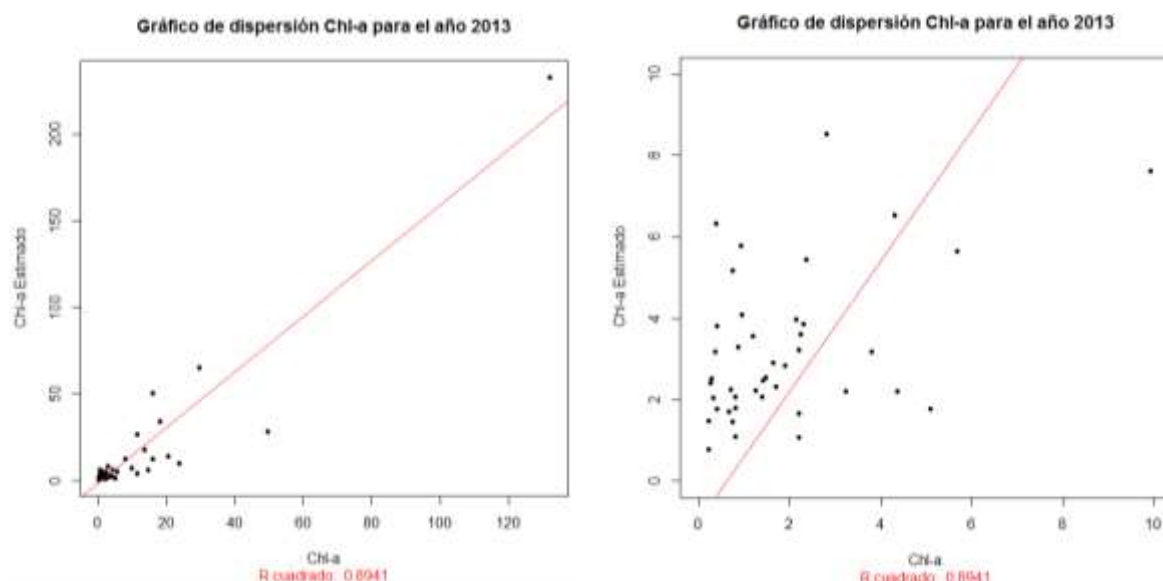
Anexo 13. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC3M y los datos de campo, periodo 2014.



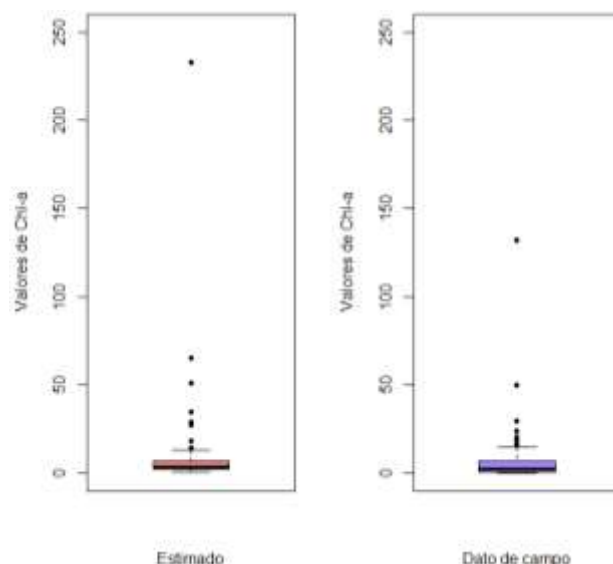
Anexo 6. Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC3M y los datos de campo, periodo 2014.

| <b>Correlación de Pearson</b> | Pixel     | Dato de campo |
|-------------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                         | 1         | 0.7397077     |
| Dato de campo                 | 0.7397077 | 1             |

Anexo 15. Gráfico de dispersión de Chl-a con el modelo OC2M y los datos de campo, para el periodo 2013.



Anexo 16. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC3M y los datos de campo, periodo 2013.

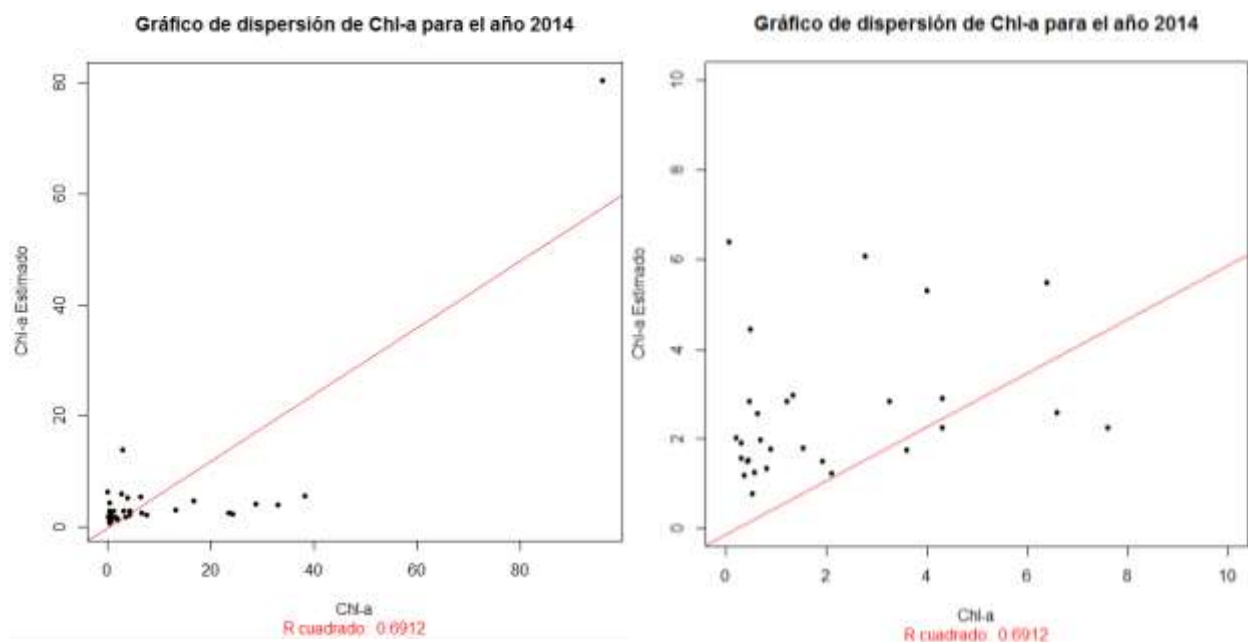


Anexo 7. Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC2M y los datos de campo, periodo 2013.

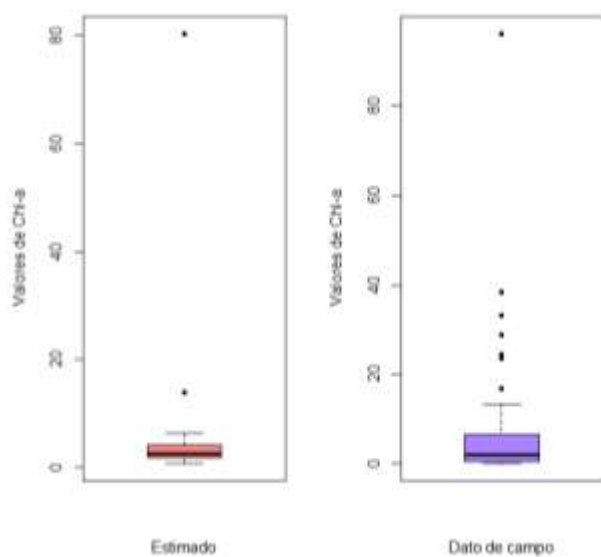
| <b>Correlación de Pearson</b> | Pixel     | Dato de campo |
|-------------------------------|-----------|---------------|
| Pixel                         | 1         | 0.9455849     |
| Dato de campo                 | 0.9455849 | 1             |

Los Anexos 15 y 16 muestran el comportamiento de los valores de clorofila-a estimados mediante el modelo OC2M y el grupo de datos de campo para el periodo 2013. En el Anexo 17 se puede observar que la correlación de Pearson es de 0.94 lo que indica una correlación lineal positiva y un coeficiente de determinación de 0.89 con lo que se sustenta que el 89% de los datos cumplen con la tendencia lineal.

Anexo 18. Gráfico de dispersión de Chl-a con el modelo OC2M y los datos de campo, para el periodo 2014.



Anexo 19. Diagrama de cajas del comportamiento de los valores estimados de OC2M y los datos de campo, periodo 2014



Anexo 8. Correlación de Pearson para los valores estimados con el modelo OC2M y los datos de campo, periodo 2014.

| Correlación de Pearson | Pixel    | Dato de campo |
|------------------------|----------|---------------|
| Pixel                  | 1        | 0.831395      |
| Dato de campo          | 0.831395 | 1             |

El Anexo 18 muestra los gráficos de dispersión de los valores de Chl-a estimados mediante el modelo OC2M y los datos de campo para el año 2014. Se puede observar una tendencia lineal, aunque no tan marcada respecto a los resultados con el modelo OC4V4. Se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.83 y un coeficiente de determinación de 0.69 lo que indica una tendencia lineal positiva. En el Anexo 19 se puede observar el comportamiento de los valores estimados con el modelo OC2M y los datos de campo. Se muestran datos atípicos para ambos casos.

Anexo 9. Datos utilizados para validar la SST para el periodo 2013.

| <b>Parámetro SST 2013</b> |            |                      |                     |
|---------------------------|------------|----------------------|---------------------|
| <b>Estación</b>           | <b>Mes</b> | <b>Dato de Campo</b> | <b>SST Estimado</b> |
| O 20                      | ENERO      | 27.741               | 27.093              |
| C47005033                 | ENERO      | 30.200               | 29.998              |
| C47005027                 | ENERO      | 31.200               | 30.400              |
| C47005026                 | ENERO      | 31.400               | 30.712              |
| C47005028                 | ENERO      | 32.300               | 30.973              |
| C47002003                 | FEBRERO    | 25.000               | 23.396              |
| C47002002                 | FEBRERO    | 27.200               | 27.052              |
| C47003018                 | FEBRERO    | 26.800               | 27.074              |
| C47003050                 | FEBRERO    | 27.300               | 27.210              |
| C47003020                 | FEBRERO    | 27.100               | 27.498              |
| C47003024                 | FEBRERO    | 30.100               | 29.022              |
| C47003023                 | FEBRERO    | 29.100               | 29.042              |
| C47004003                 | FEBRERO    | 28.900               | 29.098              |
| C13004022                 | FEBRERO    | 31.000               | 29.532              |
| C47003027                 | FEBRERO    | 29.000               | 29.577              |
| C47005033                 | FEBRERO    | 30.900               | 29.679              |
| C13004023                 | FEBRERO    | 31.200               | 29.771              |
| C47005027                 | FEBRERO    | 31.500               | 30.686              |
| C47005026                 | FEBRERO    | 32.000               | 30.972              |
| C47005028                 | FEBRERO    | 32.400               | 31.469              |
| C13001009                 | MARZO      | 27.300               | 25.811              |
| C13003045                 | MARZO      | 26.900               | 26.379              |
| C08001004                 | MARZO      | 27.600               | 26.418              |
| C13001008                 | MARZO      | 26.900               | 26.557              |
| C13003047                 | MARZO      | 27.100               | 27.083              |
| C08002019                 | MARZO      | 27.800               | 27.190              |
| C08002014                 | MARZO      | 27.700               | 27.387              |
| C08002011                 | MARZO      | 29.000               | 27.546              |
| C13003036                 | MARZO      | 28.000               | 28.004              |
| C08001003                 | MARZO      | 29.500               | 28.009              |
| C13003035                 | MARZO      | 29.300               | 29.005              |
| C47005033                 | MARZO      | 31.700               | 30.473              |
| C47005027                 | MARZO      | 31.900               | 31.018              |

|           |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|
| C47005026 | MARZO  | 32.400 | 31.112 |
| C47005028 | MARZO  | 33.000 | 31.770 |
| C47005031 | MARZO  | 34.600 | 33.274 |
| C44003007 | ABRIL  | 26.600 | 26.517 |
| C44003015 | ABRIL  | 28.500 | 26.864 |
| C44003016 | ABRIL  | 28.900 | 27.772 |
| C23001005 | ABRIL  | 29.200 | 27.859 |
| C44002019 | ABRIL  | 29.500 | 28.044 |
| C23001001 | ABRIL  | 29.200 | 28.054 |
| C44002020 | ABRIL  | 29.400 | 28.131 |
| C70002050 | ABRIL  | 28.800 | 28.369 |
| C44003017 | ABRIL  | 29.500 | 28.526 |
| C70002030 | ABRIL  | 29.600 | 28.631 |
| C70002022 | ABRIL  | 30.200 | 28.752 |
| C70002019 | ABRIL  | 29.900 | 28.942 |
| C70001002 | ABRIL  | 30.600 | 29.332 |
| C70002043 | ABRIL  | 30.300 | 29.527 |
| C70001001 | ABRIL  | 29.600 | 29.574 |
| C70002042 | ABRIL  | 30.900 | 29.771 |
| C70002021 | ABRIL  | 29.600 | 29.968 |
| C70002046 | ABRIL  | 29.900 | 30.272 |
| C47005028 | ABRIL  | 33.900 | 32.469 |
| C47005027 | ABRIL  | 33.400 | 32.974 |
| C13003031 | MAYO   | 31.000 | 30.984 |
| C47005026 | MAYO   | 32.000 | 32.511 |
| C47005033 | JUNIO  | 33.000 | 32.259 |
| C70002021 | JULIO  | 29.700 | 28.560 |
| C70002009 | JULIO  | 30.100 | 28.811 |
| C70002045 | JULIO  | 30.100 | 28.923 |
| C23002001 | JULIO  | 31.000 | 29.343 |
| C70002019 | JULIO  | 30.200 | 29.425 |
| C70002042 | JULIO  | 30.900 | 29.526 |
| C70001001 | JULIO  | 30.000 | 29.574 |
| C70002030 | JULIO  | 30.400 | 29.620 |
| C70002046 | JULIO  | 30.000 | 29.643 |
| C70002022 | JULIO  | 31.200 | 29.788 |
| C70001002 | JULIO  | 31.600 | 30.443 |
| C47005028 | JULIO  | 31.400 | 31.246 |
| C47005033 | JULIO  | 32.600 | 32.387 |
| C70002005 | JULIO  | 32.300 | 32.500 |
| C47003037 | AGOSTO | 28.300 | 26.972 |
| C47003014 | AGOSTO | 29.500 | 27.843 |
| C23001001 | AGOSTO | 29.800 | 28.395 |
| C47003001 | AGOSTO | 29.600 | 28.498 |
| C47003020 | AGOSTO | 30.000 | 28.561 |

|           |            |        |        |
|-----------|------------|--------|--------|
| C47003027 | AGOSTO     | 30.200 | 28.616 |
| C47003024 | AGOSTO     | 30.200 | 29.083 |
| C47002002 | AGOSTO     | 30.300 | 29.234 |
| C47003050 | AGOSTO     | 29.000 | 29.401 |
| C47005028 | AGOSTO     | 32.300 | 32.175 |
| C08002019 | SEPTIEMBRE | 30.100 | 29.137 |
| C08002007 | SEPTIEMBRE | 31.000 | 31.138 |
| C47005033 | SEPTIEMBRE | 33.400 | 33.601 |
| C44002025 | OCTUBRE    | 29.650 | 28.368 |
| C08001003 | OCTUBRE    | 30.600 | 29.881 |
| C44003008 | OCTUBRE    | 30.950 | 30.037 |
| C08003041 | OCTUBRE    | 30.600 | 30.622 |
| C13002025 | OCTUBRE    | 31.000 | 31.417 |
| C13003031 | NOVIEMBRE  | 30.200 | 28.639 |
| C13003040 | NOVIEMBRE  | 29.500 | 29.570 |
| C13003032 | NOVIEMBRE  | 30.100 | 29.710 |
| C13003049 | NOVIEMBRE  | 30.000 | 30.564 |
| C13003033 | NOVIEMBRE  | 30.700 | 31.040 |
| C13001008 | DICIEMBRE  | 27.600 | 27.711 |
| C13003048 | DICIEMBRE  | 30.900 | 29.643 |
| C47005026 | DICIEMBRE  | 32.600 | 31.542 |
| C47005033 | DICIEMBRE  | 33.200 | 32.341 |

Anexo 10. Datos utilizados para validar la SST en el periodo 2014.

| <b>Parámetro SST 2014</b> |            |                      |                     |
|---------------------------|------------|----------------------|---------------------|
| <b>Estación</b>           | <b>Mes</b> | <b>Dato de Campo</b> | <b>SST Estimado</b> |
| C47005028                 | ENERO      | 32.300               | 30.964              |
| C47005033                 | ENERO      | 30.100               | 29.974              |
| C47005031                 | ENERO      | 30.800               | 31.645              |
| C08001004                 | FEBRERO    | 26.300               | 25.363              |
| C47005027                 | FEBRERO    | 31.000               | 30.237              |
| C08002014                 | FEBRERO    | 26.700               | 26.591              |
| C08002019                 | FEBRERO    | 26.600               | 26.516              |
| C47005033                 | FEBRERO    | 29.200               | 29.652              |
| C08003007                 | FEBRERO    | 30.200               | 30.706              |
| C08002007                 | FEBRERO    | 27.300               | 27.955              |
| C70002043                 | MARZO      | 30.200               | 28.916              |
| C70002021                 | MARZO      | 28.800               | 27.659              |
| C23001003                 | MARZO      | 29.200               | 28.129              |
| C23001005                 | MARZO      | 28.900               | 27.839              |
| C70002030                 | MARZO      | 29.200               | 28.468              |
| C70002045                 | MARZO      | 28.600               | 28.029              |
| C47005033                 | MARZO      | 30.000               | 29.605              |

|           |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|
| C70001001 | MARZO  | 29.300 | 28.979 |
| C47005031 | MARZO  | 33.000 | 32.733 |
| C23001001 | MARZO  | 28.800 | 28.535 |
| C13003036 | MARZO  | 27.900 | 27.656 |
| C13003035 | MARZO  | 28.500 | 28.719 |
| C13003034 | MARZO  | 28.800 | 29.249 |
| C70002038 | MARZO  | 31.100 | 31.612 |
| C13003031 | MARZO  | 29.400 | 29.936 |
| C47003037 | ABRIL  | 26.800 | 25.529 |
| C47003050 | ABRIL  | 27.900 | 26.741 |
| C47005033 | ABRIL  | 31.200 | 30.302 |
| C47005031 | ABRIL  | 34.800 | 34.252 |
| C47005028 | ABRIL  | 32.900 | 32.505 |
| C47003018 | ABRIL  | 27.500 | 27.300 |
| C47004003 | ABRIL  | 29.100 | 29.587 |
| C47003014 | ABRIL  | 27.400 | 27.986 |
| C44002019 | ABRIL  | 26.700 | 27.382 |
| C47003008 | ABRIL  | 28.700 | 29.487 |
| C47003001 | ABRIL  | 29.600 | 30.535 |
| C13004022 | MAYO   | 31.200 | 30.082 |
| C47005033 | MAYO   | 32.400 | 31.600 |
| C13004023 | MAYO   | 32.400 | 32.146 |
| C13004021 | MAYO   | 30.800 | 31.603 |
| C13004024 | MAYO   | 31.300 | 32.146 |
| C47005028 | JULIO  | 34.300 | 33.176 |
| C47005033 | JULIO  | 32.000 | 31.556 |
| C08002014 | JULIO  | 27.800 | 27.448 |
| C08002019 | JULIO  | 28.400 | 28.159 |
| C08001004 | JULIO  | 27.000 | 26.808 |
| C08001003 | JULIO  | 31.000 | 30.838 |
| C47003087 | AGOSTO | 30.000 | 28.682 |
| C47003001 | AGOSTO | 30.300 | 29.073 |
| C23001002 | AGOSTO | 30.800 | 29.591 |
| C47005028 | AGOSTO | 33.800 | 32.702 |
| C70002033 | AGOSTO | 31.200 | 30.121 |
| C47005026 | AGOSTO | 32.500 | 31.563 |
| C47003037 | AGOSTO | 28.100 | 27.327 |
| C70002022 | AGOSTO | 30.500 | 29.854 |
| C47003023 | AGOSTO | 28.100 | 27.709 |
| C70002009 | AGOSTO | 28.600 | 28.213 |
| C70001003 | AGOSTO | 30.300 | 29.947 |
| C70002043 | AGOSTO | 30.300 | 30.121 |
| C23001003 | AGOSTO | 29.400 | 29.261 |
| C47003008 | AGOSTO | 30.200 | 30.067 |
| O 40      | AGOSTO | 27.608 | 27.693 |

|           |            |        |        |
|-----------|------------|--------|--------|
| C23001001 | AGOSTO     | 29.100 | 29.347 |
| C47003049 | AGOSTO     | 30.000 | 30.304 |
| C70002046 | AGOSTO     | 30.400 | 30.754 |
| C47003089 | AGOSTO     | 29.900 | 30.359 |
| C70002019 | AGOSTO     | 29.100 | 29.758 |
| C70002042 | AGOSTO     | 29.700 | 30.367 |
| C47004003 | AGOSTO     | 29.000 | 29.888 |
| C47003028 | AGOSTO     | 29.400 | 30.304 |
| C70002045 | AGOSTO     | 28.900 | 29.817 |
| C47005028 | SEPTIEMBRE | 32.100 | 31.203 |
| O 40      | SEPTIEMBRE | 28.265 | 28.532 |
| C47005027 | OCTUBRE    | 30.800 | 29.797 |
| C44003017 | NOVIEMBRE  | 29.000 | 28.146 |
| C13004023 | NOVIEMBRE  | 31.100 | 30.343 |
| C44003018 | NOVIEMBRE  | 29.100 | 28.544 |
| C47005033 | NOVIEMBRE  | 33.100 | 32.684 |
| C44003006 | NOVIEMBRE  | 27.900 | 27.598 |
| C44003007 | NOVIEMBRE  | 26.300 | 26.098 |
| C47005025 | NOVIEMBRE  | 31.400 | 31.805 |
| C44002019 | NOVIEMBRE  | 28.700 | 29.119 |
| C13004021 | NOVIEMBRE  | 29.800 | 30.544 |
| C13003032 | DICIEMBRE  | 31.000 | 30.232 |
| C13003040 | DICIEMBRE  | 28.900 | 28.320 |
| C13004035 | DICIEMBRE  | 29.000 | 28.754 |
| C13004026 | DICIEMBRE  | 29.000 | 29.215 |
| C47005033 | DICIEMBRE  | 31.000 | 31.652 |
| C13004018 | DICIEMBRE  | 28.700 | 29.390 |
| C13003031 | DICIEMBRE  | 29.700 | 30.499 |

Anexo 11. Datos utilizados para validar los Nitratos en el periodo 2013.

| Parámetro Nitratos 2013 |         |               |       |        |
|-------------------------|---------|---------------|-------|--------|
| Estación                | Mes     | Dato de Campo | Nit_1 | Nit_2  |
| C47003020               | FEBRERO | 0.9           | 2.529 | 15.285 |
| C47003014               | FEBRERO | 1.7           | 2.201 | 16.137 |
| C47003018               | FEBRERO | 1.7           | 2.565 | 10.947 |
| C13004025               | FEBRERO | 12.2          | 2.849 | 6.705  |
| C13004018               | FEBRERO | 14.9          | 2.734 | 16.593 |
| C47002003               | FEBRERO | 25.2          | 4.995 | 23.780 |
| C13004023               | FEBRERO | 152.7         | NA    | 57.732 |
| C08002019               | MARZO   | 9.9           | 2.558 | 5.741  |
| C13003040               | MARZO   | 13.5          | 4.082 | 24.977 |
| C13001010               | MARZO   | 18.8          | 4.562 | 18.176 |
| C08002014               | MARZO   | 29.1          | 2.450 | 9.680  |
| C08001004               | MARZO   | 30.4          | 2.728 | 12.966 |

|           |            |       |       |        |
|-----------|------------|-------|-------|--------|
| C13001008 | MARZO      | 30.4  | 2.712 | 10.680 |
| C13003036 | MARZO      | 34.5  | 2.058 | 10.820 |
| C13003041 | MARZO      | 45.9  | 3.171 | 30.990 |
| C13003033 | MARZO      | 71.2  | NA    | 42.444 |
| C70002042 | ABRIL      | 0.6   | 1.547 | 12.048 |
| C70002044 | ABRIL      | 0.8   | 2.880 | 11.793 |
| C70002009 | ABRIL      | 1.3   | 3.123 | 24.520 |
| C70002029 | ABRIL      | 1.4   | 1.550 | 8.372  |
| C70002026 | ABRIL      | 1.7   | 1.635 | 11.721 |
| C70002019 | ABRIL      | 2.4   | 1.891 | 9.604  |
| C70002046 | ABRIL      | 2.5   | 1.384 | 11.027 |
| C70002030 | ABRIL      | 2.7   | 2.075 | 11.819 |
| C44003008 | ABRIL      | 4.1   | 3.139 | 9.265  |
| C70001002 | ABRIL      | 4.6   | 1.759 | 8.781  |
| C23002002 | ABRIL      | 5.4   | 2.618 | 5.846  |
| C70001003 | ABRIL      | 5.8   | 3.459 | 14.058 |
| C23002001 | ABRIL      | 6.1   | 1.246 | 25.798 |
| C44002025 | ABRIL      | 6.1   | 4.109 | 30.183 |
| C70001001 | ABRIL      | 6.3   | 1.912 | 15.769 |
| C70001004 | ABRIL      | 7.4   | 1.923 | 9.070  |
| C70002039 | ABRIL      | 7.5   | 1.818 | 12.515 |
| C70002045 | ABRIL      | 8.3   | 2.470 | 7.413  |
| C44003006 | ABRIL      | 9.2   | 2.553 | 9.872  |
| C23001014 | ABRIL      | 9.4   | 2.572 | 28.445 |
| C23001005 | ABRIL      | 15.2  | 3.066 | 18.886 |
| C70002043 | ABRIL      | 16.9  | 1.574 | 9.318  |
| C70002022 | ABRIL      | 20.4  | 2.162 | 11.342 |
| C44003007 | ABRIL      | 20.8  | 2.691 | 14.541 |
| C47005026 | ABRIL      | 94.1  | NA    | 45.572 |
| C13003034 | MAYO       | 98.3  | NA    | 30.513 |
| C70001003 | JULIO      | 6.1   | 1.553 | 16.642 |
| C70002022 | JULIO      | 6.4   | 2.055 | 16.703 |
| C47003037 | AGOSTO     | 3.5   | 2.720 | 13.518 |
| C47002003 | AGOSTO     | 6     | 3.516 | 15.853 |
| C47003018 | AGOSTO     | 8.4   | 2.989 | 12.937 |
| C08002019 | SEPTIEMBRE | 12.7  | 1.892 | 14.355 |
| C44002020 | OCTUBRE    | 12.2  | 1.213 | 16.271 |
| C44003006 | OCTUBRE    | 14    | 4.020 | 24.724 |
| C13003034 | NOVIEMBRE  | 174.2 | 3.766 | 57.914 |

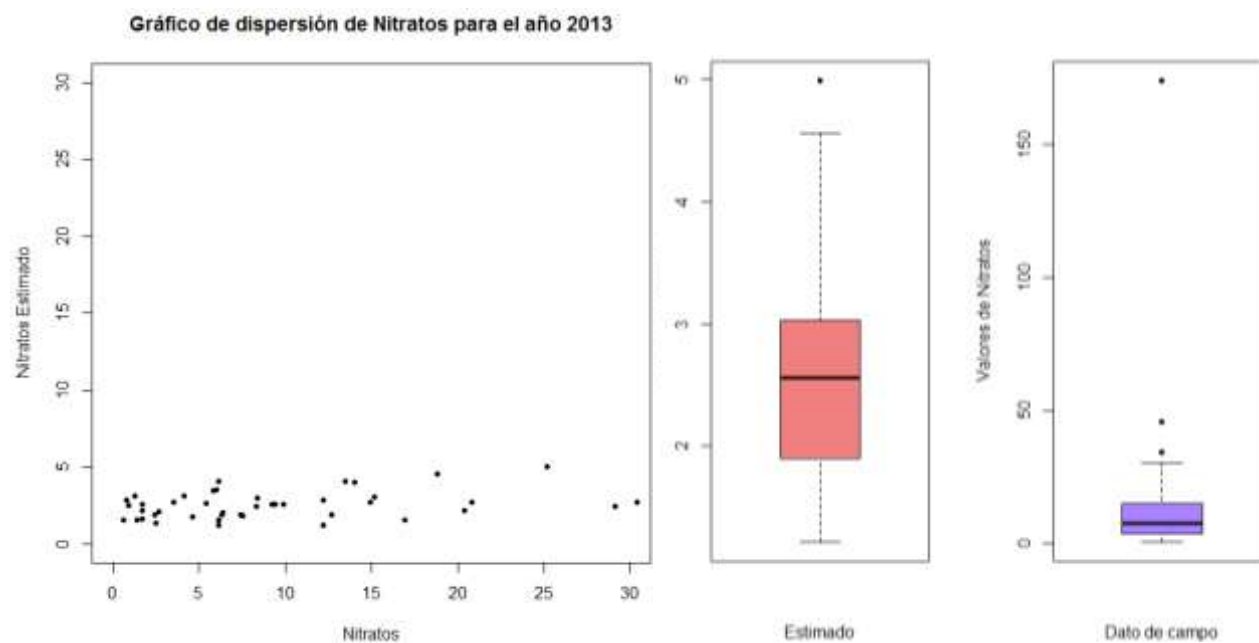
Anexo 12. Datos utilizados para la validación de Nitratos periodo 2014.

| Parámetro Nitratos 2014 |         |               |       |        |
|-------------------------|---------|---------------|-------|--------|
| Estación                | Mes     | Dato de Campo | Nit_1 | Nit_2  |
| C08002019               | FEBRERO | 11,1          | 2,902 | 23,609 |

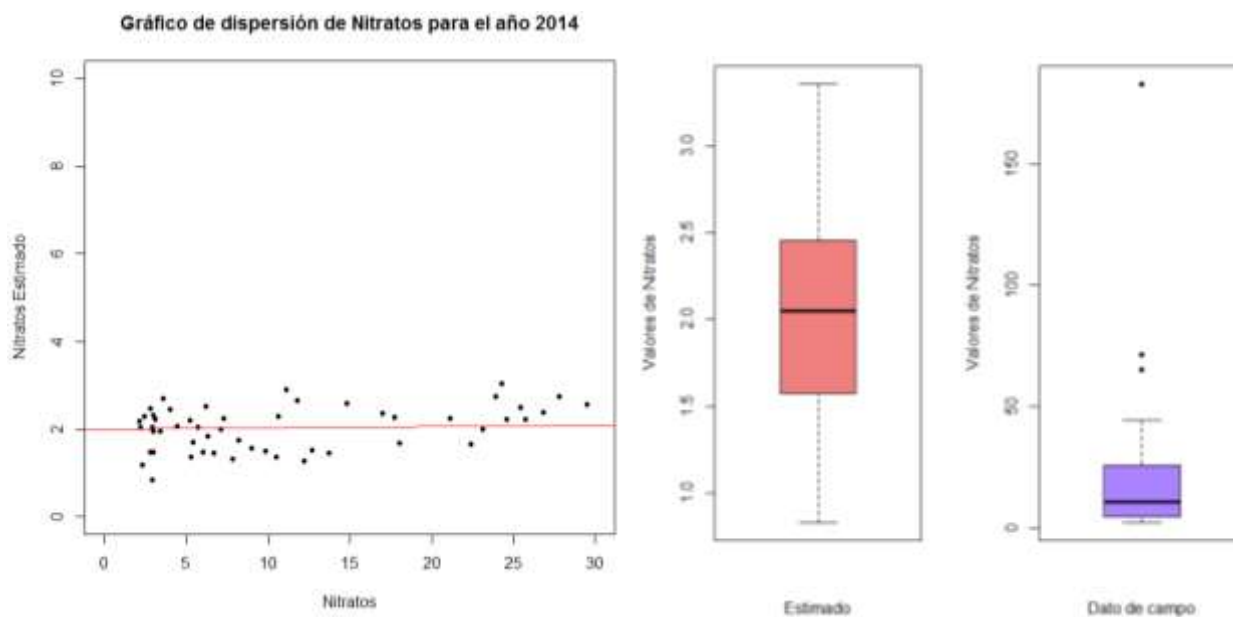
|           |         |      |       |         |
|-----------|---------|------|-------|---------|
| C08002011 | FEBRERO | 21,1 | 2,244 | 32,787  |
| C08002014 | FEBRERO | 27,8 | 2,752 | 47,444  |
| C08001004 | FEBRERO | 37,1 | 3,353 | 47,121  |
| C08002018 | FEBRERO | 64,9 | 2,474 | 73,449  |
| C70002029 | MARZO   | 2,2  | 2,034 | 6,383   |
| C70002045 | MARZO   | 2,4  | 2,282 | 8,294   |
| C70001004 | MARZO   | 2,8  | 2,470 | 7,827   |
| C70002039 | MARZO   | 2,9  | 2,031 | 8,782   |
| C70002042 | MARZO   | 3    | 1,954 | 7,111   |
| C23002006 | MARZO   | 4    | 2,452 | 13,791  |
| C70002044 | MARZO   | 4,4  | 2,054 | 6,399   |
| C23001005 | MARZO   | 7,3  | 2,244 | 7,377   |
| C70001001 | MARZO   | 8,2  | 1,753 | 8,100   |
| C23001014 | MARZO   | 11,8 | 2,660 | 14,830  |
| C23002001 | MARZO   | 12,7 | 1,528 | 37,958  |
| C13003040 | MARZO   | 17,7 | 2,272 | 5,621   |
| C70002030 | MARZO   | 24,6 | 2,219 | 9,554   |
| C13003036 | MARZO   | 32,1 | 2,193 | 34,715  |
| C13003049 | MARZO   | 80   | 1,633 | 171,062 |
| C47005027 | ABRIL   | 2,1  | 2,175 | 32,552  |
| C47003014 | ABRIL   | 3,1  | 2,213 | 16,561  |
| C47003018 | ABRIL   | 3,6  | 2,699 | 17,962  |
| C44003005 | ABRIL   | 4,2  | NA    | 19,691  |
| C47002003 | ABRIL   | 4,2  | NA    | 18,316  |
| C47002005 | ABRIL   | 5,2  | 2,198 | 28,516  |
| C47003037 | ABRIL   | 5,7  | 2,038 | 8,547   |
| C47003020 | ABRIL   | 6,2  | 2,521 | 17,740  |
| C44002025 | ABRIL   | 6,5  | NA    | 12,452  |
| C47001010 | ABRIL   | 9,7  | NA    | 19,194  |
| C13003041 | MAYO    | 12,2 | 1,264 | 24,594  |
| C13003045 | MAYO    | 13,7 | 1,453 | 13,847  |
| C13001009 | MAYO    | 14,8 | 2,589 | 16,478  |
| C13003048 | MAYO    | 18   | 1,681 | 16,059  |
| C13001008 | MAYO    | 24,3 | 3,047 | 34,865  |
| C13004023 | MAYO    | 37,2 | 3,271 | 49,847  |
| C08002014 | JULIO   | 25,4 | 2,483 | 15,555  |
| C08002019 | JULIO   | 25,7 | 2,220 | 9,825   |
| C08001004 | JULIO   | 29,5 | 2,566 | 49,187  |
| C70002039 | AGOSTO  | 2,8  | 1,482 | 6,643   |
| C47003037 | AGOSTO  | 3    | 2,306 | 1,644   |

|           |           |       |       |         |
|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| C70002022 | AGOSTO    | 3     | 1,478 | 6,708   |
| C23002002 | AGOSTO    | 3,4   | 1,947 | 1,371   |
| C70002026 | AGOSTO    | 3,4   | 1,941 | 12,107  |
| C47002002 | AGOSTO    | 5,3   | 1,357 | 33,760  |
| C47003001 | AGOSTO    | 5,4   | 1,696 | 8,777   |
| C47004003 | AGOSTO    | 6     | 1,469 | 6,862   |
| C23001014 | AGOSTO    | 6,3   | 1,833 | 20,668  |
| C70002044 | AGOSTO    | 6,7   | 1,451 | 14,047  |
| C23002006 | AGOSTO    | 7,1   | 1,992 | 18,529  |
| C70002030 | AGOSTO    | 7,8   | 1,303 | 34,581  |
| C70001002 | AGOSTO    | 9     | 1,572 | 20,529  |
| C70002045 | AGOSTO    | 9,8   | 1,487 | 8,555   |
| C47003028 | AGOSTO    | 10,5  | 1,365 | 16,579  |
| C47003024 | AGOSTO    | 22,4  | 1,660 | 4,035   |
| C47002003 | AGOSTO    | 23,9  | 2,737 | 5,107   |
| C47002005 | AGOSTO    | 37,4  | 1,522 | 44,760  |
| C47005033 | OCTUBRE   | 2,3   | 1,182 | NA      |
| C47005026 | OCTUBRE   | 2,9   | 0,828 | NA      |
| C44002020 | NOVIEMBRE | 6,4   | NA    | 26,000  |
| C44002025 | NOVIEMBRE | 10,6  | 2,286 | 34,212  |
| C44003008 | NOVIEMBRE | 26,8  | 2,386 | 42,418  |
| C44003019 | NOVIEMBRE | 31,7  | 1,688 | 28,565  |
| C44003005 | NOVIEMBRE | 33    | 2,613 | 15,163  |
| C13001010 | DICIEMBRE | 17    | 2,345 | 42,998  |
| C13003048 | DICIEMBRE | 23,1  | 2,002 | 47,266  |
| C13003045 | DICIEMBRE | 37,6  | 1,038 | 34,353  |
| C13004018 | DICIEMBRE | 38,3  | 3,081 | 43,264  |
| C13001009 | DICIEMBRE | 44,2  | 2,004 | 112,561 |
| C13003041 | DICIEMBRE | 71,3  | 0,852 | 62,594  |
| C13003034 | DICIEMBRE | 182,6 | 2,248 | 236,650 |

Anexo 25. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2013.



Anexo 26. Gráfico de dispersión de los valores obtenidos de Nitratos y los datos de campo, para el periodo 2014.



Anexo 13. Datos utilizados para validar la Salinidad en el periodo 2013.

| <b>Parámetro Salinidad 2013</b> |            |                      |              |              |
|---------------------------------|------------|----------------------|--------------|--------------|
| <b>Estación</b>                 | <b>Mes</b> | <b>Dato de Campo</b> | <b>Sal_1</b> | <b>Sal_2</b> |
| C47005028                       | ENERO      | 10.000               | 26.963       | 14.689       |
| C47005027                       | ENERO      | 10.200               | 27.154       | 14.507       |
| C47005026                       | ENERO      | 10.700               | 27.672       | 15.553       |
| C47005033                       | ENERO      | 17.300               | 28.076       | 18.332       |
| C47005028                       | FEBRERO    | 18.900               | 27.945       | 15.853       |
| C47005026                       | FEBRERO    | 19.200               | 29.626       | 22.377       |
| C47005033                       | FEBRERO    | 20.700               | 30.256       | 23.307       |
| C47003024                       | FEBRERO    | 35.700               | 33.299       | 33.672       |
| C47003001                       | FEBRERO    | 36.400               | 33.347       | 32.963       |
| C47003013                       | FEBRERO    | 36.500               | 33.534       | 35.105       |
| C47003020                       | FEBRERO    | 36.600               | 33.215       | 32.265       |
| C47003008                       | FEBRERO    | 36.600               | 33.555       | 34.865       |
| C47003046                       | FEBRERO    | 36.600               | 34.080       | 40.312       |
| C13004024                       | FEBRERO    | 37.800               | 33.776       | 38.589       |
| C08002018                       | MARZO      | 36.900               | 34.088       | 38.987       |
| C08002007                       | MARZO      | 37.200               | 33.910       | 37.794       |
| C13003040                       | MARZO      | 38.000               | 32.724       | 33.297       |
| C13001008                       | MARZO      | 38.900               | 35.321       | 43.290       |
| C13003047                       | MARZO      | 39.000               | 34.995       | 41.073       |
| C44003019                       | ABRIL      | 36.200               | 32.356       | 31.282       |
| C44002023                       | ABRIL      | 37.300               | 34.423       | 38.080       |
| C44003006                       | ABRIL      | 37.400               | 33.578       | 33.577       |
| C44003010                       | ABRIL      | 37.700               | 33.662       | 36.091       |
| C44003026                       | ABRIL      | 38.900               | 33.661       | 36.083       |
| C47005028                       | MAYO       | 29.700               | 32.113       | 28.220       |
| C47005026                       | JUNIO      | 10.200               | 27.665       | 13.023       |
| C70001002                       | JULIO      | 26.400               | 31.121       | 23.053       |
| C70002026                       | JULIO      | 29.100               | 31.425       | 29.911       |
| C70002030                       | JULIO      | 29.200               | 32.475       | 29.321       |
| C70002029                       | JULIO      | 29.200               | 31.886       | 33.234       |
| C70002042                       | JULIO      | 29.300               | 32.689       | 31.881       |
| C70002046                       | JULIO      | 29.600               | 32.947       | 31.180       |
| C70001004                       | JULIO      | 30.000               | 32.422       | 29.512       |
| C23002001                       | JULIO      | 31.800               | 32.158       | 29.926       |
| C23001005                       | AGOSTO     | 23.900               | 31.549       | 26.464       |
| C23001003                       | AGOSTO     | 28.900               | 31.661       | 27.209       |
| C23001054                       | AGOSTO     | 30.000               | 33.485       | 33.652       |
| C47003018                       | AGOSTO     | 33.200               | 33.721       | 33.996       |
| C47003014                       | AGOSTO     | 35.400               | 32.788       | 32.400       |
| C47003037                       | AGOSTO     | 35.800               | 34.202       | 36.578       |

|           |            |        |        |        |
|-----------|------------|--------|--------|--------|
| C47001011 | AGOSTO     | 35.800 | 33.905 | 37.728 |
| C47003013 | AGOSTO     | 35.900 | 34.357 | 39.062 |
| C47003008 | AGOSTO     | 35.900 | 34.680 | 39.410 |
| C47003046 | AGOSTO     | 36.100 | 33.013 | 32.339 |
| C47005033 | SEPTIEMBRE | 20.900 | 30.570 | 24.458 |
| C08002019 | SEPTIEMBRE | 32.100 | 33.293 | 33.083 |
| C08001004 | SEPTIEMBRE | 32.700 | 32.153 | 29.064 |
| C47005033 | OCTUBRE    | 14.500 | 26.442 | 10.910 |
| C44003005 | OCTUBRE    | 20.600 | 30.469 | 23.077 |
| C44003008 | OCTUBRE    | 20.800 | 31.631 | 25.230 |
| C44003019 | OCTUBRE    | 28.250 | 32.443 | 30.153 |
| C44002023 | OCTUBRE    | 35.800 | 34.000 | 36.475 |
| C44003026 | OCTUBRE    | 35.850 | 34.246 | 37.623 |
| C47005033 | DICIEMBRE  | 7.900  | 31.901 | 12.809 |

Anexo 14. Datos utilizados para validar la Salinidad en el periodo 2014.

| <b>Parámetro Salinidad 2014</b> |            |                      |              |              |
|---------------------------------|------------|----------------------|--------------|--------------|
| <b>Estación</b>                 | <b>Mes</b> | <b>Dato de Campo</b> | <b>Sal_1</b> | <b>Sal_2</b> |
| C47005028                       | ENERO      | 16.6                 | 26.538       | 16.713       |
| C08001004                       | FEBRERO    | 34.7                 | 33.157       | 34.232       |
| C08002014                       | FEBRERO    | 34.9                 | 34.016       | 38.088       |
| C08002019                       | FEBRERO    | 36                   | 33.972       | 37.429       |
| C08002007                       | FEBRERO    | 36.5                 | 34.108       | 37.881       |
| C47005033                       | MARZO      | 29.2                 | 31.496       | 32.900       |
| C13003033                       | MARZO      | 30.3                 | 32.623       | 33.034       |
| C23001054                       | MARZO      | 30.3                 | 33.357       | 34.669       |
| C23002001                       | MARZO      | 31.5                 | 33.264       | 34.932       |
| C23001003                       | MARZO      | 32.7                 | 33.332       | 35.482       |
| C23001005                       | MARZO      | 33.5                 | 34.095       | 37.530       |
| C70002026                       | MARZO      | 33.7                 | 34.022       | 36.881       |
| C70002030                       | MARZO      | 34.1                 | 34.440       | 38.528       |
| C70002022                       | MARZO      | 34.2                 | 33.209       | 34.438       |
| C70002029                       | MARZO      | 34.3                 | 34.563       | 37.969       |
| C70002042                       | MARZO      | 34.3                 | 34.184       | 39.251       |
| C70002044                       | MARZO      | 34.5                 | 34.546       | 39.368       |
| C70002046                       | MARZO      | 34.6                 | 34.239       | 37.221       |
| C70002045                       | MARZO      | 34.7                 | 33.844       | 36.155       |
| C70002043                       | MARZO      | 34.9                 | 33.495       | 35.252       |
| C70001002                       | MARZO      | 35.1                 | 33.860       | 36.174       |
| C70002009                       | MARZO      | 35.2                 | 33.535       | 35.062       |
| C70001004                       | MARZO      | 35.3                 | 34.134       | 36.919       |
| C70002021                       | MARZO      | 35.3                 | 34.596       | 39.292       |
| C70001003                       | MARZO      | 35.5                 | 34.608       | 39.095       |

|           |            |      |        |        |
|-----------|------------|------|--------|--------|
| C13003036 | MARZO      | 37.3 | 34.247 | 37.737 |
| C44003006 | ABRIL      | 24.7 | 31.667 | 28.935 |
| C47005027 | ABRIL      | 32.2 | 33.188 | 36.120 |
| C47003024 | ABRIL      | 35.1 | 33.476 | 35.499 |
| C47003023 | ABRIL      | 35.9 | 33.464 | 35.453 |
| C47001010 | ABRIL      | 36   | 33.079 | 35.205 |
| C47003018 | ABRIL      | 36.1 | 34.426 | 39.218 |
| C47003050 | ABRIL      | 36.1 | 34.494 | 40.100 |
| C47002006 | ABRIL      | 36.2 | 33.012 | 39.326 |
| C47002005 | ABRIL      | 36.3 | 34.507 | 38.836 |
| C47003001 | ABRIL      | 36.3 | 34.606 | 39.756 |
| C47003027 | ABRIL      | 36.3 | 34.304 | 40.863 |
| C44002021 | ABRIL      | 36.4 | 34.512 | 41.958 |
| C13001008 | MAYO       | 31.7 | 33.583 | 35.531 |
| C13001009 | MAYO       | 34.1 | 33.866 | 34.961 |
| C13003041 | MAYO       | 34.2 | 34.226 | 37.611 |
| C13003047 | MAYO       | 34.6 | 33.365 | 34.201 |
| C47005026 | JUNIO      | 21.9 | 29.260 | 19.813 |
| O 40      | JUNIO      | 36.0 | 34.590 | 41.215 |
| C08002018 | JULIO      | 35.7 | 34.687 | 40.590 |
| C08002011 | JULIO      | 40   | 35.244 | 42.783 |
| C23001005 | AGOSTO     | 26.5 | 33.010 | 30.078 |
| C70002046 | AGOSTO     | 31.8 | 34.355 | 37.145 |
| C70001004 | AGOSTO     | 32.4 | 34.053 | 35.430 |
| C70001002 | AGOSTO     | 33.1 | 34.138 | 35.901 |
| C47001011 | AGOSTO     | 35.5 | 34.987 | 41.020 |
| C47003037 | AGOSTO     | 36.1 | 33.826 | 34.191 |
| O 40      | SEPTIEMBRE | 36.9 | 35.102 | 41.817 |
| C47005033 | DICIEMBRE  | 12.6 | 26.580 | 12.085 |
| C13003036 | DICIEMBRE  | 29.9 | 32.161 | 29.164 |