

## RESEARCHS / INVESTIGACIÓN

### Evaluación de la descomposición de imágenes digitales, para la estimación indirecta de la turbidez en muestras de agua de cuerpos naturales

### Evaluation of the decomposition of digital images, for indirect estimation of turbidity in water samples

\*Juan Manuel Agudelo Luna<sup>1</sup>; Carlos Augusto Benjumea Hoyos<sup>2</sup>

DOI. 10.21931/RB/2019.04.02.8

**Resumen:** Las cámaras digitales ofrecen la posibilidad de captura y análisis de datos de manera sencilla y asequible, lo que permite realizar tomas rápidas y en algunos casos in situ del objeto de estudio. En esta investigación se utilizó una DSLR (Digital Single Lens Reflex por sus siglas en inglés) y una CCD (Charged Coupled Device por sus siglas en inglés) para capturar imágenes digitales analizadas bajo dos metodologías mediante un script en MATLAB, de muestras de agua obtenidas de dos zonas de Antioquia y tres cuerpos de agua: río San Carlos y quebrada San Antonio en San Carlos además de la quebrada La Marinilla. Adicional a lo anterior, se construyeron dos entornos para realizar la captura de las imágenes digitales y dos ensayos en orden de establecer una ecuación de correlación entre los datos obtenidos y la turbidez (NTU). Encontrando que existe una correlación entre la turbidez y la intensidad de luz extraída de las imágenes digitales con  $R^2 = 0.97428$  para el primer ensayo, ajustes superiores a 0.9 para el canal G en el espacio de color RGB

**Palabras clave:** Imágenes digitales; turbidez; muestras de agua; estimación.

**Abstract:** Digital cameras offer the possibility to capture and analyze data in a simple and affordable way, allowing quick and in some cases on-site shots of the study object. This research uses a DSLR (Digital Single Lens Reflex for its acronym in English) and a CCD (Charged coupled device for its acronym in English) to capture digital images analyzed under two methodologies using a MATLAB script, water samples obtained from two areas of Antioquia Colombia, and three water bodies: río San Carlos and brook San Antonio in San Carlos (Ant), in addition to brook La Marinilla in Marinilla (Ant). In addition to the foregoing, two capture environments were built to capture digital images and two trials in order to establish a correlation equation between the data obtained in light intensity and turbidity (NTU). Finding that there is a correlation between turbidity and the intensity of light extracted from digital images with  $R^2 = 0.97428$  for the first trial, and above 0.9 for the G-channel in the RGB color space.

**Keywords:** Digital Images, turbidity, water sample, estimation.

## Introducción

La turbidez es un parámetro clave en el monitoreo de la calidad de agua. La organización mundial de la salud establece que su nivel para agua destinada a consumo humano no debe superar las 5 unidades nefelométricas de turbidez o NTU por sus siglas en inglés recomendando valores de 1 NTU<sup>1</sup> y, la legislación colombiana<sup>2</sup> adopta un valor máximo aceptable de 2 NTU para la misma. El aumento o disminución de este parámetro está relacionado con el riesgo por contaminación microbiológica de agua para consumo humano<sup>3</sup> además de aportar información valiosa para el diseño de operaciones y procesos que permitan mejorar su calidad.

El análisis de imágenes digitales ha sido utilizado en muchos campos de la ciencia debido al gran número de aplicaciones que posee. Algunas de estas como el mapeo satelital de terreno en diferentes longitudes de onda, reconstrucción de geometrías tridimensionales, en medicina para la detección de tumores y medición de áreas de neuronas. Más concretamente, el análisis de color en las imágenes digitales ha sido aplicado a la clasificación de frutas<sup>4</sup>, el análisis de color en insectos y plantas<sup>5</sup>, el análisis de muestras de alimentos como carne<sup>6</sup>.

Las imágenes digitales en entorno controlado se han utilizado como método alternativo para la determinación de concentraciones de sustancias<sup>7, 8, 9, 10, 11</sup>. Algunos de estos métodos emplean el sistema de coordenadas de color RGB (Red, Green, Blue por sus siglas

en inglés) donde cada componente es medido en intensidad de gris (IG) que va de 0-255, siendo 0 negro absoluto y 255 blanco absoluto. Este tipo de datos puede extraerse de cámaras digitales convencionales como cámaras web y teléfonos inteligentes, que utilizan sensores CCD's (Dispositivos de carga acoplada) y CMOS (Semiconductor complementario de Metal - Oxido).

Otros estudios como el llevado a cabo por Goddijn & White, M. (2006)<sup>11</sup> utilizaron los datos de las intensidades en el modelo de color RGB obtenidos de una cámara digital convencional para la medición de calidad de agua en la bahía de Galway en Irlanda. Encontrando que existía una correlación marcada ( $R^2 = 0,81$ ) entre el cociente Rojo/Azul entregado por la cámara y el material orgánico disuelto (denominado sustancia amarilla) presente en la bahía.

Kohl, S.K., Landmark, J.D., & Stickle, D.F., (2006)<sup>12</sup>, mediante un experimento sencillo que buscaba demostrar la absorbancia utilizando el análisis de imágenes digitales a color, logró demostrar como con la coloración de una muestra de agua mediante colorante amarillo se podían extraer datos suficientes a diferentes concentraciones relativas (100%, 75%, 50%, 25% y 0%), para obtener un comportamiento exponencial en el canal azul medido de 0-255 intensidad de gris (IG) contra las concentraciones relativas del colorante mencionado.

1 Ingeniero Ambiental Universidad Católica de Oriente. Autor de correspondencia: [manuel9519@hotmail.com](mailto:manuel9519@hotmail.com)

2 Magister en Ingeniería, Docente Asistente Universidad Católica de Oriente, Grupo Limnología y Recursos Hídricos. Rionegro - Colombia

Otros espacios de color han sido utilizados en la determinación de concentraciones, Cantrell, K., Erenas, M., Orbe-Payá, I., & Vallvey, C. (2010)<sup>13</sup> evaluaron el espacio de color HSV (Hue, Saturation, Value por sus siglas en inglés) como un parámetro de análisis cuantitativo y lo comparó con el espacio RGB, encontrando que la principal ventaja del HSV respecto al RGB yacía en la representación completa de color en un único valor que variaba de 0 a 1. Haciendo este último de especial interés para su uso en sensores ópticos de membrana y otras aplicaciones, donde la falta de homogeneidad derivada de reacciones entre sustancias, afectara la captura de datos. También resaltó la ventaja de los dispositivos de captura de imágenes convencionales como cámaras digitales, escáneres y cámaras web al ser baratos y fáciles de utilizar para el tipo de aplicaciones que trataban en su investigación.

El monitoreo remoto utilizando cámaras digitales no es un concepto desconocido Dean, C., Warner, A., & McGraw, J.B. (2000)<sup>14</sup> evaluaron la conveniencia de una cámara digital comercial (DCS460c) para el monitoreo remoto cuantitativo aplicado al análisis de vegetación. Siguiendo una línea similar, Dymond, J.R., & Trotter C.M. (1997)<sup>15</sup> utilizaron una cámara digital comercial con un lente de gran ángulo para obtener distribuciones de reflectancia direccional de dos cubiertas vegetales, pasto (*lolium spp*) y bosque de pinos (*Pinnus radiata*).

En Colombia, el Área Metropolitana del Valle de Aburra en conjunto con otras entidades y universidades, llevaron a cabo una investigación conjunta en torno al parámetro color. Una de estas investigaciones, realizada por Silva W., y Villegas N., (2015)<sup>16</sup> implementaron el análisis de imágenes digitales capturadas mediante una cámara comercial, para establecer el color base del río Medellín realizando un recorte del área de interés en la imagen y procesando los datos en el espacio de color RGB comparados contra muestras de colorantes comerciales. Llegando a la conclusión de que es posible establecer con cierto margen de confianza el color del río en el espacio mencionado y su potencial alejamiento en caso de contaminación con colorantes.

El incremento o disminución de los sólidos en sistemas acuáticos que indirectamente se representa con la turbidez medida en NTU (Nefelometric Turbidity Units), puede incrementar el potencial erosivo de un caudal<sup>17</sup> afectar el intercambio de oxígeno en peces y degradar hábitats de especies acuáticas por sedimentación<sup>18</sup>. También su aumento afecta directamente el ingreso de radiación solar, una de las principales fuentes de energía para los ecosistemas acuáticos<sup>20</sup>. La turbidez en sistemas acuáticos está directamente influenciada por la cantidad de sólidos que esta carga en un momento determinado ya sean disueltos o suspendidos. Estos constituyentes provienen de diversos orígenes, como la degradación de material vegetal en ácidos húmicos o fúlvicos, erosión de los suelos aledaños en el caso de sistemas acuáticos lóticos y sales disueltas (Bilotta, G., & Braziera, R. 2008)<sup>21</sup>. En mayor o menor medida la luz que interacciona con los cuerpos de agua se ve afectada por su contenido de sales, sólidos y materia orgánica disuelta, esta última como resultado de los muchos procesos de degradación llevados a cabo por organismos presentes en el agua<sup>22</sup>.

El cambio de la turbidez en sistemas acuáticos es perceptible a simple vista, este cambio es debido al aumento de concentraciones en los componentes añadidos del agua, las cámaras digitales convencionales al estar diseñadas para captar la luz en el espectro visible también pueden captar estas diferencias, que son convertidas en señales digitales y representadas en un espacio de color determinado. En esta investigación se realiza una aproximación que busca explorar la posibilidad que existe en el uso de cámaras digitales convencionales, para mostrar el comportamiento de la turbidez presentada en muestras de agua de cuerpos naturales analizadas bajo condiciones de laboratorio y, minimizando algunas de las variables que se presentan al capturar

imágenes digitales in situ, como lo son la hora del día, nubosidad, ángulo e intensidad de la luz.

## Materials and methods

### Esquema experimental

Se construyeron dos entornos de captura para la adquisición de las imágenes digitales. Para el primero de ellos se construyó una caja de luz blanca (CLB), compuesta de plástico blanco en el interior y el exterior, con el propósito de bloquear la luz externa. La iluminación fue posicionada encima de la muestra, constaba de una lámpara LED con difusor incorporado, de 600 lúmenes, una temperatura de color de 6000k y un cri >80 (Color Rendering Index).

Arreglos experimentales similares al realizado fueron llevados a cabo por Mullins et al. (2018)<sup>23</sup>, Zhang, X. (2017)<sup>24</sup>, Belfort, B., Weill, S. y Lehmann F. (2017)<sup>25</sup>, Ohi, Inoue, S., y Ezaki, T. (1999)<sup>26</sup> y Kohl, S.K., Landmark, J.D., & Stickle, D.F., (2006)<sup>12</sup>.

Se utilizó un contenedor de vidrio con un volumen de 10 ml utilizado en espectrofotometría. Para este montaje se utilizó una cámara DSLR Nikon D5100 (Sensor CMOS, 23.6 x 15.6 mm, 16.2 MP, resolución de imagen de 4928 x 3264 píxeles y 40mm de longitud focal) ubicada a través de una abertura circular y a 10 cm de la muestra. La captura fue realizada con los ajustes automáticos por parte de la DSLR arrojando datos en bruto (RAW) para evitar la interpretación errónea del color de la escena capturada.

El segundo entorno de captura se construyó mediante una base plástica de acrílico blanco (BAB), donde la muestra era posicionada en la superficie de acrílico y la fuente de luz de iguales características (LED, 600 lúmenes y 6000k) provenía de la parte baja.

Las imágenes fueron capturadas en cuarto oscuro donde la única fuente de iluminación provenía de la BAB. En este montaje fueron utilizadas dos cámaras, ubicadas a 15 cm de la muestra: DSLR Nikon D5100 con ajustes fijos [f 3.0, 1/350 s, iso 100] junto con una cámara CCD industrial fabricada por The Imaging Source DMK41BU02.H [sensor CCD, 12.7 x 12.7mm, 1.2MP y una resolución de imagen de 1280 x 960 píxeles] y ajustes [Exp -6, ganancia 278, f 3.0, 1/250 s]. El objetivo principal de la construcción de los dos entornos de captura radica en la eliminación de influencias de luz externas que pudieran afectar la captura de las imágenes digitales, p.ej variación diurna de la intensidad de iluminación y las interacciones no deseadas de la luz con algunos materiales.

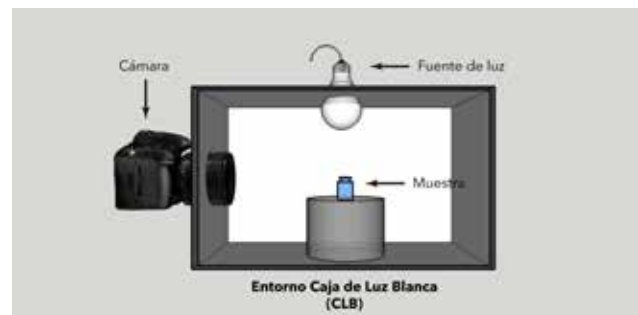


Figura 1. Entorno de captura Caja de Luz Blanca (CLB). Fuente autor

### Procesado de imágenes

Se utilizó el software MATLAB® para el procesado de imágenes. Este procesado incluye la región de interés que abarcaba un máximo de datos utilizables de 600 x 1100 píxeles para la imagen entregada por la DSLR en ambos entornos de captura (CLB y BAB), y una zona de 200 x 280 píxeles para la CCD en el entorno de captura BAB; en ambos casos evitando la estructura que contenía la muestra. De las imágenes capturas se extrajo la intensidad de gris en el campo de color RGB para cada canal en el caso de la DSLR y la intensidad total para la CCD.



Figura 2. Entorno de captura Base de Acrílico Blanco (BAB). Fuente autor

Dos métodos de análisis se tomaron en cuenta para el tratamiento de los datos, el método utilizado por Sumriddetchkajorn (2013, 2014)<sup>27, 28</sup> que corresponde a la metodología uno (M1) en el que propone la razón de color (1) para la relación de las intensidades del nivel de gris en cada canal del campo RGB:

$$CR = \frac{R_m/R_r + G_m/G_r + B_m/B_r}{3} \quad (1)$$

Donde  $R_m$ ,  $G_m$  y  $B_m$  corresponden a la intensidad de gris promedio calculada como el promedio de los valores de cada pixel en la región de interés (IGP) en cada canal de color en la muestra. Mientras que  $R_r$ ,  $G_r$  y  $B_r$  al plano de referencia (fondo), y se calcula como la IGP de dos regiones a lado y lado de la muestra.



Figura 3. Regiones de interés para metodología uno (M1).

Además, se propuso la segmentación de las imágenes digitales en cuatro sectores como segunda metodología (M2), ubicados dentro de las regiones definidas anteriormente, dispuestos horizontalmente hacia abajo (S1, S2, S3, S4). De cada sector se extraerá la IGP para cada canal en el campo de color RGB en la DSLR y la IGP total para la CCD. Este método con el propósito de establecer si existen diferencias entre las IGP de regiones en las imágenes, además si uno u otro canal en el campo RGB se ajusta mejor a los datos, para la comparación entre las diferencias de los sectores de la imagen se llevó a cabo un análisis de varianza

multi-factor con varias muestras por grupo en orden de establecer si existían diferencias entre sectores y entre los canales de color (RGB) de las imágenes capturadas.

### Turbidez

Para la determinación de la turbiedad se utilizó un turbidímetro Hach® 2100Q en todas las muestras, corresponde al método de referencia establecido que cumple con los criterios de diseño del método 180.1 USEPA<sup>29</sup>.

### Área de estudio

Se realizó toma de muestras en tres cuerpos de agua. Las muestras fueron tomadas en el centro del cuerpo de agua, sub-superficiales utilizando un recipiente de polipropileno atado a una cuerda al que se le realizaba su respectiva lavado y purga al momento de ser utilizado, las muestras se almacenaron en un recipiente plástico; analizadas 30 min después de ser tomadas, cuando no fue posible analizarlas en el momento se almacenaron refrigeradas a 4°C para prevenir la degradación orgánica de los sólidos presentes en la misma y analizadas en las 8h subsiguientes.

Cinco muestras en la quebrada San Antonio ubicada en San Carlos (Ant), Colombia con coordenadas 6.187376 N, -75.000571 E y cinco muestras en el río San Carlos en San Carlos (Ant), Colombia y con coordenadas 6.185392 N, -74.996961 E, en el mes de diciembre de 2016. Por último, se tomaron cinco muestras de agua de la quebrada La Marinilla en Marinilla (Ant) en los meses de julio y agosto de 2017 con coordenadas 6°10'14.4"N 75°20'02.6"W (Fig. 4 y 5).

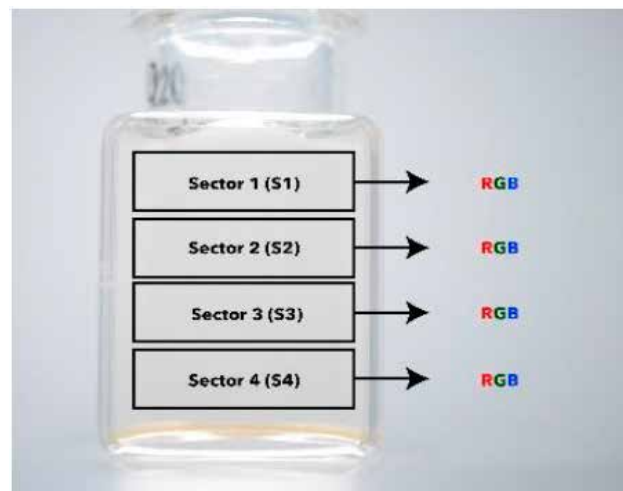


Figura 4. Regiones de interés por sector para metodología dos (M2).

### Ensayos de laboratorio

Adicional a la toma de muestras realizadas y con el fin de establecer una correlación entre los valores en NTU entregados por el turbidímetro y la IGP, fueron llevados a cabo dos ensayos de laboratorio (E1, E2). El primer ensayo (E1) fue realizado en el entorno de captura CLB y consistió en la generación de turbidez artificial utilizando arcilla de color rojizo tomada de un sector adyacente a la Quebrada la Marinilla, con coordenadas 6°10'15.0"N 75°20'02.1"W; correspondiente a suelos andisoles de la llanura aluvial de la quebrada<sup>30</sup>. Se realizaron ocho diluciones sucesivas desde 0,039 g/l hasta 5 g/l midiendo en cada una el valor de turbidez (NTU), posteriormente capturando la imagen digital utilizando la celda espectrofotométrica de 10ml, comenzando desde 925 NTU hasta 103 NTU.





Figura 5. Zonas de muestreo en (a) San Carlos y (b) Marinilla Antioquia, Colombia.

Para el segundo ensayo (E2) y siguiendo el mismo desarrollo, se utilizaron las muestras de calibración y verificación estándar que contenía el turbidímetro de fábrica, con valores que van desde 800 hasta 10 NTU (10, 20, 100, 800 NTU) y la posterior captura en el mismo recipiente.

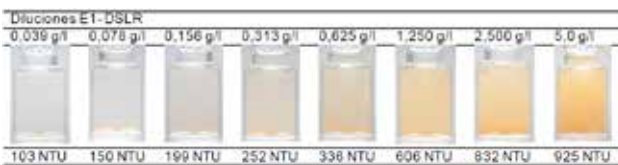


Figura 6. Diluciones sucesivas para el ensayo uno capturadas con la DSLR en CLB

## Resultados and Discusión

Los valores superiores a uno pueden explicarse desde la configuración misma del entorno de captura CLB, donde la posición de la muestra respecto a la fuente de iluminación y el fondo causaban que la muestra recibiera un poco más de iluminación que el plano de referencia o entorno circundante. Sumado a lo anterior, los valores de NTU presentados por las muestras del río San Carlos y la quebrada San Antonio fueron bajos, estando relacionados directamente con los sólidos presentes, hacían que la dispersión de la luz fuera menor, presentando valores de CR 1.0033 (Figura 9).

Así mismo, la metodología uno utilizada bajo el entorno de captura BAB en las muestras de la quebrada La Marinilla capturadas con la DSLR, arrojaban valores de CR muy por encima de 1 y en algunos casos llegando a valores de 2596.04 para un NTU de 24

(Figura 11). Es de esperarse estos resultados debido a que la IGP del plano de referencia en ninguna de las imágenes capturadas con la DSLR y la CCD (Figura 11 y 13) superaba el valor de 1.

Los valores de CR presentados por las imágenes capturadas por la DSLR y la CCD de la quebrada La Marinilla en el entorno BAB se mostraron directamente proporcionales a los de NTU, cuando se producía un incremento en los valores de NTU aumentaba la CR. El aumento en la cantidad de partículas en las muestras reflejados en NTU, y teniendo en cuenta la configuración del entorno de captura BAB, hacían que mucha más luz fuera dispersada a medida que la turbidez aumentaba, elevando

### Metodología uno y dos

La razón de color (CR) propuesta por Sumriddetchkajorn (2013, 2014)<sup>27, 28</sup> como una medida conjunta que agrupa el espacio de color RGB, presentó algunos inconvenientes al momento de ser utilizada en los diferentes entornos de captura utilizados en esta investigación.

Para el entorno de captura CLB se obtuvieron valores de intensidad de gris promedio (IGP) en la región de interés de la muestra superiores a aquellos del plano de referencia, esto se puede ver en los datos obtenidos de las muestras del río San Carlos (Figura 7) y la quebrada San Antonio (Figura 9). Los valores de IGP para el plano de la muestra, datos similares fueron encontrados por Mizutani, N., Saito, K., Numata, Y. (1988)<sup>31</sup> donde la relación  $R*B/G*G$  en el espacio de color RGB aumentaba a medida que la turbidez medida en ppm aumentaba también.

Se presentó una variación elevada entre los valores de IGP para valores de NTU similares en las muestras del río San Carlos y la quebrada San Antonio analizadas bajo la metodología dos (Figura 8 y 10) en los cuatro sectores de la región de interés. El responsable de este comportamiento puede ser la función de balance de blancos por parte de la DSLR, debido a que, aunque las condiciones de captura se mantuvieron constantes en cada una de las capturas, la cámara interpretaba el blanco de manera diferente en cada una de las oportunidades, situación similar fue reportada por L.M Goddijn & M. White (2006)<sup>11</sup> en su estudio donde recomiendan investigaciones adicionales para establecer los efectos de las diferentes condiciones de iluminación sobre esta función.

Esta misma situación se presentó en los valores de IGP para imágenes digitales capturadas de las muestras de la quebrada La Marinilla con la DSLR, donde valores de NTU de 14.8 arrojaban valores de IGP de 44.3, 47.9 y 55 para RGB respectivamente y, posteriormente valores de NTU de 13.2 arrojaban valores de 53.9, 60.6, 69.5 para RGB en S1 (Figura 12).

Esto hace muy difícil correlacionar un aumento de la IGP cuando se presenta un aumento en los valores de NTU, en el caso del entorno de captura CLB donde la iluminación se encontraba en la parte superior, cada sector analizado en las imágenes digitales en el siguiente orden  $S1>S2>S3>S4$  presentaba valores más bajos de IGP para cada espacio de color (RGB) mostrando un gradiente de dispersión longitudinal de luz alejándose de la fuente de iluminación. Este gradiente también se presentó en el entorno BAB de manera contraria donde los valores más altos de IGP iban de  $S4>S3>S2>S1$  y la fuente de iluminación en la parte baja.

### Entornos de captura

La principal diferencia entre los dos entornos de captura utilizados fue el color de fondo y la posición de la iluminación. En el primero de ellos (CLB), un fondo blanco aislado de la iluminación externa mediante una caja de luz blanca, la intensidad de gris promedio base para el plano de referencia utilizado en M1-E1-DSLR fue de 210.33 IGP para el canal rojo, 212.82 IGP para el canal verde y 216.76 IGP en el canal azul. Estos valores son cercanos al límite de intensidad de 255 correspondiente a una saturación con blanco

del 100% por esto, un cambio que sea detectado por la cámara debe reflejar valores por debajo de los tomados en el plano de referencia, de lo contrario el margen de toma de datos utilizables en las regiones de interés se reduce.

La configuración del entorno de captura CLB evitaba influencias de fuentes de luz externas, pero, debido a la posición de la fuente de luz respecto a la cámara se aumentaba la cantidad de iluminación que llegaba a esta, reduciendo un poco el rango dinámico de la misma. La configuración de la iluminación respecto a la muestra y a las paredes contiguas del entorno, generaban algunas zonas cercanas a los extremos de las imágenes digitales capturadas, donde la luz no llegaba de manera uniforme. Esta zona de iluminación no uniforme también es producto del viñeteado derivado del lente, aunque no alcanzaban a ser cubiertas por las regiones de interés tomadas para el análisis, es preciso en nuevos ensayos tratar de minimizarlas.

El entorno de captura BAB, donde la fuente de iluminación se encontraba en la parte inferior respecto a la muestra evitaba que parte de la luz interactuara con otros elementos a diferencia del entorno CLB, produciendo zonas con menos píxeles sobre expuestos que pudieran ser utilizados en el análisis de las regiones de interés. Mullins et al. (2018)<sup>23</sup> también utilizó un cuarto oscuro para la captura de imágenes, pero a diferencia del entorno BAB, posicionó la fuente de iluminación en un lateral a 90° respecto a la cámara, pruebas realizadas previamente con los recipientes de verificación estándar del turbidímetro en forma de cilindro dieron como resultado la aparición de zonas sobre saturadas con datos inutilizables que disminuía la región de interés para el análisis de datos

#### Ensayo uno

Se logró establecer una ecuación de correlación mediante un ajuste polinómico entre los datos obtenidos de las muestras de dilución en el entorno CLB con un  $R^2 = 0.97428$  y para una ecuación de tercer orden, presentando una relación inversamente proporcional entre la CR, el contenido de sólidos y los valores de NTU. Los datos cercanos a los valores de NTU más bajos (103 y 105) presentaron un CR de 1.011 y 1.004 (Figura 15) respectivamente debido tal vez a los efectos del entorno de captura mencionados. Se logra evidenciar que la dispersión de la luz causada por el incremento de sólidos en las muestras preparadas, causó una disminución de la intensidad de luz captada por la DSL en el entorno CLB. Resultados similares fueron reportados por Sumriddetchkajorn (2013, 2014)<sup>27, 28</sup> con el contenido de cloro medido en ppm, Mizutani, N., Saito, K. y Noumata, Y. (1988)<sup>30</sup> con la turbidez medida en ppm y las relaciones de color establecidas, Kohl, S.K., Landmark, J.D., & Stickle, D.F., (2006)<sup>12</sup> entre la intensidad de luz en azul y la concentración relativa de colorante.

Para el canal azul (B) en la metodología dos y el sector dos (S2) mostró mejor ajuste con un  $R^2 = 0.97645$  para una ecuación de tercer orden, mostrando un comportamiento similar a los datos obtenidos para CR con una disminución de la IGP con un aumento en los valores de NTU. Contrario al canal azul, el canal rojo (R) mostró tendencia a aumentar los valores de IGP con el incremento de NTU y un mejor ajuste en el sector uno (S1) con un  $R^2 = 0.96342$  para tercer orden (Figura 16). Debido a que la interpretación del color por parte de la DSRL es una coordenada tridimensional compuesta por los datos individuales en RGB, el color presentado por las muestras utilizadas influye de manera directa en cuál de los canales de color se presenta un mejor ajuste.

#### Ensayo dos

Los datos obtenidos para la DSLR presentaron un aumento directamente proporcional de IGP en los valores de 10, 20 y 100 NTU respectivamente (Figura 17), mientras que el valor de IGP para 800 NTU disminuyó. Un comportamiento similar fue observado en los datos entregados por la CCD (Figura 19) donde los primeros tres datos aumentaban y el último disminuía.

Esta disminución repentina después de un aumento directamente proporcional, puede relacionarse a la dispersión de la luz sobre las regiones de interés tomadas para el análisis, causando un ligero aumento en la IGP que precipita el valor en el cálculo de la CR.

Utilizando la segunda metodología, todos los sectores analizados mostraron un incremento directamente proporcional de la IGP con el aumento en NTU de las muestras de calibración, con un  $R^2 > 0.9$  para todos canales (R, G y B) en cada sector (S1, S2, S3 y S4) (Figura 18), sin embargo, el canal verde (G) mostró un ajuste ligeramente mayor en todos los sectores analizados. El aumento de los sólidos presentes en las muestras, y por ende de la turbidez, se ve reflejado en la intensidad de luz captada por las cámaras para cada una de las muestras, contrario a lo evidenciado en el ensayo uno donde el aumento causaba una disminución en la intensidad de luz.

En el caso de la CCD para el segundo ensayo, el sector uno (S1) presentó mejor ajuste con un  $R^2 = 0.94148$  seguido del sector dos (S2) con un  $R^2 = 0.92266$  (Figura 20). El comportamiento fue igual al descrito para el ensayo uno en la segunda metodología utilizando la DSLR.

#### Ecuaciones de correlación

La precisión de las ecuaciones de correlación encontradas entre la razón de color y los valores de NTU para el ensayo uno, depende en gran medida de la estabilización de los valores medidos en las muestras de agua del río San Carlos y la quebrada San Antonio. Debido a que estos presentaban una gran variación, solo en unos pocos casos se logró porcentajes de alejamiento con respecto al valor, del orden del 16.61 % por debajo del valor real, para una muestra de la quebrada San Antonio con un NTU de 1.253 y un valor determinado por la ecuación de 1.0447 respectivamente.

## Resultados y Discusión

Los resultados están organizados por zona de muestreo y metodología, comenzando por el río San Carlos, quebrada San Antonio y quebrada La Marinilla de igual modo, para esta última, se hace la distinción de las cámaras utilizadas. Seguidamente, se presentan los resultados de los ensayos realizados separados por cámara digital utilizada.

#### Río San Carlos – metodología 1

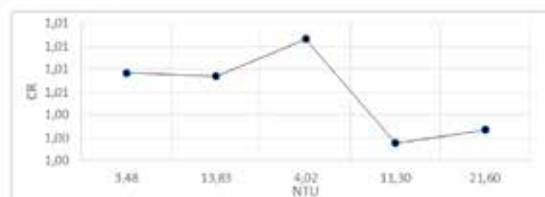


Figura 7. Razón de color contra NTU en las muestras del Río San Carlos con la DSLR para la metodología 1 en CLB.

#### Quebrada San Antonio – Metodología 1-DSLR

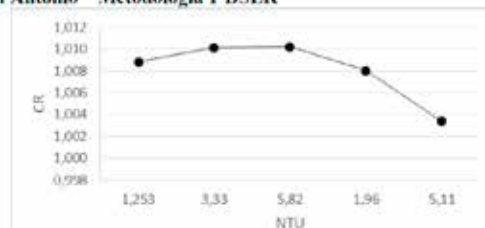


Figura 9. Razón de color contra NTU en las muestras de la quebrada San Antonio utilizando la DSLR para la metodología uno

**Rio San Carlos – metodología 2**

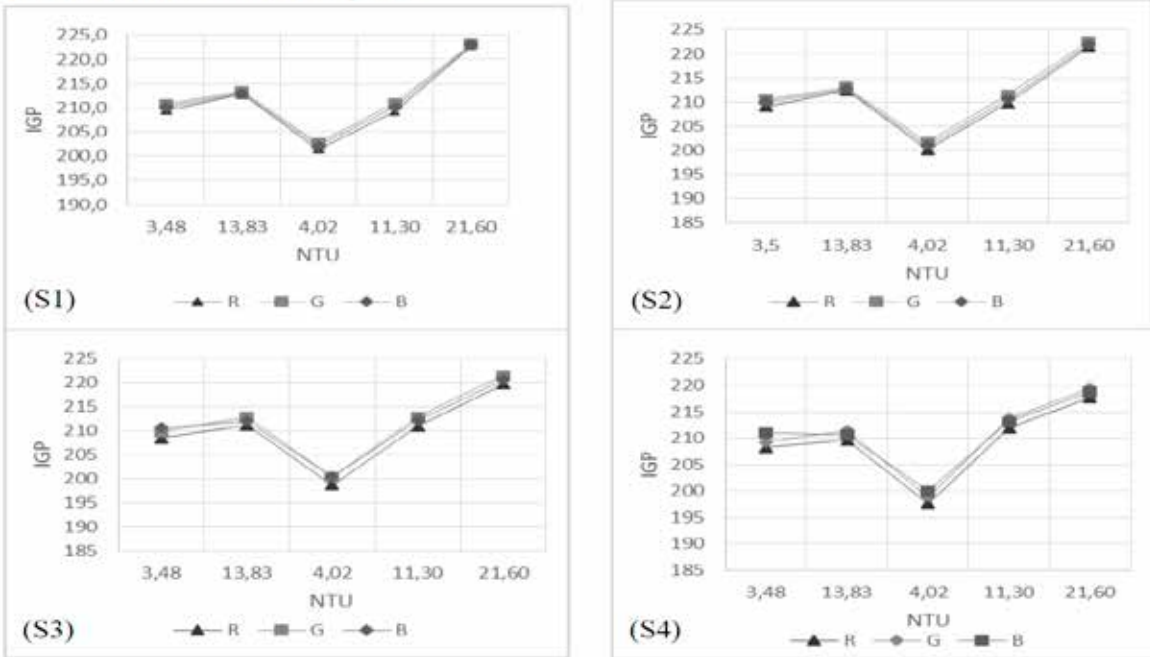


Figura 8. Intensidad de gris promedio (IGP) contra NTU utilizando la metodología dos en la DSLR y en CLB.

**Quebrada San Antonio – Metodología 2 - DSLR**

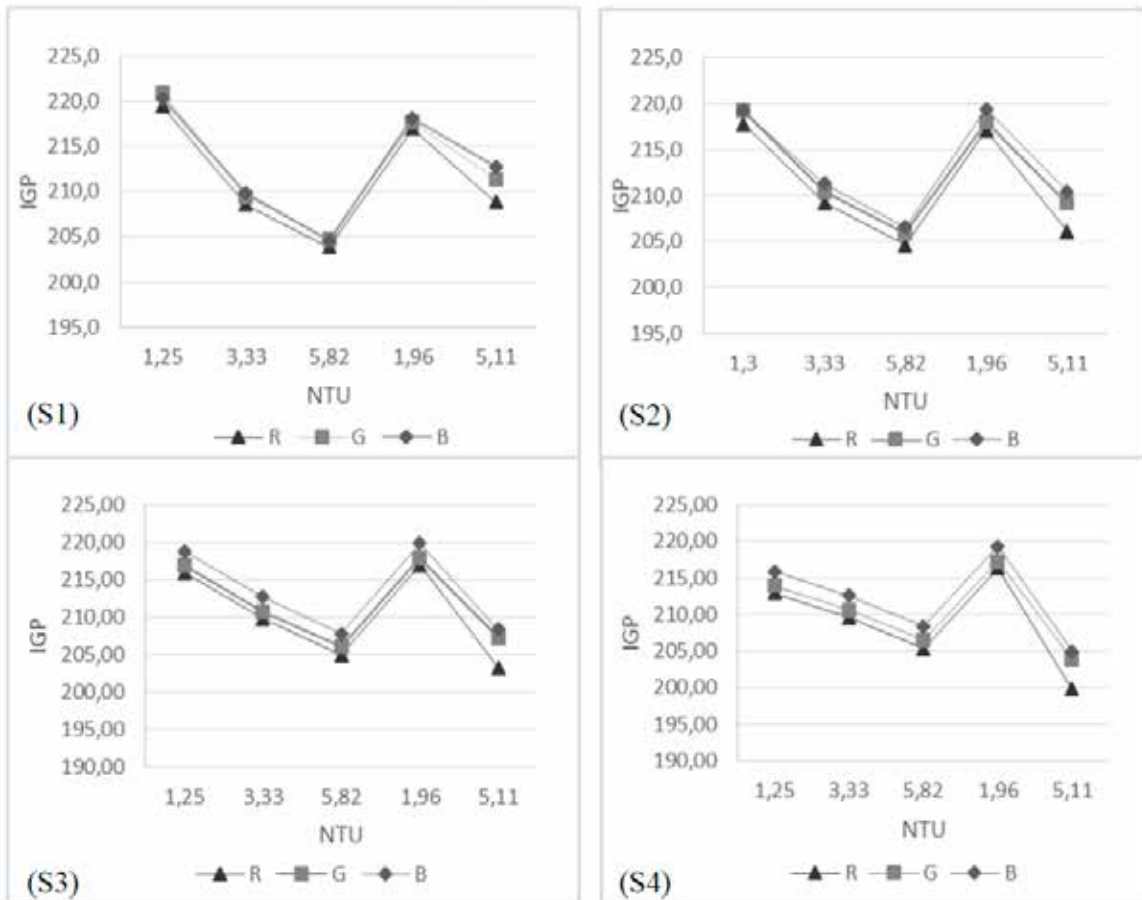


Figura 10. Intensidad de gris promedio contra NTU para todos los sectores utilizando la DSLR para la metodología dos



Quebrada La Marinilla – Metodología 1- DSLR

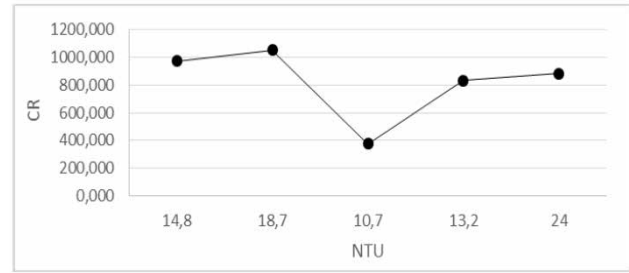
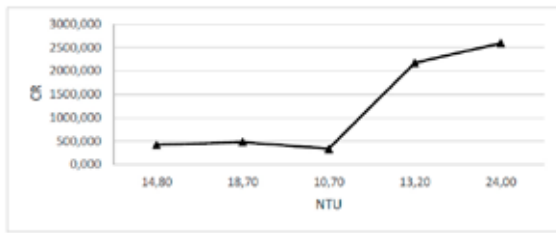


Figura 11. Razón de color contra NTU en las muestras de la quebrada la marinilla utilizando la DSLR para la metodología uno en BAB

Figura 13. Razón de color contra NTU en las muestras de la Quebrada La Marinilla utilizando la CCD para la metodología uno en BAB.

Quebrada La Marinilla – Metodología 1 - CCD

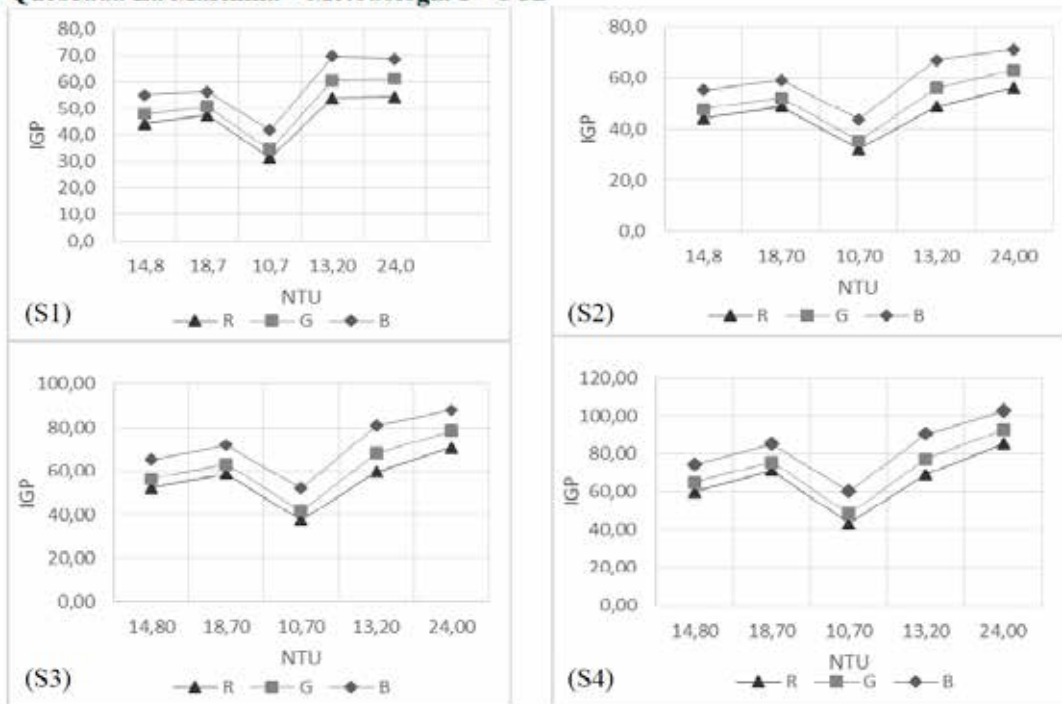


Figura 12. Intensidad de gris promedio contra NTU para todos los sectores utilizando la DSLR utilizando la metodología dos, en BAB.

Ensayo uno – metodología 1

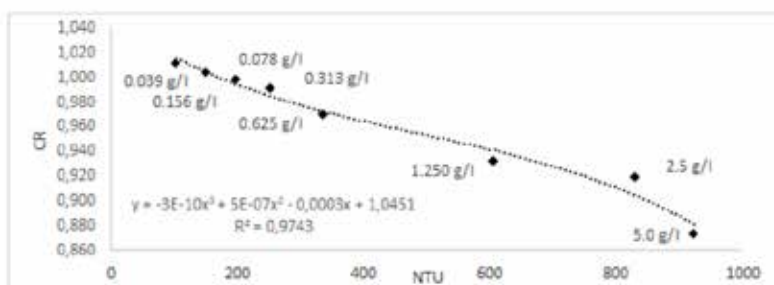


Figura 15. Razón de color contra NTU para el ensayo uno, utilizando la DSLR en el entorno CLB para la metodología uno.

**Quebrada La Marinilla – Metodología 2 - CCD**

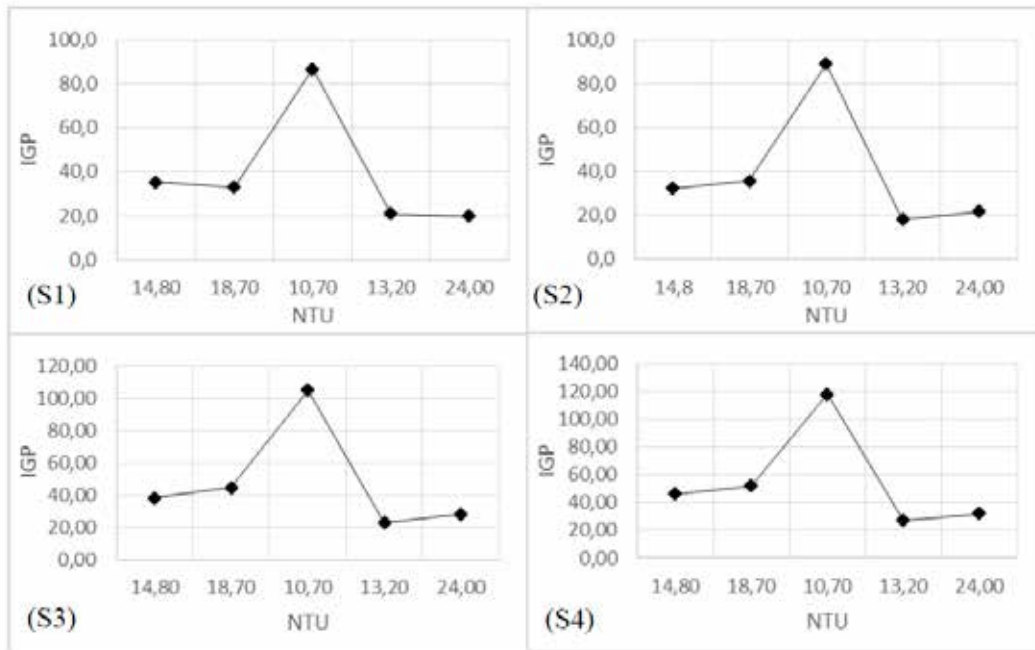


Figura 14. Intensidad de gris promedio contra NTU para todos los sectores utilizando la CCD en la metodología dos, entorno BAB

**Ensayo uno – metodología dos**

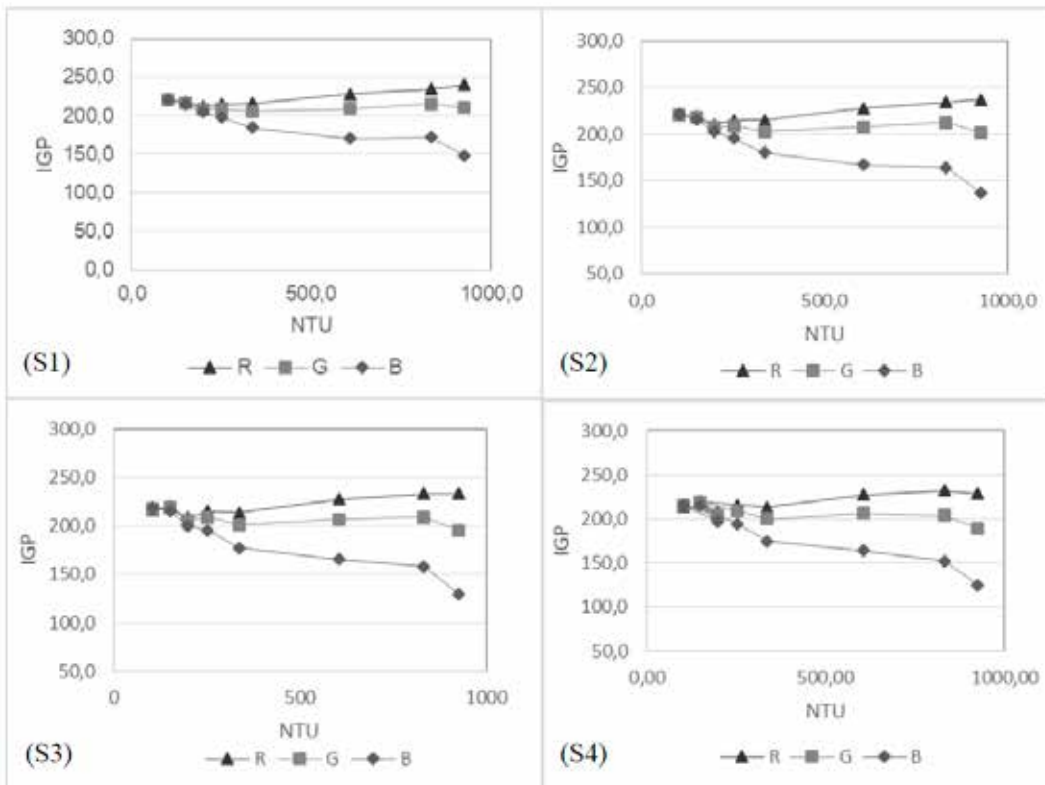
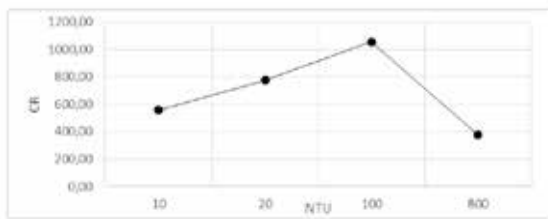


Figura 16. Intensidad de gris promedio contra NTU para todos los sectores utilizando la DSLR para la metodología dos, en CLB.



Ensayo 2 – metodología uno - DSLR



Ensayo dos – metodología uno – CCD

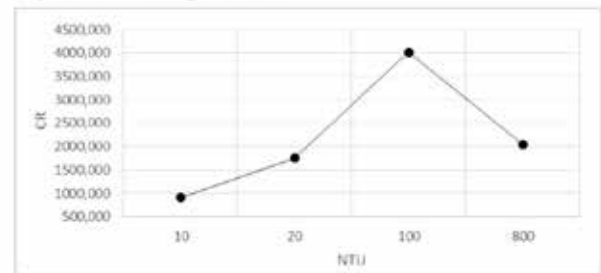


Figura 17. Razón de color contra NTU para el ensayo 2 con DSLR utilizando la metodología uno, en BAB.

Figura 19. Razón de color (CR) contra NTU, ensayo dos utilizando la metodología uno en BAB para la CCD.

Ensayo 2 – metodología dos

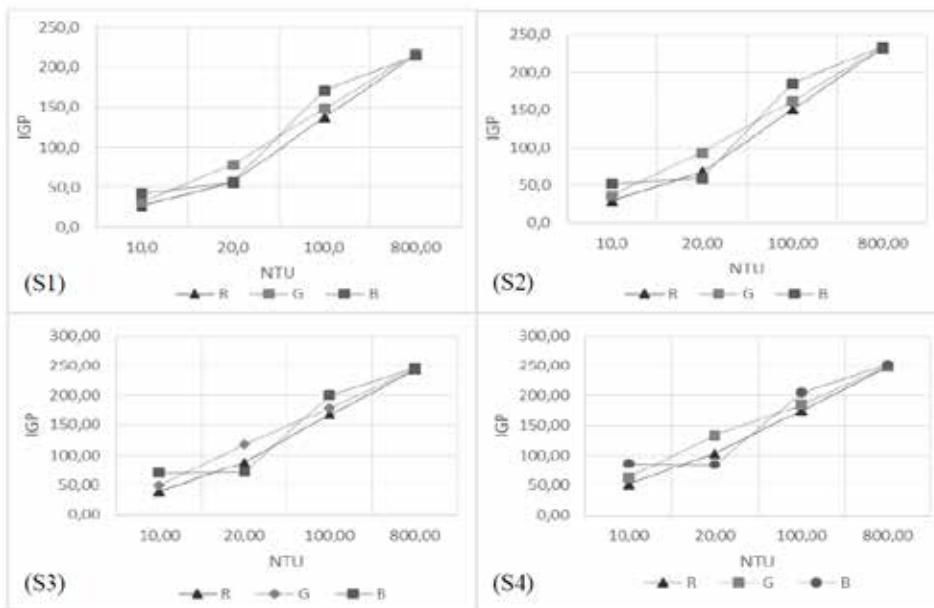


Figura 18. Intensidad de gris promedio contra NTU para todos los sectores utilizando la DSLR para la metodología dos en BAB.

Ensayo dos – metodología dos - CCD

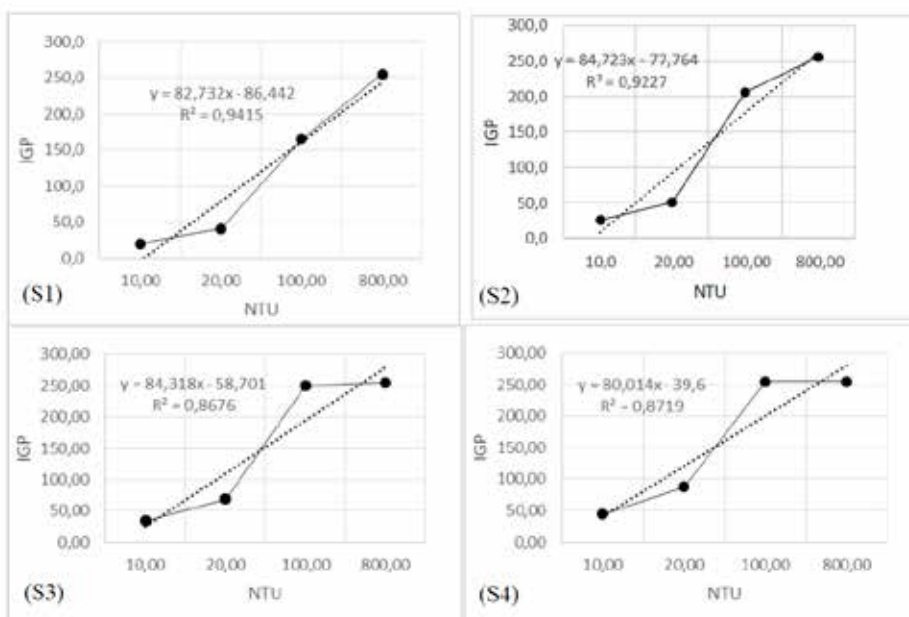


Figura 20. Intensidad de gris promedio contra NTU para todos los sectores utilizando la CCD para la metodología dos en BAB.

## Conclusiones

Se evaluó la descomposición de imágenes digitales para la estimación indirecta de la turbidez en tres cuerpos de agua naturales. Se encontró una relación inversa para el caso del ensayo uno donde el aumento de turbidez reflejaba una disminución de la IGP con la DSLR utilizando la metodología uno y dos con diferencias en los canales de color evaluados. El color aparente otorgado por la turbidez de las muestras en el caso del ensayo uno, afecta de manera significativa cuál de los canales de color se ajusta mejor al momento de realizar las correlaciones. Se debe llevar a cabo más ensayos para determinar una metodología que permita disminuir la varianza presentada entre las diferentes capturas, que incluya la utilización de sólidos similares a los presentados por cuerpos de agua naturales al igual que la utilización de diferentes intensidades y tipos de iluminación.

El tipo de fondo en los entornos de captura CLB y BAB afecta la precisión de los datos extraídos de las imágenes digitales, siendo menos sensible a los cambios de NTU el fondo blanco de CLB que el negro en BAB.

Existe una correlación inversa entre la cantidad de sólidos presentes en una muestra de agua y la intensidad de luz captada por la DSLR en el ensayo uno. Para el ensayo dos la correlación era directamente proporcional al aumento de la turbidez en las muestras utilizadas.

No fue posible realizar una estimación indirecta precisa por medio de las ecuaciones de correlación obtenidas en ambos ensayos mediante los ajustes polinómicos y lineales, debido a la alta variación de la IGP en las muestras de agua naturales, derivadas de los sólidos presentes en las mismas y algunas variaciones atribuidas a las cámaras digitales utilizadas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo de investigación Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente, al programa de ingeniería ambiental de la misma institución por su apoyo durante todo el proceso y al docente Daniel Gómez por la ayuda brindada en las fases iniciales de la investigación.

## Referencias Bibliográficas

1. World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum. [online] Disponible en: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/)
2. Resolución 2115. Diario oficial de la república de Colombia, Bogotá, junio 22 de 2007
3. Allen, M.J., Brecher, R.W., Copes, R., Hruday, S.E., Payment, P. (2008). Turbidity and Microbial Risk in Drinking Water. Prepared for The Minister of Health Province of British Columbia. <http://www.wsabc.ca/wp-content/uploads/2011/04/TAC-Turbidity-Report.pdf>
4. Zawbaa, H., Abbass, M., Hazman, M. and Hassenian, A. (2014). Automatic Fruit Image Recognition System Based on Shape and Color Features. Communications in Computer and Information Science, pp.278-290.
5. Byers, J. (2006). Analysis of Insect and Plant Colors in Digital Images Using Java Software on the Internet. Annals of the Entomological Society of America, 99(5), pp.865-874. [https://doi.org/10.1603/0013-8746\(2006\)99\[865:AOIAPC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0013-8746(2006)99[865:AOIAPC]2.0.CO;2)
6. Sun, X., Gong, H., Zhang, F. and Chen, K. (2009). A Digital Image Method for Measuring and Analyzing Color Characteristics of Various Color Scores of Beef. 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. doi: 10.1109/CISP.2009.5302150
7. Choodum, A., Boonsamran, P., NicDaeid, N. and Wongniramaikul, W. (2015). On-site semi-quantitative analysis for ammonium nitrate detection using digital image colourimetry. Science & Justice, 55(6), pp.437-445. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scijus.2015.05.001>
8. Firdaus, M., Alwi, W., Trinoveldi, F., Rahayu, I., Rahmidar, L. and Warsito, K. (2014). Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry. Procedia Environmental Sciences, 20, pp.298-304. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.037
9. Lopez-Molinero, A., Liñan, D., Sipiera, D. and Falcon, R. (2010). Chemometric interpretation of digital image colorimetry. Application for titanium determination in plastics. Microchemical Journal, 96(2), pp.380-385. doi: 10.1016/j.microc.2010.06.013
10. Lopez-Molinero, A., Tejedor Cubero, V., Domingo Irigoyen, R. and Sipiera Piazuolo, D. (2013). Feasibility of digital image colorimetry—Application for water calcium hardness determination. Talanta, 103, pp.236-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2012.10.038>
11. Goddijn, L. and White, M. (2006). Using a digital camera for water quality measurements in Galway Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 66(3-4), pp.429-436. DOI: 10.1016/j.ecss.2005.10.002
12. Kohl, S., Landmark, J. and Stickle, D. (2006). Demonstration of Absorbance Using Digital Color Image Analysis and Colored Solutions. Journal of Chemical Education, 83(4), p.644.
13. Cantrell K., Erenas, M., de Orbe-Payá, I. and Capitán-Vallvey, L. (2010). Use of the Hue Parameter of the Hue, Saturation, Value Color Space As a Quantitative Analytical Parameter for Bitonal Optical Sensors. Analytical Chemistry, 82(2), pp.531-542. doi:10.1021/ac901753c
14. Dean, C., Warner, A., & McGraw J.B. (2000). Suitability of the DSC460c colour digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation. ISPRS J. Photogram. 55, 105-108
15. Dymond, J. and Trotter, C. (1997). Directional reflectance of vegetation measured by a calibrated digital camera. Applied Optics, 36(18), p.4314. <https://doi.org/10.1364/AO.36.004314>
16. Silva, W., Villegas, N. (2015). Implementación de la metodología de análisis De descomposición de Imágenes digitales para la determinación de contaminación por color en un cuerpo de agua. Investigación Básica Y

- Aplicada Sobre El Parámetro Color En Los Vertimientos De Aguas Residuales Generados En El Sector Industrial Y De Servicios, Ubicado En La Jurisdicción Del Área Metropolitana Del Valle De Aburra. Tomado de <http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Color/Informes/INVESTIGACION%20PARAMETRO%20COLOR%20EN%20VERTIMIENTOS.pdf>
17. Brea, D. and Balocchi, F. (2010). Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas. [online] Unesco. unesco.org. Available at: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216338s.pdf>
  18. Berkman, H. and Rabeni, C. (1987). Effect of siltation on stream fish communities. *Environmental Biology of Fishes*, 18(4), pp.285-294.
  19. WOOD, P. and ARMITAGE, P. (1997). Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment. *Environmental Management*, 21(2), pp.203-217.
  20. Kirk, J. (2011). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. (3rd ed., p. 404). New York: Cambridge University Press.
  21. Bilotta, G. and Brazier, R. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42(12), pp.2849-2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>
  22. Jonasz, M. and Fournier, G. (2011). *Light Scattering by Particles in Water: Theoretical and Experimental Foundations*. 1st ed. Elsevier Science. ISBN: 9780080548678
  23. Mullins, D., Coburn, D., Hannon, L., Jones, E., Clifford, E. and Glavin, M. (2018). A novel image processing-based system for turbidity measurement in domestic and industrial wastewater. *Water Science and Technology*, 77(5), pp.1469-1482. doi: 10.2166/wst.2018.030
  24. Zhang, X. (2017). Water Quality Turbidity Detection Based on Image Recognition System Design and Implementation. *Advances In Intelligent Systems And Computing*, 613, 63-70. doi: 10.1007/978-3-319-60744-3\_7.
  25. Belfort, B., Weill, S., & Lehmann, F. (2017). Image analysis method for the measurement of water saturation in a two-dimensional experimental flow tank. *Journal Of Hydrology*, 550, 343-354. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.007
  26. Oh, J., Inoue, S., & Ezaki, T. (1999). The Potential Use of Digital Image in Turbidity Measurement. *Journal Of Rainwater Catchment Systems*, 4(2), 27-30. doi: 10.7132/jrcsa.kj00003257807
  27. Sumriddetchkajorn, S., Chaitavon, K., & Intaravanne, Y. (2013). Mobile device-based self-referencing colorimeter for monitoring chlorine concentration in water. *Sensors And Actuators B: Chemical*, 182, 592-597. doi: 10.1016/j.snb.2013.03.080
  28. Sumriddetchkajorn, S., Chaitavon, K., & Intaravanne, Y. (2014). Mobile-platform based colorimeter for monitoring chlorine concentration in water. *Sensors And Actuators B: Chemical*, 191, 561-566. doi: 10.1016/j.snb.2013.10.024
  29. EPA (1993). METHOD 180.1 DETERMINATION OF TURBIDITY BY NEPHELOMETRY. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268
  30. Jaramillo, D.F. (1995). Andisoles del Oriente Antioqueño: caracterización química y fertilidad. Instituto Ciencias Naturales y Ecología-ICNE. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35p
  31. Mizutani, N., Saito, K., Numata, Y. (1988). Real-time monitoring of turbid water by using video camera, personal computer and image processing, in *Asia Air Survey Co., Ltd.* 13-16 Tamura-cho, Atsugi-shi, Kanagawa- Ken, 243, Japan.

**Recibido: 10 abril 2019**

**Aprobado: 5 mayo 2019**