

ESTIMACIÓN DE FLUJOS DIFUSIVOS DE CO₂ EN EMBALSES TROPICALES MEDIANTE EL USO CONJUNTO DE LA TELEDETECCIÓN, LA MODELACIÓN DE CONCENTRACIONES SUPERFICIALES DEL GAS Y K₆₀₀

CO₂ DIFFUSIVE FLUX ESTIMATION FOR TROPICAL RESERVOIRS FROM JOINT UTILIZATION OF REMOTE SENSING, SUPERFICIAL GAS CONCENTRATIONS AND K₆₀₀ MODELLING

¹**Juan G. León**

²**Mariam Rojas**

¹PhD. Ciencias de la Tierra, del Ambiente y del Espacio. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

²MSc. Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia

¹jgleonh@unal.edu.co; ²mgrojas@unal.edu.co

RESUMEN

Contextualización: actualmente, se reconoce a nivel internacional que los embalses, además de alterar el natural ciclo del carbono, son fuertes emisores de gases de efecto invernadero (GEI) y, en la cuantificación de sus emisiones, prevalecen grandes incertidumbres sobre las que, solo hasta el momento, se ha comenzado a generar conocimiento, mediante mediciones directas en campo sobre las verdaderas magnitudes de las emisiones que tienen lugar en estos hidrosistemas.

Vacío de conocimiento: los altos costos del desarrollo de mediciones *in situ*, análisis de muestras y cuantificación de emisiones, han sido un impedimento mayor para

la producción de información suficiente que conlleve a una comprensión global del comportamiento de estos hidrosistemas en términos de emisiones.

Propósito del estudio: con base en los resultados del Proyecto GEITRO (2012-2014), cuyo objetivo principal fue cuantificar las emisiones de GEI generados en el embalse de Riogrande II (Antioquia, Colombia) a partir de muestreos exhaustivos *in situ*, se abrió la posibilidad de explorar métodos alternativos que permitan la cuantificación de emisiones mediante la aplicación de modelos fundamentados en el uso de variables medibles basados en sistemas remotos como la teledetección.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar cómo el uso conjugado de datos, medidos desde el espacio, y modelos que relacionen dichos datos con las concentraciones superficiales de un gas en el agua, así como su coeficiente de velocidad de transferencia, se podrían usar para estimar de manera acertada los flujos difusivos del gas en el espacio y en el tiempo, reduciendo los esfuerzos de monitoreo en campo.

Metodología: los métodos estuvieron fundamentados en el análisis de la información proveniente de los datos de campo para el desarrollo y validación de los modelos, así como la deducción de temperaturas superficiales del agua medidas a partir sensores remotos para la estimación final de emisiones a partir de los modelos propuestos.

Resultados y conclusiones: como resultado se han desarrollado dos modelos: uno para la estimación de concentraciones superficiales de CO₂ y otro para la estimación del coeficiente de velocidad de transferencia normalizado sobre número de Schmidt de 600 (K600). El resultado de la aplicación de estos dos modelos condujo a la estimación de flujos difusivos de CO₂ del embalse. Los procesos de validación permitieron concluir que los modelos desarrollados logran reproducir, de manera más que aceptable (error relativo 15 ± 0,07% en promedio), los flujos difusivos de CO₂ medidos en el embalse de RGII entre los años 2012 y 2014. Finalmente, a partir de estos resultados, se emplearon las temperaturas superficiales, medidas por MODIS-Terra, con el fin de estimar los flujos difusivos de CO₂ sobre el embalse.

Palabras clave: Coeficiente de velocidad de transferencia; Concentraciones superficiales de CO₂; embalses; MODIS Terra.

ABSTRACT

Contextualization: Currently, it is internationally recognized that the reservoirs alters the natural carbon, they are strong GHG emitters and, in the quantification of their emissions, important uncertainties still prevail. Only, up to now, the initiatives of direct measurements in the field have begun to generate knowledge about the true magnitudes of the emissions produced from these hydrosystems.

knowledge gap: The high costs to develop *in situ* measurements, analyses of samples and quantification of emissions, have been a major impediment to the production of sufficient information that leads to a global understanding of the behavior of these hydrosystems in terms of emissions.

Purpose: Based on the results obtained from GEITRO Project (2012-2014), whose main objective was to quantify the GHG emissions generated in the Riogrande II dam based on exhaustive *in situ* monitoring, it was possible to explore alternative methods to allow the quantification of emissions generated in a dam by means of application or development of models based on the use of measured issues from remote sensors like tele-detection. The main objective of this research was to evaluate how the conjoint use of measured spatial data and models relating these data to gas surface concentrations, as well as its transfer velocity coefficient, could be used to estimate CO₂ diffusive flow emissions, in time and space, avoiding huge *in situ* monitoring efforts.

Methodology: Methods were based on the analysis of the information from the field data for the development and validation of the models, as well as the deduction of water surface temperatures measured from remote sensors for the final estimation of emissions from the deduced models.

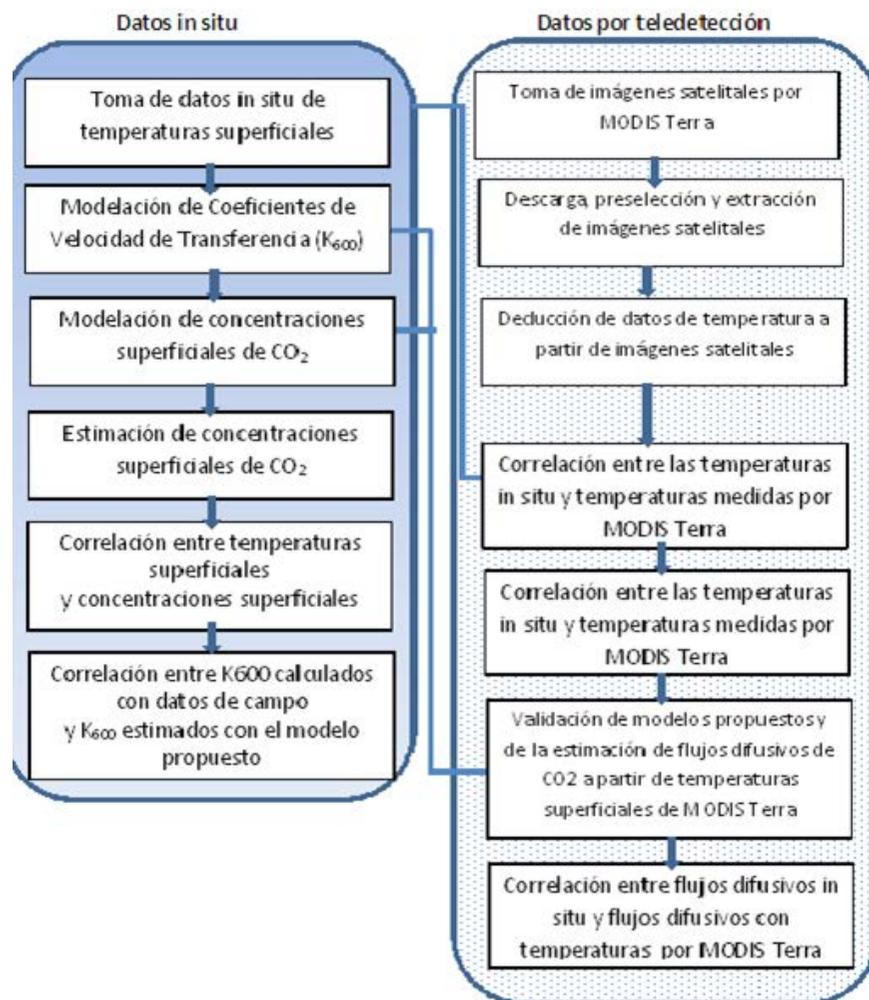
Results and conclusions: As a result, we developed two models: one for the estimation of surface CO₂ concentrations and another for the estimation of the normalized transfer velocity coefficient normalized under the Schmidt's number of 600 (K₆₀₀). The result of the application of these two models allowed to the estimation of CO₂ diffusive flux from the dam. The validation processes of the models allowed to conclude that they manage to reproduce more

than acceptable (relative error of 15 ± 0.07% on average) the diffusive CO₂ fluxes measured in the RGII reservoir between 2012 and 2014. Finally, based on these results, we used Water Surface Temperature (WST) measured by MODIS-Terra for the estimation of the diffusive flux of CO₂ on the dam.

Keywords: Transfer velocity coefficient; CO₂ Surface concentrations; dams; MODIS Terra.

RESUMEN GRÁFICO

Estimación de flujos difusivos de CO₂ a la atmosfera de cuerpos de agua continentales



1. INTRODUCCIÓN

Los embalses son considerados como una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero de origen antrópico a causa de su naturaleza. Su comportamiento, como ecosistema acuático, responde a los mismos procesos fisicoquímicos y a la degradación de la materia orgánica (MO) que un ecosistema acuático de origen natural. A pesar de que existen en la actualidad grandes incertidumbres con relación a la magnitud precisa de emisiones de estos sistemas, diversos estudios (Guérin y Abril, 2007; Guérin et al., 2008) sugieren que los embalses pueden contribuir en un 4% y 12% de las emisiones globales de origen antrópico de CO₂ y CH₄ respectivamente.

Hasta el momento, no hay evidencia científica concluyente respecto a la magnitud real de emisiones de GEI que tienen lugar en embalse, y es probable que las aproximaciones difieran de manera importante según la región geográfica. El Informe del IPCC (2011), junto con otra serie de estudios más recientes, como el de Raymond et al. (2013) y Werhli, B (2013), sostienen que existen muy pocas mediciones de emisiones de GEI en regiones tropicales a nivel de embalses y de ecosistemas acuáticos en general y que, por el momento, la poca información disponible resulta insuficiente para dar una conclusión relacionada con los aportes de emisiones de GEI a partir de dichas regiones.

Existen importantes estudios que aportan conocimiento en este dominio de la cuantificación de emisiones en ecosistemas acuáticos, los cuales están representados en aquellos desarrollados por Guérin y Abril (2007) y Guérin et al., (2007) sobre el embalse de Petit-Saut en Guyana francesa, Kemenes et al., 2007; Kemenes et al., 2011 en la represa de Balbina en Brasil, Chanudet et al., (2011) en los embalses de Nam Ngum y Nam Leuk, Fearnside (2016); Fearnside (2009) y Demarty y Bastien (2011)

en diferentes embalses tropicales. Sin embargo, estas iniciativas son insuficientes para determinar con precisión la contribución de emisiones de GEI de embalses en el trópico.

Los elevados costos relacionados con el desarrollo de trabajos de campo periódicos, compra y mantenimiento de equipos de medición, tomas y análisis de muestras, entre otros, dificultan la ejecución el desarrollo de esta labor. En este sentido, se hace inminente el desarrollo de modelos que permitan estimar de forma confiable el conjunto de emisiones de estos ecosistemas a partir de información que sea accesible por medio de sensores remotos (estaciones de medición en tiempo real, teledetección, etc.).

El uso de los sensores remotos para este fin ha sido altamente reportado para ecosistemas marinos (Stephens et al, 1995); sin embargo, su aplicación en ecosistemas acuáticos continentales está muy débilmente documentada. En esto se basa la necesidad de reportar los posibles resultados, positivos o negativos, de tal aplicación en un ecosistema acuático tropical de alta montaña.

Esta investigación tuvo como objetivo fundamental aplicar el uso de herramientas de observación, como sensores remotos, para alimentar modelos de emisiones de GEI actualmente reportados en la literatura, con el fin de reconstituir flujos difusivos de CO₂ medidos en campo sobre el embalse de Riogrande II (RGII) y poder determinar la viabilidad del uso de este tipo de tecnologías en la estimación de tales emisiones de este biogás en ecosistemas acuático tropicales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes y descripción de la zona de estudio

Entre el año 2012 y el 2014, el Grupo de Investigación en Ecología y Contaminación Acuática

de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, desarrolló el proyecto de investigación "Cuantificación de emisiones de GEI en embalses tropicales: Caso del Embalse de Riogrande II" – GEITRO (GEITRO 2012). Este proyecto tuvo como objetivo fundamental adquirir datos de campo durante 18 meses, para estimar las emisiones de CO₂ provenientes del embalse de Riogrande II, así como el análisis del comportamiento biogeoquímico del sistema que permitiría comprender las relaciones que influyeron sobre tales emisiones. El conjunto de datos de campo y análisis realizados para el embalse fueron puestos a disposición para el desarrollo de este estudio.

El embalse de Riogrande II (Figura 1), está situado a 2.270 msnm en la región Andina de Colombia, al norte del departamento de Antioquia. Presenta un área inundada, a la cota de vertimiento, de aproximadamente 1.214 ha, y represa, a esa cota, un volumen de agua

estimado en 236 mm³ con tiempos de retención hidráulicos de 77 días en promedio. Sobre la superficie, los anchos máximos del espejo de agua no superan los 900 m y pueden fluctuar en promedio entre los 300 m y 320 m, aproximadamente. Las profundidades máximas, que pueden alcanzar los 48 m, se encuentran en varias áreas de la presa y en el centro de confluencia de los dos principales tributarios que surten el sistema: Río Grande y Río Chico. Estos dos ríos, condicionados por regímenes de precipitación que varían entre 1900 y 2100 mm al año, pueden llegar a aportar, en promedio, alrededor de 15 a 25 m³ s⁻¹, a partir de un área drenada de aproximadamente 1.050 km². El sistema está globalmente condicionado por un régimen bimodal marcado por precipitaciones moderadas entre los meses de marzo, abril y mayo; y por precipitaciones fuertes durante los meses de septiembre y octubre. El período de sequía más importante tiene lugar hacia finales de diciembre e inicios de febrero.

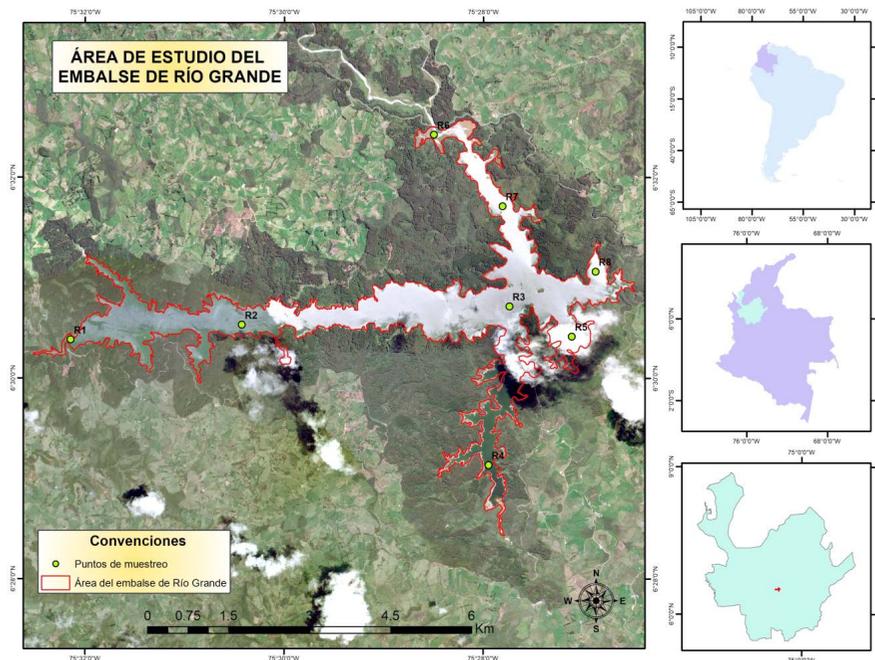


Figura 1. Ubicación del embalse de Riogrande II en Antioquia, Colombia y ubicación de los puntos de control para muestreos.

Fuente: Autores

Descripción de los datos de campo existentes para RGII

Entre marzo 2012 y febrero 2014, se realizaron 14 trabajos de campo. Estas comisiones científicas tuvieron como objetivo general tomar muestras en los diferentes puntos de control (Figura 1) para el seguimiento de la calidad del agua en términos de parámetros fisicoquímicos superficiales como pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad; concentraciones de gases en la columna de agua; medición de flujos difusivos desde la superficie del lago a la atmósfera; y medición de flujos de ebullición. Con respecto a lo anterior, se usó en forma permanente una estación meteorológica portátil que registró durante todo este periodo, con intervalos de 30 minutos entre un registro y otro, las siguientes variables: temperatura máxima y mínima, precipitación, evapotranspiración, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, velocidad y dirección del viento.

Estimación de flujos difusivos de CO₂

En el marco de este estudio se consideran dos fuentes de información con relación a los flujos difusivos de CO₂ en el embalse de Riogrande II: i) Los flujos que ya se midieron en campo durante el proyecto GEITRO (2012) y, ii) Los flujos que se estimarán mediante la utilización conjunta de los modelos desarrollados en esta investigación e imágenes satelitales. Para el segundo caso, es necesario considerar que, el total de las emisiones de un gas (g) que tienen lugar desde el espejo de agua hacia la atmósfera son dependientes de: i) la variación de velocidades de transferencia del gas en dicha interface a una temperatura superficial del agua dada y, ii) la diferencia entre la concentración del gas en el agua y su concentración de equilibrio con la atmósfera según la ecuación 1:

$$F(\text{CO}_2) = k_{g,T} \Delta C \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde F (CO₂) es el flujo difusivo de CO₂, k_{g,T} es la velocidad de transferencia del gas para un gas (g) particular a una temperatura (T) dada, y ΔC es el gradiente de concentración de CO₂ expresado como la diferencia entre la concentración en el agua (C_w) y la concentración de equilibrio entre el agua y la atmósfera (C_{eq}).

Cuando k_{g,T} es conocido para un gas a una temperatura T1 (K_{g1,T1}), es posible calcular un valor diferente de k_{g,T} a una temperatura T2 (K_{g2,T2}) gracias a la relación entre los números de Schmidt (Sc) (Jähne, 1987):

$$\frac{k_{g1T1}}{k_{g2T2}} = \left[\frac{Sc_{g1T1}}{Sc_{g2T2}} \right]^n \quad (\text{ecuación 2})$$

El exponente n de la Ecuación 2 varía de 1 a -0,67 según el proceso dominante del fenómeno de la difusión (Jähne, 1987). El número de Schmidt (Sc) es calculado para el CO₂ con la Ecuación propuesta por Wanninkhof (1992):

$$Sc_{CO_2} = 1911.1 - 118.11T + 3.4527T^2 - 0.04132T^3 \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde T es la temperatura superficial del agua en °C.

Jähne (1987) proponen una solución para la Ecuación 2 en función a la Ecuación 3:

$$K_{g,T} = k_{600} \left(\frac{600}{Sc_T} \right)^{-n} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde k₆₀₀ es la velocidad de transferencia del gas normalizada por el número de Schmidt de 600 (Sc = 600, para CO₂ a 20°C), y sobre la superficie de un lago n puede asumirse como 0,66 para velocidades de viento inferiores a 3,5 m.s⁻¹, o 0,5 para velocidades superiores a ese valor (Guérin et al., 2007).

Modelación de concentraciones superficiales de CO₂

Ha quedado establecido que los flujos difusivos de un gas dependen tanto de la concentración superficial de dicho gas, como del coeficiente de velocidad de transferencia del mismo (ver Ecuación 1). Para el primer caso, si bien para este estudio se podrían usar las concentraciones superficiales de CO₂ medidas en campo en el proyecto GEITRO (2012), la aproximación que se tiene en cuenta en esta investigación ha considerado la posibilidad de desarrollar un modelo capaz de establecer una relación entre dichas concentraciones y las temperaturas superficiales del agua. En efecto, las concentraciones de CO₂ en el agua tienen ocurrencia en función a la temperatura, las presiones parciales del gas, la alcalinidad y la salinidad del medio. En cuerpos de agua continentales con pequeños cambios en alcalinidad y salinidad (lo cual ocurre en la mayoría de los casos), la variación de concentraciones de CO₂ están, por ende, principalmente gobernadas en estos casos por los cambios en la temperatura y las presiones del gas en agua. Para el caso de los océanos, existen modelos ampliamente documentados en los que se correlacionan las presiones parciales (pCO₂) o concentraciones superficiales del gas, con las temperaturas superficiales. Entre los más utilizados está el modelo propuesto por Stephens et al, (1995); sin embargo, se estima que no existe evidencia de modelos reportados para el caso de ecosistemas acuáticos continentales.

La aproximación propuesta en este estudio consiste entonces en el uso de los datos de campo relacionados con la medición de concentraciones superficiales y temperaturas superficiales (GEITRO, 2012). El objetivo es ajustar entre ambas variables una relación matemática que permita estimar dichas concentraciones a partir de valores conocidos de temperatura superficial del agua. Esta temperatura, para efectos

de esta investigación, sería obtenida a partir de imágenes satelitales tal como se describirá más adelante.

Modelación de Coeficientes de Velocidad de Transferencia (K₆₀₀) en ecosistemas acuáticos continentales

Siguiendo la misma lógica para la solución de la Ecuación 1, se ha establecido que, para la estimación de los flujos difusivos de un gas se requiere también conocer la velocidad de transferencia del mismo (k_{g,T}). Igualmente que el caso anterior, si bien podría usarse para este estudio las velocidades de transferencia CO₂ estimadas a partir de datos de campo por el proyecto GEITRO (2012), esta investigación ha considerado la posibilidad de desarrollar un modelo adicional que conlleve a deducir, para el caso de Riogrande II, un modelo ajustado entre tales valores de velocidad de transferencia y la velocidad del viento.

Para los lagos y embalses, el coeficiente de velocidad de transferencia de un gas (k en la Ecuación 1) ha sido altamente documentado y parametrizado como una función de la velocidad del viento y normalizado usando el número de Schmidt de 600 (K₆₀₀) (Cole y Caraco, 1998; Crusius y Wanninkhof, 2003).

Li, (2018) sintetiza cinco de los modelos más confiables para la estimación de K600 (ecuaciones 5-9):

$$\text{Cole y Caraco (1998): } K_{600} = 2.07 + 0.215 U_{10}^{1.7} \quad (\text{ecuación 5})$$

Esta relación es precisa para velocidades de viento tomadas a 10 metros de altura (U₁₀) y cuya magnitud no supera los 3.7 m.s⁻¹.

$$\text{Borges et al. (2004): } K_{600} = 4.045 + 2.580 U_{10} \quad (\text{ecuación 6})$$

Esta relación está ajustada para velocidades del viento U₁₀ superiores a 2 m.s⁻¹.

Raymond and Cole (2001): $K_{600} = 2.06e^{(0.37U_{10})}$
(ecuación 7)

La cual no presenta restricciones para límites de velocidad del viento.

McGillis et al. (2001): $K_{600} = 3.3 + 0.026 U_{10}^3$
(ecuación 8)

Igualmente, sin restricciones para límites de velocidad del viento.

Guérin et al. (2007): $K_{600} = 1.76 + 0.23 U_{10}^{1.78}$
(ecuación 9)

Sin restricción para velocidad del viento.

Para cada una de estas relaciones, K₆₀₀ (cm.h⁻¹) es la velocidad de transferencia ajustada al número de Schmidt de 600 para el CO₂ a 20°C. U₁₀ (m.s⁻¹) es la velocidad del viento ocurrida a 10 m por encima del espejo de agua.

Conociendo entonces los valores de K₆₀₀ a una velocidad del viento (U₁₀), por medio de cualquiera de los modelos antes descritos, es posible deducir los valores de velocidad de transferencia del CO₂ (kg,T) para estimar los flujos difusivos del gas (F(CO₂)) según lo dispuesto en la Ecuación 1.

MODIS Terra para estimación de temperaturas superficiales sobre RGII

Se escogieron los productos MODIS Terra, generados por la misión espacial MODIS, para el objeto de este estudio, teniendo en cuenta exclusivamente la disponibilidad de imágenes sobre el embalse de RGII para las mismas fechas en que existen las mediciones de campo descritas anteriormente. MODIS Terra observa la totalidad de la cobertura

terrestre cada 1 a 2 días con adquisición de datos en 36 bandas espectrales diferentes. Sus órbitas están ubicadas a 705 km de altura y proveen una resolución espacial de 1000 m para las bandas que registran la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST por sus siglas del inglés Land Surface Temperature) (Fisher, 2013).

Wan (2013) propone la estimación de la LST como la muestra la Ecuación 10:

$$LTS = C + \left(A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} - T_{32}}{2}$$

(ecuación 10)

Donde: T31 y T32 son las bandas 31 y 32 de MODIS; ε son el promedio de la emisividad de la superficie de las bandas 31 y 32 de MODIS, C, A₁, A₂, A₃, B₁ y B₃ son coeficientes de regresión (Wang, Liang y Meyers, 2008).

El procedimiento específico consistió en descargar las imágenes disponibles para las fechas de interés, es decir, las mismas fechas en las cuales se realizaron los trabajos de campo sobre el embalse de RGII dentro del marco del proyecto GEITRO (2012). La descarga se realizó del portal web de la NASA, llamado Centro de Archivos Activos Distribuidos de Nivel-1 y Atmósfera (LAADS-DAAC). A través de esta plataforma, se buscaron, seleccionaron y ubicaron las fechas necesarias para su posterior descarga y tratamiento (NASA, 2018), asegurándose de acceder a los productos de Temperatura y Emisividad de la Superficie Terrestre (Wan, 2013).

Después de la preselección y descarga de los productos, se proyectaron las imágenes al sistema de coordenadas UTM zona 18N con Datum WGS 1984, usando la herramienta MODIS Reprojection Tools (MTR) de acuerdo con Dwyer & Schmidt (2006).

Los valores de las temperaturas superficiales o LST de las imágenes seleccionadas, inicialmente en escala absoluta de Kelvin, fueron convertidas a escala relativa en grados Celsius empleando la siguiente relación:

$$T(^{\circ}\text{C})=(\text{DN} \cdot 0.02)-273.1 \quad (\text{ecuación 11})$$

Donde DN es el Número Digital estimado por los algoritmos a bordo del satélite según la Ecuación 1.12, y corresponde a los valores de LST día o noche respectivamente contenidos en las imágenes seleccionadas.

El procedimiento del cálculo se realizó mediante la calculadora de *raster* en el software ArcGIS 10.6. Estas temperaturas se validaron teniendo en cuenta las temperaturas medidas en campo para una misma fecha y posteriormente usadas para la estimación de concentraciones superficiales de CO₂ en el embalse de RGII.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Disponibilidad de información del proyecto GEITRO (2012)

Del proyecto GEITRO (2012), se extrajo el conjunto de mediciones de flujos difusivos y concentraciones de CO₂ realizadas durante los trabajos de campo (12 en total), así como los datos relacionados con las temperaturas superficiales del cuerpo de agua y velocidades del viento actuando sobre el hidrosistema registrados a cada instante de tiempo en que se medían concentraciones y flujos difusivos. El número de trabajos de campo son relacionados por fecha (Tabla 1).

A partir de la medición de los flujos difusivos de CO₂ mediante el método de las cámaras flotantes, la temperatura superficial del agua y las concentraciones superficiales del biogás, el desarrollo del proyecto GEITRO (2012) estuvo en capacidad de deducir los valores de velocidad de transferencia ($K_{g,T}$) y el número de Schmidt (S_{CT}) relacionados en la Ecuación 2 en cada uno de los puntos de control (Figura 1). En consecuencia, se pudo estimar el valor de velocidad de transferencia normalizado a K_{600} , y se pudo determinar la relación con la velocidad local del viento, que se midió en la estación meteorológica instalada en el embalse.

Tabla 1. Fechas de campañas científicas realizadas en el proyecto GEITRO (2012) sobre el embalse de RGII.

Número de campaña	Fecha(d/m/año)	Puntos de control muestreados
1	30/07/2012	R2, R7 y R8
2	16/09/2012	R8
3	31/10/2012	R2, R4
4	01/02/2013	R2, R4, R7
5	27/03/2013	R2 y R8
6	05/06/2013	R4 y R8
7	24/07/2013	R2 y R7
8	20/08/2013	R2
9	18/09/2013	R4, R7 y R8
10	27/11/2013	R4
11	28/01/2014	R8
12	25/02/2014	R4 y R7

Fuente: Proyecto GEITRO, 2012

Modelo para estimación de concentraciones superficiales de CO₂ en RGII

Teniendo en cuenta el conjunto de medidas de campo antes mencionadas, particularmente concentraciones y temperaturas superficiales, fue posible proponer un modelo propio de concentraciones superficiales para el embalse de RGII que relaciona esas dos variables usando el software de Microsoft EXCEL (este fue usado en permanencia para

todo el análisis de los datos que son presentados en adelante).

La Figura 2 presenta la mejor correlación encontrada (R²=0,77; p<0,05) entre el conjunto de datos disponibles. El número total de datos correlacionados (n) fue de 23, lo que corresponde a un 70% del total de datos disponibles dentro de la base de datos descrita en la sección anterior.

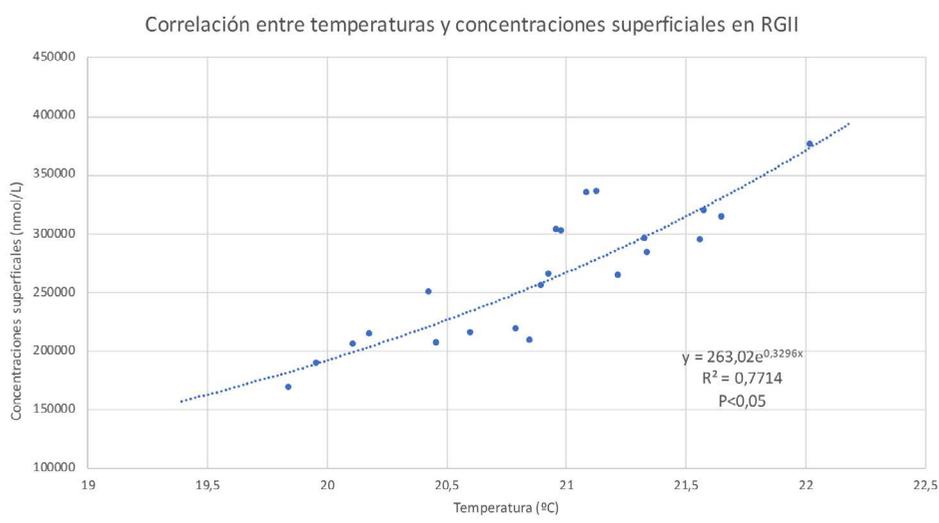


Figura 2. Correlación entre temperaturas superficiales y concentraciones superficiales en el embalse RGII.

Fuente: Autores

La función exponencial encontrada y que será, en consecuencia, usada para modelar en adelante las concentraciones superficiales de CO₂ a partir de temperaturas superficiales medidas en campo, o por cualquier otro método disponible, está dada por la Ecuación 12.

$$C_w = 263,02e^{0,3296 T} \quad (\text{ecuación 12})$$

Donde, C_w es la concentración superficial de CO₂ en el agua expresada en nmol.L⁻¹, y T es la temperatura superficial del agua expresada en °C.

Esta relación fue utilizada entonces para modelar las concentraciones superficiales a partir de temperaturas estimadas por teledetección.

Modelos para estimar K₆₀₀ en RGII

Si bien este estudio pudo haber utilizado directamente los valores de K_{g,T} calculados por el proyecto GEITRO (2012), la intención es la de emplear herramientas que conlleven a disminuir las intervenciones directas en campo. En este sentido, un resultado adicional de esta investigación es estimar los valores de K₆₀₀ a partir de valores conocidos de velocidad del viento, teniendo en cuenta la relación bien documentada que existe entre ambas variables (Li, 2018).

Con el fin de definir el mejor modelo para estimar los valores de K₆₀₀ para el caso de RGII; se ha aplicado cada una de las Ecuaciones 5 a 9, empleando los valores de velocidad de viento

(U10) medidos en campo; y se han comparado los valores estimados por dichos modelos con los valores de K_{600} ya deducidos dentro del marco del proyecto GEITRO (2012).

Los resultados de la aplicación de estos 5 modelos son presentados en la Figura 3. Como se puede observar en esta figura, solo uno de los modelos, el propuesto por Guérin et al. (2007), presenta una correlación que podría considerarse aceptable para poder estimar con la mejor precisión posible los valores de K_{600} ($R^2 = 0,62$; $p < 0,05$). Por el contrario, los resultados obtenidos a partir de los otros

modelos no son satisfactorios. Esto no puede interpretarse como que los modelos sean errados. Indica, simplemente, que ninguno de ellos se ajusta al comportamiento que se observó en torno a K_{600} dentro del embalse RGII durante los años 2012 a 2014 cuando se realizaron los muestreos de campo. En efecto, la mayoría de estos modelos han sido desarrollados para ecosistemas acuáticos en zonas boreales o tropicales de bajas altitudes. En el caso de RGII estamos hablando de un embalse tropical de montaña, y hasta donde se tiene conocimiento ningún modelo ha sido propuesto para este tipo de ecosistema.

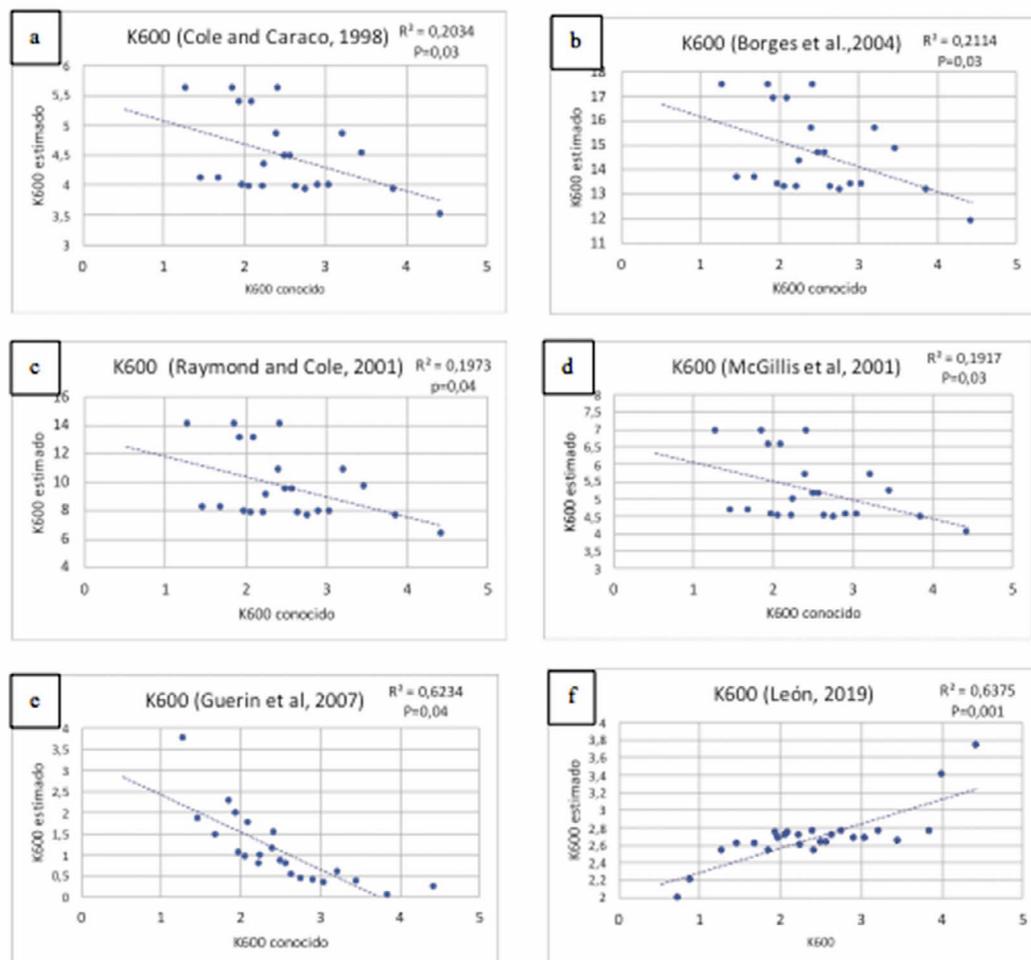


Figura 3. Correlación entre K_{600} calculados con datos de campo y K_{600} estimados con los modelos propuestos: a) Cole y Caraco (1998), b) Borges et al. (2004), c) Raymond and Cole (2001), d) McGillis et al. (2001), e) Guérin et al. (2007) y, f) Modelo propuesto en este estudio.

Fuente: autores.

Gracias a la disponibilidad de datos de campo, resultó posible deducir un modelo propio de K₆₀₀ para el embalse de RGII, al correlacionar las velocidades del viento medidas en campo (y ahora corregidas a U10) con los valores de K₆₀₀ deducidos a partir de los datos mediante la aplicación de las Ecuaciones 1, 3 y 4. La Ecuación 13 corresponde al modelo de deducido para RGII en el marco de este estudio.

$$K_{600} = 0,4054e^{0,342 U_{10}} \quad (\text{ecuación 13})$$

En la Figura 3f se observa la correlación (R²=0,63; p<0,05) de los datos estimados por el modelo y los datos conocidos de K₆₀₀.

Del contexto anterior se puede deducir que, si bien el modelo propuesto por Guérin et al. (2007), particularmente aplicable a embalses tropicales de zonas bajas, presenta una correlación aceptable con el modelo deducido en el marco de este estudio, aunque presenta una

correlación un poco mejor que la del modelo antes mencionado (R²=0,64, p<0,05). Está claro que su aplicabilidad está adaptada a un ecosistema acuático tropical de montaña, específicamente al embalse de RGII. En este sentido, resulta más consecuente el uso de este último modelo para estimar los valores de K₆₀₀ a partir de valores conocidos de U₁₀ en el embalse de RGII.

Temperaturas superficiales estimadas con MODIS Terra

Al final del proceso de selección de imágenes se encontraron 8 productos MODIS Terra de día para las fechas en que hubo mediciones de campo del proyecto GEITRO (2012). Para cada una de esas fechas se dedujeron las temperaturas superficiales sobre los puntos de control R2, R4, R7 y R8 (disponibles con datos de campo de flujos difusivos según los reportados por el Proyecto GEITRO (2012)). La Figura 4 muestra el resultado de este proceso.

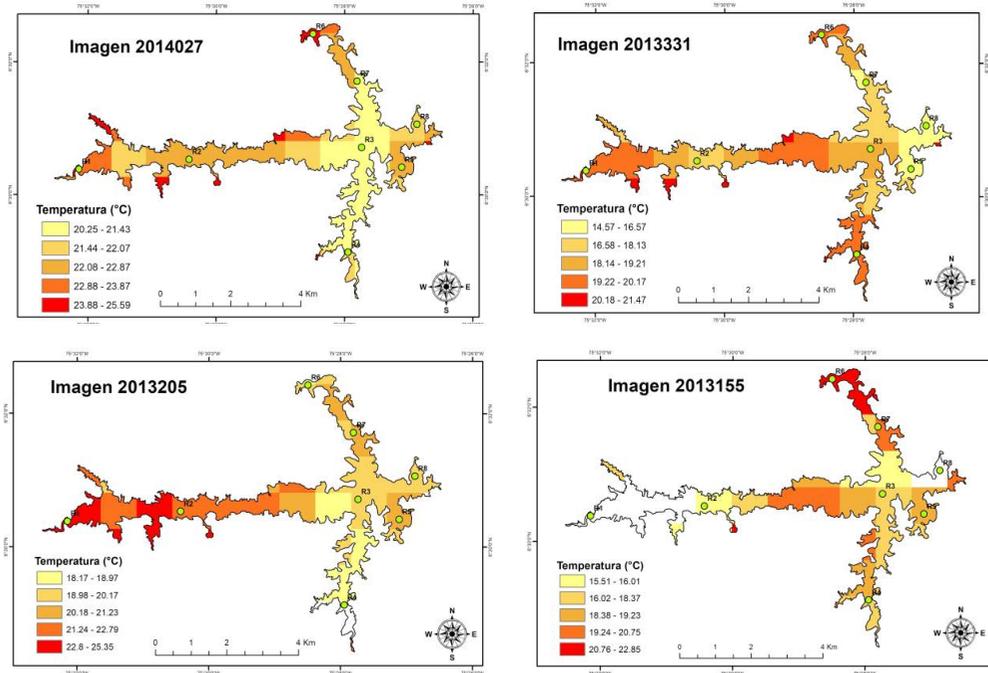


Figura 4. Imágenes del embalse RGII obtenidas de día por el sensor remoto MODIS Terra en diferentes fechas.

Fuente: Autores

Los valores de temperatura deducidos a partir de imágenes MODIS se correlacionaron con los datos de temperatura superficial medidos en campo. La Figura 5 muestra el resultado de dicha correlación. Este resultado ($R^2=0,87$; $p<0,05$), demuestra la buena precisión que presenta el sensor en MODIS Terra para la adquisición de este tipo de información, sobre ecosistemas acuáticos continentales,

particularmente en zonas tropicales de alta montaña, como es el caso de RGII. Estos resultados permiten concluir que los posibles errores sobre la estimación de flujos de CO_2 en el embalse RGII tienen una mayor relación con el uso de los modelos antes descritos, que con la pequeña diferencia entre los datos de temperaturas medidos en campo y estimados por teledetección.

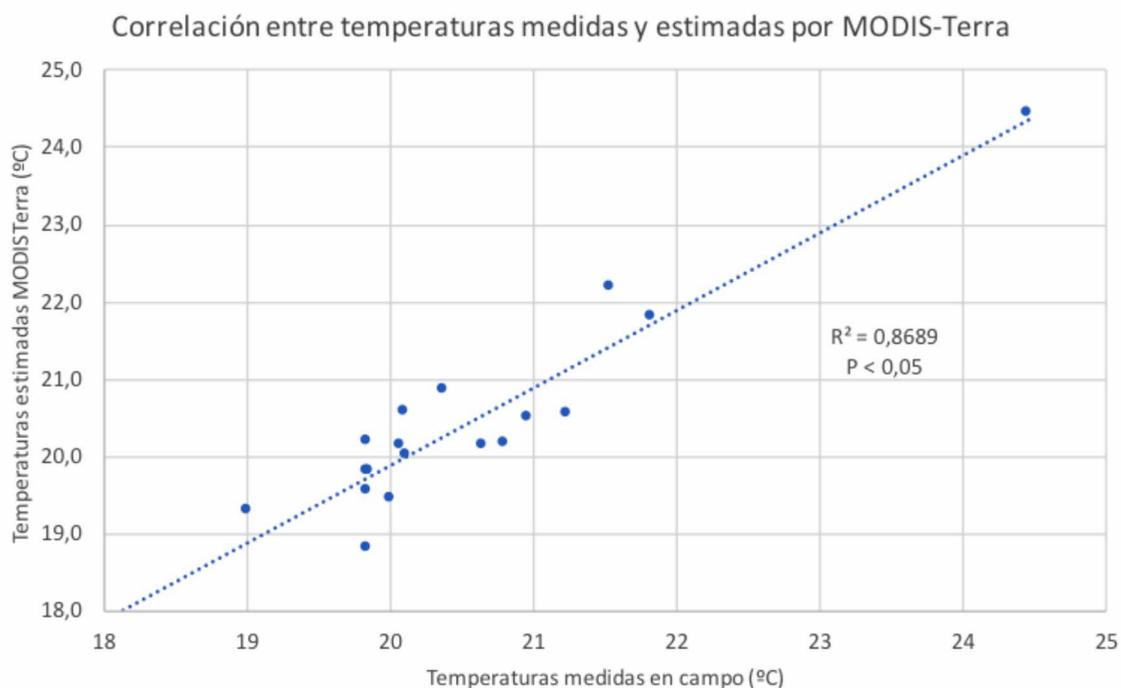


Figura 5. Correlación entre temperaturas medidas en campo por el proyecto GEITRO (2012) y temperaturas estimadas a partir de satélite MODISTerra.

Fuente: Autores.

Validación de los modelos propuestos y estimación de flujos difusivos de CO_2 a partir de temperaturas superficiales con MODIS Terra

Con base en la información de campo y en el análisis de resultados disponibles para el embalse RGII, junto con la aplicación de los modelos ajustados para la estimación de concentraciones superficiales de CO_2 a partir de temperaturas superficiales, y para la

estimación de K_{600} (lo que lleva a encontrar valores ajustados del coeficiente de velocidad de transferencia de este biogás ($k_{g,T}$)), se han estimado los flujos difusivos de CO_2 ($F(CO_2)$) sobre el embalse a dos niveles diferentes: i) estimación de flujos con el propósito de validar los modelos propuestos; y, ii) estimación de los flujos empleando los datos de temperaturas superficiales deducidos a partir de imágenes satelitales del MODIS Terra.

En el primer caso, se llevó a cabo la estimación de flujos difusivos de CO₂ (F(CO₂)) a partir del modelo deducido para concentraciones superficiales en el marco de esta investigación (Ecuación 12), y del modelo propuesto para la estimación de K₆₀₀ (Ecuación 13), con el fin de establecer la correlación y consecuente grado

de error que presentan estos modelos al comparar sus resultados de estimaciones de flujos con relación a los flujos calculados a partir de los datos de campo ampliamente descritos en este documento por el proyecto GEITRO (2012). La Figura 6 muestra la correlación entre ambas variables.

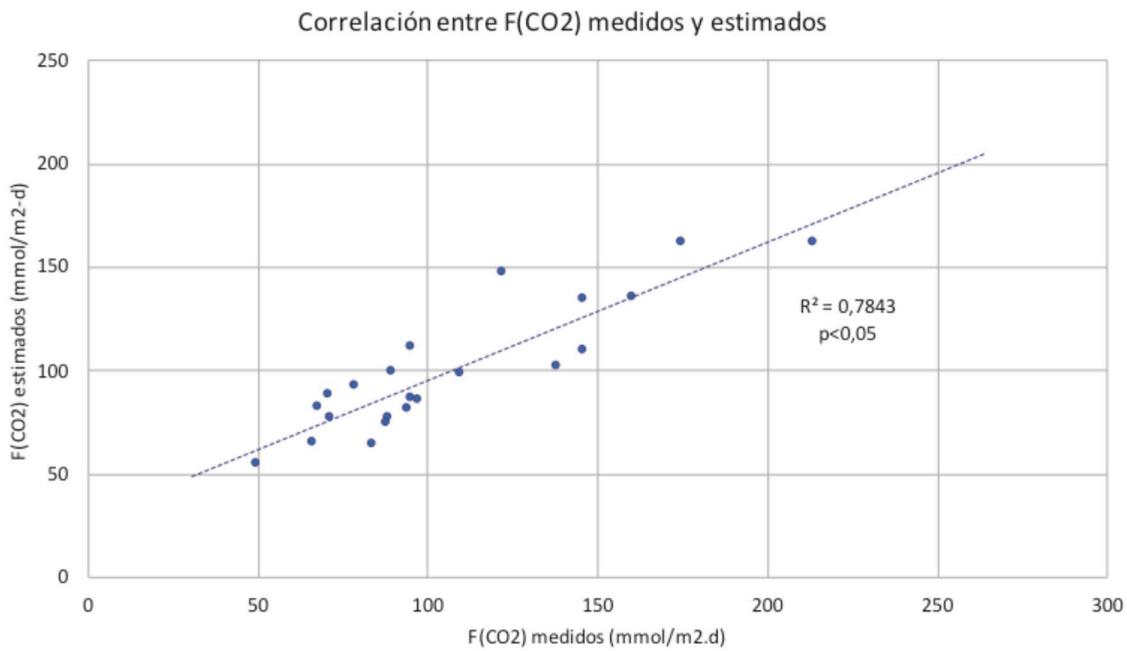


Figura 6. Correlación entre los flujos difusivos (F (CO₂)) medidos en campo y los flujos difusivos (F (CO₂)) estimados a partir de los modelos de las Ecuaciones 12 y 13.

Fuente: autores.

Al observar la Figura 6 se puede concluir que la aplicación de los modelos usados en el marco de esta investigación, han permitido reproducir de manera más que aceptable ($R^2 = 0,78$; $p < 0,05$, y con un error relativo sobre el conjunto de datos de $15 \pm 0,07\%$ en promedio), los flujos difusivos de CO₂ medidos en el embalse de RGII entre los años 2012 y 2014.

Para el segundo caso, los resultados antes presentados ofrecen la confiabilidad necesaria para emplear las temperaturas superficiales medidas por MODIS Terra para la estimación

de los flujos difusivos sobre el embalse. En este caso se aplicó la misma metodología anterior: a partir de los modelos propuestos en las ecuaciones 11 y 12, se estimaron los valores de concentraciones superficiales de CO₂ y K₆₀₀. Estos resultados fueron posteriormente usados en las ecuaciones 4 y 1 para obtener los valores de K_{g,T} y, finalmente F(CO₂), respectivamente. La Figura 7 muestra el resultado de la correlación obtenida después este proceso.

De la Figura 7 se puede concluir que, si bien la correlación encontrada ($R^2 = 0,71$; $p < 0,05$)

entre los flujos estimados a partir de los modelos propuestos, los cuales hacen uso de las temperaturas superficiales obtenidas con datos del satélite MODIS Terra, esta es inferior a la correlación encontrada en el proceso de validación de dicho modelo (Figura 6); estos resultados siguen siendo bastante aceptables. El uso de las temperaturas superficiales

observadas por MODIS Terra usadas en la Ecuación 3 para la estimación del número de Schmidt, posteriormente K_{600} y finalmente $K_{g,T}$; puede ser aceptado para la estimación de $F(\text{CO}_2)$ a partir de la diferencia de concentraciones superficiales de CO_2 y las concentraciones del gas al equilibrio con la atmósfera, junto con el $K_{g,T}$ según la ecuación 1.

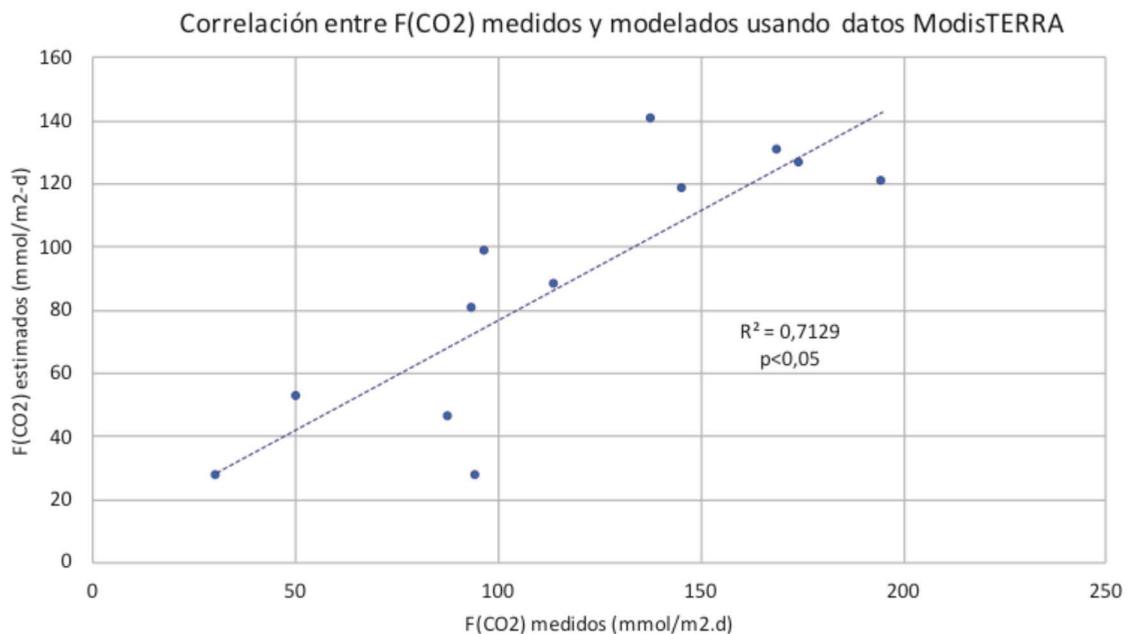


Figura 7. Correlación entre los flujos difusivos ($F(\text{CO}_2)$) medidos en campo y los flujos difusivos ($F(\text{CO}_2)$) estimados a partir de los modelos de las Ecuaciones 3.1 y 3.2 donde las temperaturas superficiales corresponden a las observadas por el Satélite MODIS-Terra.

Fuente: autores.

4. CONCLUSIONES

En la actualidad, no se conocen en su totalidad los aportes de emisiones de CO_2 en embalses tropicales; sin embargo, diversos estudios (Guérin y Abril, 2007; Guérin et al., 2008, entre otros) sugieren que los embalses pueden contribuir en un 4% de las emisiones globales de origen antrópico de CO_2 , magnitud que no es despreciable y que amerita una cuantificación más precisa para, así mismo, ajustar mejor los balances globales de carbono propuestos por el mismo IPCC.

El IPCC (2011), junto con otra serie de estudios, tales como Raymond et al. (2013) y Werhli, B (2013), sostienen que existen muy pocas mediciones en regiones tropicales, no solo a nivel de embalses, sino a nivel de ecosistemas acuáticos en general y que, por el momento, la poca información disponible resulta insuficiente para determinar alguna conclusión relacionada con los aportes de emisiones de GEI a partir de dichas regiones. Si bien hasta el momento han existido importantes esfuerzos con el

fin de aportar conocimiento en dicho dominio, los cuales están representados en los estudios como los desarrollados por Guérin y Abril (2007) y Guérin et al., (2007) sobre el embalse de Petit-Saut en Guyana francesa, Kemenes et al., 2007; Kemenes et al., 2011 en la represa de Balbina en Brasil, Chanudet et al., (2011) en los embalses de Nam Ngum y Nam Leuk, Fearnside (2016); Fearnside (2009) y Demarty y Bastien (2011) en diferentes embalses tropicales, que son alternativas necesarias, aunque insuficientes, para determinar con precisión la contribución de emisiones de GEI de embalses en el trópico. Los elevados costos ligados al desarrollo de trabajos de campo periódicos, compra y mantenimiento de equipos de medición, tomas y análisis de muestras, entre otros, dificultan la ejecución el desarrollo de esta labor. En este sentido, se hace inminente el desarrollo de modelos que permitan estimar de forma acertada el conjunto de emisiones de estos ecosistemas a partir de información que sea accesible por medio de sensores remotos (estaciones de medición en tiempo real, teledetección, etc.).

En este sentido, este estudio tuvo como objetivo fundamental aplicar el uso de imágenes satelitales en diferentes modelos para reconstituir flujos difusivos de CO₂ medidos en campo sobre el embalse de Riogrande II (RGII) y poder así concluir sobre la viabilidad del uso de este tipo de tecnologías en la estimación de tales emisiones de este biogás en ecosistemas acuático tropicales.

Como resultado de esta investigación, se ha propuesto un modelo para estimar concentraciones superficiales de CO₂ aprovechando la relación que existe entre este parámetro y la variación de las temperaturas superficiales del agua. A nuestro conocimiento, esta sería la primera vez que se reporta un modelo de estas características para un ecosistema acuático tropical de alta montaña. Asimismo, se ha logrado evaluar diferentes modelos reportados

en la literatura y proponer un modelo propio para la estimación del coeficiente de velocidad de transferencia normalizado sobre número de Schmidt de 600 (K₆₀₀), lo que conlleva estimar, de manera consecuente, los coeficientes de velocidad de transferencia (k_{g,T}) para el CO₂ en el embalse de RGII. El hecho de proponer un modelo propio para estimar K₆₀₀ a partir de su relación ampliamente documentada con valores de velocidad del viento (U₁₀), surge de la baja precisión que tuvieron dichos modelos al intentar representar los valores de K₆₀₀ medidos en campo. Dicho modelo, presentado en la Ecuación 12, presentó una correlación ligeramente superior a la propuesta por Guérin et al. (2007) (R²=0,64), por lo que se ha aceptado como una solución más ajustada para la modelación del comportamiento del sistema de RGII.

Estando en capacidad de estimar concentraciones superficiales de CO₂, concentraciones al equilibrio con la atmósfera y el cuerpo de agua, así como los coeficiente de velocidad de transferencia del CO₂ (k_{g,T}), fue posible modelar los flujos difusivos del biogás (F(CO₂)) según la Ecuación 1, para las fechas en que dichos flujos fueron medidos por el proyecto GEITRO (2012), lo que ha permitido establecer, en consecuencia, el dominio de validez de los dos modelos desarrollados en el marco de esta investigación y que vienen de ser discutidos. Los resultados presentados permiten concluir que los modelos propuestos logran reproducir de manera más que aceptable (R² =0,78, con un error relativo sobre el conjunto de datos de 15 ± 0,07% en promedio), los flujos difusivos de CO₂ medidos en el embalse de RGII entre los años 2012 y 2014.

Teniendo en cuenta los resultados antes expuestos, fue posible emplear las temperaturas superficiales medidas por MODIS Terra para la estimación de los flujos difusivos de CO₂ sobre el embalse. Los resultados fueron satisfactorios en la medida en que la correlación

obtenida después este proceso entre los flujos estimados a partir de los modelos propuestos, los cuales hacen uso de las temperaturas superficiales obtenidas a partir de satélite MODIS-Terra fue de $R^2=0,71$. Si bien esta correlación resultó inferior a la correlación encontrada en el proceso de validación de los modelos, estos resultados siguen siendo aceptables.

Se ha logrado demostrar que, de forma global, el uso de las temperaturas superficiales observadas por MODIS-Terra para la estimación del número de Schmidt, a partir del cual es posible estimar los valores de K_{600} usando el modelo desarrollado en el marco de este estudio, para finalmente calcular valores de $k_{9,T}$; así como el uso de esas mismas temperaturas para la estimación de concentraciones superficiales de CO_2 mediante la aplicación del modelo propuesto en esta investigación, puede ser aceptado para la estimación de flujos difusivos de este biogás ($F(CO_2)$). Queda entendido que los valores de velocidad del viento (U_{10}) utilizados en el marco de esta investigación y necesarios para la estimación de K_{600} , fueron aquellos medidos en campo por la estación meteorológica dispuesta por el proyecto GEITRO. Sin embargo, dependiendo del lugar de la zona de estudio, estos valores de velocidad del viento pueden ser medidos por otros tipos de medio remotos como AEOLUS (ESA, 2018) o por estaciones de las redes meteorológicas nacionales o locales, con lo cual, se reduciría la necesidad de medir esta variable en campo. No fue objeto de esta investigación el evaluar otras fuentes de información que aporten velocidades de viento. El asunto queda entonces planteado como expectativa para otras investigaciones relacionadas.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer autor: Dirección de la investigación, redacción, edición y revisión del artículo. **Segundo autor:** análisis de datos y generación de información en general.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira por disponer los recursos económicos y logísticos para la realización de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Borges, A.V., Vanderborght, J.P., Schiettecatte, L.S., Gazeau, F., Ferron-Smith, S., Delille, B., Frankignoulle, M., (2004). Variability of the gas transfer velocity of CO_2 in a macrotidal estuary (the Scheldt). *Estuaries* 27, 593–603.
- Chanudet, V., S. Descloux, A. Harby, H. Sundt, B. H. Hansen, O. Brakstad, D. Serca and F. Guerin. (2011). Gross CO_2 and CH_4 emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR. *Science of the Total Environment*, 409, 5382–5391. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.018>
- Cole, J.J., Caraco, N.F., (1998). Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF_6 . *Limnology and Oceanography*, 43, 647–656.
- Crusius, J., Wanninkhof, R., (2003). Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Limnol. Oceanography*, 48, 1010–1017. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1010>
- Demarty, M. y Bastien. (2011). Annual follow-up of gross diffusive carbon dioxide and methane emissions from a boreal reservoir and two nearby lake in Quebec, Canada. *Biogeosciences*, 8, 41–53. <https://doi.org/10.5194/bg-8-41-2011>
- Dwyer, J., y Schmidt, G. (2006). The MODIS Reprojection Tool. In J. J. Qu, W. Gao, M. Kafatos, R. E. Murphy, & V. V. Salomonson (Eds.), *Earth Science Satellite Remote Sensing: Vol. 2: Data, Computational Processing, and Tools* (pp. 162–177). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37294-3_9
- Fearnside, P. (2016). Greenhouse gas emissions from Brazil's Amazonian hydroelectric dams. *Environmental Research Letters*, 11, 011002.
- Fearnside, P. (2009). As Hidrelétricas de Belo Monte e Altamira (Babaquara) como Fontes de Gases de Efeito Estufa. *Novos Cadernos NAEA*, 12(2), 5–56. <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v12i2.315>

- Fisher, G. H. (2013). *Science writers' guide to TERRA*. NASA Technical Reports Server (NTRS). Retrieved from http://terra.nasa.gov/Publications/terra_sw_guide.pdf
- GEITRO (2012). Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Embalses Tropicales: Caso de Riogrande II en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Guérin, F. y Abril, G. (2007). Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 112 (G3), 14. <https://doi.org/10.1029/2006JG000393>
- Guérin, F., Abril, G., Serça, D., Delon, C., Richard, S., Delmas, R., Tremblay, A., and Varfalvy, L., (2007). Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream. *Journal of Marine Systems*, 66, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.03.019>
- Guérin, F., G. Abril, A. de Junet and M.-P. Bonnet. (2008). Anaerobic decomposition of tropical soils and plant material: Implication for the CO₂ and CH₄ budget of the Petit Saut Reservoir, *Applied Geochemistry*, 23(8), 2272-2283. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.04.001>
- IPCC (2011). *Hydropower Chapter, Special Report on Renewable Energy Sources*.
- Jähne, B. M. (1987). On parameters influencing air-water exchange. *Journal of Geophysical Rese*, 92(C2). <https://doi.org/10.1029/JC092iC02p01937>
- Kemenes, A., Forsberg, B. R., and Melack, J. M., (2007). Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophysical Research Letters*, 34, L12809. <https://doi.org/10.1029/2007GL029479>
- Kemenes, A., Forsberg, B.R., Melack, J.M., (2011). CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Journal of Geophysical Research* 116, G3. <https://doi.org/10.1029/2010JG001465>
- Li, S. (2018). CO₂ oversaturation and degassing using chambers and a new gas transfer velocity model from the Gorges Reservoir surface. *Science of the Total Environment*, 640-641, 908-920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.345>
- McGillis, W.R., Edson, J.B., Hare, J.E., Fairall, C.W., 2001. Direct covariance air-sea CO₂ fluxes. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 106, 16729-16745. <https://doi.org/10.1029/2000JC000506>
- Raymond, P., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., ... Guth, P. (2013). Global Carbon Dioxide Emissions From Inland Waters. *Nature*, 503(7476), 355-359. <https://doi.org/10.1038/nature12760>
- Raymond, P.A., Cole, J.J. (2001). Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity. *Estuaries*, 24(2), 312-317. <https://doi.org/10.2307/1352954>
- Stephens, M. P., Samuels, G., Olson, D. B., Fine, R. A., Takahashi, T. . (1995). Sea-air flux of CO₂ in the North Pacific using shipboard and satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 100(C7), 13,583. <https://doi.org/10.1029/95JC00901>
- Wan, Z. (2013). Collection-6 MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide. Santa Barbara: ERI, University of California.
- Wang, W., Liang, S., & Meyers, T. (2008). Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 623-635. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.024>
- Wanninkhof, R. (1992). Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97, 7373-7382. <https://doi.org/10.1029/92JC00188>
- Werhli, B. (2013). Conduits of the carbon cycle. *Nature*, 503, 346-347. <https://doi.org/10.1038/503346a>

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

**Licencia de Creative Commons**

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.