

**DESARROLLO DE UN MODELO ESTADÍSTICO
PARA LA CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS
Y LA EMISIÓN GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL PRELLENADO
Y DURANTE EL LLENADO DE UN EMBALSE TROPICAL**

MSc en Ingeniería **Ingry Natalia Gómez**

PhD en Ingeniería Ambiental **Diana C. Rodríguez**

PhD en Química Ambiental **Gustavo A. Peñuela**.

Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Universidad de Antioquia (UdeA), Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia.

Autor de correspondencia: Ingry Natalia Gómez, Universidad de Antioquia (UdeA), Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia.

ingry.gomez@udea.edu.co

Resumen

La construcción de embalses para la generación de energía eléctrica ha generado efectos en los ecosistemas y en su área de influencia, pero en los últimos años se ha empezado a evaluar el impacto que generan en las emisiones de gases de efecto invernadero. En este trabajo se realizó la determinación de gases de efecto invernadero durante las etapas de pre-llenado (tributarios del embalse) y llenado del embalse Topocoro en el departamento de Santander (Colombia). Los resultados fueron correlacionados estadísticamente con las variables fisicoquímicas monitoreadas. Se encontró que para el pre-llenado el modelo estadístico de generación de CO₂ estuvo influenciado por la estación y el muestreo, es decir, que la alta variabilidad en los diferentes tributarios tuvo incidencia sobre este parámetro. Para el caso del llenado, el modelo que definió la generación de CO₂ estuvo relacionado con las variables de sólidos y productividad del embalse (alcalinidad, nitratos y clorofila-a), y éstas a su vez estuvieron relacionadas con la materia orgánica disuelta. Los modelos estadísticos tuvieron un ajuste del 43% y 60% para el pre-llenado y el llenado, respectivamente.

Palabras clave: correlación* dióxido de carbono* embalse* métodos estadísticos.

1. Introducción

La inundación de grandes áreas de tierra para la construcción de embalses, ha ocasionado alteraciones en el balance natural del carbono (Huttunen et al., 2002), dando lugar a la formación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) por la descomposición de la materia orgánica. Esto ha puesto sobre la mesa una importante discusión acerca de las emisiones de GEI en los embalses (de Faria et al., 2015; Delmas et al., 2001; Fearnside, 1995, 2004, 2015^a, 2015^b, 2015^c, 2016; Galeotti and Lanza, 1999; Galy-Lacaux et al.,

1999; Gunkel, 2009; Rosa et al., 2004, 2006; St. Louis et al., 2000; Tremblay et al., 2011).

En este estudio se realizó la determinación solo de los flujos de CO₂, y no del CH₄ ya que antes del llenado y durante el llenado en el embalse Topocoro no se apreció producción de metano y se estudiaron la asociación de estos flujos con las características físicas y químicas del agua del embalse. Se pretende determinar si existen diferencias en las emisiones y las relaciones entre las variables medidas, en estos períodos de tiempo.

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del área de estudio

La hidroeléctrica Hidrosogamoso y su embalse Topocoro se muestran en la Figura 1, donde se encuentran ubicadas las estaciones durante el prellenado y el llenado el embalse. Para el prellenado se realizaron 5 muestreos y durante el llenado 3 muestreos.

Los análisis fueron realizados en el laboratorio del grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) de la Universidad de Antioquia, acreditado para el análisis de aguas por el IDEAM que pertenece al Ministerio de Ambiente de Colombia bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025 (Resolución 1665 del 12 de julio de 2011). Los parámetros medidos, las abreviaturas usadas, las unidades y los métodos de referencia se muestran en la Tabla 1.

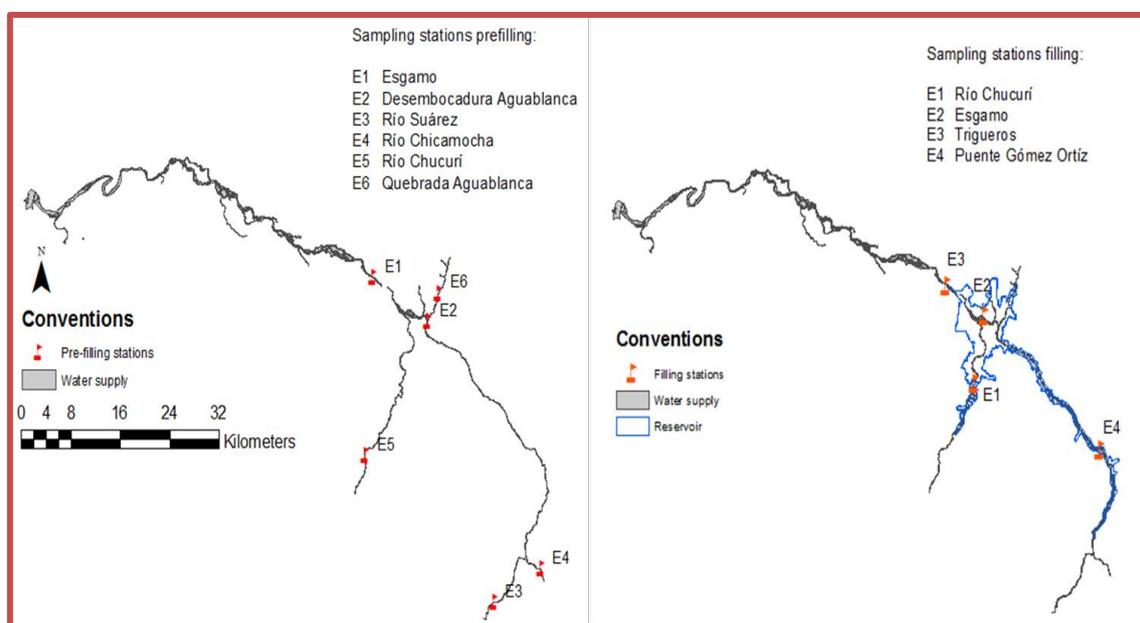


Figura 1. Localización del embalse Topocoro y de las estaciones de muestreo

2.2 Análisis estadístico

Parámetros	Abreviación	Unidades	Método de referencia
Alcalinidad total	Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	SM 2320 B; Ed. 2012
Fósforo total	Total_P	mg P/L	SM 4500 P E; Ed. 2012
Sólidos disueltos	DS	mg/L	SM 2540 C; Ed. 2012
Total sólidos suspendidos	TSS	mg/L	SM 2540 D; Ed. 2012
Total sólidos	TS	mg/L	SM 2540 B; Ed. 2012
Carbón orgánico disuelto	DOC	mg C/L	SM 5310 B; Ed. 2012
Carbon orgánico disuelto biodegradable	BDOC	mg C/L	<i>Internal method</i>
Clorofila	Clorofila	mg/L	SM 10200 H; Ed 2012
Demanda bioquímica de oxígeno	BOD ₅	mg O ₂ /L	SM 5210 D; Ed. 2012
Demanda química de oxígeno	COD	mg O ₂ /L	SM 5220 D; Ed. 2012
Nitrógeno amonio	Amonio_N	mg NH ₃ -N/L	SM 4500 NH ₃ B C; Ed. 2012
Total Kjeldahl nitrógeno	TKN	mg N/L	SM 4500 Norg B; Ed. 2012
Nitratos	Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /L	SM 4110 B; Ed. 2012
Dióxido de carbono	CO ₂	mmol CO ₂ /m ² .d	<i>Internal method</i>
Metano	CH ₄	mmol CH ₄ /m ² .d	<i>Internal method</i>
Oxido nitroso	N ₂ O	mmol N ₂ O /m ² .d	<i>Internal method</i>

Tabla 1. Parámetros analizados, unidades y métodos de referencia

Se realizó el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson para conocer las relaciones lineales entre pares de variables; seguidamente se realizó la prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) para probar si los datos siguen una distribución normal. Posteriormente, para las variables fisicoquímicas se estimaron factores subyacentes aplicando el análisis factorial, por el método de máxima

verosimilitud, para reducir la dimensionalidad de los datos (altas correlaciones). Finalmente, tanto antes como durante el llenado, se estimaron modelos que permitieron encontrar la relación entre las variables fisicoquímicas y las emisiones de GEI y ambos modelos se compararon para conocer el efecto que el llenado del embalse tuvo sobre las emisiones. Todos los cálculos matemáticos y estadísticos se llevaron a cabo usando *Microsoft Office Excel* 2010, *Statgraphics Centurion XVI* y *Stata* 13, la construcción de los mapas se realizó en *ArcMap* 10.2.2.

3. Resultados

3.1 Pre-llenado

La Tabla 2 muestra la matriz de correlaciones para las variables antes del llenado. Se observan fuertes correlaciones entre DOC y BDOC y de igual manera sucede con TS y TSS; las demás correlaciones pueden considerarse no significativas dado su bajo coeficiente, menor que 0,5 o mayor que -0,5.

	DOC	BDOC	TS	TSS	DS	Nitratos	Total_P	Clorofila	Alcalinidad
DOC	1								
BDOC	0,99	1							
TS	-0,07	-0,04	1						
TSS	-0,05	-0,02	0,98	1					
DS	-0,09	-0,10	0,07	-0,12	1				
Nitratos	0,17	0,19	0,07	0,08	0,16	1			
Total_P	-0,10	-0,06	0,33	0,32	-0,04	-0,09	1		
Clorofila	0,20	0,24	0,15	0,22	-0,27	0,27	-0,31	1	
alcalinidad	-0,12	-0,13	-0,02	-0,06	0,17	0,16	0,18	-0,37	1

Tabla 2. Matriz de correlaciones antes del llenado del embalse

Dadas las altas correlaciones se realizó el análisis factorial para estimar las variables latentes que generan los datos (Tablas 3 y 4). Se estimó que existe un solo factor que genera las variables DOC, BDOC, TS y TSS, explicando la materia orgánica y los sólidos presentes en el agua. Este factor agrupa el 100% de la información de las variables originales, como se observa en la tabla 3.

Factor	Variancia	Proporción	Acumulativo
Factor 1	1,98	1,00	100 %

Tabla 3. Análisis factorial para las variables fisicoquímicas correlacionadas en el pre-llenado

Variable	Factor 1
DOC	1
BDOC	0,9862
TS	-0,0658
TSS	-0,0459

Tabla 4. Pesos del Factor en el pre-llenado para las variables fisicoquímicas.

Con este factor y las demás variables, incluyendo Estación y Muestreo, se construyó un modelo que diese cuenta de la relación entre ellas y el CO₂. Se obtuvo un valor p de 0,0831 (menor de 0,1) en el análisis de varianza, lo que indica que existe un modelo que permite relacionar estas variables. En el análisis de significación de las variables, se encontró que los únicos valores de p -menores a 0,05 fueron para las Estación y Muestreo. Estas fueron las únicas que explicaron la variabilidad del CO₂ en esta etapa del estudio, con un ajuste R² del 43%.

El modelo resultante fue:

$$\text{CO}_2 = - 0,532863 * I_1 (1) - 0,592308 * I_1 (2) + 0,831456 * I_1 (3) - 0,0413041 * I_1 (4) - 0,231681 * I_1 (5) + 0,325375 * I_2 (1) - 0,437204 * I_2 (2) + 0,446735 * I_2 (3) + 0,723663 * I_2 (4)$$

donde

I₁ (1) = 1 si ESTACION= Desembocadura Rio Chucuri, -1 si ESTACION=Rio Suárez, 0 en otro caso

I₁(2) = 1 si ESTACION= Esgamo, -1 si ESTACION= Rio Suárez, 0 en otro caso

I₁ (3) = 1 si ESTACION= Quebrada Aguablanca, -1 si ESTACION= Rio Suárez, 0 en otro caso

I₁ (4) = 1 si ESTACION= Rio Chicamocha, -1 si ESTACION=Rio Suárez, 0 en otro caso

I₁ (5) = 1 si ESTACION= Rio Chucuri, -1 si ESTACION=Rio Suárez, 0 en otro caso

I₂ (1) = 1 si MUESTREO= Muestreo 1, -1 si MUESTREO=Muestreo 5, 0 en otro caso

I₂ (2) = 1 si MUESTREO= Muestreo 2, -1 si MUESTREO=Muestreo 5, 0 en otro caso

I₂ (3) = 1 si MUESTREO= Muestreo 3, -1 si MUESTREO=Muestreo 5, 0 en otro caso

I₂ (4) = 1 si MUESTREO= Muestreo 4, -1 si MUESTREO=Muestreo 5, 0 en otro caso

3.2 Llenado

	DOC	BDOC	TS	TSS	DS	Nitratos	Total_P	Clorofila	Alcalinidad
DOC	1								
BDOC	0,63	1							
TS	0,14	-0,17	1						
TSS	0,06	-0,11	0,24	1					
DS	0,13	-0,17	0,99	0,09	1				
Nitratos	0,19	0,01	0,17	0,56	0,08	1			
Total_P	-0,03	-0,16	0,13	0,97	0,01	0,44	1		
Clorofila	0,23	0,19	0,30	-0,28	0,35	-0,51	-0,30	1	
Alcalinidad	-0,06	0,11	-0,28	-0,42	0,22	-0,62	-0,31	0,08	1

Tabla 7. Matriz de correlaciones durante el llenado del embalse

La Tabla 7 presenta la matriz de correlaciones durante el llenado. Comparando las tablas 3 y 7, se observa que las relaciones entre las variables aumentaron durante el llenado con respecto al pre-llenado, además, se mantuvo la relación entre DOC y BDOC. Adicionalmente se encontró una relación directa entre los TS y DS, TSS y nitratos, TSS y Total_P, y las relaciones inversas fueron para clorofila y nitratos, alcalinidad y nitratos.

Factor	Varianza	Proporción	% acumulativo
Factor 1	2,24	0,30	30
Factor 2	1,87	0,25	56
Factor 3	1,78	0,24	79
Factor 4	1,48	0,20	100

Tabla 8. Análisis factorial para las variables correlacionadas durante el llenado.

El análisis factorial que se presenta en las tablas 8 y 9 da cuenta de 4 factores que generan las 9 variables, acumulando el 100% de la varianza de las variables originales (Tabla 8). La tabla 9 presenta los pesos de los factores en cada variable. El factor 1 genera a TS y DS, debido a que los DS son la mayor proporción de los TS. El factor 2 genera nitratos, clorofila y alcalinidad, porque la alcalinidad está determinada por la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en el agua, sin embargo, existe una pequeña proporción de algunas sales de ácidos débiles como por ejemplo los nitratos que aportan en menor cantidad a la alcalinidad. Por otro lado, la alcalinidad, es un parámetro particularmente importante cuando existe una gran actividad fotosintética de algas en los embalses ya que no sólo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que también desempeña un importante papel dentro de la productividad de cuerpos de agua naturales, y sirve como una fuente de reserva para la fotosíntesis. El factor 3 genera a DOC y BDOC y el Factor 4 a TSS y Total_P.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
DOC	0,09	-0,02	0,85	-0,03
BDOC	-0,07	0,16	0,88	0,07
TS	0,94	-0,25	0,11	0,19
TSS	0,45	-0,42	0,46	0,58
DS	0,99	0,09	-0,07	0,09
Nitratos	0,24	-0,76	0,01	0,27
Total_P	0,16	-0,16	-0,01	0,97
Clorofilal	0,16	0,75	0,23	-0,27
Alcalinidad	-0,24	0,65	0,03	-0,05

Tabla 9. Pesos de los factores durante el llenado.

Al igual que con los datos del pre-llenado, se construyó un modelo para dar cuenta de la relación entre las variables factor 1, factor 2, factor 3 y factor 4, Muestreo y Estación con el CO₂. El valor p del análisis de varianza fue de 0,0007 y las variables significativas, después del llenado del embalse, son el Factor 1 y el Factor 2, es decir, que la generación de CO₂ en el embalse está influenciado por los parámetros de sólidos (TS y DS) y los de productividad (nitratos, clorofila y alcalinidad).

La alcalinidad es un parámetro utilizado como indicador de la productividad de embalses, que cuando las concentraciones son altas indican una productividad alta. Esto se debe al hecho de que la disponibilidad del carbono es mayor en embalses alcalinos y también al hecho de que las rocas sedimentarias que contienen carbonatos, a menudo contienen también concentraciones

relativamente altas de nitrógeno y fósforo lo que incrementa la productividad en dichos ecosistemas. Es por esto que si la productividad del embalse es alta, son altas las concentraciones de alcalinidad y por lo tanto, hay más disponibilidad de carbono para los microorganismos lo que da lugar a la generación de mayores cantidades de CO₂. Con un ajuste R² del 60%, el modelo sería: $CO_2 = 1,1094E-8 - 0,412283*Factor1 + 0,66894*Factor2$

Conclusiones

Se encontró un modelo estadístico que permitiría deducir la generación de CO₂ en las etapas del pre-llenado y durante el llenado del embalse Topocoro, donde en el pre-llenado, el modelo estuvo ligeramente influenciado por las variables muestreo y estación, con un ajuste del 43%. Esto indicó una alta variabilidad en los datos, lo cual fue ocasionado por las diferentes fuentes monitoreadas, que contenían concentraciones variables de materia orgánica, sólidos totales y nutrientes, lo que afectó la dinámica microbiana, y por lo tanto, aceleró o disminuyó el proceso de emisión de gases. En cuanto a la etapa durante el llenado, el modelo estuvo influenciado por los sólidos y las variables de productividad, indicando que la disponibilidad de materia orgánica para los microorganismos permite la liberación de mayores cantidades de CO₂. Este modelo tuvo un ajuste mayor (60%) que en el pre-llenado, indicando una mayor correlación con esta variable en comparación con la etapa del pre-llenado.

Referencias bibliográficas

de Faría FAM, Jaramillo P, Sawakuchi HO, Richey JE, Barros N. Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. *Environmental Research Letters* 2015; 10: 1-13.

Delmas R, Galy Lacaux C, Richard S. Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives. *Global Biogeochemical Cycles* 2001; 15: 993–1003.

Fearnside PM. Hydroelectric Dams in the Brazilian Amazon as sources of “greenhouse” gases. *Environmental Conservation* 1995; 22: 7-19.

Fearnside PM. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. an editorial comment. *Climatic change* 2004; 66: 1–8.

Fearnside PM. Hidrelétricas na Amazônia (Vol. 1). 2015a.

Fearnside, PM. Hidrelétricas na Amazônia Vol. 1. (I. N. de P. da A. INPA, Ed.) (Vol.1). Manaus, Brasil, 2015b.

Fearnside PM. Tropical hydropower in the clean development mechanism: Brazil's Santo Antônio Dam as an example of the need for change. *Climatic Change*, 2015c; 131: 575-89.

Fearnside PM. Greenhouse gas emissions from Brazil's Amazonian hydroelectric dams. *Environmental Research Letters*, 2016; 11: 1-3.

Galeotti M, Lanza A. Richer and cleaner? A study on carbon dioxide emissions in developing countries¹. *Energy Policy*. 1999; 27: 565–73.

Galy Lacaux C, Delmas R, Kouadio G, Richard S, Gosse P. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biogeochemical Cycles*. 1999; 13: 503–17.

Gunkel G. Hydropower- a green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas Emissions. *CLEAN – soil, air, water*, 2009; 37: 726–34.

Huttunen J, Väisänen T, Hellsten S, Heikkinen M, Nykänen H, Jungner H., et al. Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002; 16: 1–17.