

ACTIVIDAD METABÓLICA DE LOS SEDIMENTOS EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL DE UN RÍO TROPICAL DE MONTAÑA DURANTE EVENTOS DE SEQUÍA, SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA-COLOMBIA

METABOLIC ACTIVITY OF SEDIMENTS ON ALTITUDINAL GRADIENT IN TROPICAL STREAM MOUNTAIN DURING DROUGHT EVENTS, SIERRA NEVADA OF SANTA MARTA - COLOMBIA

Gilberto Orozco-Berdugo, Javier Rodríguez-Barrios y Rodulfo Ospina Torres

RESUMEN

En el presente estudio, se realizan medidas de la actividad metabólica del sustrato sedimentos (SED) en un gradiente altitudinal de un río tropical de montaña (Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia) con el fin de establecer su relación con variables físico-químicas, hidrológicas e hidroclimáticas a lo largo de la cuenca durante eventos de sequía. Adicionalmente, se realizó un acercamiento al comportamiento de esta actividad durante un ciclo diario de luz y la variación de la relación Producción-Respiración (P/R) a lo largo del día. Las mediciones se realizaron mediante el método de botellas claras y oscuras utilizando como sustrato extracciones de SED, con un tiempo de exposición de dos horas. Para la estimación del área real, se procedió a la obtención de imágenes digitales de alícuotas de SED previamente pesadas, que fueron procesadas en el programa computacional ImageJ 1.40g. En el gradiente altitudinal se encontró que la respiración de la comunidad (RC) fue mayor que la PPB haciendo que la relación Producción Primaria Bruta/Respiración (P/R) sea < 1 . De acuerdo con los resultados obtenidos, la luminosidad es la variable que reviste mayor importancia, ya que esta se asoció con la relación P/R en el tramo alto, y estuvo asociada con la PPB desde la cabecera hasta la parte baja del río. De acuerdo con los resultados se sugiere que para el río Gaira el sustrato SED es fuertemente heterotrófico ($P/R < 1$) a través del gradiente altitudinal, principalmente en el tramo medio de esta cuenca.

PALABRAS CLAVE: Metabolismo, sedimentos, gradiente altitudinal.

ABSTRACT

The metabolic activity of sediments was measured over an altitudinal gradient in a mountain tropical river (Sierra Nevada de Santa Marta - Colombia). It was related along the river basin with climatic and hydrologic parameters during the dry season. Additionally, observations of the metabolic activity and the variation of the P/R ratio during a day were made. Measures were made with a light-dark bottle method and two hours exposition. For the estimation of the real area, images of previously weighted subsamples of sediment were processed with an ImageJ 1.40g computer program. Over the altitudinal gradient we find that community respiration (CR) was higher than the gross primary productivity (GPP), also $P/R < 1$. The light intensity was the most important variable and was related with the P/R ratio on the upper basin and with GPP over the entire gradient. Our results shows that the substrate sediment is strong heterotrophic over the entire basin but mainly on the middle part of the river

KEY WORDS: Metabolism, sediment, elevation gradient.

Dirrección de los autores:

Universidad del Magdalena, Santa Marta-Colombia. A.A. 10004, dirección: Carrera. 4 A No. 30-67 Barrio Manzanares. orozcober@gmail.com. Grupo GIEN. jarodriguezba@gmail.com. Teléfono: 318-286781 (G.O-B; J.R-B) Universidad Nacional de Colombia-Bogotá. A.A. 14490. rospinat@unal.edu.co (R.O.T)



INTRODUCCIÓN

El concepto de que un río es un sistema físico en cadena y en equilibrio dinámico fue primeramente propuesto por Leopold y Maddock (1953), describiendo patrones consistentes y ajustables a las condiciones físicas de un río. A partir de estas consideraciones Vannote et al. (1980) abordan el tema del carácter autotrófico o heterotrófico de los sistemas fluviales como uno de los aspectos centrales en el modelo conceptual del continuo de un río (CCR), donde proponen valores típicos en la relación P/R de acuerdo al orden a que pertenece el río (Gutiérrez, 2006).

A pesar de la importancia de la vegetación riparia y de la heterogeneidad del hábitat en la regulación de la estructura de comunidades bentónicas y en las características bioenergéticas de los ríos (Benke et al., 1988), muy pocos estudios han comparado explícitamente el metabolismo de comunidades bentónicas en los diferentes hábitats de la misma corriente (Whitledge y Rabeni, 2000; Gutiérrez, 2006).

En ríos de regiones templadas, el cambio en el proceso metabólico de las comunidades lólicas depende principalmente de la radiación, temperatura y la concentración de clorofila (Bott et al., 1985); sin embargo, experimentos realizados por Gutiérrez (2006), en un río alto andino de Colombia, y por Elósegui y Pozo (1998), en un río del norte ibérico, sugieren que en los ríos tropicales de montaña de orden menor obedecen en mayor medida a la hidrología y geomorfología de la cuenca

Tradicionalmente, los estudios enfocados a sistemas lólicas hacen referencia a elementos estructurales como los fisicoquímicos del agua o aquellos enfocados al estudio de la estructura de las comunidades presentes en el río. En los últimos años este enfoque ha complementado la aplicación y evaluación de aspectos relacionados con la funcionalidad del sistema lótico, que proporcionan información complementaria y que pueden servir a su vez como insumo para la toma de decisiones sobre el manejo y la conservación del recurso agua, así como en la utilización de estos elementos en el estudio de impactos antrópicos y procesos de

restauración (Mulholland et al., 2001; Hall y Tank, 2003; Young et al., 2008).

Para la medición del metabolismo de las comunidades bentónicas en diferentes sustratos o Unidades Funcionales (UF), una opción es utilizar cámaras de respiración, con las que se evita determinar los efectos de la reaireación. Debido a esto, las cámaras han sido usadas en numerosos estudios de la productividad primaria y metabolismo (McIntire et al., 1964, Hansmann et al., 1971, Bott, 1996, Gutiérrez, 2006). El propósito de esta investigación fue evaluar la actividad metabólica de los sedimentos de un río tropical de montaña, determinar su variabilidad espacial en relación con un gradiente altitudinal y su variación temporal diaria durante eventos de período seco en la Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia.

METODOLOGÍA

Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Gaira se encuentra ubicada en la vertiente nor-occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Sus condiciones físicas corresponden a las de un río tropical de montaña el cual tiene su nacimiento a 2750 m.s.n.m en la cuchilla de San Lorenzo (Figura 1) (Contreras et al., 2000). El área de estudio se extiende desde la cabecera o tramo alto (1650 m.s.n.m) pasando por el tramo medio (900 m.s.n.m) hasta la parte baja o tramo bajo (50 m.s.n.m).

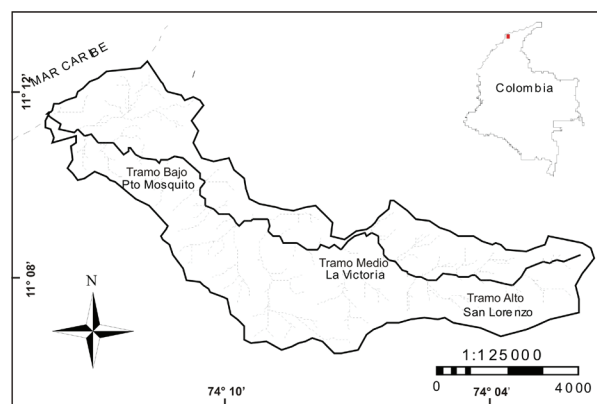


Figura 1. Cuenca hidrográfica del río Gaira, Santa Marta-Colombia. Área de estudio.

La cuenca del río tiene un recorrido de 32.53 km aproximadamente, atravesando diferentes paisajes morfo-climáticos, que le confieren variabilidad de pendientes (entre 45-65 %) originando un cauce con bruscos cambios y gran heterogeneidad (Contreras et al., 2000). El clima en la cuenca esta determinado por la elevación. La escala de pluviosidad está entre los < 50 mm a bajas elevaciones y los < 300 mm en altas elevaciones durante el periodo de sequia (diciembre-marzo) correspondiente a un régimen hidrológico unimodal (Figura 2) (Tamaris-Turizo y López, 2006).

Este estudio fue realizado entre marzo y junio de 2008 durante eventos de baja precipitación. En total, se

realizaron cuatro campañas de muestreo a lo largo de la cuenca. La primera campaña se realizó del 20 al 23 de marzo (M-1), la segunda del 4 al 12 de abril (M-2), la tercera del 27 de mayo al 5 de junio (M-3) y la cuarta del 17 al 20 de junio (M-4) de 2008.

Variables físico-químicas

Las variables físico-químicas incluidas en este estudio fueron medidas en campo y laboratorio a través de diferentes métodos potenciométricos (Sonda Multiparamétrica WTW 350i) y colorimétricos (APHA, 1985) en todos los sitios donde los datos de metabolismo fueron recolectados se presentan en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. Variables, unidades e instrumentos de medida utilizados.

Variable	Unidades	Instrumento de medida/método
Luminosidad	Lux	Luxímetro MLM-1010 MINIPA
Temperatura	°C	WTW Multi 350i/SET
Oxígeno Dislt.	mg O ₂ /L	WTW Multi 350i/SET
Conductividad eléctrica	µS.cm	WTW Multi 350i/SET
TDS		WTW Multi 350i/SET
pH	Und.	WTW Multi 350i/SET
Nitritos	µg/L-N-NO ₂	Colorimetrico
Nitratos	µg/L-N-NO ₃	Reducción de cadmio
Fosfatos	µg/L-P-PO ₄	Ácido ascórbico

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de la cuenca del río Gaira. Los datos corresponden a los diferentes tramos estudiados. TA = tramo alto, TM = tramo medio, TB = tramo bajo.

Estaciones	Unidades	TA		TM		TB	
		Promedio	Desv. (±)	Promedio	Desv. (±)	Promedio	Desv. (±)
Velocidad	m.s ⁻¹	0,56	0,27	0,56	0,27	0,36	0,18
Caudal	m ³ .s ⁻¹	0,37	0,27	0,35	0,32	1,43	1,05
Nitritos	µg.l ⁻¹	0,181	0,087	0,223	0,102	0,240	0,122
Nitritos	µg.l ⁻¹	0,791	0,263	0,790	0,399	1,422	1,112
Fosfatos	µg.l ⁻¹	4,406	2,476	4,769	3,315	4,619	3,157
Oxígeno	mg.l ⁻¹	8,308	1,353	8,003	1,544	7,889	1,386
pH		7,191	1,048	6,791	1,230	7,358	0,724
Conductividad	µS.cm ⁻¹	33,45	17,80	106,80	209,65	98,71	34,28
Temp	°C	15,51	2,50	18,49	1,17	24,17	2,20
TDS		31,84	16,43	49,42	23,50	100,68	31,01
Luz	Lux	13377,8	19685,6	1239,1	1936,3	59724,8	39474,6

Variables hidrológicas e hidroclimáticas

Las variables tomadas en cuenta en este estudio fueron el caudal aplicando el método batimétrico, el cual consiste en la estimación de la velocidad de la corriente con ayuda de un objeto flotador, el ancho de la sección y la profundidad promedio del tramo del río estudiado. Además se recopiló la información histórica instantánea de la precipitación aportada por las estaciones pluviográficas ubicadas en la cuenca del río Gaira y zonas adyacentes en propiedad del IDEAM, como lo son: estación meteorológica del Aeropuerto, Guachaca, San Lorenzo, Universidad del Magdalena, Vista Nieves y Minca (Figura 2).

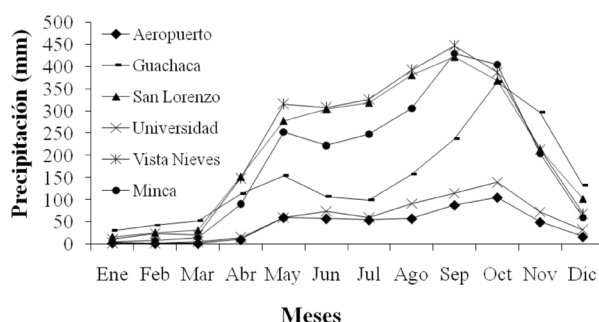


Figura 2. Precipitación media mensual multianual (1980-2004) registrada por las estaciones meteorológicas e hidrológicas del IDEAM en la cuenca del río Gaira y área adyacentes (Tamariz-Turizo, 2009 Doc. Ined.)

Cobertura de la unidad funcional sedimento (UF SED)

Para conocer la distribución espacial y variación temporal de la UF SED, durante cada campaña de muestreo, se seleccionó un sector del río con suficiente variación micro geomorfológica (sensu Frisell et al., 1986), que contuviera un conjunto de rápidos y remansos para cada una de las zonas estudiadas. La dimensión del sector fue de cinco metros lineales y mediante la utilización de cuadrantes de 1 x 1 m subdivididos en cuadrículas de 10 x 10 cm, se cuantificó el porcentaje de cobertura de esta UF para luego interpolar estos valores a una escala de tramo, a lo largo de cada estación de muestreo.

Cuantificación de la actividad metabólica

Para determinar la tasa metabólica, (o la relación P/R) se empleó el método de las botellas claras/oscuras, con cuatro replicas, utilizando como sustrato extracciones o muestras de la UF SED adyacentes al tramo mapeado (Gutiérrez, 2006). La actividad metabólica se estimó

como la variación en la concentración de oxígeno disuelto después de un tiempo de exposición de dos horas, con agitación manual en intervalos de diez minutos optimizando el proceso de reaeración. Las botellas se sumergieron dentro del cauce del río manteniendo así la temperatura del agua. Las mediciones de oxígeno disuelto se tomaron con un equipo digital marca WTW modelo Multi 350i/SET.

Las muestras de SED fueron tomadas del lecho del río mediante un dispositivo tipo Surber modificado (mini-surber), la cual presenta un área de muestreo de 50 cm² y una superficie inferior flexible ajustable a la forma irregular de los diferentes sustratos. Las muestras se recolectaron con una bolsa de polietileno de calibre grueso acoplada al dispositivo y depositadas en botellas de vidrio esmeriladas, completando el volumen de cada una con agua extraída del sitio de muestreo.

Metabolismo en un ciclo diario

En cada tramo estudiado se cuantificó el ciclo diario de la actividad metabólica (producción/respiración) de los SED (tres incubaciones con periodicidad de dos horas cada una), sin cambiar el sustrato de cada botella, pero con recambio de agua después de cada incubación, lo que permitió evaluar la actividad metabólica de los SED en el día o período de luz. Dichos análisis se desarrollaron durante el Muestreo 2 (tramo alto y bajo), y el Muestreo 3 (tramo medio).

Los ciclos se iniciaron en horas de la mañana y terminaron al atardecer, período en el cual la luminosidad presenta sus valores máximos. Durante estas incubaciones se tomaron medidas de las condiciones ambientales, como luz incidente en intervalos de 10 minutos mediante la utilización de un Luxímetro MLM-1010 MINIPA, además de la cuantificación de las variables físico-químicas y muestras para el análisis de los nutrientes. La relación P/R fue calculada como el cociente entre la Productividad Primaria Bruta (PPB) y Respiración (RC).

Estimación del área metabólica real

Aunque el área del dispositivo de muestreo es de 50 cm² no corresponde con el área real metabólica del sustrato SED, debido a su estado de agregación o plegamiento. Por esta razón, para la estimación del área real de los SED incubados, inicialmente se procedió a la obtención de imágenes digitales, que fueron procesadas en el programa computacional ImageJ 1.40g (National Institutes of Health, E.E.U.U. <http://>

rsb.info.nih.gov/ij/). Cada muestra de SED se secó en una estufa a 50 °C en recipientes de vidrio debidamente rotulados y se determinó el peso total en una balanza analítica. Posteriormente, se obtuvieron alícuotas de sedimento de cada una de las muestras a las cuales se les determinó su peso en una balanza analítica. Esta alícuota fue extendida y separada cuidadosamente en una lámina de microscopio de escala conocida, para evitar subestimaciones del área debido al plegamiento o superposición de las partículas orgánicas e inorgánicas que componen el sustrato sedimento. Con la ayuda de un microscopio digital se tomaron fotografías de la alícuota en un campo óptico y aumento de 0.63 X. Las imágenes obtenidas fueron convertidas en un formato binario (píxeles 0 o 1) y con la ayuda de la escala en la lámina de microscopio la imagen binaria fue procesada en el programa antes mencionado para calcular el área real metabólica de los sedimentos. Finalmente, el cálculo del área total de la muestra se obtuvo al extrapolar el área obtenida en la alícuota previamente pesada al peso total de la muestra. A pesar que las imágenes digitales mejoran la estimación del área real metabólica del sustrato, este involucra un margen de error producto de las diferentes formas de proyección sobre un plano bidimensional de objetos tridimensionales; por esta razón se utilizó el factor de corrección propuesto por Gutiérrez (2006) para la UF SED, el cual permite tener mejor acercamiento al valor de área real de este sustrato.

Análisis Estadístico

Previo a las comparaciones estadísticas se probaron los supuestos de homogeneidad de varianza (Prueba de Bartlett) y normalidad de los datos (Bondad de ajuste de Kolmogorov- Smirnov: K-S) para las variables metabólicas, los cuales en muchos casos violaban estos supuestos, por lo cual las pruebas y comparaciones estadísticas se realizaron con base a la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (K-W). Además se realizaron correlaciones entre las variables fisicoquímicas y la actividad metabólica de los SED usando la prueba de rangos de Spearman (r_s).

RESULTADOS

Variabes hidrológicas e hidroclimáticas

Los datos históricos de precipitación basados en estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca muestran

que, para esta zona, los meses de estudio corresponden a un periodo de transición entre aguas bajas o de poca precipitación y el comienzo de la temporada lluviosa. Sin embargo, este comportamiento climático no fue evidente a través de las diferentes campañas de muestreo, ya que durante el estudio predominó la época seca, con la aparición de leves lloviznas y un aumento progresivo de las mismas a través de las diferentes campañas de muestreo, principalmente hacia M-4 (Figura 2). Para los muestreos 3 y 4 se evidenció un incremento del caudal (Figura 3), lo cual puede ser consecuencia de un aumento en las precipitaciones a nivel local en días previos al muestreo.

La tendencia en los diferentes tramos y a través de las campañas de muestreo muestra que el caudal se relacionó con el patrón general de la región, en donde marzo, abril y mayo (M-1, M-2 y M-3 respectivamente) correspondieron a bajas precipitaciones, presentándose un cambio hacia M-4 (junio), dando comienzo a la temporada de lluvias (Tabla 2 y Figura 3). Los valores promedio del caudal variaron entre 0,14 $m^3 \cdot s^{-1}$ para TA M-2 a 1,44 $m^3 \cdot s^{-1}$ para TB M-4 a lo largo del gradiente altitudinal del río.

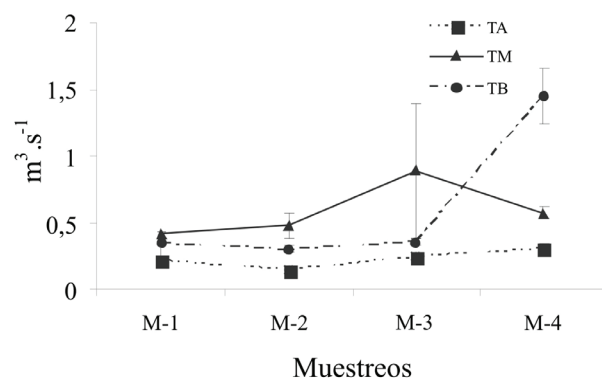


Figura 3. Caudal promedio por tramo. M-1 = muestreo 1, M-2 = muestreo 2, M-3 = muestreo 3, M-4 = muestreo 4. TA = tramo alto, TM = tramo medio, TB = tramo bajo.

Área cubierta por los SED

De acuerdo con los datos obtenidos mediante los mapeos, se determinó que la UF SED varió en cuanto al área promedio cubierta por este sustrato, aumentando progresivamente desde TA hacia TB del río (Tabla 3). El máximo valor en área cubierta (4,69 m^2) por este sustrato se encontró en TB para el tercer muestreo (M-3).

Tabla 3. Área promedio cubierta en metros cuadrados por cada UF a lo largo del gradiente altitudinal del río (los valores en paréntesis corresponden a la desviación). TA = tramo alto, TM = tramo medio, TB = tramo bajo.

UF	TA	TM	TB
GRA	5,96 (± 3,30)	12,33 (± 5,13)	5,02 (± 3,97)
EPI	4,38 (± 2,75)	5,88 (± 3,85)	4,55 (± 0,66)
HOJ	0,66 (± 0,24)	0,54 (± 0,46)	1,21 (± 0,54)
SED	0,23 (± 0,17)	0,49 (± 0,51)	1,58 (± 2,08)

Cuantificación de la actividad metabólica

La PPB en la UF SED

Para las campañas de muestreo realizadas, la PPB no presentó una tendencia hacia el aumento en los diferentes tramos. Sin embargo, en las campañas realizadas y a través del gradiente altitudinal del río, la PPB mostró un patrón ajustado a lo predicho por Vannote et al. (1980), encontrando para TM los valores máximos en la PPB.

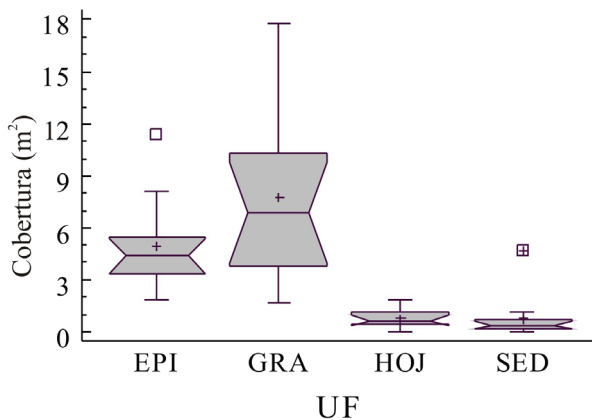


Figura 4. Variaciones de área ocupada por cada UF. Los rectángulos con muescas representan la escala intercuartil y las líneas horizontales de corte a su mediana, los cuadrados vacíos a los datos atípicos y los cuadrados con cruces los datos extremos (K-W = 33,61, n = 48, p < 0,01).

Para TA M-4, la actividad metabólica de los sedimentos presentó el menor valor en la PPB, con alrededor de 0,08 (± 0,08) mg O₂ .m⁻².h⁻¹. De acuerdo con los datos obtenidos, se evidenció que en este tramo la actividad metabólica tiene una tendencia hacia la disminución a través de las diferentes campañas de muestreo, debido a que para este mismo tramo en el M-1 los valores de PPB registrados fueron de 0,84 mg O₂ .m⁻².h⁻¹. De acuerdo con lo anterior, se encontraron diferencias significativas en su variación temporal para esta variable (K-W = 8,80, P = 0,031, n = 27) (Figura 5). Por su parte en el TM se registraron los mayores valores de productividad de los sedimentos con 2,71 mg O₂ .m⁻².h⁻¹ a través de las diferentes campañas de muestreo. Sin embargo, para este tramo no se encontraron diferencias significativas en la variación temporal de la productividad de los sedimentos. Para el TB se encontraron diferencias en la PPB entre las diferentes campañas de muestreo (K-W = 15,53, P = 0,0014, n = 34).

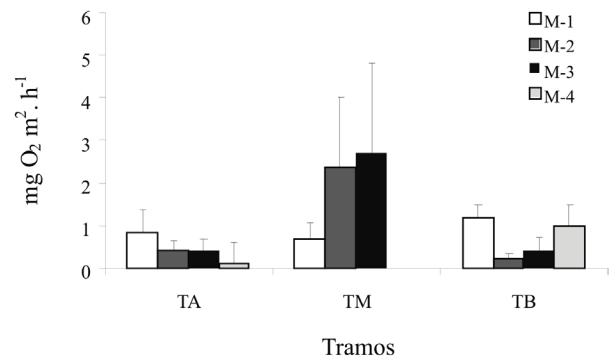


Figura 5. Productividad Primaria Bruta (PPB) por tramo. Las líneas acotadas sobre las barras corresponden a la desviación estándar de las réplicas.

Respiración (RC) en la UF SED

Esta actividad fue la más representativa durante todo el estudio, ya que en términos generales tanto en las botellas claras como en las oscuras existió consumo de oxígeno para la UF SED. Este comportamiento se presentó a través de todas las campañas de muestreo variando de 0,36 mg O₂ .m⁻².h⁻¹ en TA M-1 a 4,20 mg O₂ .m⁻².h⁻¹ en TM M-3, ya que este sustrato es considerado como netamente heterotrófico (Gutiérrez, 2006), es decir, con tendencia hacia la respiración a causa del tipo de comunidades presentes en él y al tipo de recurso alimentario, dominado por materia orgánica fina y disuelta.

En todos los tramos estudiados, la actividad respiratoria siempre fue mayor que la productividad a través de las diferentes campañas de muestreo. Para TA y TB del río se encontraron diferencias significativas entre los diferentes muestreos (K-W = 16,39, P = 0,00093, n = 27) y (K-W = 8,85, P = 0,031, n = 34), respectivamente (Figura 6).

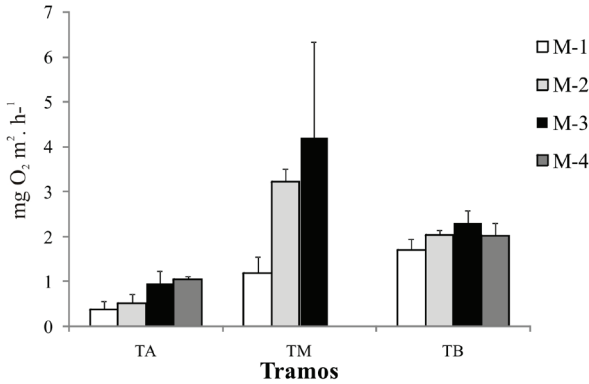


Figura 6. Actividad Respiratoria (RC) por tramo. Las líneas acotadas sobre las barras corresponden a la desviación estándar de las réplicas.

Relación P/R en la UF SED

La relación P/R en los SED siempre fue menor a 1 para todos los muestreos y tramos, con excepción de tramo alto M-1 donde fue mayor de 1 (2,98) (Figura 7). El resto de las campañas de muestreo mostraron relaciones por debajo de 1. Esta relación (P/R) indica claramente condiciones heterotróficas para este sustrato a lo largo del gradiente altitudinal del río.

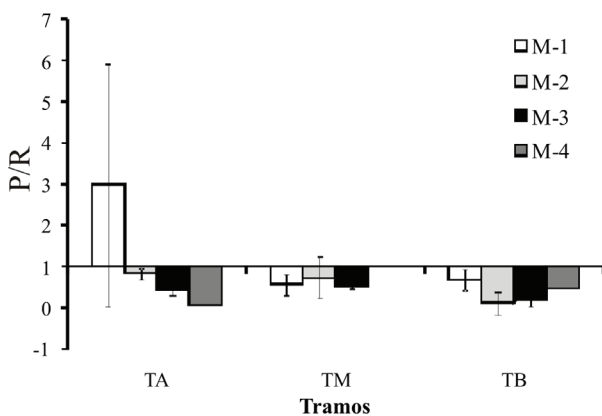


Figura 7. Relación Producción/Respiración (P/R) de la UF SED. Las líneas acotadas sobre las barras corresponden a la desviación estándar de las réplicas.

Correlación entre variables físico-químicas e hidrológicas con la actividad metabólica de la UF SED

En el TA se pudo determinar que existe una correlación positiva entre la luminosidad y la relación P/R ($r_s = 0,53$, $n = 44$, $P = 0,0005$). Sin embargo, las demás variables físico-químicas, hidrológicas e hidroclimáticas no presentaron asociación evidente con la actividad metabólica de los SED en el resto de tramos estudiados.

Metabolismo en un ciclo diario

Se referenció el comportamiento de la actividad metabólica de los sedimentos a lo largo de un día o periodo de luz. Las incubaciones realizadas en cada tramo corresponden a Incubación 1 (I-1 = mañana), Incubación 2 (I-2 = medio día), Incubación 3 (I-3 = tarde), con un promedio de 35 minutos entre cada incubación.

En TA la actividad RC siempre fue mayor que la PPB, por lo tanto la variación diaria de la relación Producción/Respiración, siempre fue menor que 1 para las diferentes incubaciones (Figura 8). Sin embargo, durante I-1 se presentó un valor muy próximo a 1 (0,84). Se encontraron diferencias significativas para la relación P/R en las diferentes incubaciones realizadas (K-W = 11,42, P = 0,0033, n = 37).

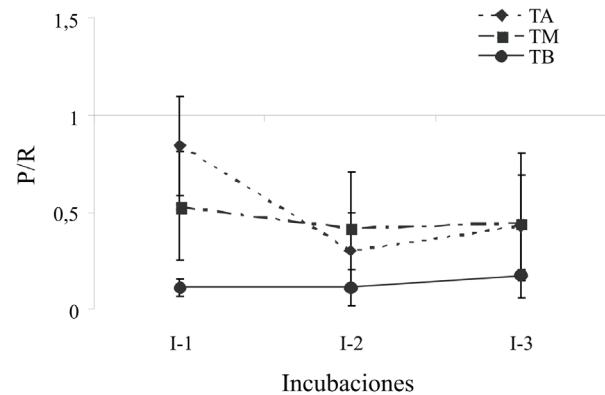


Figura 8. Relación Producción/Respiración (P/R) de la UF SED durante un ciclo diario de luz. I-1 = primera incubación, I-2 = segunda incubación, I-3 = tercera incubación. Las líneas acotadas corresponden a la desviación estándar.

Los valores hallados para la relación P/R, en TM fue < 1 en las incubaciones realizadas. Esta relación no presentó mucha variación lo largo del día, destacando que para I-1 se presentó el valor más próximo a 1 (0,53). Para TM y TB no se encontraron diferencias significativas para esta relación entre las incubaciones realizadas.

Para los ciclos diarios se encontró que el promedio de la PPB en las diferentes incubaciones, se correlacionó inversamente con la luminosidad ($r_s = -0,9667$, $n = 9$, $P = 0,0063$) encontrando para bajos niveles de luz los mayores valores en la PPB para el tramo medio y en altos niveles de luz, los menores valores para la PPB para TA y TB, esto puede deberse a la fuerte intensidad lumínica y a la características del sustrato SED.

DISCUSIÓN

Variables físico-químicas

Nutrientes

La intercepción y conversión de la radiación solar por las comunidades autotróficas está acompañada por la toma y asimilación de nutrientes, originalmente presentes en formas inorgánicas (Talling y Lemoalle, 1998) convirtiéndose estos en un factor importante que favorecen al establecimiento, funcionamiento y permanencia de las comunidades autotróficas en el ecosistema lótico (Ortiz-Zayas et al., 2005).

Para el caso de los nutrientes en la cuenca del río Gaira, la concentración total disuelta de PO_4 , así como las formas NO_2 y NO_3 (Tabla 2) no alcanzaron grados extremos de agotamiento que los podrían considerar como factores limitantes en el crecimiento de las diferentes comunidades (Hall y Tank, 2003). Sin embargo, a pesar que las concentraciones de las formas nitrogenadas fueron bajas, los valores encontrados para el fósforo, fueron similares a los registrados por Ortiz-Zayas et al. (2005) en el río Mameyes en Puerto Rico.

Luminosidad

Para TA se encontraron valores promedio de luminosidad (Lux) mayores en comparación con el TM, que pueden ser debidos a las características locales de TA (encañonamiento y suelo de tipo rocoso), que puede limitar la presencia de arboles de gran tamaño al borde del río (Tabla 2). Por otro lado, en TM y TB se pudo identificar la presencia de arboles de gran tamaño como

Tabebuia pentaphylla, *Cedrela sp.*, *Pereskia colombiana*, *Guazuma ulmifolia* e *Inga sp.*, que en diferentes horas del día impedían la penetración de luz al lecho del río. Sin embargo, fue TB el que presentó los mayores valores de luminosidad durante todo el estudio (Tabla 2).

Variables hidráulicas e hidroclimáticas

En TA no se presentaron cambios súbitos en el caudal del río a través de las diferentes campañas de muestreo, que puede ser causa de la estabilidad climática para la época en que se desarrollo el estudio. Además, hay que tener en cuenta la naturaleza de los suelos y su capacidad de infiltración, como también las altas pendientes y al estado de conservación de la cuenca, ya que una buena cobertura vegetal es capaz de retener parte de la escorrentía superficial que se produce cuando se inicia el periodo de lluvias (Gutiérrez, 2006). Para TM y TB no se presentaron cambios de caudal durante las primeras campañas de muestreo, sin embargo, hacia M3 y M4 se presentaron fuertes lluvias que fueron evidentes en un cambio significativo del caudal en estas estaciones de muestreo. Este aumento del caudal en TM y TB, también es evidencia de un aumento en las precipitaciones a nivel local (Tamariz-Turizo, 2009), ya que estos cambios en el caudal pueden ser respuesta de la saturación de los suelos a causa de eventos consecutivos de precipitación (Gutierrez, 2006). La precipitación se ajustó de acuerdo con la periodicidad anual para la zona, presentando valores bajos en los primeros meses del año, para luego mostrar un incremento hacia la última campaña de muestreo, lo que concuerda con lo reportado por Tamariz-Turizo (2009).

Asociación entre variables fisicoquímicas, hidrológicas e hidroclimáticas con la actividad metabólica de la UF SED

De acuerdo con Uehlinger (2000) y Ortiz-Zayas et al. (2005), la correlación positiva encontrada entre la luminosidad y la relación P/R puede deberse a que la relación P/R es dependiente en cierto grado de la PPB y a su vez esta es favorecida por la luminosidad presente en el sistema. A pesar que, de manera general, la PPB no se encontró correlacionada positivamente con la luminosidad, hay que resaltar que hubo un muestreo en TA que evidenció correlación entre la PPB y la luminosidad. Hay que tener en cuenta que en TA, se presentó autotrofia en M-1 y valores altos próximos a 1 para la relación P/R en el resto de las campañas, hecho que pueden estar generando las correlaciones encontradas entre estas variables. En

un estudio similar desarrollado por Gutiérrez (2006) se evidenció que la escala de resolución de las UF, no encontró correlación entre las variables metabólicas, hidrológicas e hidroclimáticas para la UF SED. Para el caso de los sustratos blandos como la UF SED, se propone la existencia de una migración vertical de los microorganismos presentes en el sustrato y que dicha migración permitiría la configuración de refugios a partir de los cuales se recupera la comunidad de microorganismos que eventualmente pudiera ser afectada por las crecidas de caudal. De esta manera, a pesar de que dichos sustratos son móviles, estos ofrecen una configuración física que favorece la resiliencia de la comunidad de microorganismos, manteniendo estable la actividad metabólica de dicha UF (Gutiérrez, 2006).

Representatividad de los sedimentos en el río

En ríos de orden menor, cuyas cuencas están bien conservadas y donde la textura de los suelos permite una buena infiltración, las variaciones del caudal son pequeñas y de poca duración, de tal forma que la movilización y arrastre de sustratos es inusual. Solo eventos extremos de incremento de caudal alcanzan suficiente energía para poner en movimiento los sustratos mecánicamente más inestables del bentos (Lancaster y Hildrew, 1993 En: Gutiérrez, 2006). Este patrón se evidenció para la UF SED hacia M-4 en el gradiente altitudinal del río, cuando se presentaron eventos de máximo caudal. Estos cambios en el área cubierta por el sustrato SED en el lecho del río, se debe a la inestabilidad mecánica del mismo (Gutiérrez, 2006).

La UF SED mostró un incremento en representatividad para el TB M-3. Este incremento pudo obedecer a eventos de creciente y de un aumento de la precipitación en la cuenca del río en los días previos al muestreo, arrastrando en mayor cantidad MOPF y MOPG provenientes de las laderas del río (entradas laterales de materia orgánica), convirtiendo las zonas de remanso en posibles centros de acumulación de materia orgánica propia de esta UF, así como a las condiciones naturales del río, que tiende a presentar una disminución en el tamaño del grano ya que por acción mecánica de la corriente y el sustrato, este se fragmenta a medida que desciende a lo largo del río. En este muestreo y tramo, la UF SED alcanzó una de las mayores tasas metabólicas para la RC, ya que las comunidades de organismos autótrofos y heterótrofos presentes en este sustrato son lavadas y arrastradas por la corriente (Gutiérrez, 2006). Esta acción de lavado favorece la formación de

un mayor número de espacios intersticiales u oscuros que son potencialmente colonizados por hongos y bacterias (heterótrofos) propios de estos lugares del río, favoreciendo a la condición heterotrófica registrada para este sustrato.

Metabolismo en la UF SED

Se encontró que la respiración (RC) fue mayor que la producción (PPB) en la UF SED a lo largo de todos los muestreos y tramos con excepción de M-1 en el TA. Este fenómeno puede ser debido a que la UF SED es considerada como un sustrato netamente respirador a causa de su naturaleza, siendo consistente con lo registrado por Gutiérrez (2006) en un río tropical de orden menor y por Ortiz-Zayas et al. (2005) para un río tropical (río Mameyes), en el cual los valores de producción presentan su máximo hacia la parte media del río, siendo la parte alta la que presenta los mínimos valores. De igual forma la respiración presentó el mismo comportamiento, sin embargo, esta fue mayor en la parte baja del río. De acuerdo con lo anterior, se reafirma la idea de que la UF SED es considerada un sustrato respirador (Gutiérrez, 2006), además del hecho que las variaciones en la actividad metabólica presentada en las cámaras (claras-oscuras), pueden estar asociada con la relación del área real disponible para la actividad fotosintética y el área real habitable para los heterótrofos.

Metabolismo diario de la UF SED

A lo largo de las incubaciones realizadas, la actividad RC de SED siempre fue mayor que la PPB, siendo este fenómeno consistente con lo encontrado por Gutiérrez (2006) para la actividad metabólica, ya que es considerado como un sustrato heterotrófico. Se destaca el hecho que la PPB no presentó mucha variación a lo largo del día, siendo esta actividad homogénea durante los ciclos realizados. Por otro lado, la RC presentó variaciones considerables a lo largo de las incubaciones en cada tramo estudiado, destacando el ciclo diario realizado en el TM M-3 donde se presentó el máximo valor para el caudal en el tramo y el máximo valor hallado para la RC a lo largo del gradiente altitudinal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar sus agradecimientos a la Universidad del Magdalena por permitir el desarrollo exitoso de esta investigación en el marco del

macroproyecto titulado “Descriptores funcionales de un sistema fluvial de montaña – Sierra Nevada de Santa Marta”. De igual forma se agradece el valioso apoyo de Grupo GIBEA para la adquisición de materiales de campo. También agradecen al Biólogo Isaac Romero por su apoyo en el análisis fisicoquímico y préstamo de equipos de campo.

BIBLIOGRAFÍA

APHA. 1985. Standard methods for the examination of water and waste water, 16th ed. American Public Health Association, Washington.

Benke, A., C. Hall, C. Hawkins, R. Lowe-McConnell, J. Stanford, K. Subberkropp y J. Ward. 1988. Bioenergetics considerations in the analysis of stream ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society* 7:480-502.

Bott, T. 1996. Primary productivity and community respiration, pp. 533-556. En: Hauer F. y G. Lamberti. *Methods in Stream Ecology*. Academic Press, San Diego, CA.

Bott, T., J. Brock, C. Dunn, R. Nainman, R. Ovink y R. Petersen. 1985. Benthic community metabolism in four temperate stream systems: an interbioma comparison and evaluation of the river continuum concept. *Hydrobiology* 123:3-45.

Chessman, B. 1985. Estimates of Ecosystem Metabolism in the La Trobe River, Victoria. *Australian Journal Marine Freshwater Research* 36: 873-80.

Contreras, V., E. Jiménez, R. Pabón y O. Valeros. 2000. Plan de manejo integral de la cuenca hidrográfica del río Gaira. Trabajo de grado. Universidad del Magdalena. Magdalena, Santa Marta. pp. 34-105.

Elósegui, A. y J. Pozo. 1998. Biomasa epilítica y metabolismo en un río en el norte ibérico. *Aquatic Sciences* 60:1-16.

Frissell, C., W. Liss, C. Warren y M. Hurley. 1986. A hierarchical framework for stream classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*. 10:199-214.

Gutiérrez, J. 2006. Caracterización del metabolismo y de la oferta de recursos de materia orgánica para la fauna de macroinvertebrados bentónicos en una quebrada de montaña de orden menor. Tesis Doctoral. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 17-42.

Hall, R. y J. Tank. 2003. Ecosystem metabolism controls nitrogen uptake in streams in Grand Teton National Park, Wyoming. *Limnology and Oceanography* 48:1120-1128.

Hansmann, E., C. Lane y J. Hall. 1971. A direct method of measuring benthic primary production in streams. *Limnology and Oceanography* 16:822-825.

[Http://rsb.info.nih.gov/ij/](http://rsb.info.nih.gov/ij/). Programa computacional. ImageJ 1.40g National Institutes of Health, EE.UU.

Lancaster, J. y A. Hildrew. 1993. Characterizing in-stream flow refugia. *Canadian Journal Fisheries Aquatic Sciences* 50:1663-1675

En: Gutiérrez, J. 2006. Caracterización del metabolismo y de la oferta de recursos de materia orgánica para la fauna de macroinvertebrados bentónicos en una quebrada de montaña de orden menor. Documento de tesis Doctoral. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 17-42.

Leopold, L. y T. Maddock. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological Survey Professional Paper* 252:57

Mcintire, C., R. Garrinson, H. Phinney y C. Warren. 1964. Primary production in laboratory streams. *Limnology and Oceanography*. 9:92-102

Minshall, G., 1978. Autotrophy in stream ecosystems. *Bioscience* 28:767-771

Mulhollan, P., C. Fellows, J. Tank, N. Grimm, J. Webster, S. Hamilton, E. Martí, L. Ashkenas, W. Bowden, W. Dodds, W. McDowell, M. Paul y B. Peterson. 2001. Inter-biome comparison of factors controlling stream metabolism. *Freshwater Biology* 46: 1503-1517.

Ortiz-Zayas, J., W. Lewis, J. Saunders, J. Mccutchan y F. Scatena. 2005. Metabolism of a tropical rainforest stream. *Journal North American Benthological Society* 24(4): 769-783

Sabater, S y A. Romani. 1999. Efectos de los productores primarios sobre el metabolismo heterotrófico de las biopelículas en un río. *Freshwater Biology* 41: 729-736

Talling, J y J. Lemoalle. 1998. Ecological dynamics of tropical island waters. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. pp. 117.

Tamariz-Turizo, C. y H. López-Salgado. 2006. Aproximación a la zonificación climática del río Gaira. *Revista Intropica*. 3: 69-76.

Uehlinger, U. 2000. Resistance and resilience of ecosystem metabolism in a flood-prone river system. *Freshwater Biology* 45:319-332.

Vannote, R., G. Minshall, K. Cummins, J. Sedell, y C. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal Fisheries Aquatic Sciences* 37: 130-137.

Whitledge, G. y C. Rabeni, 2000. Benthic community metabolism in three habitats in an Ozark stream. *Hydrobiology* 437: 165-170.

Young, R., C. Matthaei y C. Townsend. 2008. Organic matter breakdown and ecosystem metabolism: functional indicators for assessing river ecosystem health. *Journal North American Benthological Society* 27 (3):605-625.

Fecha de Recepción: 01/01/2012
Fecha de Aceptación: 21/11/2012

