

EVALUACIÓN DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS Y CALIDAD DE AGUA EN QUEBRADAS DE FINCAS CAFETERAS DE CUNDINAMARCA Y SANTANDER, COLOMBIA

Luz Ángela Galindo-Leva*; Luis Miguel Constantino-Chuaire*; Pablo Benavides-Machado*; Esther Cecilia Montoya-Restrepo**; Nelson Rodríguez -Valencia***

RESUMEN

GALINDO L., L.A.; CONSTANTINO C., L.M.; BENAVIDES M., P.; MONTOYAR., E.C., RODRÍGUEZ V.; N. Evaluación de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en quebradas de fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander, Colombia. Revista Cenicafé 63(1): 70-92. 2012

Se estudiaron las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en 54 fincas cafeteras de Santander y Cundinamarca, comparando dos sistemas agroforestales de *Coffea arabica* (con certificación *Rainforest Alliance* -C y sin certificación-NC) en bloques pares, seleccionados completamente al azar, para analizar los cambios de abundancia, composición y estructura asociados con la contaminación de fuentes de agua. En los nacimientos de agua de cada finca, en época de cosecha y fuera de cosecha, en dos puntos del cuerpo de agua (origen y final), se realizaron análisis fisicoquímicos y recolecciones de macroinvertebrados. En total, se recolectaron 11.275 ejemplares para los dos departamentos, distribuidos en 35 órdenes, 114 familias y 352 morfoespecies. Como resultado se encontraron diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas en la calidad del entorno físico de los ecosistemas, evaluada con los protocolos SVAP y CIPAV, en los dos departamentos. El índice biótico BMWP indicó diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas para los dos departamentos con valores promedio de $118,4 \pm 7,94$ en fincas CE y $71,73 \pm 7,6$ en fincas NC de Cundinamarca. Para Santander los valores BMWP fueron de $65 \pm 7,14$ en fincas CE y $48,8 \pm 6,18$ en fincas NC. Las variables fisicoquímicas como la carga de contaminación orgánica DBO y la demanda química de oxígeno DQO mostraron diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas. Se concluye que con la adopción de la Norma de Agricultura Sostenible se generan mejores condiciones físicas y mejor calidad del agua para sustentar poblaciones más diversas de macroinvertebrados acuáticos.

Palabras clave: Certificación ambiental, insectos acuáticos, análisis fisicoquímicos, índices bióticos, *Coffea arabica*.

ABSTRACT

The aquatic macro-invertebrate communities of 54 coffee farms in Cundinamarca and Santander were studied by comparing two agroforestry systems of *Coffea arabica* (with *Rainforest Alliance*-C and without certification-NC) in paired blocks with a completely randomized design in order to analyze the changes in abundance, composition and structure associated with water sources contamination. Physicochemical analyses and macro-invertebrate collections were carried out in the water springs of each farm during harvest and during non-harvest time in two points of the water body (start and end). In total, 11,275 samples were collected in both departments, distributed into 35 orders, 114 families and 352 morpho-species. There were significant differences in favor of the Certified farms with respect to the quality of the physical environment of ecosystems, evaluated with SVAP and CIPAV protocols in both departments. The BMWP biotic index indicated significant differences in favor of the Certified farms for both departments with average values of 118.4 ± 7.94 in C farms and 71.73 ± 7.6 in NC farms of Cundinamarca. For Santander, the BMWP values were 65 ± 7.14 and 48.8 ± 6.18 in NC farms. The physicochemical variables such as organic pollution load BOD and chemical demand of COD oxygen showed significant differences in favor of Certified farms. The conclusion is that with a Sustainable Agriculture adoption, there are better physical conditions and better water quality to support a more diverse population of aquatic macro-invertebrates.

Keywords: Environmental Certification, aquatic insects, physicochemical analyses, biotic indices.

* Investigador Asociado, Investigadores Científicos II, respectivamente. Disciplina de Entomología. Cenicafé.

** Investigador Científico III, Disciplina de Biometría, Cenicafé.

*** Investigador Científico I, Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El agua, al igual que el suelo, son los componentes que más sufren por problemas de contaminación, debido a que constituyen el factor más importante en la determinación del tipo, complejidad y productividad de los ecosistemas. Los sistemas agrícolas dependientes de altos insumos de origen químico, los cuales ayudan a aumentar la productividad, con el paso del tiempo traen una serie de problemas de contaminación persistentes, tanto en los suelos, como en los alimentos y las aguas (5). Este problema se ve reflejado tanto desde el inicio del ciclo productivo, con el uso de los insumos agrícolas, como al final, con la producción de desechos y contaminantes. Los problemas se dan desde el abastecimiento de insumos para la producción agrícola (fertilizantes, plaguicidas, herbicidas), continúa en la actividad primaria (uso del suelo y agua, erosión del suelo, pérdida de biodiversidad) de la producción, se prolonga hasta la actividad secundaria de beneficio y procesamiento, hasta la comercialización (14).

Por ejemplo, los fertilizantes químicos y pesticidas aplicados al suelo y la vegetación en los cultivos son una fuente importante de contaminación antropogénica para los suelos y aguas, superficiales y subterráneas, ya que muchos de ellos por efectos de la adsorción por el suelo y la lixiviación se filtran a las aguas subterráneas y nacimientos de agua; igualmente, las lluvias lavan las partículas de los químicos suspendidos en la vegetación y el suelo y por efectos de escorrentía llegan a las fuentes de agua. Los principales contaminantes producidos por los fertilizantes son los iones nitratos, derivados del nitrato de sodio.

El agua para consumo humano o animal debe ser química y biológicamente pura. Esta pureza misma hace que sobre ella no se desarrollen microorganismos y vegetales.

Cuando ésta se enriquece con calcio, magnesio, sodio y principalmente de fósforo se dice que el agua se ha eutroficado, comenzando el desarrollo de todo tipo de organismos, con exceso de algas y plantas acuáticas, las cuales la vician tomando el oxígeno (aumentando la demanda bioquímica de oxígeno DBO), aportando materia orgánica que para su descomposición requiere de oxígeno (DQO), y aumentando el contenido de dióxido de carbono y a su vez la acidez. El resultado final de esta alteración es la falta de oxígeno para peces y macro invertebrados y la impotabilidad para su consumo por el hombre (12,14).

Para el caso del beneficio del café, se conoce que los desechos de aguas mieles y de arrastre de pulpa como las percoladas a través de fosas con pulpa en descomposición y las de lavado de café fermentado, son aguas muy tóxicas para los animales como los peces y renacuajos, diluidas al 50% matan a todos los animales en unos minutos o en algunas horas, y diluidas al 1% afectan la supervivencia de los animales hasta por 5 días (6, 7, 23).

Una forma de valorar los bienes y servicios ambientales que los sistemas productivos pueden generar e igualmente para estimar la salubridad de los ecosistemas acuáticos, es a través de la evaluación de indicadores biológicos, que permitan cuantificar los cambios de abundancia y diversidad en un sitio dado. Los parámetros biológicos empleados en este estudio son los llamados indicadores ecológicos de calidad de agua, los cuales se hallan constituidos por un grupo de pequeños macroinvertebrados bentónicos como larvas y ninfas de insectos de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Coleoptera y Diptera, entre otros taxa, crustáceos, platelmintos, anélidos hirudíneos y oligoquetos, y moluscos gasterópodos que

responden de diferente manera o en diferentes escalas a la presión externa generada por las prácticas agrícolas o a los beneficios de las actividades que mitigan el deterioro de los ecosistemas (3, 26, 27).

En la evaluación de indicadores ecológicos de calidad de agua, el índice BMWP (*Biological Monitoring Working Party Score System*) es muy útil y de uso frecuente en evaluaciones ambientales. En varias regiones del país como Antioquia, Cauca, la sabana de Bogotá y Norte de Santander, entre otras, hay adaptaciones a condiciones locales con base en la fauna de macroinvertebrados que tipifican la zona (15, 18, 21, 29, 30, 32). Este índice evalúa la presencia de diferentes familias de macroinvertebrados y asigna rangos de calidad en ambientes lóticos, de acuerdo con la composición de las comunidades presentes debido a que dicha composición de la comunidad de bentónicos puede aportar información valiosa dada su sensibilidad a las modificaciones del hábitat (2, 3, 4, 16, 17, 24). Para el presente estudio se utilizó la adaptación del índice BMWP de Zúñiga y Cardona (37), diseñada para cuerpos de agua de primer orden (aljibes o nacimientos) de la zona andina de Colombia.

Algunos índices basados en la riqueza (número de especies) han tenido, aunque breve, una importante trayectoria en los estudios de bioindicación; han sido probados y validados previamente para Suramérica y se ha encontrado un alto grado de precisión para la evaluación de la calidad del agua (13). Por ejemplo, el índice biótico EPT y ELPT (número de especies de Ephemeroptera / Elmidae, Plecoptera y Trichoptera) son medidas eficientes para evaluar la calidad biológica mediante un valor que mide los grupos clave (menos tolerantes) que responden de forma clara a la perturbación. En este sentido, la diversidad alfa de la comunidad es

otra variable que se usa como una medida de la calidad ambiental en un cuerpo de agua.

Los sellos certificadores al cultivo de café que acogen la Norma de Agricultura Sostenible (NAS) afirman que su adopción promueve la conservación de la biodiversidad. Para corroborar el papel de las fincas cafeteras en este proceso, se muestrearon macroinvertebrados acuáticos comparando dos sistemas agroforestales de *Coffea arabica* (con certificación *Rainforest Alliance* y sin certificación) en bloques pares seleccionados completamente al azar, con el objeto de analizar los cambios de abundancia y composición asociados con la contaminación de fuentes de agua, y poder estimar la salubridad de los ecosistemas acuáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló en los departamentos de Cundinamarca y Santander. Para Cundinamarca, las fincas muestreadas con nacimientos de agua abarcaron los municipios de San Francisco, Supatá, Vergara, La Palma y Guaduas, dentro de la cuenca del río Negro al Noroccidente del departamento, en un rango altitudinal comprendido entre 1.410 y 1.820 m. Esta zona se caracteriza por presentar un relieve fuertemente ondulado y en algunos casos quebrados con pendientes y escarpes fuertes. En el aprovechamiento hídrico de la cuenca se beneficia el sector agrícola y pecuario y el abastecimiento de acueductos urbanos y rurales. La cuenca registra precipitaciones medias anuales entre 1.670 mm y 2.500 mm en la parte alta.

Las fincas muestreadas en el departamento de Santander con nacimientos de agua estuvieron ubicadas en los municipios de Aratoca, Valle de San José, Pinchote, Socorro, Barbosa, Guavatá y Vélez, en un rango altitudinal comprendido entre los 1.420 y

1.906 m. Los cuatro primeros municipios se clasifican dentro del ecotopo cafetero 305A, el cual se localiza abarcando la cuenca del río Chicamocha y río Sogamoso, y las subcuencas de los ríos Fonce y Suárez. Las precipitaciones anuales van de 1.500 a 2.000 mm, disminuyendo de diciembre a febrero y de junio a agosto, con déficit hídrico en el suelo para los meses de diciembre, enero y febrero.

Selección de la muestra. En cada departamento (Cundinamarca y Santander), se seleccionaron de manera aleatoria 54 fincas cafeteras (27 fincas Certificadas que habían implementado la Norma de Agricultura Sostenible (NAS) y 27 fincas sin certificar sin ningún tipo de sello; debidamente registradas en el Sistema de Información Cafetera-SIC@, de los Comités Departamentales de Cafeteros correspondientes, y con 3 años o más de certificación *Rainforest Alliance* (RA). El marco de muestreo estuvo conformado por aquellas fincas que cumplieron este criterio y que estuvieran presentes en aquellos municipios que abarcaran como mínimo el 80% de las fincas Certificadas RA, según la prueba de Pareto (10).

Por cada finca seleccionada con certificación RA (CE) (bloque par), se tomó una finca No Certificada (NC), sin algún tipo de sello, contigua y con condiciones similares en topografía, microclima, altitud y cultivo de café. Igualmente, que tuviesen un cuerpo de agua (nacimiento) al interior de la finca con flujo continuo, no interrumpido, desde el origen hasta el final.

Análisis fisicoquímicos. Tanto en las fincas Certificadas como No Certificadas se realizaron en dos tiempos de muestreo (época de cosecha principal y fuera de ésta, en adelante llamadas cosecha y no cosecha) y en dos puntos del cuerpo de agua, en el origen del nacimiento

de agua dentro de la finca y al final de la quebrada, en el lindero de la finca, el registro de las variables *in situ* (Alcalinidad con el uso del kit HI 3811, marca Hanna Instruments, para neutralizar ácidos con un pH superior a 4,5 por titulación; dureza empleando el kit HI 3812 marca Hanna Instruments, para determinación de dureza residual en aguas blandas con el método complexométrico; pH mediante microcomputador medidor de pH T19000 marca WalkLab Trans Instruments; temperatura evaluada por medio de un termómetro digital T19000 marca WalkLab Trans Instruments; oxígeno disuelto medido con Oxímetro digital marca WalkLab Trans Instruments; y sólidos suspendidos empleando un medidor de sólidos en suspensión marca WalkLab Trans Instruments).

En el mismo punto de muestreo se recolectaron muestras de agua de 600 ml para el laboratorio de Biodigestión de la Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación de Cenicafé, para realizar los análisis fisicoquímicos *ex situ* (DBO, DQO, color verdadero, sólidos totales y suspendidos) siguiendo los procedimientos de métodos estándar normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (1). Las muestras recolectadas fueron acidificadas en el campo hasta un pH inferior a dos ($\text{pH} < 2$) y transportadas a 8°C hasta el laboratorio, en neveras refrigeradas de icopor. Para los análisis DBO se utilizó el método Winkler en alícuotas de 200 ml de muestra, para el DQO el método de digestión-Semimicro-Espectrofotométrico en 2 ml de muestra a un pH entre 5,5 y 6,5 en viales DQO, para el color verdadero con el método estándar de Platino-Cobalto (Un Pt/Co), y Sólidos totales con el método gravimétrico.

Recolección de macroinvertebrados. En estos mismos puntos de muestreo de los análisis fisicoquímicos de aguas (origen y

final) se recolectaron macroinvertebrados empleando redes acuáticas con poros de 300 μ (Red D y cónica *minor*) y moviendo el sustrato para causar el desprendimiento de los individuos. Adicionalmente, se realizaron jameos acuáticos rozando los bordes, piedras y vegetación sumergida, y superficie del agua en pocetas, con el fin de abarcar todos los micro-hábitats presentes en los cuerpos de agua. De manera complementaria se recolectaron muestras de 300 g de detritos y hojarasca, para la separación en el laboratorio de especímenes adheridos. En los casos en que no fue posible acceder a los dos puntos de muestreo se recolectaron 600 g de detritos del mismo lugar, para obtener un tamaño de muestra equitativo en todos los cuerpos de agua. Igualmente, se realizaron recolecciones cualitativas removiendo piedras y vegetación sumergida durante 1 hora con un mismo esfuerzo de muestreo representado en 2 horas/hombre/día y capturando con pinzas los ejemplares perceptibles a simple vista, de tal manera que los datos estadísticos de riqueza y abundancia para cada localidad pudieran ser comparables entre sí.

La totalidad de ejemplares obtenidos tanto de las recolecciones cuantitativas (con redes de arrastre y remoción de detritos) como cualitativas (de manera manual con pinzas) fueron identificados a nivel de familia y clasificados como morfoespecies, con esta información se obtuvieron las siguientes variables de interés:

El índice biótico BMWP (Biological Monitoring Working Party Score System) (2), asigna a cada familia de macroinvertebrados acuáticos un puntaje que varía entre uno y diez, de acuerdo con su tolerancia a la contaminación. Para el presente análisis se utilizó el índice BMWP/Univalle 2009, el cual fue adaptado para Colombia, específicamente

para cuerpos de agua pequeños (de primer a tercer orden) de ambientes andinos (36, 37) y es un índice independiente de la estacionalidad. Los valores de este índice se obtienen mediante la suma de los puntajes de todas las familias encontradas en un cuerpo de agua. Dichos puntajes se asignan de acuerdo a la tabla de tolerancia (Tabla 1) de tal manera que el mayor puntaje (diez) lo obtienen las familias menos tolerantes a la contaminación y los menores puntajes se asignan a aquellas familias muy tolerantes, que se pueden encontrar en gran variedad de condiciones y pueden soportar bajos niveles de oxígeno disuelto, pH y temperatura, entre otros. Los rangos para clasificar la calidad del agua van desde muy limpias hasta contaminadas, en un rango en un puntaje que varía entre 120 y 1 (Tabla 2).

Índices bióticos EPT y ELPT, los cuales se obtienen de manera muy similar al índice BMWP. Son el resultado de la sumatoria de la cantidad de especies o morfoespecies que corresponden a los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en el caso de EPT o Coleoptera, Elmidae, Plecoptera y Trichoptera en el caso de ELPT, quienes son considerados los grupos menos tolerantes a la contaminación; es decir, para este último, las especies del orden Ephemeroptera se cambian por especies de la familia Elmidae del orden Coleoptera (20).

Los valores que se obtienen para este índice se confrontan con una tabla de categorías de calidad del agua (Tabla 3) de la misma manera que con el BMWP. Estos índices se calcularon de manera complementaria con el objetivo de dar soporte o ratificar los resultados.

Índice físico SVAP (Stream Visual Assessment Protocol). Protocolo de valoración visual de quebradas y CIPAV. El protocolo SVAP (8, 25)

Tabla 1. Tolerancia a la contaminación de aguas con las puntuaciones asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos, para la obtención del índice BMWP (37) para quebradas andinas de Colombia.

Orden: Familias	Puntuación
Plecoptera: Perlidae; Ephemeroptera: Oligoneuriidae; Trichoptera: Calamoceratidae; Coleoptera: Psephenidae; Diptera: Blepharoceridae; Odonata: Polythoridae	10
Ephemeroptera: Euthyplociidae; Trichoptera, Helicopsychidae, Odontoceridae, Philopotamidae, Anomalopsychidae; Coleoptera: Ptilodactylidae; Megaloptera, Corydalidae	9
Ephemeroptera: Leptophlebiidae, Polymitarciidae, Caenidae; Trichoptera: Leptoceridae, Hidrobiosidae, Xiphocentronidae, Hydroptilidae; Odonata: Gomphidae	8
Ephemeroptera: Leptohiphidae; Trichoptera, Glossosomatidae, Polycentropodidae; Coleoptera: Elmidae; Odonata: Aeshnidae, Calopterygidae	7
Coleoptera: Elmidae, Scyrtidae; Odonata: Coenagrionidae; Diptera: Simuliidae; Hemiptera: Corixidae, Gerridae, Veliidae; Gasteropoda: Ancylidae	6
Ephemeroptera: Baetidae; Trichoptera: Hydropsychidae; Coleoptera: Staphylinidae; Odonata, Libellulidae; Hemiptera: Naucoridae; Diptera: Tipulidae, Muscidae	5
Coleoptera: Curculionidae, Crysomelidae, Hydrophilidae, Gyrinidae; Diptera: Tabanidae, Ceratopogonidae, Psychodidae, Dixidae, Empididae; Hemiptera: Belostomatidae; Lepidoptera: Pyralidae, Tricladida, Planariidae; Gasteropoda: Planorbidae, Lymneidae, Thiaridae	4
Coleoptera: Dytiscidae; Hemiptera: Hydrometridae; Gastropoda: Physidae, Bivalvia, Sphaeriidae, Hirudinea, Glossiphonidae	3
Diptera: Chironomidae, Culicidae, Syrphidae	2
Oligochaeta: Tubificidae	1

Tabla 2. Rangos de clasificación del índice biótico BMWP según Zúñiga y Cardona (37).

Categoría	Rango
Aguas muy limpias	> 120
Aguas no alteradas de modo sensible	101-120
Aguas con evidencia de algunos efectos de contaminación	61-100
Aguas contaminadas	36-60
Aguas muy contaminadas	16-35
Aguas fuertemente contaminadas	<15

evalúa el hábitat físico de un río o quebrada mediante la asignación de puntajes entre uno y diez (Tabla 4). Para esta evaluación se usan más de 15 parámetros que en ciertos casos pueden excluir uno o más de éstos, cuando no se aplica a un sitio. El proceso consiste en calificar estos 15 parámetros aplicando altos puntajes (9,0 a 10) para ríos

o quebradas que tienen condiciones sanas, y bajos puntajes (2,2 a 1) para ríos o quebradas en mal estado. El protocolo CIPAV (11) por su parte, es una evaluación muy similar al que propone el SVAP, tiene en cuenta criterios muy similares y fue diseñado por el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria, para la evaluación de corrientes de agua de bajo gradiente en las zonas Andinas de Colombia (11). Ambos protocolos SVAP y CIPAV usan los mismos criterios y puntajes.

Índice de similitud de Bray Curtis. Para combinar la información proporcionada por el método de ordenación, se realizó un dendrograma (aglomeración por ligamiento promedio bajo el algoritmo de UPGMA) a partir de la matriz de similitud mediante el Índice de Bray-Curtis (22), de acuerdo

Tabla 3. Rangos de clasificación para los índices bióticos EPT y ELPT (20).

Categoría	Rango
Sin impacto	> 10
Levemente impactado	6-10
Moderadamente impactado	2-5
Severamente impactado	0-1

Tabla 4. Rangos de clasificación de los índices físicos de valoración visual SVAP/CIPAV (11).

Categoría	Rango
Óptimo	9,0-10
Subóptimo	7,5- 8,9
Aceptable	6,1-7,4
Pobre	6,0-2,3
Deficiente	1,0-2,2

a la siguiente fórmula: $D_{1,2} = \sum qi$, donde $D_{1,2}$ es la similaridad entre las muestras 1 y 2 y qi es la menor de las abundancias relativas de la especie i . D puede variar de 0 a 1, indicando valores $> 0,6$ de muestras replicadas. La disimilaridad de Bray-Curtis entre tramos es 1 menos la Similaridad de Bray-Curtis entre los tramos. Cada taxón que no es idéntico en las dos muestras contribuye a una parte de la disimilaridad entre lugares.

Análisis de datos. Con las variables de interés, cuya naturaleza es cuantitativa, se estimaron los intervalos de confianza, con un coeficiente de confianza del 95% y a través del estadístico de prueba t , se definieron, con cada una de las variables de interés, las diferencias entre las fincas Certificadas y No Certificadas, utilizando el paquete estadístico SAS v. 9.3. Para respaldar los resultados se realizó una matriz de correlaciones con el coeficiente de Pearson (P de r) para cuantificar la influencia de cada variable sobre las demás.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diversidad y abundancia de macroinvertebrados acuáticos. En total se recolectaron 11.244 ejemplares de macroinvertebrados acuáticos durante los dos muestreos (cosecha y no cosecha de café) para los dos departamentos (Tabla 5), distribuidos en 35 órdenes, 114 familias y 352 morfoespecies o posibles especies. Algunos de éstos se ilustran en la Figura 1. Dentro de este grupo de especímenes recolectados, cerca del 14% corresponden a organismos semiacuáticos o asociados a la vegetación ribereña. Es válido mencionar que la mayor proporción (abundancia) de organismos se recolectó en los puntos de muestreo de “origen” en el departamento de Santander y de manera contraria ocurrió en Cundinamarca. Este resultado está relacionado con las características físicas del entorno, debido a la significativa atención que los propietarios ponen en estos puntos, puesto a que es justo del origen de donde obtienen el abastecimiento para las labores de la finca, esto quiere decir que para los propietarios éste es el punto de interés y en donde enfocan el cuidado de su ecosistema acuático, lo cual se ve reflejado en mejores valores de SVAP en esos puntos de muestreo.

Se observó en la mayoría de las fincas CE y NC que la cobertura de dosel, el manejo del borde ripario y el cuidado general del entorno decrece en la medida en que se aleja del punto de origen, de tal manera que el cauce restante carece de interés en algunas fincas.

Debido a este comportamiento, en el 35% de los cuerpos de agua de las fincas No Certificadas y el 33% de las fincas Certificadas en Santander, está ausente la escorrentía o cauce, existen transformaciones severas de ambientes lóticos a lénticos, por la conversión

Tabla 5. Cantidad de macroinvertebrados acuáticos recolectados en cada departamento para cada muestreo, durante época de cosecha y no cosecha de café.

Departamento	Cundinamarca									
	Cosecha				No Cosecha				Total	
Época de muestreo	Final		Origen		Final		Origen			
Punto de muestreo	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza
Parámetro	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza
Fincas Certificadas	1.038	122	888	87	1.296	132	707	143	3.934	121
Fincas No Certificadas	783	86	540	82	1.169	65	551	99	3.043	83
Total general	1.821	208	1.428	169	2.465	197	1.258	242	6.977	204

Departamento	Santander									
	Cosecha				No Cosecha				Total	
Época de muestreo	Final		Origen		Final		Origen			
Punto de muestreo	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza
Parámetro	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza
Fincas Certificadas	518	100	967	119	403	60	648	65	2.536	86
Fincas No Certificadas	359	73	624	66	225	45	529	57	1.731	62
Total general	877	173	1.591	185	628	105	1.177	122	4.267	148

Gran Total									11.244	352
-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	---------------	------------



Figura 1. Algunos macroinvertebrados recolectados. **a.** Coleoptera: Hydrophilidae, larva. **b.** Plecoptera: Perlidae, ninfa. **c.** Ephemeroptera: Baetidae, ninfa. **d.** Ephemeroptera: Leptohyphidae, ninfa. **e.** Coleoptera: Elmidae, larva. **f.** Trichoptera: Philopotamidae, larva. **g.** Diptera: Simuliidae, larva. **h.** Coleoptera: Dityscidae, adulto. **i.** Coleoptera: Gyrinidae.

de los cuerpos de agua en pocetas, y por este motivo carecen de punto de muestreo “final”, lo que se refleja en un número menor de capturas de macroinvertebrados para estos puntos de muestreo. Para los análisis estadísticos se omitieron los cuerpos de agua en los que la recolección se limitó al punto de muestreo “origen” en el departamento de Santander.

Aunque ésta es una práctica generalizada en los dos departamentos donde se realizó el estudio y pese a que en Cundinamarca las condiciones físicas del entorno en algunos cuerpos de agua no alcanzan valores óptimos, las transformaciones de los cuerpos de agua no implican la eliminación del cauce, permitiendo la escorrentía y oxigenación del agua en su recorrido, lo que favorece el mantenimiento de los organismos que los habitan.

Consecutivamente, se recolectó un mayor número de ejemplares en Cundinamarca para la época de no cosecha y en Santander para la época de cosecha. Es necesario resaltar que los muestreos coincidieron con épocas de características climáticas diferentes, de tal manera que los muestreos de Cundinamarca se llevaron a cabo en época de ocurrencia del Fenómeno de La Niña y en la etapa de normalización de las lluvias. En contraste, los muestreos de Santander se realizaron en épocas más secas y con déficit hídrico según lo documentado por los datos de precipitación promedio mensual, sin embargo los cambios drásticos en los regímenes climáticos no deben afectar de forma severa los patrones normales y la dinámica de estos cuerpos de agua si un buen entorno físico está presente para amortiguarlos (9).

La considerable disminución en las precipitaciones durante los muestreos en Santander se reflejó de manera importante en la disminución de los caudales y en la

captura de especímenes. Sin embargo, los índices de calidad del agua fueron evaluados y calibrados a partir de tres cuerpos de agua considerados puntos de referencia por ser, de acuerdo a las valoraciones visuales, los menos impactados y de corrientes naturales. En estos puntos de referencia se encontraron aproximadamente el 90% de las familias contempladas por el BMWP, incluyendo categorías de la seis a la diez (menos tolerantes a la contaminación).

Análisis fisicoquímicos e índices bióticos de calidad del agua. En total se consideraron 24 variables para las evaluaciones realizadas. A continuación se relacionan las más relevantes para los resultados. Los valores correspondientes a cada finca para la totalidad de variables se relacionaron de manera individual. La realización del estadístico de prueba *t* - Student arrojó diferencias significativas entre los dos grupos de datos (fincas Certificadas - CE y No Certificadas - NC) para los dos departamentos, en algunas variables que determinan la calidad del agua y del entorno físico (Tabla 6).

Cundinamarca fue el departamento que presentó mayor cantidad de variables cuyos resultados en cuanto a la construcción de los intervalos de confianza y el estadístico de prueba *t*, indicaron diferencias significativas entre las fincas Certificadas y No Certificadas. De este modo, sobresalen las variables BMWP, EPT y ELPT, que determinan la calidad del agua con base en la tolerancia de la comunidad de macroinvertebrados a la contaminación. No obstante, para Santander, de las variables mencionadas, se encontraron diferencias en los promedios para las fincas Certificadas con respecto a sus pares No Certificadas en BMWP, para el muestreo de no cosecha. Se destaca que los valores obtenidos para estas variables fueron más altos en Cundinamarca que en Santander (Figura 2).

Tabla 6. Valores promedio y error estándar (E.E.), para algunas de las variables de interés en fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca y Santander.

Variable	Cundinamarca				Santander			
	Certificadas		No Certificadas		Certificadas		No Certificadas	
	Promedio	E.E.	Promedio	E.E.	Promedio	E. E.	Promedio	E. E.
Altitud	1564,92 ±	24,14	1539,31±	23,94	1664,57±	37,73	1688,64±	34,61
Dureza	16,30±	3,00	95,07±	77,10	10,56±	3,04	2,22±	0,31
Alcalinidad	197,71±	170,77	35,54±	8,37	115,67±	28,69	36,15±	7,75
Oxígeno disuelto	6,45±	0,44	4,74±	0,60	3,39±	0,63	3,32±	0,51
Temperatura	20,05±	0,24	20,13±	0,22	19,96±	0,27	19,41±	0,26
pH	5,64±	0,14	5,59±	0,19	6,26±	0,22	5,99±	0,15
Sólidos suspendidos	27,69±	7,97	23,60±	5,77	0,14±	0,03	0,10±	0,02
Canal activo mínimo	0,80±	0,26	0,82±	0,23	0,77±	0,17	1,16±	0,22
Canal activo máximo	4,53±	2,23	7,92±	3,97	1,69±	0,25	2,04±	0,32
Caudal	0,20±	0,03	0,12±	0,02	0,06±	0,01	0,06±	0,01
Velocidad	0,31±	0,04	0,33±	0,05	0,16±	0,03	0,18±	0,08
Sólidos totales	554,83±	101,26	4,81±	59,22	3,01±	0,94	30,36±	28,07
Color verdadero	31,00±	20,76	93,38±	63,62	27,62±	7,93	41,93±	19,45
DQO	39,81±	12,61	25,99±	7,80	20,33±	3,06	39,90±	7,84
DBO	5,36±	0,22	5,83±	0,23	10,41±	2,03	11,74±	2,68
SVAP	8,84±	0,32	6,56±	0,44	7,78±	0,51	5,59±	0,54
Cobertura de dosel	74,00±	2,33	57,08±	5,81	76,20±	4,45	57,65±	5,49
BMWP	118,46±	7,94	71,73±	7,62	65,00±	7,14	48,87±	6,18
EPT	6,12±	0,62	4,34±	0,56	3,54±	0,73	2,18±	0,50
ELPT	6,23±	0,68	3,76±	0,60	4,83±	0,97	3,23±	0,63

Por otra parte, la variable SVAP que evalúa la integridad física del entorno de los cuerpos de agua, arrojó diferencias estadísticas entre las fincas de las dos condiciones, demostrando mejores escenarios ambientales para las fincas Certificadas y percibiéndose similitud en los valores para los dos departamentos (Figura 3). Pese a que no se ilustran los intervalos de confianza para los valores de la evaluación del CIPAV, cabe anotar que sus resultados corroboran y respaldan los obtenidos con el SVAP, debido a que los valores fueron muy similares en estas dos variables, pues ambos usan los mismos criterios y puntajes.

Dentro de los criterios contemplados en la Norma de Agricultura Sostenible (28) para la conservación de ecosistemas acuáticos, adoptado por la certificadora ambiental RA, se contempla que los ecosistemas naturales tanto acuáticos como terrestres deben ser protegidos, conservados y recuperados mediante un programa de conservación. Igualmente la protección de los cauces naturales, mediante el establecimiento de zonas de protección en las riberas de ríos, arroyos, quebradas, lagos, humedales y en las orillas de otros cuerpos naturales de agua (entre 5 y 20 m) con vegetación riparia y cobertura de dosel ribereña que permitan la

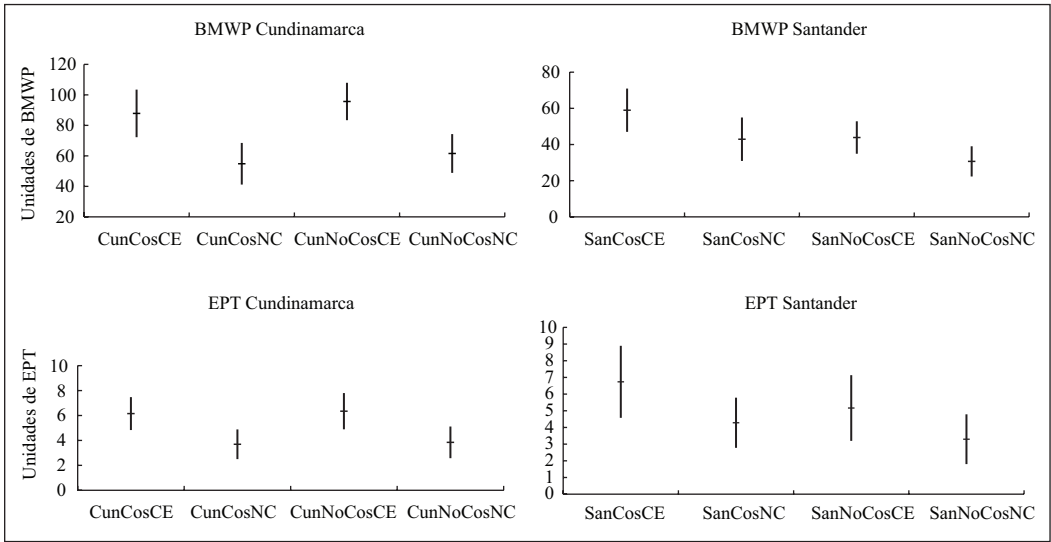


Figura 2. Intervalos de confianza para los índices bióticos BMWP y EPT en fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca y Santander, en época de cosecha y no cosecha.

estabilidad y la integridad de los ecosistemas acuáticos, sin realizar alteraciones del cauce, canalizaciones artificiales, desviaciones del mismo, represamientos artificiales y extracciones de material.

Dentro de las medidas para evitar la contaminación de las aguas están aquellas relacionadas con no realizar descargas de aguas residuales industriales o domésticas, desechos orgánicos o inorgánicos, ni basuras en cuerpos naturales de agua, sin demostrar que las aguas vertidas cumplen con los requisitos legales respectivos, y que sus características físicas y bioquímicas no degraden la calidad del cuerpo receptor de agua. Todos estos aspectos que pueden generar impactos negativos a los ecosistemas acuáticos y naturales pudieron ser medidos en cada una de las fincas evaluadas mediante el protocolo SVAP, complementado con los índices bióticos BMWP, EPT, ELPT y los análisis fisicoquímicos de calidad de aguas.

Consecuentemente, variables fisicoquímicas de vital importancia para el mantenimiento de la biota como el oxígeno disuelto presentó diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas para Cundinamarca y Santander, respectivamente (Figura 3).

Los intervalos de confianza establecidos para la variable de oxígeno disuelto señalan diferencias significativas en favor de las fincas Certificadas de Cundinamarca, no obstante en Santander, no se encuentran estas diferencias. Es importante resaltar que los valores más altos de oxígeno disuelto obtenidos en Santander son similares a los que se observan en Cundinamarca para las fincas No Certificadas. Esto señala que aún en el mejor de los casos, no se están alcanzando niveles óptimos de saturación de oxígeno en las aguas para las fincas evaluadas en este departamento (Figura 3).

En cuanto a las variables fisicoquímicas restantes tan solo se obtuvieron diferencias

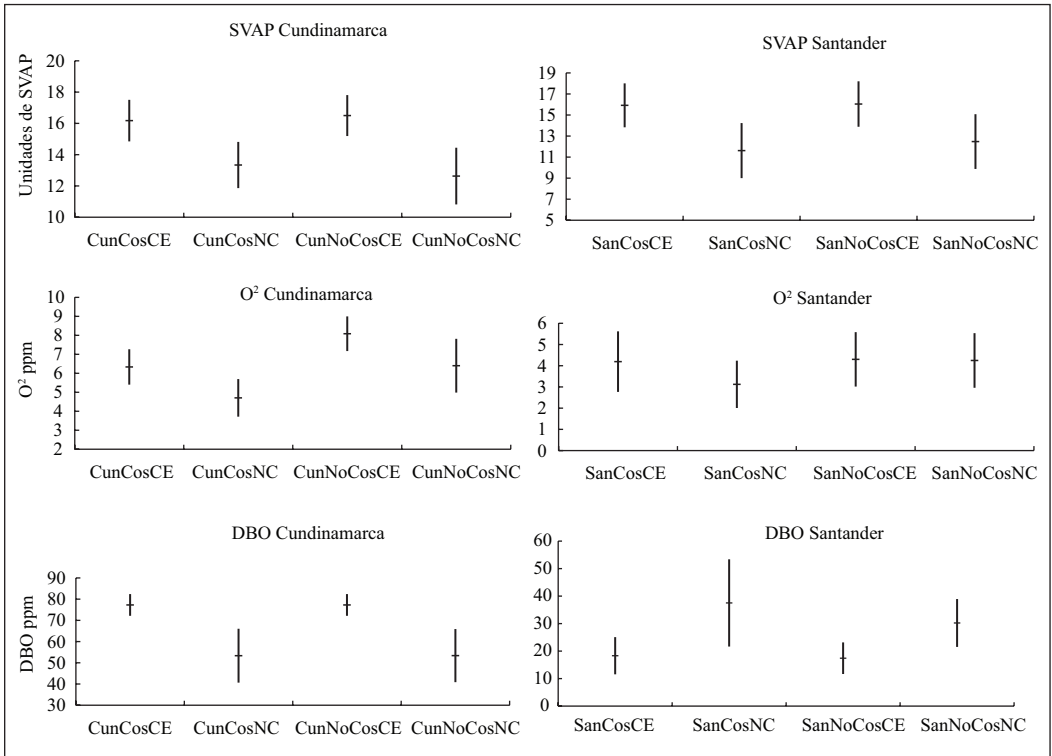


Figura 3. Intervalos de confianza para los índices fisicoquímicos SVAP, DBO y O² en fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca y Santander, en época de cosecha y no cosecha.

significativas estadísticamente en dureza y alcalinidad a favor de las fincas Certificadas de Santander. En general, tanto para las fincas Certificadas como No Certificadas en los dos departamentos, los valores de estas variables se encontraron en rangos normales (Tabla 6). La alcalinidad, está indicando valores bajos e intermedios según la escala de Kevern (1) para las fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca e igualmente para las fincas Certificadas de Santander, diferenciándose el grupo de las No Certificadas de este mismo departamento, cuyos valores más altos se encuentran en el rango de alcalinidad alta. En la prueba de dureza, el límite superior más alto fue de 34,6 mg.L⁻¹ de CaCO₃, encontrado en las fincas No Certificadas, y

de 27,3 mg.L⁻¹ en las fincas Certificadas. Estos valores, aunque son dependientes de diversos factores, se encuentran en rangos normales en todas las muestras. Dichos resultados son concordantes con los obtenidos por Rodríguez (33) quien demuestra valores bajos de dureza cuando hay niveles inferiores a 1.200 mg.L⁻¹ de DQO. Así mismo, los valores de alcalinidad presentaron una gran variabilidad al interior de los grupos de datos, no obstante, el límite superior encontrado para las fincas No Certificadas fue cercano a 300 puntos, más alto que el límite superior de las fincas Certificadas. La literatura señala que niveles inferiores a 200 pueden sugerir que el cuerpo de agua es muy vulnerable a contaminación por sustancias de bajo pH,

entre las que se encuentran las aguas mieles o residuales del café; aunque este caso no fue encontrado en ninguno de los dos grupos, sí es importante mencionar que para las fincas Certificadas, el límite inferior es más cercano a este valor y aunque puede estar mostrando aguas más puras, también señala cuerpos de agua más vulnerables, que requieren más atención y cuidado para evitar contaminación, ya que las aguas del beneficio del café son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente, como pH bajo, acidez alta y concentraciones de materia orgánica altas, correspondiente a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (35).

Al examinar los aspectos que tienen en cuenta las valoraciones visuales realizadas, se puede decir que evalúan propiamente el cumplimiento de los criterios críticos de la Norma de Agricultura Sostenible en cuanto a la conservación de los cuerpos de agua y de esta manera, los resultados obtenidos demuestran que la certificación por sí sola no garantiza la calidad del agua, sino el cumplimiento como tal de la norma implícita con la certificación. El SVAP y CIPAV evalúan directamente características físicas tangibles que deben estar presentes por el cumplimiento de la NAS (Norma de Agricultura Sostenible).

Análisis de similitud de Bray Curtis. Los cuerpos de agua que reflejan el cumplimiento de la norma NAS obtienen mejores calificaciones de SVAP/CIPAV, y de igual manera, estas fuentes de agua tienen en común muchos grupos de macroinvertebrados. Esta premisa se corroboró al realizar un análisis de similitud de Bray Curtis, en donde se contrastaron unidades de muestreo con especies encontradas y sus abundancias relativas, encontrando una tendencia a agrupar aquellos cuerpos de agua

que comparten características similares que les confieren determinados rangos de calidad de hábitat (Figura 4a).

Al parecer, en cada rango de calidad de hábitat existen comunidades de macroinvertebrados comunes por las cuales se están agrupando estos sitios de muestreo. Estas similitudes solo fueron encontradas para Cundinamarca, ya que al realizar el mismo análisis para las fincas de Santander no se observaron agrupaciones o tendencias importantes (Figura 4b).

Existen diferentes tipos de factores que originan los patrones del hábitat que controlan la distribución de las especies acuáticas y ribereñas, íntimamente relacionadas. Algunos de los factores que inciden en el hábitat son: La velocidad de la corriente, la profundidad y la temperatura, las cuales en la mayoría de los casos se mantienen y protegen por la cobertura vegetal; así como el contenido de oxígeno disuelto, el sustrato, la turbidez, la humedad y saturación del suelo, entre otras condiciones físicas, químicas y bióticas (31). En tal sentido, el manejo y conservación de la integridad del ecosistema no puede enfocarse exclusivamente hacia la corriente, sino que tiene que considerar integralmente su zona ribereña y todo su entorno físico.

De acuerdo a lo anterior, una posible explicación al resultado obtenido para Santander puede asociarse con el déficit hídrico ocurrido para los muestreos, ya que los caudales, velocidades y consecuentemente la oxigenación de los mismos se vieron modificados o afectados por estos períodos sin precipitaciones.

Índice de diversidad de Simpson. El índice de diversidad de Simpson o el inverso de Simpson, en este caso, se utilizó para medir la calidad del agua, considerando que un

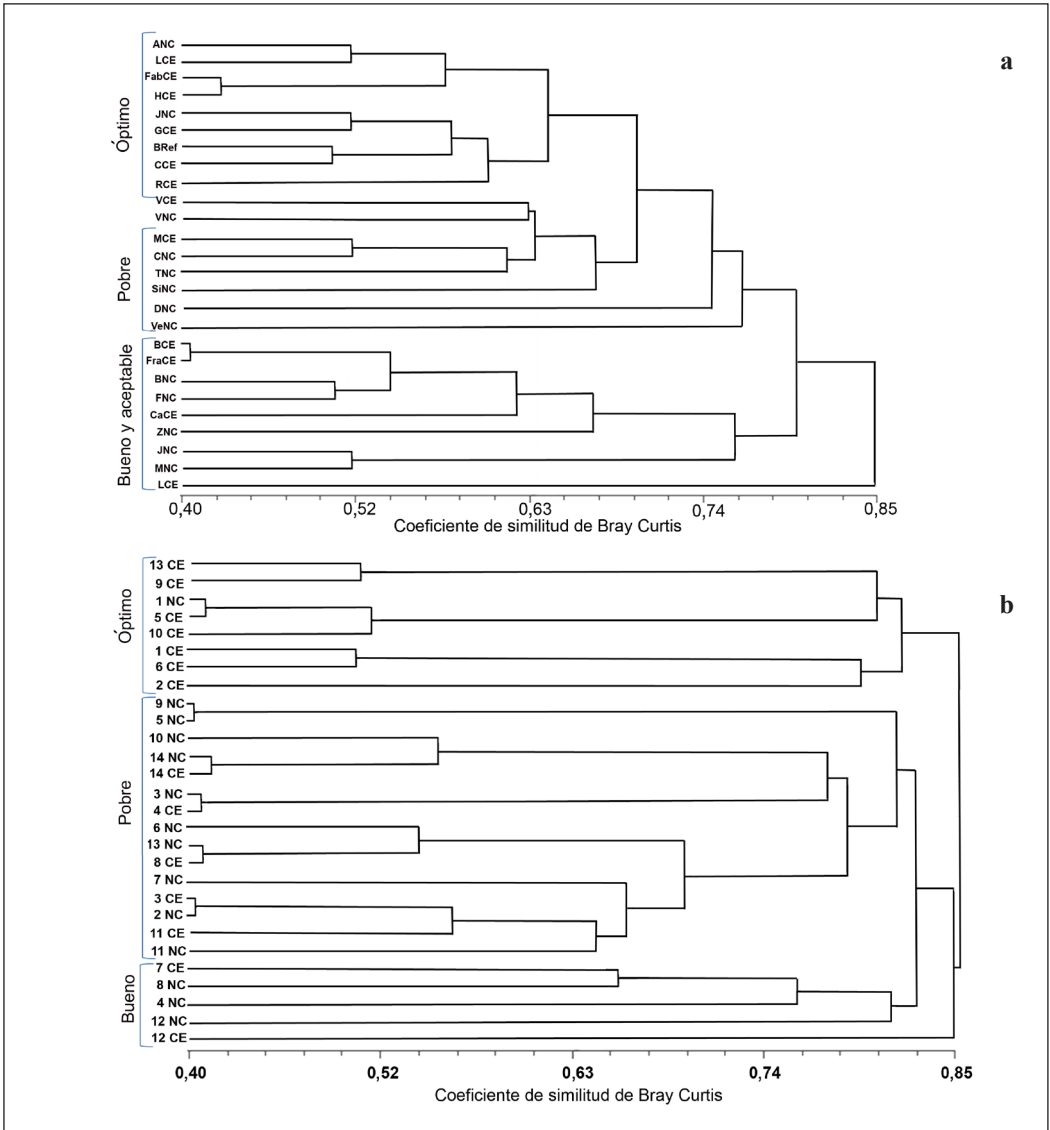


Figura 4. Dendrograma de similitud por medio del coeficiente de Bray Curtis. Tendencia a agrupar fincas de acuerdo a su categoría de SVAP para (a.) Cundinamarca y (b.) Santander.

hábitat no contaminado es caracterizado por una gran cantidad de especies, y no está representado por una o unas pocas especies que se muestren dominantes o más abundantes que las demás que componen la comunidad.

Después de examinar la diversidad en una gama de quebradas contaminadas y no contaminadas, diversos autores han sugerido que un valor de $1/D$ mayor que 16, indica aguas limpias, valores entre 10 y 15 son característicos de condiciones moderadamente

contaminadas y valores menores a 9 indican condiciones fuertemente contaminadas. Para este índice el estado óptimo de un ecosistema es aquel en el que las especies encontradas tienen una abundancia proporcional y no hay una sola o unas pocas especies que estén dominando en la comunidad. Para el caso del presente estudio, se encontraron mayores valores del inverso de Simpson para algunas fincas No Certificadas con respecto a su par certificado (Figura 5). Estos resultados sugieren una mejor estructura en las comunidades de macroinvertebrados en esos cuerpos de agua y por lo tanto mejor calidad del mismo; sin embargo, al analizar la estructura de abundancias de las fincas No Certificadas se encontró que dentro de las familias más abundantes en estas comunidades de macroinvertebrados, dominan grupos de baja categoría en el BMWP, es decir, dominan grupos que son más tolerantes a la contaminación (Figura 6).

En contraste, al examinar la estructura de abundancias para algunas de las fincas Certificadas que presentan valores de diversidad

de Simpson menores con respecto a las No Certificadas, se encontraron dentro de las familias más abundantes aquellas menos tolerantes a la contaminación (Figura 7). Lo anterior demuestra que el uso de índices de diversidad basados en la abundancia relativa de las especies que conforman una determinada comunidad no es lo más conveniente, ya que discrimina o señala como poco diversos los cuerpos de agua con dominancia alta de unas pocas especies, aun cuando esto sea una condición natural y refleje una estructura saludable.

Gremios funcionales. La dominancia de determinados grupos de macroinvertebrados bentónicos refleja el buen estado de un ecosistema acuático. Según la Teoría del Río Continuo (34), los cuerpos de agua de cabecera están influenciados fuertemente por la vegetación ribereña y cobertura de dosel que le aportan grandes cantidades de detritos (hojarasca, raíces, ramas, troncos); conforme aumenta el tamaño del cuerpo de agua se reduce el aporte de insumos orgánicos de origen terrestre,

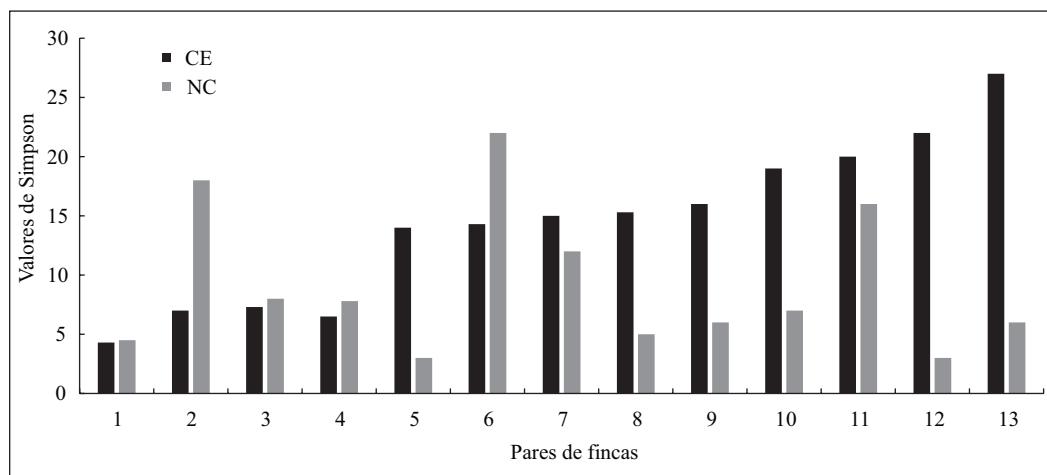


Figura 5. Valores del inverso de Simpson para cada bloque (Fincas Certificadas-CE y No Certificadas-NC) en Cundinamarca.

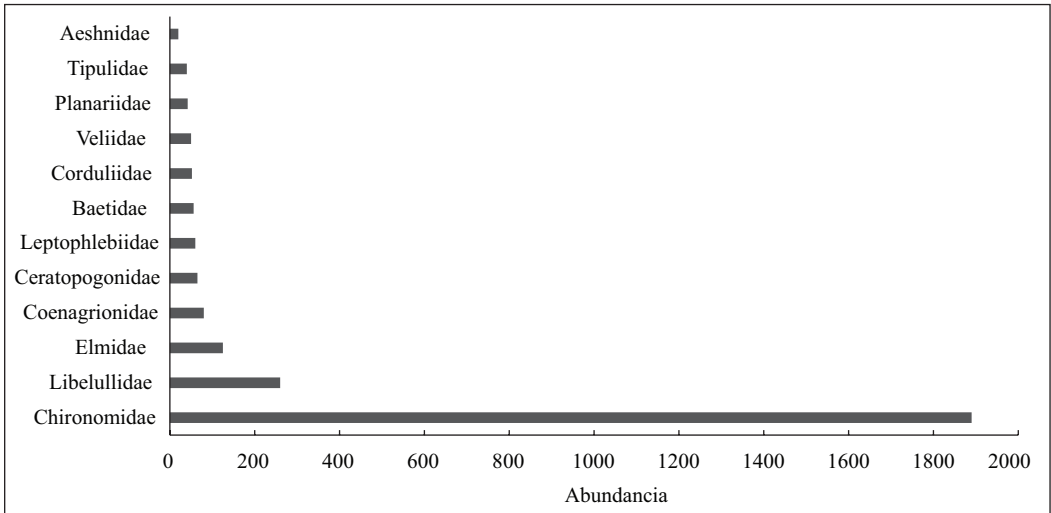


Figura 6. Familias más abundantes en un cuerpo de agua de una finca No Certificada con predominio de grupos que son más tolerantes a la contaminación.

es decir, del entorno del cuerpo de agua y así mismo se incrementa la producción primaria. De esta manera, diferentes grupos o gremios dominan en cada rango del cuerpo de agua obedeciendo al gradiente de concentración de nutrientes y materia orgánica. De acuerdo a lo anterior, se establece que en los ríos o cuerpos de agua de primer a tercer orden dominan (en términos de biomasa) los grupos de colectores y trituradores que se encargarán de transformar y hacer aprovechables los nutrientes para las comunidades de organismos que se encuentran en las partes bajas de los ríos (cuerpos de agua de cuarto grado en adelante). En síntesis, en los cuerpos de agua de primer a tercer orden dominan los colectores y en menor proporción trituradores. La proporción de colectores disminuye en los cuerpos de agua de cuarto orden y se incrementa la de raspadores (Figura 8).

Análisis de correlación de Pearson (P de r). La totalidad de las fincas Certificadas

no alcanzaron valores apropiados de calidad de agua, y de igual manera no todas las fincas No Certificadas obtuvieron valores bajos de las variables evaluadas y existe una proporción que arroja valores significativos de calidad según los índices bióticos y físicos (Figuras 9 y 10).

Se observó que las variables de calidad del agua medidas con base en la comunidad de macroinvertebrados (BMWP, EPT y ELPT) están influenciadas o correlacionadas por casi todas las otras variables de manera positiva o negativa. De acuerdo a esto, variables como el oxígeno disuelto, el SVAP (características físicas), la cobertura de dosel, el DBO, los sólidos suspendidos, entre otros, intervienen en la calidad del agua significativamente. De esta manera se demuestra que para la integridad de los ecosistemas de agua dulce, es necesario el control de la contaminación, pero no es suficiente, es decir, no solo es importante el cuidado de la corriente sino de todo el entorno físico del ecosistema.

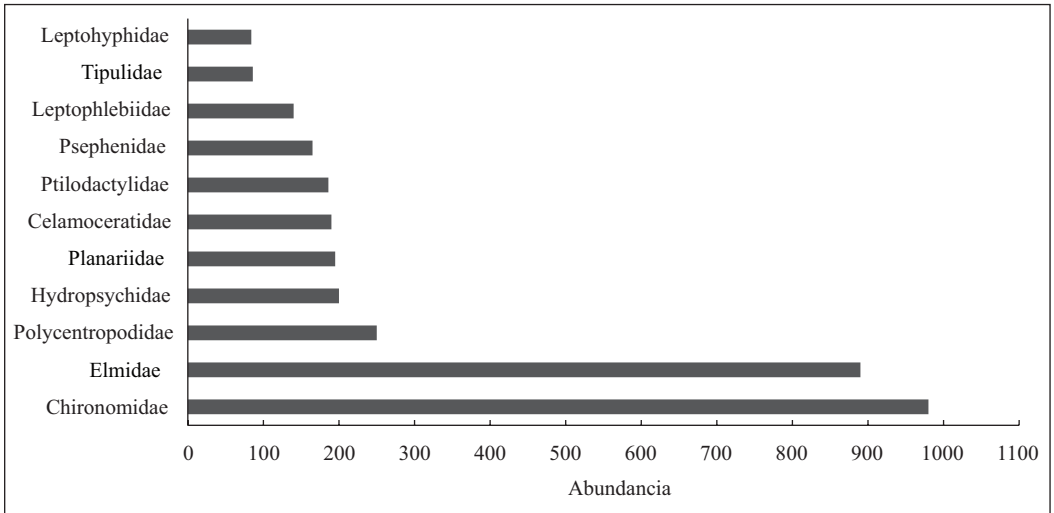


Figura 7. Familias más abundantes en un cuerpo de agua de una finca Certificada con predominio de grupos que son menos tolerantes a la contaminación.

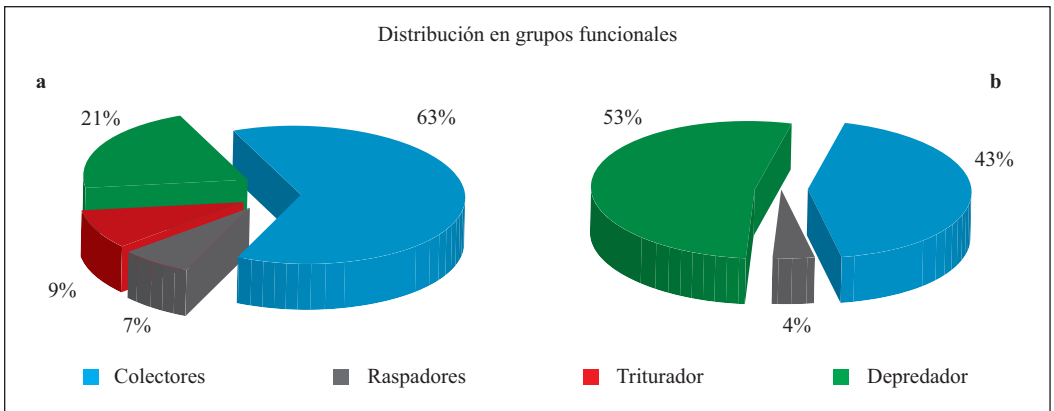


Figura 8. Distribución de grupos funcionales en los cuerpos de agua de primer orden muestreados. **a.** Abundancias generales de grupos funcionales; **b.** Caso atípico de abundancias encontrado en una de las fincas No Certificadas.

Por otra parte, se puede inferir que la calidad del entorno de un cuerpo de agua (SVAP) contribuye a mantener adecuados niveles de oxígeno disuelto, como lo demuestra la correlación positiva del 40% que existe entre estas dos variables. Consecuentemente, los valores de DBO (contaminación orgánica susceptible de ser degradada por

microorganismos), sólidos suspendidos y color del agua, son más bajos en la medida que el cuerpo de agua cuenta con buen entorno físico, lo cual incluye el mantenimiento de bordes de vegetación riparia y barreras, que probablemente evitan y amortiguan el efecto de los contaminantes por las prácticas agrícolas o la intervención antrópica.

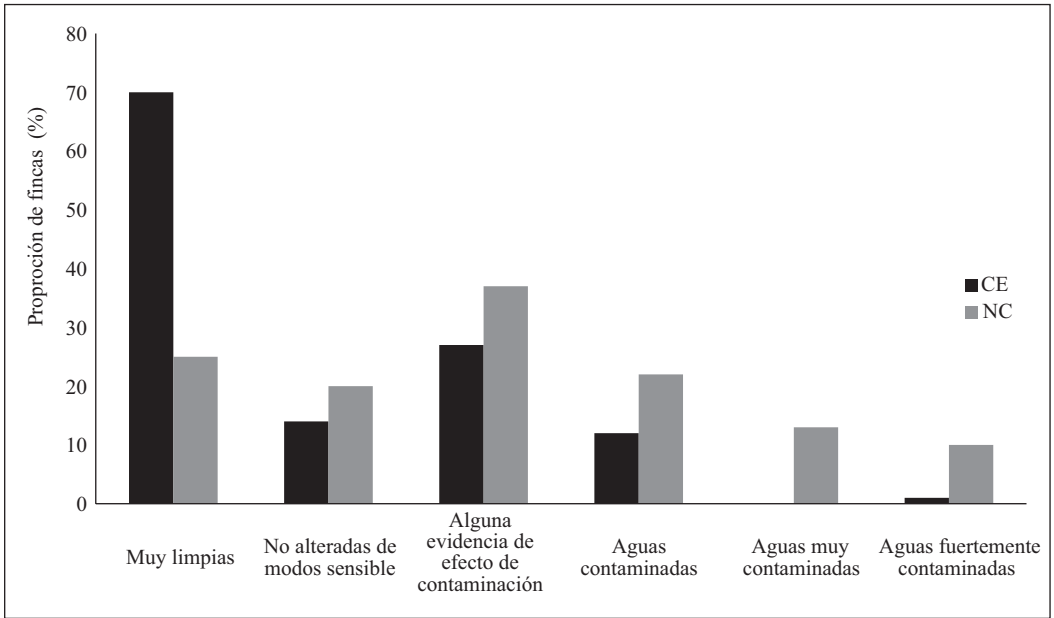


Figura 9. Proporción de Fincas Certificadas (CE) y No Certificadas (NC) en las categorías de calidad de aguas propuestas para el índice BMWP, con base en la comunidad de macroinvertebrados en fincas de Cundinamarca.

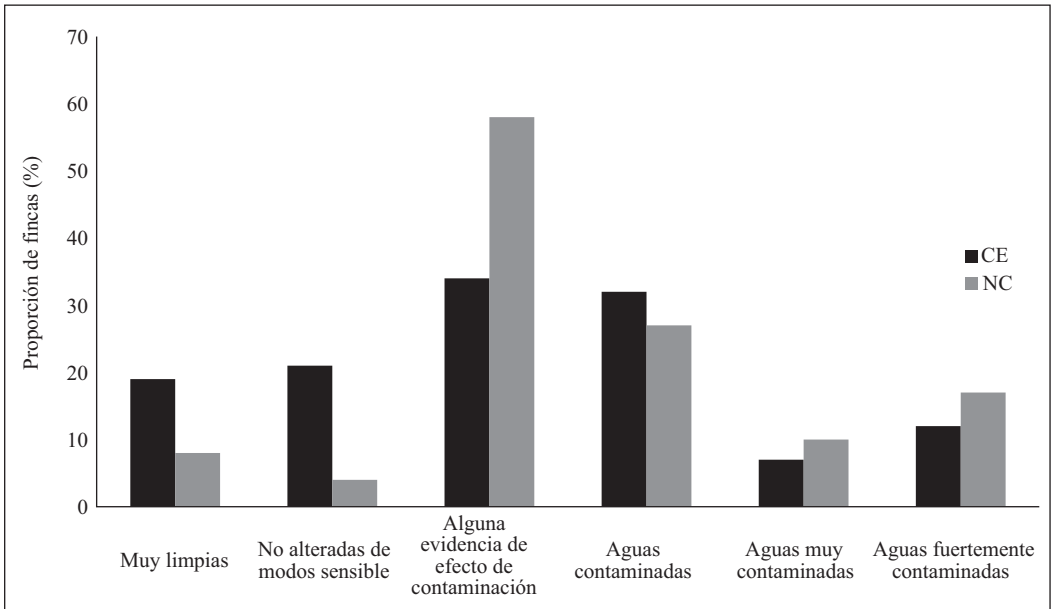


Figura 10. Proporción de Fincas Certificadas y No Certificadas en las categorías de calidad de aguas propuestas para el índice BMWP con base en la comunidad de macroinvertebrados en fincas de Santander.

De la misma manera que con el SVAP/ CIPAV, algunas variables cuyos valores bajos pueden señalar fuentes de contaminación, tienen una correlación inversa con los índices de calidad de agua BMWP, EPT y ELPT, lo que indica que este tipo de contaminación ejerce una presión directa sobre la comunidad de macroinvertebrados menos tolerantes a la contaminación. Así mismo, sobre los macroinvertebrados se observa una presión directa por la contaminación orgánica como lo señala la correlación negativa (-32%) entre estos últimos y la variable DBO.

De acuerdo a esto se deduce que los valores bajos que obtienen algunas fincas, de manera independiente a la certificación, obedecen a las transformaciones o presión ejercida sobre el cauce. En la mayoría de los casos estas transformaciones consisten en la interrupción parcial o total de la escorrentía o cauce, cambios de condición lítica a léntica, pérdida de caudal por infiltración causada al desviar el cauce sobre terrenos inadecuados.

Adicionalmente, las transformaciones mencionadas conllevan a la acumulación de materia orgánica (por la falta de circulación) que inicia un proceso de descomposición consumiendo también una buena parte del oxígeno disuelto presente en el agua, lo que se refleja en el incremento de los valores de DBO y otras características fisicoquímicas (como los sólidos en suspensión, la dureza, entre otros), los cuales afectan de manera directa las comunidades de macroinvertebrados cuyas especies menos tolerantes desaparecen (37), quedando representados por aquellos grupos que soportan en mayor grado la contaminación y que arrojan bajos valores de BMWP, indicando una baja calidad del agua.

Se puede concluir que:

Los macroinvertebrados acuáticos son importantes como indicadores de las condiciones ambientales, ya que su presencia refleja las condiciones que prevalecen en el ambiente donde viven, como las condiciones físicas, químicas y bióticas, además de las diferentes presiones sobre los ecosistemas naturales (19, 32). En este estudio las familias de macroinvertebrados acuáticos que fueron más sensibles y que mejor respondieron a los cambios de perturbación de hábitat y a la contaminación del agua en Santander y Cundinamarca fueron las familias Perlidae (Plecoptera), Oligoneuriidae, Baetidae, Leptohyphidae, Leptophlebiidae, Euthyplociidae (Ephemeroptera), Calamoceratidae, Helicopsychidae, Odontoceridae, Philopotamidae, Anomalopsychidae, (Trichoptera), Psephenidae, Ptilodactylidae, Elmidae (Coleoptera), Blepharoceridae (Diptera), Polythoridae, Gomphidae, Aeshnidae, Calopterygidae (Odonata) y Corydalidae (Megaloptera).

La Norma de Agricultura Sostenible tiene un efecto tangible, cuantificable y positivo sobre la calidad del agua y del hábitat en un ecosistema acuático y de rivera; de tal manera que su cumplimiento contribuye con el sostenimiento de comunidades de macroinvertebrados bioindicadores. Esto puede concluirse con base en los resultados obtenidos para Cundinamarca y Santander, en donde se encontraron diferencias significativas al construir intervalos de confianza y aplicar el estadístico de prueba *t*, favoreciendo las fincas Certificadas con respecto a las No Certificadas en algunas de las variables más importantes de las 24 analizadas, como el BMWP y SVAP/CIPAV.

Sin embargo, la certificación por sí sola no es suficiente, sino que es el cumplimiento

de la norma lo que repercute en mejores condiciones y calidad de los ecosistemas acuáticos, lo cual es demostrado por la relación existente entre estas dos variables, ya que existe una correlación directa y significativa entre el cumplimiento de la norma (mantenimiento del bosque ripario, la cobertura de dosel, el cuidado del cauce, etc.) que de una manera directa es evaluado por los índices físicos SVAP y CIPAV, y la calidad del cuerpo de agua para sostener una comunidad de macroinvertebrados, la cual fue evaluada con los índices bióticos BMWP, EPT y ELPT. Estas correspondencias son corroboradas al relacionar gráficamente dos de estas variables (Figura 11). En principio, su comportamiento lineal demuestra que un incremento en el SVAP/CIPAV va acompañado de un crecimiento proporcional en la variable BMWP y viceversa. De la misma manera, las líneas de tendencia lineal (regresión lineal) demuestran la existencia de una relación directamente proporcional respaldada por

unos valores de R^2 superiores a 0,6 (Figura 11 b y d).

Estas diferencias entre las fincas Certificadas y No Certificadas demuestran las bondades de los criterios que componen la Norma de Agricultura Sostenible en cuanto a la conservación de ecosistemas acuáticos, de modo que su cumplimiento se refleja en hábitat de mejores atributos con posibilidades de sostener cuerpos de agua con buena calidad. No obstante, no se descarta la idea de sugerir un fortalecimiento de la norma, complementando las instrucciones referentes al mantenimiento de la cobertura de dosel, al respeto por el borde ripario y al uso inadecuado del recurso, evitando las transformaciones, ya que los criterios referentes a los vertimientos contaminantes, hasta donde se observó, se cumplen de manera sistemática.

En este contexto, la utilización de los macroinvertebrados bentónicos como

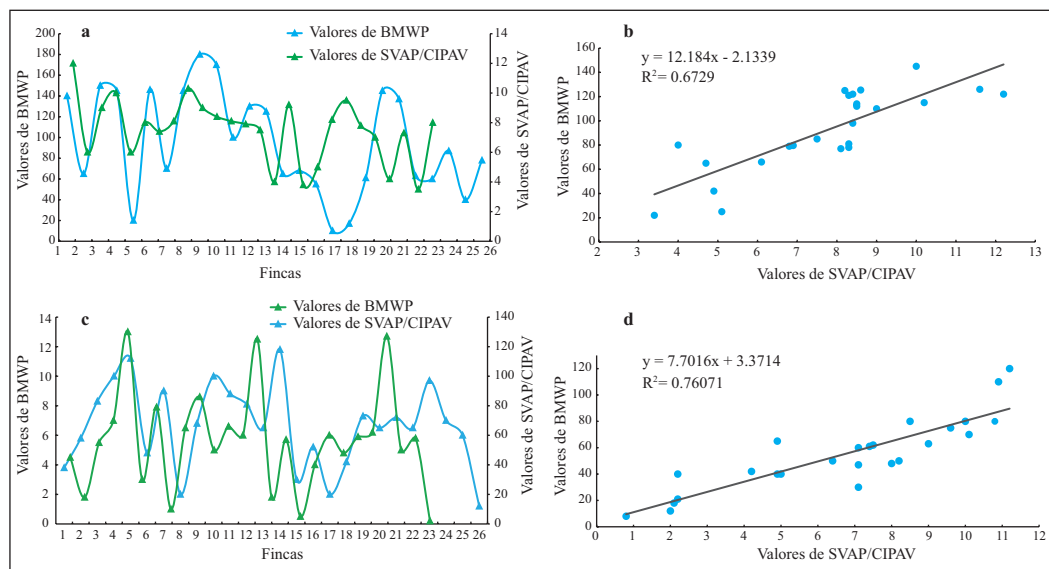


Figura 11. Graficas de correlación entre la protección de las fuentes y la calidad del agua, para las variables BMWP y SVAP/CIPAV en fincas cafeteras de Cundinamarca (a, b) y Santander (c, d).

indicadores de la alteración hidrológica y la calidad del agua, se constituye en una valiosa herramienta que permite aportar información para evaluar las interrelaciones entre los fenómenos del flujo y las respuestas bióticas, con el objeto de conservar los ecosistemas acuáticos y su biodiversidad dentro de rangos de variabilidad natural. Los índices bióticos BMWP, EPT y ELPT se establecen como instrumento viable y apropiado para la cuantificación y evaluación de la calidad del agua, en cuerpos de agua pequeños de origen andino. Así mismo, los protocolos de valoración visual representan el complemento adecuado para las evaluaciones de estos sitios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Jorge Eduardo Botero de la Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación, y Cesar Serna de la Disciplina de Economía de Cenicafé, por sus aportes en la planeación del experimento y asesoría. A David Hughell y Rebecca Butterfield de *Rainforest Alliance* por la asesoría y apoyo. A Luis Gabriel Pérez, Gustavo Zabala, Jhon Félix Trejos, José E. Gómez, Jairo Hernán Henao, colaboradores de Cenicafé, por el apoyo en la toma de datos en el campo y laboratorio, a los Comités de Cafeteros, extensionistas y caficultores de Cundinamarca y Santander, por el apoyo logístico para la recolección de muestras de macroinvertebrados acuáticos (permiso de investigación científica en diversidad biológica No. 20 del 18 de noviembre de 2009 otorgado por el Ministerio del Medio Ambiente). Esta investigación fue financiada por la Federación Nacional de Cafeteros, el Centro Nacional de Investigaciones de Café y *Rainforest Alliance* en el experimento ENT 1510 de Cenicafé en el convenio GEF/PNUD/*Rainforest Alliance* "Biodiversity Conservation in Coffee: transforming productive practices

in the coffee sector by increasing market demand for certified sustainable coffee" (PIMS 3083).

LITERATURA CITADA

1. APHA; AWWA; WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid : Díaz de Santos, 1990. 1010 p.
2. ARMITAGE, P.D.; MOSS, D.; WRIGHT, J.F.; FURSE, M.T. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of polluted running-water sites. *Water. Res.* 17(3):33-347. 1983.
3. ALBA T., J.; SÁNCHEZ O., A. Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellowell (1978). *Limnetica* 4:51-56. 1988.
4. ALBA T., J.; SÁNCHEZ O., A. Caracterización del estado ecológico de ríos mediterráneos ibéricos mediante el índice IBMWP (antes BMWP). *Limnetica* 21(3/4):175-185. 2002.
5. ALTIERI, M. Agro ecología: Bases científicas para una agricultura sustentable. La Habana : CLADES, 1997. 249 p.
6. ARCILA, O.F. Determinación de las sustancias contaminantes de las aguas del beneficio del café. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades de la disciplina de química industrial. Chinchiná : CENICAFÉ, 1975. 19 p.
7. ARCILA, O.F. Tolerancia de algunos animales acuáticos a las aguas del beneficio del café. En: CENICAFÉ. Informe final de la disciplina de química industrial. Chinchiná : CENICAFÉ, 1983. 10 p.
8. BARBOUR, M.T.; GERRITSEN, J.; SNYDER, B.D.; STRIBLING, J.B. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, Benthic macroinvertebrates and fish EPA 841-B-99.002. Washington : Environmental protection agency, 1999. 89 p.
9. BARÓN, J.; [et al.]. Sustaining healthy freshwater ecosystems: Issues in ecology. *Ecological society of America* 10:1-16. 2003.
10. BRAGA, G. Forma y equilibrio sociales: Extracto del libro tratado de sociología general de Wilfredo Pareto. Madrid : Alianza, 1980. 135 p.

11. CHARÁ, J. Manual de evaluación biológica de ambientes acuáticos en microcuencas ganaderas: Protocolo CIPAV. 2a. ed. Cali : Fundación CIPAV, 2004. 52 p.
12. CIESE. Stevens institute of technology. [En línea]. Disponible en Internet: <http://www.ciese.org/curriculum/dipproj2/es/fieldbook/oxigeno.shtml>. Consultado en Septiembre de 2007.
13. DOMÍNGUEZ, E.; FERNÁNDEZ, H. Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología. Tucumán: Fundación Miguel Lillo, 2009. 654 p.
14. ENKERLIN, E.C.; CANO, G.; GARZA, R.A.; VOGEL, E. Ciencia ambiental y desarrollo sostenible. México : International Thomson, 1997. 665 p.
15. GUERRERO, B.F.; MANJARES, H.A.; NÚÑEZ, N. Los macroinvertebrados bentónicos de Pozo azul (Cuenca del río Gaira, Colombia) y su relación con la calidad del agua. Acta biológica colombiana 8(2):43-55. 2003.
16. GORDON, C.; MANSON, R.; SUNDBERG, J.; CRUZ A., A. Biodiversity, profitability, and vegetation structure in a mexican coffee agroecosystem. Agriculture, ecosystems and environment 118:256–266. 2007.
17. HUGHES, F.M.R.; COLSTON, A.; OWEN, J. Restoring riparian ecosystems: The challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. Ecology and society 10(1):1-12. 2005.
18. INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT. Caracterización de la biodiversidad en áreas prioritarias de la vertiente oriental de la cordillera Oriental. [En línea]. Villa de Leiva : Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt, 1999. 25 p. Disponible en internet: <http://www.humboldt.org.co/humboldt/homeFiles/inventarios/VOCO.pdf>. Consultado en Enero de 2006.
19. IDEAM. Evidencias del cambio climático en Colombia: Definición de herramientas para enfrentar el cambio climático en el sector agropecuario. Bogotá : IDEAM, 2009. 24 p.
20. KLEMM, D.J.; LEWIS, P.A.; FULK, F.; LAZORCHAK, J.M. Macroinvertebrate field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters: EPA/600/4-90/030. Ohio : Environmental protection agency : Environmental monitoring systems laboratory, 1990. 124 p.
21. LIÉVANO, L.A.; OSPINA, T.R. Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón. Bogotá : Universidad del Bosque : Instituto Alexander von Humboldt, 2007. 130 p.
22. LUDWIG, J.A.; REYNOLDS, J.F. Statistical ecology. Nueva York : John Wiley & Sons, 1988. 337 p.
23. MATUK, V. El impacto biológico de las aguas residuales del lavado del beneficio húmedo de café tratadas anaerobiamente. Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias básicas, 1996. 287 p. Tesis: Biólogo
24. MONTGOMERY, D.R.; BOLTON, S.M. Hydrogeomorphic variability and river restoration. p. 39-80. En: WISSMAR, R.C.; BISSON, P.A. Strategies for restoring river systems. Bethesda : The American fisheries society, 2003.
25. NATIONAL WATER AND CLIMATE CENTER. Stream visual assessment protocol: Technical note 99-1. Connecticut : NWCC : USDA : NRCS, 1998. 36 p.
26. PALMER, M.A.; [et al.]. Standards for ecologically successful river restoration. Journal of applied ecology 42:208–217. 2005.
27. PERFECTO, I.; VANDERMEER, J.; MAS, A.; PINTO, L.S. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. Ecological economics 54:435–46. 2005.
28. RAINFOREST ALLIANCE. Norma de agricultura sostenible: Red de agricultura Sostenible Rainforest Alliance 2008. [En línea]. Disponible en Internet: www.ra.org. Consultado en Noviembre de 2009.
29. RINCÓN, M.E. Estudio preliminar de la distribución altitudinal y espacial de los tricópteros en la cordillera Oriental (Colombia). p. 267-284. En: AMAT, G.; ANDRADE, M.G.; FERNÁNDEZ, F. Insectos de Colombia. Bogotá : Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, 1999.
30. RISS, W.; OSPINA, R.; GUTIÉRREZ, J.D. Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la sabana de Bogotá. Caldasia 24(1):135-156. 2002.
31. RITCHER, B.; BAUMGARTNER, J.; WIGINGTON, R. How much water does a river need? Freshwater biology 37:231-249. 1997.

32. Roldán, P.G. Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: Uso del método BMWP/Col. Medellín : Universidad de Antioquia, 2003. 170 p.
33. RODRÍGUEZ, N. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente, 2009. 508 p. Tesis doctoral.
34. VANNOTE, R.; MINSHALL, G.W.; KUMMINS, K.W.; SEDELL, J.R.; CUSHING, C.E. The river continuum concept. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 37:130-137. 1980.
35. ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N. Sistemas para el tratamiento de aguas mieles: Investigación aplicada en beneficio de los productores cafeteros. Chinchiná : CENICAFÉ, 2008.
36. ZÚÑIGA, M.; ROJAS, A.; CAICEDO, G. Indicadores ambientales de calidad de agua en la cuenca del río Cauca. *Asociación de ingenieros sanitarios de Antioquia* 2:17-28. 1993.
37. ZÚÑIGA, M.C.; CARDONA, C. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental: Conceptos, experiencias y desafíos. p: 167-197. Cali : Universidad del Valle, 2009.