



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**Análisis de la estabilidad ecológica de un reoambiente a lo largo de  
un gradiente altitudinal a través de los macroinvertebrados  
acuáticos y el procesamiento digital de imágenes**

Juan Pablo Serna López

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental

Medellín, Colombia

2020



Análisis de la estabilidad ecológica de un reambiente a lo largo de un gradiente altitudinal  
a través de los macroinvertebrados acuáticos y el procesamiento digital de imágenes

**Juan Pablo Serna López**

Tesis como requisito para optar al título de:

**Doctor en Ingeniería Ambiental**

Asesores (a):

Dr.rer.nat. Néstor Jaime Aguirre Ramírez

Asesor externo (a):

Dr. David Stephen Fernández McCann

Línea de Investigación:

Modelación ambiental y recursos hídricos

Grupo de Investigación:

Geolimna

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020

## Dedicatoria

*“En Dios están la sabiduría y el poder,  
el consejo y el entendimiento son suyos”*

*Job 12:13*

*A mis Padres y hermanas*

*A mi novia*

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis profesores y mentores Fabio Vélez, Néstor Aguirre y David Fernández, quienes fueron inspiración y motivación en cada uno de las etapas de este proceso académico. A ellos gracias por sus valiosos aportes para entender lo geográfico desde un dron, lo hidrobiológico desde un estereomicroscopio y el mundo de la visión artificial desde una imagen.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnológica en Innovación de Colombia – Minciencias-, en la convocatoria 727 de 2015 por la financiación de esta investigación.

A la Universidad de Antioquia, y todos los estamentos académicos y administrativos incluyendo el Grupo Geolimna y Gepar, y al posgrado de la Facultad de Ingeniería. Al Grupo GIDIA de la UnalMed. Al personal administrativo de las Seccionales del Suroeste y del Bajo Cauca por los espacios y socializaciones.

Mi gratitud especial a los profesores de la Escuela Ambiental Esneddy Hernández, Rubén Molina, Diana Agudelo, Julio Cañon y Orlando Caicedo por los aportes y discusiones en esta investigación.

A mi compañero y amigo Adrián Escobar, quien fue mi mano derecha en las campañas de muestreo y quien hace 10 años me enseñó a usar por primera vez una red tipo Surber y ahora puede ver el resultado de su paciencia y vocación.

Al profesor Broder Breckling de la Universidad de Vechta en Alemania, con quien sostuve discusiones muy interantes en busca de entender los conceptos ecológicos. A la universidad de Bremen y la universidad de Giessen por los espacios de discusion con estudiantes e investigadores.

A los compañeros y colegas Julián Ruiz, Sebastian Lobo, Daniel Uribe, Maria Fernanda Orozco, Mateo Parra, Alejandro Espinal, Jose Deossa, Sergio Herazo, Karen Palacio, Maikol Cordoba y demás integrantes del grupo de Investigacion, quienes estuvieron en este proceso con sus aportes, trabajos y motivación.

A la Alcaldía del Municipio de Concordia, y a las Empresas Públicas de Concordia por facilitarnos el ingreso al la reserva natural La Nitrera como espacio de trabajo.

Al investigador y amigo Carlos Lasso del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, por su valiosa colaboración en la identificación de los organismos y el acompañamiento en este proceso.

A mi familia Flavio, Ana, Natalia, Vanessa y Ana María, quienes son el motor y para quienes debo todo mi esfuerzo y sacrificio. Gracias por su cariño.

A mi novia Eleana, por ser mi polo a tierra sin dejar de mirar a lo alto en esta etapa final. A mis amigos de iglesia por sus palabras de motivación.

## Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Tabla de Contenido.....	1
Listado de Tablas.....	3
Listado de Figuras .....	4
Listado de Anexos .....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT .....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Estabilidad ecológica .....	11
2.2. La cuenca hidrográfica.....	12
2.3. Macroinvertebrados acuáticos .....	14
2.4. Redes ecológicas.....	15
2.5. Procesamiento digital de imágenes.....	16
2.6. Modelo conceptual propuesto.....	19
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	21
4. OBJETIVOS.....	22
4.1. Objetivo general.....	22
4.2. Objetivos específicos .....	22
5. ZONA DE ESTUDIO .....	22
5.1. Quebrada La Nitrera .....	23
5.2. Río San Juan .....	25
5.3. Río Cauca.....	28
6. METODOLOGÍA .....	30
6.1. Características hidrológicas y climáticas de las cuencas .....	30
6.2. Cobertura vegetal- terrestre asociada a las cuencas.....	34
6.3. Usos del suelo y clasificación de las actividades socioeconómicas .....	36
6.4. Análisis y toma de muestras en campo y laboratorio .....	36
6.5. Estructura de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos .....	41

6.6.	Grupos Funcionales Alimentarios (GFA).....	42
6.7.	Modelo de redes de análisis y visualización “Gephi”.....	46
6.8.	Método de determinación de macroinvertebrados acuáticos .....	48
6.	RESULTADOS.....	53
6.1.	Características hidroclimáticas y de oferta hídrica de las cuencas .....	53
6.2.	Características altitudinales de las Cuencas.....	62
6.3.	Caracterización del uso del suelo en las diferentes cuencas .....	65
6.4.	Caracterización de las coberturas vegetales en las estaciones de muestreo.....	67
6.5.	Análisis estadístico .....	68
6.6.	Análisis de los contenidos estomacales de los morfotipos estudiados .....	78
6.7.	Análisis de la estabilidad mediante la modularidad en redes ecológicas usando <i>Gephi</i> 84	
6.8.	Análisis del procesamiento y uso aprendizaje de máquinas .....	89
7.	DISCUSIÓN.....	94
8.	CONCLUSIONES .....	99
9.	RECOMENDACIONES .....	101
9.	REFERENCIAS .....	102
	Hoja de Vida .....	112
	Pasantía internacional .....	115
	Certificados .....	116
	Aplicativo.....	118
10.	ANEXOS.....	119

## Listado de Tablas

Tabla 1 Información hidráulica y fisicoquímica de la quebrada La Nitrera.....	24
Tabla 2 Descripción de la vegetación riparia en las estaciones de la quebrada La Nitrera.....	25
Tabla 3 Información hidráulica y fisicoquímica del Río San Juan .....	26
Tabla 4 Descripción de la vegetación riparia en las estaciones sobre el Río San Juan .....	27
Tabla 5 Información hidráulica y fisicoquímica del tramo del Río Cauca.....	28
Tabla 6 Descripción de la vegetación riparia en las estaciones del río Cauca .....	29
Tabla 7 Estaciones hidroclimatológicas usadas en el proyecto.....	30
Tabla 8 Portal web de la información cartográfica usada en la investigación .....	33
Tabla 9 Imágenes satelitales utilizadas para el procesamiento y generación de mapas .....	34
Tabla 10 Matriz de consistencia.....	37
Tabla 11 Equipos utilizados para los análisis hidráulicos y fisicoquímicos .....	39
Tabla 12 Índices de diversidad propuestos para el análisis de la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos.....	41
Tabla 13 Información secundaria para asignación del grupo funcional alimentarios para los macroinvertebrados encontrados en los tres reoambientes.....	42
Tabla 14 Nomenclatura asignada para cada grupo funcional de alimentación. Tomado de Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, (2014).....	42
Tabla 15 Nomenclatura y rangos para la dieta alimentaria usadas por Cheshire, Boyero, & Pearson, (2005) .....	43
Tabla 16 Modelo ajustado para la determinación de la biomasa por cada uno de los grupos funcionales alimentarios. Datos tomados de Ruiz-Toro et al., (2020) .....	44
Tabla 17 Listado de Nodos (Izq.) y Aristas (Der.) de la Estación 3 de la quebrada La Nitrera en el mes de abril de 2018.....	47
Tabla 18. Número de imágenes iniciales y ampliadas para las cuatro clases (587 imágenes) que corresponden a cuatro géneros de macroinvertebrados acuáticos. ....	51
Tabla 19 Aporte hídrico del río Cauca en la estación E1 (Bolombolo) para los meses de enero a agosto en el 2017 y abril a diciembre de 2018. Tomado de(Mejía, 2008) .....	61
Tabla 20 Análisis de componentes de Varianza para las variables ambientales y biológicas. Porcentajes de contribución a la variabilidad .....	69
Tabla 21 Prueba de Kruskal-Wallis para las variables ambientales y bióticas .....	70
Tabla 22 Análisis de Varianza Multifactorial para los grupos funcionales alimentarios .....	73
Tabla 23. Dieta alimenticia y Grupo Funcional Alimenticio de algunos taxa identificados en esta investigación y el reportado por la literatura. ....	80
Tabla 24 Análisis de Varianza Multifactorial para la Modularidad.....	87
Tabla 25 Descripción de modelos de clasificación probados en el análisis con sus respectivos porcentajes de acierto. ....	89
Tabla 26 Matriz de confusión a) <i>Thraulodes</i> sp b) <i>Traverella</i> sp c) <i>Anacroneuria</i> sp d) <i>Smicridea</i> sp. ....	91

## Listado de Figuras

Figura 1. Representación jerárquica del río San Juan Comfenalco. A. Cuenca río SJ B. Segmento del sistema C. Tramo del sistema D. Pozo o Rápido E. Microhábitat (Adaptado de Frissell, Liss, Warren, & Hurley, 1986, Google Earth). .....	13
Figura 2. Modelo conceptual. Elaboración propia. ....	20
Figura 3. Representación esquemática de líneas divisorias de agua para las cuencas de estudio. Elaboración propia.....	20
Figura 4. Área de estudio donde se ubican las nueve estaciones de muestreo en los tres reoambientes: quebrada la Nitrera (NE1, NE2, NE3), río San Juan (SJE1, SJE2, SJE3) tramo del río Cauca (CE1, CE2, CE3). .....	23
Figura 5. Distribución espacial de las estaciones de las diferentes estaciones pluviométricas en la zona de estudio. ....	31
Figura 6. Sección transversal del la Estación 1 del Río San Juan para cálculo de caudal.....	32
Figura 7. Tipos de muestreo y redes utilizadas para la recolección de los macroinvertebrados acuáticos. ....	40
Figura 8. Ejemplo de Diagrama para NE3 usando <i>Gephi</i> con las conexiones. ....	47
Figura 9. Montaje para la captura de las imágenes usando un estereomicroscopio. ....	48
Figura 10. Imágenes capturadas para el procesamiento y el entrenamiento de la red. A. <i>Thraulodes</i> sp B. <i>Traverella</i> sp C. <i>Anacroneuria</i> sp D. <i>Smicridea</i> sp.....	49
Figura 11. Diagrama del proceso de entrenamiento y uso del modelo propuesto para la clasificación de macroinvertebrados. Elaboración propia. ....	52
Figura 12. Series mensuales multianuales de las estaciones pluviométricas cercanas a las estaciones de monitoreo en el tramo de la cuenca del Río Cauca.....	53
Figura 13. Distribución espacial de la precipitación anual y mensual multianual para las campañas de muestreo en las tres cuencas incluidas las diferentes estaciones pluviométricas. A) Mapa de lluvias multianual B) Mapa de lluvias en febrero C) Mapa de lluvias en abril D) Mapa de lluvias en julio E) Mapa de lluvias en agosto F) Mapa de lluvias en septiembre. Elaboración propia adaptado de Ideam, (2015). ....	55
Figura 14. Sección transversal para la quebrada La Nitrera en los diferentes meses de monitoreo para el año 2017. A) Tabla y esquema por campaña para la Estación 1 B) Tabla y esquema por campaña para la Estación 2 C) Tabla y esquema por campaña para la Estación 3.....	57
Figura 15. Sección transversal para la quebrada La Nitrera en los diferentes meses de monitoreo para el año 2018. A) Tabla y esquema por mes para la Estación 1 B) Tabla y esquema por mes para la Estación 2 C) Tabla y esquema por mes para la Estación 3. ....	59
Figura 16. Sección transversal del río San Juan en la estación E1, Charco Corazón, para los meses de julio de 2017, abril, septiembre de 2018.....	60
Figura 17. Sección transversal del río San Juan en la estación E2 (Comfenalco) para los meses de julio y septiembre de 2018. ....	60
Figura 18. Perfiles históricos del río Cauca para los meses de febrero/10, abril/02, agosto/13 y septiembre/12 en la estación Limnométrica ubicada en Bolombolo CE1. Adaptado de Ideam (2019). ....	61
Figura 19. Mapa de elevación de la cuenca de estudio y la zona de la Nitrera en los diferentes puntos de muestreo. Elaboración propia.....	62
Figura 20. Perfil altitudinal de las estaciones de muestreo en las tres subcuencas de estudio. ....	63

Figura 21. Mapa de elevación y de pendiente de la cuenca del río San Juan en los puntos de muestreo. Elaboración propia. ....	64
Figura 22. Mapa de elevación y de pendiente del tramo de la cuenca del río Cauca en los diferentes puntos. Elaboración propia. ....	65
Figura 23. Mapa de usos del suelo para el tramo de estudio sobre la cuenca del Río Cauca. Escala 1:250.000. Elaboración propia. Trabajo de grado en desarrollo (Orozco, Vélez, Serna, & Aguirre, 2019). ....	66
Figura 24. Mapa de coberturas terrestre para el tramo de estudio sobre la cuenca del Río Cauca. Escala 1:250.000. Elaboración propia. Trabajo de grado en desarrollo(Orozco et al., 2019)..	67
Figura 25. Análisis de componentes principales de las especies más representativas en el muestreo cuantitativo con las variables fisicoquímicas, altitud y época. ....	71
Figura 26. Análisis de componentes principales de los grupos funcionales alimentarios en el muestreo cuantitativo con las variables fisicoquímicas, altitud y época. ....	72
Figura 27. Análisis de componentes principales de la estructura de los macroinvertebrados en el muestreo cuantitativo con las variables fisicoquímicas, altitud, modularidad, estación y época. ....	72
Figura 28. Variación de la abundancia de Filtradores (Ft) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas. ....	74
Figura 29. Variación de la abundancia de Colectores (CG) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas. ....	74
Figura 30. Variación de la abundancia de Depredadores (Pr) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas. ....	75
Figura 31. Variación de la abundancia de Raspadores (Sc) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas. ....	76
Figura 32. Variación de la abundancia de Fragmentadores (Sh) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas. ....	76
Figura 33. Distribución de la riqueza de macroinvertebrados acuáticos a diferentes altitudes en cada una de las estaciones de monitoreo por reoambiente.....	77
Figura 34. Distribución de la densidad de macroinvertebrados acuáticos a diferentes altitudes en cada una de las estaciones de monitoreo por reoambiente. ....	77
Figura 35. Análisis cualitativo del contenido estomacal de algunos de los taxa presentes en los reoambientes estudiados. MOPF: Materia Orgánica Fina, MOPG: Materia Orgánica Gruesa, RO: Restos de Organismos, AP: Algas Perifíticas, TV: Tejido Vegetal. Sd: Sin determinar. .	80
Figura 36. Distribución espacial por estaciones de los GFA en cada una de las campañas de muestreo A) Febrero/17 B) Julio/17 C) Agosto/17 D) Septiembre/17 E) Abril/18 F) Julio/18 G) Agosto/18 H) Septiembre/18.....	83
Figura 37. Diagramas de relaciones tróficas en septiembre de 2018 en las tres estaciones de los tres reoambientes usando redes ecológicas. ....	85
Figura 38. Valores de modularidad para tres épocas hidrológicas: seca (naranja), transición (gris), lluvias (azul), en los tres reoambientes estudiados para los años 2017 y 2018. ....	86
Figura 39. Variación de las Modularidades en las diferentes estaciones, en tres épocas hidrológicas, para la quebrada La Nitrera. ....	88
Figura 40. Variación de la Modularidades en las diferentes estaciones en tres épocas hidrológicas para el Río San Juan. ....	88
Figura 41. Variación de las Modularidades en las diferentes estaciones, en tres épocas hidrológicas, para el Río Cauca.....	89

Figura 42. Histogramas de apariciones visuales de palabras, vector de características para cada una de las clases evaluadas en el modelo. A) *Thraulodes* sp B) *Traverella* sp C) *Anacroneuria* sp D) *Smicridea* sp. .... 90

Figura 43. Interfaz gráfica de usuario (IGU) para la determinación automática de cuatro macroinvertebrados acuáticos..... 91

Figura 44. Modelo de la variación altitudinal de los diferentes reoambientes. Elaboración propia.. 93

## Listado de Anexos

Anexo 1. Resumen estadístico variables hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas para la quebrada La Nitrera.....	119
Anexo 2. Resumen estadístico variables hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas para el Río San Juan.....	119
Anexo 3. Resumen estadístico variables hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas para el Río Cauca .....	120
Anexo 4. Tabla con los valores de Modularidad para cada una de las estaciones en el muestreo semicuantitativo durante las diferentes campañas de muestreo .....	121
Anexo 5. Campañas de muestreo realizadas durante los años 2017 y 2018 .....	122
Anexo 6. Preservación <i>Hetaerina caja</i> (24 de agosto de 2017).....	123
Anexo 7. Diagramas de relaciones tróficas en todas la campañas durante el 2017 y 2018 en las tres estaciones de los tres reoambientes usando redes ecológicas.....	125
Anexo 8. Listado de organismos encontrados en la quebrada La Nitrera en el muestreo semi-cuantitativo usando la red triangular .....	132
Anexo 9. Listado de organismos encontrados en la quebrada La Nitrera en el muestreo cuantitativo con la red tipo surber .....	134
Anexo 10. Listado de organismos encontrados en el río San Juan en el muestreo semi-cuantitativo usando la red triangular .....	136
Anexo 11. Listado de organismos encontrados en el río San Juan en el muestreo cuantitativo con la red tipo surber.....	137
Anexo 12. Listado de organismos encontrados en el río Cauca en el muestreo semi-cuantitativo usando la red triangular .....	139
Anexo 13. Listado de organismos encontrados en el río Cauca en el muestreo cuantitativo con la red tipo surber.....	140
Anexo 14. Registro fotográfico principales morfotipos encontrados en esta investigación .....	142

## RESUMEN

La estabilidad ecológica de un reoambiente, es una condición termodinámica de eficiencia y aprovechamiento al máximo la energía y la materia disponible en las redes tróficas y se refleja en la calidad ambiental del recurso usando variables hidráulicas, fisicoquímicas, y la estructura de las comunidades que habitan e interactúan en un espacio físico. Esta investigación buscó analizar esta estabilidad bajo tres escalas: un análisis de cuenca, un análisis de la estructura y composición de los macroinvertebrados acuáticos (MA), y las interacciones que se pueden presentar entre ellos a través de los Grupos Funcionales Alimentarios (GFA), en nueve estaciones, en épocas hidroclimatológicas seca, transición y lluvia. Se escogieron tres reoambientes a diferentes niveles altitudinales: la Quebrada La Nitrrera, como microcuenca; el río San Juan, como mesocuenca, y un tramo sobre el río Cauca, como macrocuenca. Primero, se hizo una recopilación, caracterización de la información y la descripción de las cuencas mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las campañas se realizaron durante los años 2017 y 2018. Para el segundo objetivo, en cada uno de los sitios se recolectaron los MA y se levantó la información fisicoquímica. Se usaron métodos univariados y multivariados para el análisis de la información a través de análisis de componentes principales (ACP), ANOVA simple multifactorial y estadísticos de pruebas no paramétricas. En el tercer objetivo se usó el modelo de redes *Gephi* para conocer las interacciones a través del análisis de grafos. Para ello, la variable respuesta fue modularidad que muestra el grado de agrupamiento de las redes y así definir qué tan estables son. Finalmente con las imágenes de algunos MA se desarrolló un método de reconocimiento usando aprendizaje de máquina y procesamiento digital de imágenes. Los principales resultados indican que a medida que disminuyen los niveles altitudinales, la diversidad y riqueza de especies disminuye y aumenta la temperatura del agua, la conductividad, turbiedad, el caudal. Los GFA, abundancia varían significativamente en relación con la *estación* que con la *época* hidrológica. El valor de modularidad no se ve afectado por la estacionalidad ni la época y fue mayor en el río San Juan. Por su parte se desarrolló un software que logra el reconocimiento de cuatro morfotipos con un acierto del 97.1%.

**Palabras clave.** estabilidad ecológica, redes ecológicas, reoambiente, macroinvertebrados acuáticos, aprendizaje de máquinas.

## ABSTRACT

The ecological stability of a stream, is a thermodynamic condition of efficiency and maximum use of energy and matter available in trophic networks and is reflected in the environmental quality of the resource using hydraulic, physicochemical variables, and the communities structure that inhabit and interact in a physical space. This research analyzed this stability under three scales: a basin analysis, the structure and composition of aquatic macroinvertebrates (MA) analysis, and the interactions that can occur between them through the Functional Feeding Groups (FFG), in nine sampling locations, in dry transition and rain hydroclimatological epochs. Three streams were chosen at different altitude levels: La Nitrrera Creek, as microbasin; San Juan river, as a mesobasin, and a stretch over the Cauca river, as a macrobasin. First, a compilation, characterization of the information and description of the basins was made using Geographic Information Systems (GIS). The campaigns were carried out during the years 2017 and 2018. To the second objective, in each of the sites the MAs were collected and the physicochemical information was used. Univariate and multivariate methods were used for the analysis of the information in a Principal Component Analysis (PCA), multifactor simple ANOVA and non-parametric test statistics. In the third objective, the *Gephi* network model was used to know the interactions through graph analysis. For this, the response variable was the modularity that shows the degree of grouping of the networks and thus define how stable they are. Finally, with the images of some MAs, a recognition method was developed using machine learning and digital image processing. The main results indicate that as the altitude levels decrease, the diversity and richness of species decreases and increases the water temperature, the conductivity, turbidity, the flow rate. The FFG, abundance vary significantly in relation to the *sampling location* than with the *hydrological epoch*. The modularity value is not affected by seasonality or time and was higher in the San Juan River. On the other hand, a software was developed that achieves the recognition of four morphotypes with a success of 97.1%.

**Keywords.** Ecological stability, ecological networks, stream, aquatic macroinvertebrates, machine learning.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los objetivos del milenio el acceso a métodos de abastecimiento de agua adecuados es un tema que impacta de manera directa el bienestar y salud de todos los colombianos. Los esfuerzos en este frente buscan llevar el país a la cobertura total en 2030, actualmente está en 92.9%. En los últimos siete años se ha logrado que 6.3 millones de colombianos tengan acceso a agua potable por primera vez y 7 millones a alcantarillado (DPN, 2018).

En el Estudio Nacional del Agua (ENA) se hace una estimación de la *oferta* hídrica superficial de Colombia a partir del procesamiento y el análisis hidrológico de las series de tiempo seleccionadas previamente. A partir de este análisis se concluyó que el país tiene un rendimiento hídrico promedio de 63 L/s-km<sup>2</sup>, lo cual supera seis veces el rendimiento promedio mundial. Colombia está entre los países con una mayor oferta hídrica natural en todo el mundo (CTA, 2012).

Entender los reoambientes como ecosistemas integrales en donde la cuenca y los diferentes procesos y usos que se dan en esta, son importantes al momento de valorar aspectos ecológicos. Los ríos tropicales presentan unas características complejas en donde las interacciones que se dan entre elementos bióticos con los abióticos juegan un papel importante en la estabilidad de estos sistemas (Maass, 2000).

Las redes alimentarias por su parte constituyen en un elemento importante en los procesos ecológicos que ocurren en los ecosistemas fluviales. Entre las cuales se encuentran las dinámicas del flujo de materia y energía que proporcionan información de la configuración de los sistemas biológicos, sirviendo como herramientas científicas para la planificación y gestión de los ecosistemas fluviales (Tamaris-Turizo, Pinilla-A, & Muñoz, 2018). Para el caso de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos estas relaciones tróficas son un elemento determinante en aspectos como los ciclos de vida, elección de hábitat, comportamiento, predación, entre otros (Chará-Serna, Chará, Zúñiga, Pedraza, & Giraldo, 2010). Debido a la complejidad que se tiene en el análisis de estas interacciones. Se ha venido trabajando en campos como la ecología funcional, la cual establece la asignación de rasgos funcionales que permiten medir características morfológicas, fisiológicas o fenológicas a nivel individual (Violle et al., 2007).

Por otra parte, para una mejor comprensión de los fenómenos que suceden en la naturaleza es importante usar un enfoque multidisciplinario que involucre otras áreas del conocimiento como lo es la informática. Los desarrollos tecnológicos en la instrumentación de las cuencas se deben abordar de la mano de especialistas en cada área y de esta manera, dar solución de manera eficiente los desafíos ecológicos (Vilche, Gil-Pérez, Toscano, & Macías, 2014).

En la actualidad, los monitoreos requieren que la cuantificación de las poblaciones de macroinvertebrados acuáticos en campo y laboratorio sea más rápida y eficiente. De ahí que los métodos de visión por computador pueden convertirse en herramientas que permitan de manera rápida la captura y clasificación de las imágenes de organismos. Si estos métodos pueden ser suficientemente precisos y de bajo costo, podrían tener un impacto positivo en la

vigilancia del medio ambiente (Larios et al., 2008). Además, si se puede establecer un protocolo en campo se podría optimizar el tamaño de la colecta que se lleva a los laboratorios y así reducir el impacto a los ecosistemas.

Esta investigación tiene como propósito analizar la estabilidad ecológica que presenta un reoambiente teniendo en consideración tres dimensiones: cuenca, el biotopo, y la estructura de los macroinvertebrados acuáticos y así mediante el procesamiento digital de imágenes a escala de laboratorio poder avanzar en la determinación de los macroinvertebrados acuáticos presentes en estos ecosistemas. El análisis de cuencas se realizó a través de imágenes satelitales, en tanto los biotopos se estudiaron empleando video, fotografía digital y estadísticos de prueba, como lo son análisis de varianza y p-valor para kruskall wallis y las biocenosis de macroinvertebrados acuáticos se analizaron a través del grupos funcionales alimentarios. Se consultaron bases de datos de estudios de calidad de agua y bioindicadores en el departamento de Antioquia, donde se estudiaron tres cuencas con variación en el gradiente altitudinal: la quebrada La Nitrera en Concordia (Antioquia), como microcuenca, el río San Juan en el municipio de Andes (Antioquia), como mesocuenca y un tramo del río Cauca (Antioquia), como macrocuenca. Esta investigación fue financiada por el departamento administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación para Colombia (Colciencias) ahora Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencia).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Estabilidad ecológica**

Grimm & Wissel (1997) presenta tres definiciones de las propiedades fundamentales de la estabilidad ecológica: (1) la capacidad del sistema de no presentar cambios (constancia), (2) la capacidad de volver al estado de referencia después de una perturbación temporal (resiliencia) y (3) la persistencia a través del tiempo de un sistema ecológico (persistencia).

Cualitativamente, la estabilidad es la capacidad de un sistema para mantener su funcionamiento sin necesidad de cambiar la estructura interna a pesar de las perturbaciones externas. Otros autores han definido la estabilidad ecológica como la capacidad de un ecosistema en resistir cambios en presencia de perturbaciones y en algunos casos poder volver a su estado original (Gigon, 2013; Jorgensen, Xu, & Costanza, 2010).

El estudio de la estabilidad es importante en los sistemas biológicos. La estabilidad juega un papel importante en algunos de los procesos básicos de la vida. La estabilidad múltiple es un motivo recurrente en biología, y hay muchos ejemplos de sistemas que pueden funcionar de manera estable en dos modos muy distintos (Holling, 2013). El término "estabilidad" se utiliza ampliamente en el campo de la ecología. Los ecólogos tradicionalmente interpretan un aumento en los cambios de las características estructurales y funcionales de las unidades ecológicas, como una disminución en la estabilidad de esas unidades (Parparov, Gal, & Zohary, 2015).

La estabilidad ecológica de un río puede ser vista como una tendencia a reducir cambios en el flujo de energía, lo que conlleva a que la estructura ecológica de las comunidades varíe con las condiciones ambientales estacionales; así, estas variaciones temporales y espacial en la composición de especies y abundancia de individuos en las poblaciones, son importantes para la estabilidad del sistema (Hurtado, García-Trejo, & Gutiérrez-Yurrita, 2005).

Ives & Carpenter (2007) han estudiado la relación entre la diversidad y la estabilidad, la cual requiere un conocimiento de cómo las especies interactúan entre sí y cómo cada una de ellas se ve afectada por el ambiente. La relación también es compleja, debido a que el concepto de estabilidad es multifacética; diferentes tipos de estabilidad que describen diferentes propiedades de los ecosistemas, conducen a múltiples relaciones diversidad-estabilidad. Además, las relaciones de la diversidad de estabilidad no pueden entenderse fuera del contexto de los factores ambientales que afectan a ambos.

## **2.2. La cuenca hidrográfica**

Una cuenca, en sentido amplio, es una unidad de territorio donde las aguas fluyen mediante un sistema natural interconectado; en la cual pueden interactuar uno o varios elementos biofísico-socioeconómicos y culturales (Ideam, 2013).

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar, por su magnitud, en “micro” (menos de 50 km<sup>2</sup>), “meso” o “subcuencas” (de 50 a 20,000 km<sup>2</sup>) y “macro” o “cuenca” (más de 20,000 km<sup>2</sup>). Si bien son arbitrarios los límites superior e inferior de estas tres categorías, la clasificación sirve para evaluar en el ámbito de una cuenca las repercusiones potenciales de las actividades humanas, como la agricultura, la explotación forestal, el pastoreo, etc. En comparación con los efectos de los fenómenos naturales como los movimientos geológicos o fenómenos meteorológicos extremos. La investigación revela que en las unidades de escala micro, los efectos de las actividades humanas en los procesos de las cuencas tienden a ser mayores que los de los fenómenos naturales (FAO, 2009).

En las unidades de escala media, los procesos naturales son tan decisivos como los factores humanos, generando que sean mesocuenas particularmente vulnerables a la degradación ambiental. Las macrocuencas, por su magnitud, presentan procesos naturales que superan los efectos de las intervenciones humanas, percibidos específicamente en el sitio. En particular, las inundaciones y otros acontecimientos extremos que se producen en las llanuras de aluvión dependen de procesos geológicos y climáticos de gran envergadura y no se deben atribuir a prácticas inadecuadas de ordenación de la cuenca río arriba (FAO, 2009; J. Ives & Messerli, 1989).

La palabra reoambiente viene del gr. "rhéo" que significa “fluir”. Idealmente el perfil longitudinal de un río es cóncavo, con una parte alta pendiente cerca del manantial que se transforma en tramos progresivamente menos inclinados al aproximarse a la desembocadura. Otras características del río guardan relación con esta progresión. Cuanto más somero es el gradiente, más finos son los materiales del lecho y debido al aumento del caudal del río, su canal se ensancha progresivamente desde el manantial hasta la desembocadura. Para describir

los diversos tramos del sistema se han propuesto sistemas de clasificación basados en las características físicas del canal y en la composición biológica de la fauna asociada (Welcomme, 1980).

De acuerdo con la zonificación y codificación de cuencas hidrográficas en Colombia, a las corrientes se les asocia un orden que permite reconocer el grado de ramificación de la red. Los afluentes que desembocan directamente al río principal (Río Cauca) se consideran afluentes de segundo orden (Río San Juan) y los que tributan sus aguas a estos se llamarán de tercer orden (Quebrada La Nitrrera) y así sucesivamente (Ideam, 2013).

Frissell et al. (1986) realizaron una representación jerárquica de un sistema fluvial a diferentes escalas basados en su patrón de canales y morfología. En análisis se realizó a nivel de cuenca considerando elementos físicos y biológicos. De esta manera se pudo establecer características generales y particulares de un ecosistema de manera holística. La Figura 1 muestra un esquema jerárquico para el Río San Juan. En ella se presenta a nivel de escala los diferentes sistemas desde el nivel de cuenca hasta microhábitat.

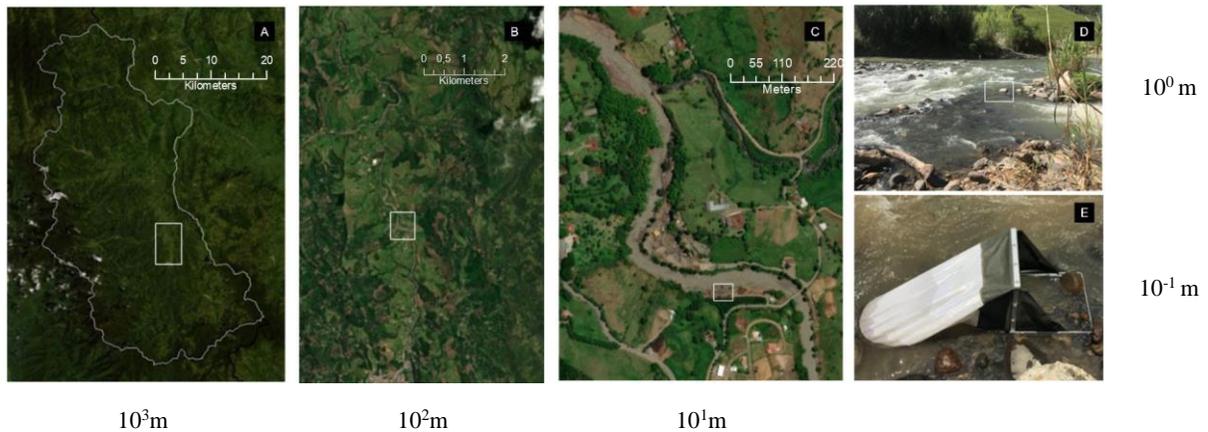


Figura 1. Representación jerárquica del río San Juan Comfenalco. A. Cuenca río SJ B. Segmento del sistema C. Tramo del sistema D. Pozo o Rápido E. Microhábitat (Adaptado de Frissell, Liss, Warren, & Hurley, 1986, Google Earth).

Una cobertura de la tierra es la manifestación de rasgos que cubren la tierra, producto de los procesos físico – bióticos y antrópicos, tales como agua, bosques, otros tipos de vegetación, rocas desnudas o arenas, estructuras hechas por el hombre, entre otros. Estas pueden ser vegetales y no vegetales. La cobertura vegetal natural es el manto continuo o discontinuo de árboles, arbustos o hierbas, o combinaciones de ellas, que se producen por la interacción natural de factores climáticos, edáficos e hídricos; la cobertura seminatural es aquella que sin ser plantada por el hombre tiene una influencia antrópica como el pastoreo y la extracción de madera, generando una cobertura intervenida, también corresponde a las áreas donde los cultivos han sido abandonados y se combinan con los espacios naturales. Las coberturas antrópicas son las que se obtienen por el reemplazo o modificación de la natural para usos productivos y bienestar social (IGAC & Corpoica, 2002).

### 2.3. Macroinvertebrados acuáticos

El monitoreo de organismos biológicos tiene la capacidad de detectar impactos inesperados en los reoambientes debido a la respuesta de los organismos ante cambios o alteraciones en estos ecosistemas acuáticos (Burden, Foerstner, McKelvie, & Guenther, 2002). Los macroinvertebrados son los organismos más comúnmente utilizados para conocer las condiciones ecológicas de los ecosistemas de agua dulce en todo el mundo, los cuales pueden ser apreciables a simple vista (Hussain & Pandit, 2012; Mieblaathers, Chadd, Extence, Rice, & Wood, 2016). Dentro de esta categoría se incluye el estudio de grupos tales como: turbelarios, oligoquetos, platelmintos, anélidos, moluscos y artrópodos. Estos últimos representan alrededor del 54% de las especies descritas (Margalef, 1983; Roldán & Ramírez, 2008).

Las razones de la importancia de los macroinvertebrados acuáticos como reveladores de las condiciones ambientales se basan en que estos organismos son de naturaleza sedentaria y presentan ciclos de vida largos en relación con otros organismos acuáticos. Estos dos aspectos se integran como una respuesta a la valoración de las condiciones espacio-temporales de las aguas corrientes superficiales (Rosenberg & Resh, 1993; Wilson, 1988). Debido a su movilidad limitada, los macroinvertebrados no son capaces de salir de un área si las condiciones se deterioran rápidamente. De este modo, reflejan la historia del sitio, lo que permite detectar alteraciones. Por último, sus ciclos de vida son generalmente del orden de meses a años, lo que también limita su capacidad para recolonizar sitios rápidamente.

Los macroinvertebrados bentónicos, al responder rápidamente a las variaciones ambientales, reflejan el grado de integridad ecológica del sistema, no sólo momentáneamente, sino estacionalmente. Estas comunidades pueden verse afectadas por factores como el hidroperíodo, el régimen hídrico, los cuales hacen que en ecosistemas temporales, presenten un período de reabastecimiento mayor que en ecosistemas permanentes (Hurtado et al., 2005).

El análisis de la comunidad de macroinvertebrados en términos de calidad de aguas también está relacionado con el empleo de los índices de diversidad y sus componentes. Los índices de diversidad más utilizados son: el índice de diversidad de Shannon-Weaver (1949), el índice de dominancia de Simpson (1949), el índice de equidad de Pielou (1996) y la riqueza específica de especies.

El concepto de biotopo puede referirse a una unidad morfológica o física, lugar donde habita un conjunto de especies (o rasgo) en lugar de una especie conocida como hábitat. Se puede demostrar considerándolas como el nivel más bajo en una jerarquía de redes ecológicas. Pero también deben entenderse como partes funcionales integradas del sistema. Además se reconocen como elementos clave en la estructura del paisaje para las redes de hábitats (Brandt, Holmes, & Larsen, 1994; Hou & Walz, 2014).

La biocenosis o comunidad béntica relaciona el tipo de especies y sus funciones dentro del ecosistema (Manfredi et al., 2018). Varios autores han avanzado en el análisis, estudio y

clasificación de estos organismos a partir de su función, principalmente en grupos alimentarios de insectos acuáticos en el neotrópico (Chará-Serna et al., 2010; Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, 2014; Tamaris-Turizo et al., 2018; Tomanova, Goitia, & Helešic, 2006). Esto ha permitido que se den pasos importantes en entender la función ecológica que pueda tener la relación alimenticia depredador-presa entre los organismos, para conocer la estabilidad de las comunidades que habitan en un biotopo.

La palabra alimentaria viene del latín *alimentarius* la cual es perteneciente o es relativo a la alimentación (Real Academia Española, 2019). Para el caso de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos se tiene una clasificación de acuerdo al tipo de alimento que consumen. Esto se conoce como Grupo funcional alimentario. La clasificación de Ramírez y Gutiérrez (2014), permite agrupar los macroinvertebrados acuáticos en seis categorías cuyas siglas están en inglés: Raspadores (Sc), aquellos que viven generalmente adheridos a rocas y otros sustratos y se alimentan del perifiton (algas, bacterias y hongos). Los perforadores (Pc) que se alimentan principalmente de plantas vasculares cortando el tejido y consumiendo su líquido. Los fragmentadores (Sh), los cuales mastican restos de plantas y madera, descomponiendo las partículas grandes en más pequeñas que pueden ser asimilables por otros organismos. En general estos organismos facilitan el proceso de descomposición de la materia orgánica. Por su parte, los Colectores-recolectores (CG), son capaces de tamizar pequeñas partículas, aunque con aparatos bucales más pequeños, también se alimentan de material que puede resuspenderse en la columna de agua. Los filtradores (Ft) eliminan partículas de la columna de agua, algunos pueden consumir tejido vegetal, pero lo hacen filtrando la materia orgánica. Finalmente, los depredadores (Pr) son aquellos que pueden consumir otros organismos, presentando algunos de ellos estructuras bucales como mandíbulas.

## **2.4. Redes ecológicas**

El análisis de redes importante en la comprensión de la estructura, función y dinámica de los sistemas ecológicos. Estos sistemas son complejos ya que involucran relaciones e interacciones que no son fácilmente cuantificables. Sin embargo, se ha avanzado en entender algunas interacciones cuya identidad puede cambiar en el espacio y el tiempo, como por ejemplo las redes alimentarias, la dinámica de los parches y las fluctuaciones de la población, entre otros (Anand, González, Guichard, Kolasa, & Parrott, 2010). Aunque las redes han proporcionado representaciones fundamentales de la complejidad ecológica, requieren una extensión para capturar de manera sistemática y simultánea estas interacciones multifacéticas (Pilosof, Porter, Pascual, & Kéfi, 2017).

El análisis de grafos es una herramienta importante en el modelamiento de fenómenos, comprensión de datos y análisis de algoritmos. Los grafos están representados por colecciones de objetos denominados vértices o nodos conectados por líneas llamadas aristas, también llamadas bordes, que pueden tener orientación dirigida o no dirigida (Contreras & Zúñiga, 2016). Actualmente y debido al desarrollo de la informática y la computación, esta

herramienta es ampliamente utilizada en varias áreas como la biología, redes sociales, tecnológica, entre otras (Fortunato, 2010; Girvan & Newman, 2002).

Una de las propiedades de la teoría de grafos se denomina *Modularidad*; el cálculo de este índice fue propuesto por Newman & Girvan (2004). Se basa en la idea de que una distribución en clúster no es lo que se espera por azar en una red y, por tanto, trata de cuantificar la intensidad de esta estructura de comunidades comparando la densidad de link dentro y fuera de cada comunidad con la densidad que esperaríamos si los links estuviesen distribuidos aleatoriamente en la red. En otras palabras, determina las densidades dentro y fuera de cada clúster, comparándolas con la densidad general que tendrían si la red fuera construida de manera aleatoria (Newman, 2010). En ecología, la modularidad ha sido ampliamente utilizada (Olesen, Bascompte, Dupont, & Jordano, 2007; Ruiz-Toro, Aguirre-Ramírez, Serna-López, Hernández-Atilano, & Vélez-Macías, 2020) (Gauzens, Thébault, Lacroix, & Legendre, 2015; Stouffer & Bascompte, 2011).

## **2.5. Procesamiento digital de imágenes**

La evaluación de la calidad del agua superficial se lleva a cabo principalmente mediante la medición de variables físicas, químicas y biológicas. Aunque estas proporcionan información precisa acerca de la contaminación del agua (USEPA, 2013), algunos de ellos requieren análisis de laboratorio costosos. Por su parte, la vigilancia biológica que ofrecen los organismos acuáticos se ha convertido en una estrategia importante, debido a la capacidad que tienen los organismos de dar respuesta a las variaciones espacio temporales que presentan los cuerpos de agua. El uso de organismos como indicadores del nivel de contaminación del agua es rentable y es una alternativa atractiva para los países en desarrollo, donde la experiencia y los recursos tecnológicos y económicos son limitados (Carmina et al., 2015).

Las imágenes y dibujos han sido la base para la descripción de organismos que mediante inventarios faunísticos han permitido conocer la composición y características taxonómicas de las comunidades. Actualmente existen diferentes técnicas, modelos digitales en 3D, diagramas sombreados, fotografías, entre otros, cada una de las cuales resulta efectiva para ciertos propósitos. Algunos trabajos y estudios de bioindicación podrían beneficiarse de los métodos de visión por ordenador de bajo costo para el recuento automatizado de las poblaciones. El conteo de la población de insectos acuáticos es una herramienta valiosa para el control de la calidad del agua de ríos y arroyos, sin embargo, el manejo de las muestras en el laboratorio para la identificación de especies, requiere de tiempo (Sarpola, Paasch, Dietterich, Lytle, & Shapiro, 2008).

La *World Wide Web Consortium* (W3C) es un sistema de distribución de documentos de hipertexto o hipermedios interconectados y accesibles vía Internet. Con un navegador web, un usuario visualiza sitios web compuestos de páginas web que pueden contener texto, imágenes, vídeos u otros contenidos multimedia, y navega a través de esas páginas usando hiperenlaces (W3C, 2015). Estas plataformas son empleadas, entre otras cosas, para el intercambio rápido de información entre especialistas alrededor del planeta, permitiendo

comparaciones precisas entre estructuras de diferentes organismos, sin tener que recurrir a los especímenes originales y facilitando así, la construcción rápida de esquemas y estructuras. Adicionalmente, las imágenes de los organismos convertidos en archivos electrónicos pueden ser integradas a bases de datos que permitan convertir la información taxonómica en documentos multimedia que amplían la difusión de este conocimiento entre los especialistas y el público en general.

En la actualidad, los métodos de captura tradicionales de macroinvertebrados acuáticos implica que los organismos luego de ser capturados son llevados al laboratorio, almacenados en bolsas o recipientes plásticos con alcohol al 70%, debidamente rotulados, para su separación, determinación y conteo (Álvarez & Daza, 2005). Estos métodos tradicionales generan un impacto debido a que las colectas implican el sacrificio. Debido a esto, los problemas de contaminación por actividades antrópicas en los ríos ha llevado a buscar nuevas estrategias de evaluación de la calidad del agua de manera más efectiva y rápida (Larios et al., 2008). En la actualidad se está avanzando en diversas técnicas de seguimiento automatizado donde se usa la tecnología computacional para entender fenómenos aplicados a la ecología (Dell et al., 2014).

Son varios los estudios relacionados con el uso de técnicas de aprendizaje aplicado a los macroinvertebrados acuáticos. Algunos autores han demostrado que el uso de redes neuronales convolucionales evaluadas con *MatConvNet* y *Coffee* para determinación de macroinvertebrados bentónicos en ríos finlandeses pueden superar el método tradicional. Ellos usaron una base de datos aplicando técnicas de rotación para la clasificación de 29 especies (Joutsijoki, 2014). Otros autores han utilizado redes neuronales artificiales para clasificar 8 clases de copépodos. Del conjunto de datos, el 60% se usa para una red neuronal de dos capas prealimentadas, y el 40% se usa para la evaluación del sistema. Se obtuvo una precisión de clasificación del 93% (Leow, Chew, Chong, & Dhillon, 2015). Por su parte en Panamá se está trabajando en un método para el reconocimiento de macroinvertebrados con imágenes de internet y de muestreos en campo para las familias Calopterygidae y Heptageniidae. Para esta prueba preliminar se reportan porcentajes de confiabilidad con valores por encima del 95% (Quintero, Merchán, Cornejo, & Galán, 2018).

En un estudio realizado por Reyes y Navas, (2000) en el Instituto Colombiano de Investigación Marina (Invemar), encontraron algunas ventajas en la digitalización de los organismos marinos directamente sobre el escáner. Entre ellas, el rastreo de los organismos sumergidos en agua o en los líquidos en los que están preservados. Esto evita que se resequen y posibilita la digitalización de estructuras frágiles y/o gelatinosas. Los resultados son inmediatos, permitiendo obtener imágenes de gran fidelidad. Las imágenes pueden ser editadas, retocadas y transformadas, permitiendo resaltar detalles de interés. Igualmente, posibilita almacenar una cantidad de información en un solo rastreo, obteniendo en una sola imagen una visión panorámica del organismo con pequeños detalles, e incluso realizar métrica y morfometría (Reyes & Navas, 2000).

Wang *et al.* (2012) presentaron un sistema de identificación de insectos a nivel de orden. Para ello, se escogieron imágenes de insectos de diferentes especies a través de varios órdenes

comunes. Para la determinación automática de la imagen se diseñó un preproceso simple, se definieron una serie de características y compararon los métodos de reconocimientos de patrones (redes neuronales y máquinas de vectores de soporte).

Existen varios métodos de clasificación, tales como red neuronal, estructural, de lógica difusa y transformación las cuales han sido usadas en los sistemas de identificación de imágenes biológicas. Las redes neuronales artificiales (ANN) han mostrado resultados satisfactorios en las clasificaciones complejas de imágenes biológicas tales como insectos, algas, los peces, hojas, mariposas, protozoos y metazoos, dinoflagelados y huevos de helmintos parásitos de humanos. Un ANN es un modelo matemático compuesto de muchas unidades de procesamiento que se comunican por variables interconectadas, lo cual permite el aprendizaje de las características de la imagen de entrada (Leow et al., 2015).

Para los expertos en determinación, el reconocimiento de especies no es una tarea sencilla (Hone, 2013) y se hace más compleja en la medida en que avanza su clasificación taxonómica. En la mayoría de inventarios y trabajos en hidrobiología la clasificación se hace hasta familias (Stevenson, Pérez-Torres, & Muñoz-Saba, 2006). Con estos métodos automatizados, es posible acercarse a su determinación hasta el nivel de género. Las bondades de estos métodos sirven de apoyo para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos y sus beneficios pueden verse en áreas como la biología, ecología, hidrobiología y principalmente en una rápida evaluación de los impactos ambientales que puede tener una actividad sobre los ecosistemas acuáticos.

La construcción de la base de datos puede ser un factor limitante al momento de incluir nuevas especies en el algoritmo. Además, el clasificador permite el reconocimiento de MA específicos para unos sitios de estudio, como lo son los tres reoambientes estudiados. A pesar de esto, estas metodologías permiten trabajar con datos desbalanceados. Se requieren personas especializadas que puedan acompañar cada una de las etapas y se tienen beneficios importantes como el tiempo de determinación, disminución del esfuerzo físico, bajo costos, certeza.

Desde hace algunos años se viene avanzando en el uso de técnicas de procesamiento de imágenes en organismos biológicos como en algas y copépodos (Evans & Norris, 1997; Leow et al., 2015), muchos de los métodos tradicionales requieren el sacrificio de estas comunidades. Una de las bondades de estas metodologías busca disminuir la alteración del equilibrio que existe entre las especies en los ríos. Por ejemplo, el uso de aplicativos móviles que vienen desarrollándose como *Merlín Bird ID app*, *Key insects orders*, identificador de insectos por foto, entre otros, cada vez se están convirtiendo en una estrategia para el reconocimiento de especies. Sin embargo, dada la importancia de los macroinvertebrados acuáticos se puede usar este interés de la sociedad para desarrollar aplicaciones que contribuyan significativamente en el inventario y la protección de estas comunidades biológicas, con el fin de favorecer la educación ambiental en nuestro país.

## 2.6. Modelo conceptual propuesto

El modelo conceptual propuesto en la Figura 2, integra varios componentes que son importantes al momento de analizar la estabilidad ecológica de un reoambiente. El primero de ellos, y a gran escala está la *cuenca*, cuyos elementos que lo conforma son la climatología, el relieve, los usos del suelo, coberturas terrestres y actividades antrópicas. La climatología de la cuenca es un factor importante para el control de la estructura y función de los ecosistemas fluviales, es por esto que afectan la hidráulica de un reoambiente y a su vez a estas comunidades biológicas que dependen del agua (Watson, 2013).

En segundo lugar y a una escala menor se encuentra el *reoambiente* cuyos elementos que presentan son la hidrología regional, hidráulica fluvial, altitud y pendientes, variables fisicoquímicas en el agua, tipos de sustrato y obras civiles. La influencia que genera la hidráulica sobre la distribución en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos. Las preferencias de hábitat hidráulicos y los costos energéticos beneficiando la captura de alimento y oxígeno (Mérigoux & Dolédec, 2004).

En tercera escala esta el *biotopo* el cual comprende elementos como la vegetación riparia, el caudal y la velocidad de la corriente, cambios geomorfológicos. Los biotopos tienen una influencia sobre la estructura y composición de los macroinvertebrados acuáticos y estos determinan las condiciones ambientales para el desarrollo de los organismos (Worrall, 2012). Además se presenta la interacción de las comunidades de macroinvertebrados por grupos funcionales. De esta manera se puede ver cambios de adentro hacia afuera y viceversa que modifican la estabilidad ecológica.

En cada una de las escalas se usan métodos de procesamiento y captura de la información. El uso de sistemas de información geográfica (SIG), fotografías tomadas con dron, fotos de los biotopos y de los organismos. Finalmente el uso de métodos matemáticos de reconocimiento automático de organismos para cuantificar y reconocer los morfotipos.

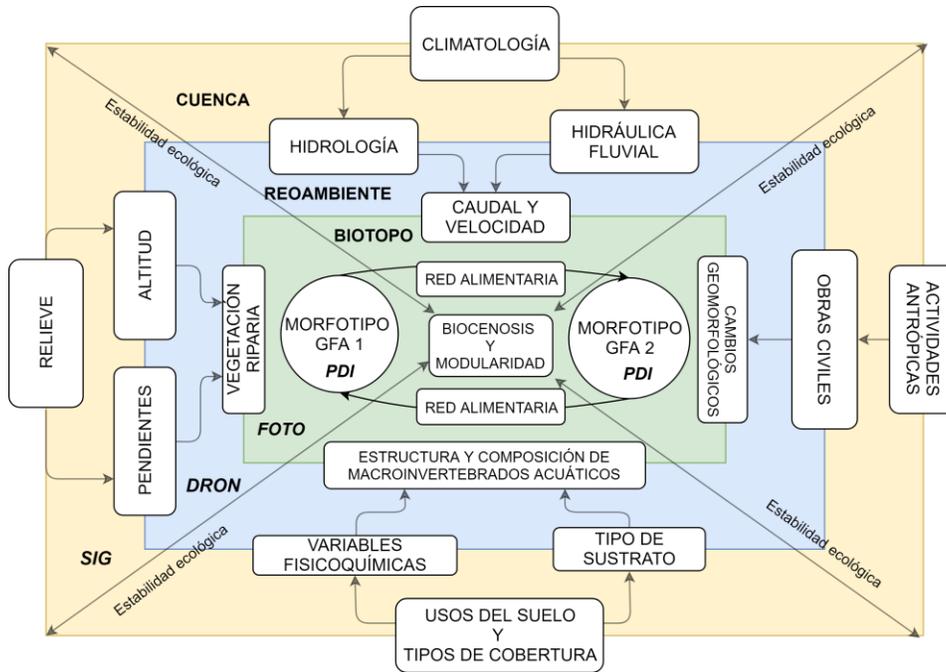


Figura 2. Modelo conceptual. Elaboración propia.

En la Figura 3 se presenta un diagrama jerárquico de las tres cuencas. La macrocuenca que integra un tramo del río Cauca, la mesocuenca del río San Juan y la microcuenca de la reserva natural La Nitrera en el departamento de Antioquia, todas ellas interconectadas. Adicionalmente, se establecen algunas estaciones de muestreo a lo largo del gradiente altitudinal.

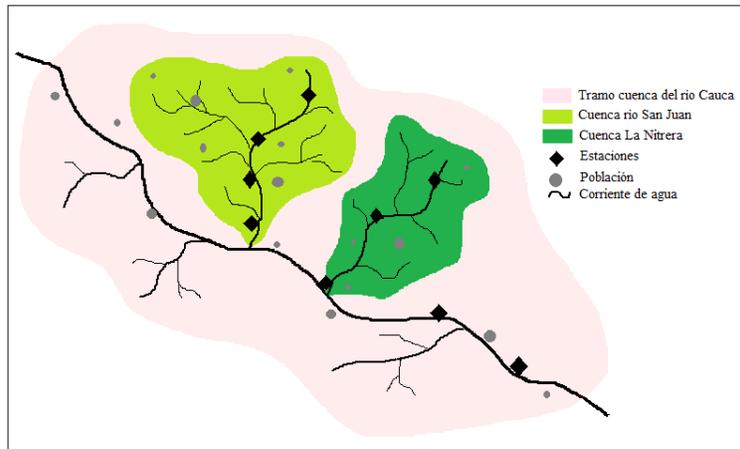


Figura 3. Representación esquemática de líneas divisorias de agua para las cuencas de estudio. Elaboración propia.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La disponibilidad del recurso hídrico en Colombia está determinada por las condiciones sociales, económicas y geográficas de la zona. Esta juega un factor importante en la gestión de la región. Sin embargo, su análisis debe integrar elementos ecológicos a los ya planteados. Esta investigación comprende el estudio de tres reoambientes: la quebrada La Nitrera, el río San Juan y un tramo del río Cauca; los cuales se encuentran conectados entre sí en la misma ecorregión y presentan cambios significativos de calidad y sus dinámicas hidrológicas ejemplifican las modificaciones tanto naturales (topografía, gradiente altitudinal, tipo de vegetación) como las intervenciones antrópicas (asentamientos humanos, embalses, usos del suelo, descarga de aguas domésticas, entre otros).

Según Mejía (2008) los problemas que generan mayor impacto en la cuenca del río Cauca son los vertimientos orgánicos generados por las actividades antrópicas de los sectores domésticos, industria de alimento y bebidas. También de actividades agrícolas como beneficio del café, uso de xenobióticos y el sacrificio del ganado sin un tratamiento previo. Todo esto conlleva a un impacto directo o indirecto debido que los subproductos de estas actividades llegan a los ríos a través de escorrentía superficial y quebradas tributarias. Afectando las comunidades bióticas, en especial los macroinvertebrados acuáticos quienes coexisten en estos ecosistemas y dan respuesta del efecto de tensores ambientales que nacen de la cuenca y terminan en los ríos.

Los macroinvertebrados acuáticos han sido ampliamente estudiados por la comunidad científica ya que reflejan las condiciones de calidad de estos ecosistemas dulceacuícolas, en especial los arroyos, quebradas y ríos. Sin embargo, la mayoría de estos estudios son localizados y no incluyen las características como requerimientos de hábitat, modos de reproducción, redes tróficas, fenología y respuesta a las perturbaciones (Wagner & Zasada, 1991), que pueden llegar a ser determinantes al momento de conocer la estabilidad ecológica de estos ambientes. Los insectos, son utilizados como indicadores de perturbación y pueden convertirse en un importante instrumento para la evaluación de zonas intervenidas (Bustos & Ulloa, 2015). Es por esto que se pretende afrontar este problema a través de tres escalas espaciales: el análisis de cuenca, el análisis de los biotopos, y las relaciones que se presentan entre los macroinvertebrados acuáticos que se desarrollan en un hábitat.

Por otro lado, las técnicas tradicionales para el análisis en términos de determinación de macroinvertebrados acuáticos han requerido el apoyo de expertos que clasifican las muestras recogidas manualmente en campo para cuantificar estas comunidades en los reoambientes. De ahí que esta investigación está orientada al uso de Sistema de Información Geográfica (SIG) y el desarrollo de métodos de visión por ordenador para un rápido rendimiento de captura, clasificación y determinación de imágenes y videos digitales a tres niveles: cuenca, hábitat y organismo. Todo esto, para apoyar a especialistas y gestores al momento de monitorear un ecosistema acuático.

Por todo lo anterior se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo analizar la estabilidad ecológica de un reoambiente siguiendo un gradiente altitudinal en un tramo de la cuenca media-baja del río Cauca en tanto las características ambientales de la cuenca, la variación de biotopos y la biocenosis de macroinvertebrados acuáticos?. La hipótesis científica que se desea comprobar es: Si se tiene en cuenta las variaciones espacio-temporales mediante el análisis de la cuenca, los biotopos de macroinvertebrados y la biocenosis en la estructura la comunidad de macroinvertebrados acuáticos apoyado del procesamiento de imágenes a estos tres niveles, entonces, es posible analizar la estabilidad ecológica de un reoambiente siguiendo un gradiente altitudinal en un tramo de la cuenca media-baja del río Cauca.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Analizar la estabilidad ecológica de un reoambiente siguiendo un gradiente altitudinal en un tramo de la cuenca media-baja del río Cauca bajo tres dimensiones jerárquicas: la cuenca, el biotopo y las biocenosis de macroinvertebrados acuáticos para la gestión del recurso hídrico.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Conocer el gradiente altitudinal, oferta hídrica, usos del suelo, coberturas vegetales en las cuencas de tres reoambientes a través de sistemas de información geográfica para la gestión del recurso hídrico.
- Determinar la variación de los biotopos de macroinvertebrados acuáticos en tres reoambientes considerando su gradiente altitudinal y la variación hidrológica en temporada seca, de lluvias y transición.
- Modelar los Grupos Funcionales de Alimentación de los principales morfotipos de macroinvertebrados acuáticos en los tres reoambientes mediante redes ecológicas.
- Desarrollar un método basado en procesado de imágenes y aprendizaje de máquinas que permitan la determinación de los principales organismos presentes en los reoambientes.

## **5. ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se localiza en el departamento de Antioquia en Colombia (Figura 4), comprende tres diferentes cuencas: la microcuenca de la quebrada La Nitrera, la cual es un afluente del embalse La Nitrera, en el municipio de Concordia, Antioquia. Una mesocuenca cuya arteria central es el río San Juan, desde el municipio de Jardín hasta la desembocadura en el río Cauca, en el sitio conocido como “Peñalisa”. Finalmente, una macrocuenca, que incluye un tramo del río Cauca, va desde el municipio de Bolombolo, en el suroeste antioqueño, hasta el municipio de Caucasia, al norte del departamento.

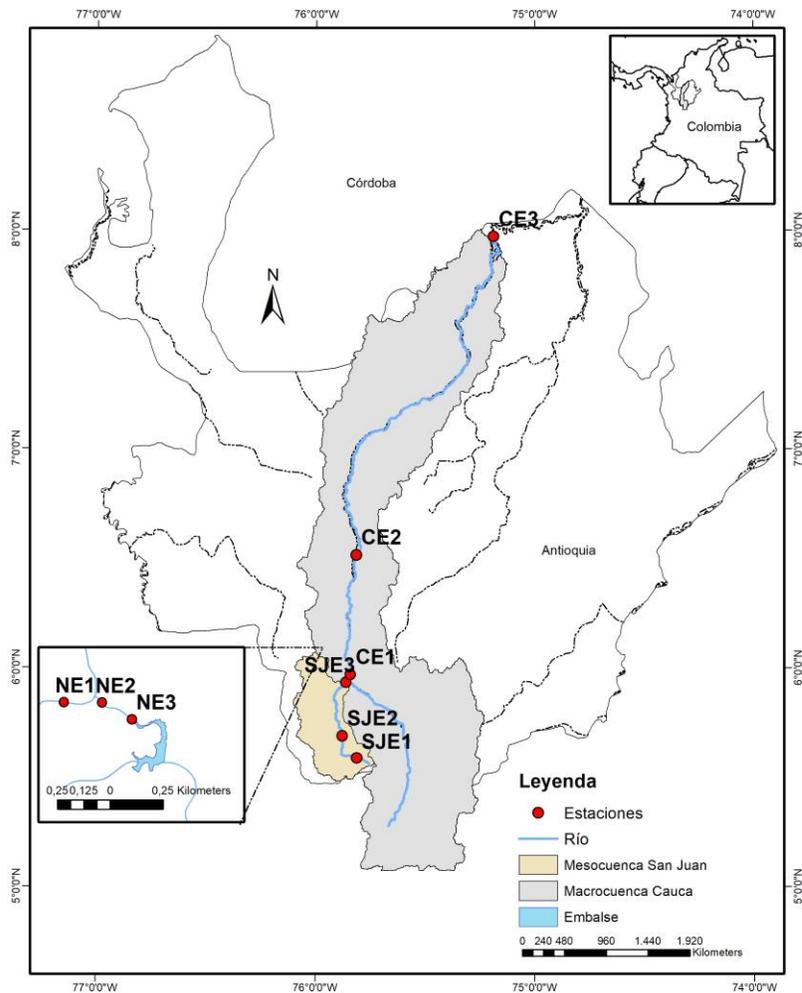


Figura 4. Área de estudio donde se ubican las nueve estaciones de muestreo en los tres reoambientes: quebrada la Nitrera (NE1, NE2, NE3), río San Juan (SJE1, SJE2, SJE3) tramo del río Cauca (CE1, CE2, CE3).

La porción de red hídrica escogida para esta investigación se localiza toda, en el departamento de Antioquia. Los tres sistemas se encuentran en la cuenca media y baja del río Cauca y hacen parte de una red hídrica conectada en una gran ecorregión. Las nueve estaciones de monitoreo se ubicaron en puntos que responden a variaciones hidráulicas, de altitud, uso del suelo y coberturas bien diferenciados. La quebrada la Nitrera es afluente del río La Magallo que a su vez desemboca en el río Cauca. El San Juan por su parte desemboca en el río Cauca y este último, al río Magdalena, fuera de los límites de este estudio.

### 5.1. Quebrada La Nitrera

La quebrada la Nitrera está ubicada en la reserva natural la Nitrera situada a 97 km de la ciudad de Medellín y a aproximadamente 4 km del casco urbano del municipio de Concordia, Antioquia. Es uno de los principales afluentes del embalse Miguel Martínez Isaza, que a su

vez suministra agua potable a los habitantes de la cabecera municipal. Este ecosistema no presenta actividades antrópicas al tratarse de una reserva natural protegida. La vegetación asociada corresponde a un bosque secundario con alta humedad y materia orgánica en descomposición. El cauce se encuentra dominado por hojarasca, troncos y lutitas. La zona de vida del Parque corresponde, según Holdridge (1967), Bosque muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB) - Tierra Fría Muy Húmeda (Alcaldía de Concordia, 2016; Callejas & Idárraga, 2011)

La Temperatura ambiente promedio en la cuenca es de 17 °C. El área de la cuenca es de 1.16 km<sup>2</sup> con precipitación media de 2223 mm/año. La altura de la cuenca presenta una media y máxima entre los 2200 y 2250 m.n.s.m. El embalse presenta un área total de 0.014 km<sup>2</sup> (Morales-Quintero, Velez-Macías, & Guerrero-Hoyos, 2019). En la Tabla 1 se muestra la información hidráulica y fisicoquímica de los puntos de muestreo en la quebrada La Nitrera.

Tabla 1 Información hidráulica y fisicoquímica de la quebrada La Nitrera

Variable	La Nitrera		
	NE1	NE2	NE3
Nomenclatura	NE1	NE2	NE3
Sitio	Qda. La Nitrera	Qda. La Nitrera	Qda. La Nitrera
Latitud	6° 2.129'	6° 2.139'	6° 2.119'
Longitud	-75° 56.026'	-75° 55.669'	-75° 55.951'
Altitud (m.s.n.m)	2220	2183	2096
Distancia desde la fuente (m)	0	19	36
Pendiente (%)	0	-2.6	-3.2
Orden del Río	1	1	1
Conductividad (µS/cm)	35.5	34.5	34.7
Temperatura del agua promedio (°C)	15.7	16.2	16.5
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.43	7.32	7.18
pH	7.32	6.95	6.93
Turbiedad (UNF)	3.44	2.68	2.09
Velocidad promedio (m/s)	0.11	0.17	0.16
Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)	0.03	0.03	0.03

El cuadro resumen de la Tabla 1 muestra que los valores entre las estaciones de la quebrada La Nitrera no presentan un cambio significativo en el flujo, la velocidad y el caudal permanecen constantes. Los valores de oxígeno, pH ligeramente neutros y bajas conductividades dan cuenta de una buena condición de calidad ambiental. La altitud y la no intervención antrópica favorece las condiciones para que se presente la colonización de insectos, aves, mamíferos, etc en la zona.

#### 5.1.1. Vegetación riparia de la Quebrada la Nitrera

En la Tabla 2 se presentan las estaciones y una descripción de la vegetación asociada a estos puntos sobre la quebrada La Nitrera. Las imágenes fueron capturadas a través de un teléfono celular.

Tabla 2 Descripción de la vegetación riparia en las estaciones de la quebrada La Nitrera

Es un Bosque y Área Seminatural de Bosque Ripario que posee una vegetación arbórea ubicada en sus márgenes. Esta cobertura está dominada por arbustos y árboles nativos tales como dulumocos, cordoncillos, yarumo blanco, silbo, chagualo, uvito de monte, drago, carate, siete cueros y espaderos.

Su vegetación se caracteriza por tener especies en estadio sucesional intermedio denotando el dominio de las especies pioneras que favorecen la llegada y establecimiento de otras especies

15 septiembre de 2017

La Nitrera E1



18 de agosto de 2017

La Nitrera E2



18 de agosto de 2017

La Nitrera E3



## 5.2. Río San Juan

La cuenca del río San Juan se encuentra situada en la región Suroeste del departamento de Antioquia con un área total de 1409.08 km<sup>2</sup>, con alturas que varían entre los 534 y los 3920

m.s.n.m. El río San Juan nace en cercanías a las zonas de protección de los Farallones del Citará y la Cuchilla Jardín-Támesis, y desemboca en el río Cauca, representando uno de sus principales afluentes (Corantioquia, 2018).

El régimen pluvial de la región es bimodal, caracterizado por dos épocas secas, comprendidas entre los meses de diciembre a marzo y junio a julio. La primera temporada de lluvias se presenta entre los meses de abril y mayo y la segunda entre los meses de agosto a noviembre. Este régimen pluviométrico es una consecuencia del desplazamiento en sentido norte-sur de la zona de convergencia intertropical a lo largo del año (Aguirre et al., 2015).

Al ser uno de los ríos los más importantes de la zona, en sus alrededores se desarrollan actividades como las actividades agrícolas y se presentan vertimientos de aguas residuales domésticas. Las estaciones de muestreo se localizaron entre en el municipio de Jardín, en el sitio conocido como “Charco Corazón” hasta su desembocadura en el río Cauca en el sector conocido como Peñalisa. En la Tabla 3 se muestra la información hidráulica y la fisicoquímica en cada una de las estaciones.

Tabla 3 Información hidráulica y fisicoquímica del Río San Juan

Variable	Río San Juan		
	SJE1	SJE2	SJE3
Nomenclatura			
Sitio	Charco corazón	Comfenalco	Peñalisa
Latitud	5° 35' 14"	5° 35' 58"	5° 55' 56"
Longitud	-75° 48' 44"	-75° 49' 03"	-75° 51' 34"
Altitud (m.s.n.m)	2134	1892	556
Distancia desde la fuente (km)	0	18.9	56.8
Pendiente (%)	-9.6	0	-0.1
Orden del Río	4	4	4
Conductividad eléctrica (µS/cm)	65.2	58.6	71
Temperatura promedio del agua (°C)	16.4	16.9	22.2
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.87	7.74	7.99
pH	7.52	7.47	7.52
Turbiedad (UNF)	9.04	82.3	431
Velocidad promedio (m/s)	0.35	0.50	-
Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)	1.48	4-13	-

Los datos presentados en la Tabla 3 muestra tres estaciones sobre el río San Juan con una distancia significativa, siguiendo el gradiente altitudinal, con diferencias desde la primera estación a la segunda de 18.9 km y a la tercera de 56.8 km. El río San Juan de orden 3 presenta una serie de afluentes que van alimentando su caudal. El oxígeno y pH no tienen cambios importantes. Sin embargo la turbiedad del río aumenta significativamente hasta el SJE3, muy cerca a su desembocadura.

### 5.2.1. Vegetación riparia en el Río San Juan

La Tabla 4 muestra la descripción de las estaciones localizadas sobre el río San Juan. En los sitios conocidos como: Charco Corazón, Comfenalco y Peñalisa. Las imágenes fueron capturadas mediante Dron.

Tabla 4 Descripción de la vegetación riparia en las estaciones sobre el Río San Juan

30 de septiembre de 2019

#### Charco Corazón

Persenta un Bosque y Área Seminatural de Bosque ripario que posee una vegetación arbórea ubicada en sus márgenes. Esta cobertura está dominada por arbustos. Margen derecha árboles nativos. Construcción de obras civiles. Uso para recreación.



30 de septiembre de 2019

#### Comfenalco

Corresponde a una Superficie de Agua Continental (Río San Juan) y a un territorio artificializado de zona de extracción minera. Existe poca cobertura vegetal de sus márgenes que cambia en su amplitud y se fragmenta en algunos trayectos.



30 de septiembre de 2019

#### Peñalisa

Corresponde a una Superficie de Agua Continental (Río San Juan) con árboles de gran porte en sus márgenes. Zona urbana cercana al punto de muestreo. Algunos cultivos pequeños.



### 5.3. Río Cauca

El río Cauca nace en el Macizo Colombiano entre las Cordilleras Occidental y Central de Los Andes con un área de drenaje de 59000 km<sup>2</sup>, que representa el 5 % del territorio nacional (Puertas, Carvajal, & Quintero, 2011). El sistema fluvial del río Cauca recorre 1350 km desde su nacimiento en el macizo Colombiano (Dpto. del Cauca) hasta su desembocadura en el Brazo de Loba (Dpto. de Bolívar). Los procesos degradativos de la cuenca están dados por el sistema de producción minero, hidroeléctricas, su elevado aporte de sedimentos con metales pesados, xenobióticos y cianuros a lo largo de su recorrido (López, 2013; Torres & Pinilla, 2011). Además la zona de estudio de la investigación es de interés debido a que en ella se encuentra el embalse Hidroituango. Este proyecto está situado en el noroccidente del departamento de Antioquia, a unos 170 kilómetros de la ciudad de Medellín. Ocupa predios de los municipios de Ituango y Briceño (Hidroituango, 2019). En mayo de 2018 generó una alerta nacional por un represamiento en uno de los túneles de desviación de la obra, lo que obligó a las autoridades locales emitir alerta roja y amarilla aguas abajo en los municipios de Puerto Valdivia, Cáceres, Tarazá y Caucasia (Colombiano, 2018).

El tramo estudiado comprendió desde el corregimiento de Bolombolo, pasando por el municipio de Santa Fe de Antioquia, hasta Caucasia en el departamento de Antioquia, con una distancia aproximada de 297.8 km. En la Tabla 5 se presenta la información hidráulica y fisicoquímica en cada una de las estaciones del tramo del Río Cauca.

Tabla 5 Información hidráulica y fisicoquímica del tramo del Río Cauca

Variable	Río Cauca		
	CE1	CE2	CE3
Nomenclatura			
Sitio	Bolombolo	Santa fe de Antioquia	Caucasia
Latitud	5° 58' 31"	6° 2.129'	6° 2.139'
Longitud	-75° 50' 14"	-75° 56.026'	-75° 55.669'
Altitud (m.s.n.m)	555	453	50
Distancia desde la fuente (km)	61.50	130.72	356.26
Pendiente (%)	-0.9	-0.7	0
Orden del Río	5	5	5
Conductividad eléctrica (μS/cm)	184.8	198.9	135.3
Temperatura promedio (°C)	27.5	24.8	26.9
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.78	7.64	7.66
pH	7.68	7.87	7.36
Turbiedad (UNF)	325 - 800	200- 800	260-800
Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)	1236	-	-

La información presentada en la Tabla 5 indica el cambio del gradiente desde una altura sobre los 555 a 50 m.s.n.m. El río en este tramo presenta conductividades que se alcanzan valores de hasta 198 μS/cm. El oxígeno y el pH no varían significativamente. Sin embargo, la turbiedad sí se incrementa de manera significativa y puede alcanzar o superar los 800 UNF.

Todo esto debido a los procesos de depositación y arrastre de sedimentos que presenta este reoambiente a lo largo de su cauce.

### 5.3.1. Vegetación riparia en el tramo del Río Cauca

En la Las imágenes fueron capturadas con ayuda de un Dron.

Tabla 6 se presenta una descripción general de las estaciones ubicadas en los sitios: Bolombolo, Santa Fe de Antioquia y Caucasia, sobre el río Cauca. Se incluye también una breve descripción de estos puntos. Las imágenes fueron capturadas con ayuda de un Dron.

Tabla 6 Descripción de la vegetación riparia en las estaciones del río Cauca

---

30 de septiembre de 2019

Bolombolo

Corresponde a una Superficie de Agua Continental (Río Cauca) con árboles de buen porte en sus márgenes. Entrada de agua a través de una quebrada.



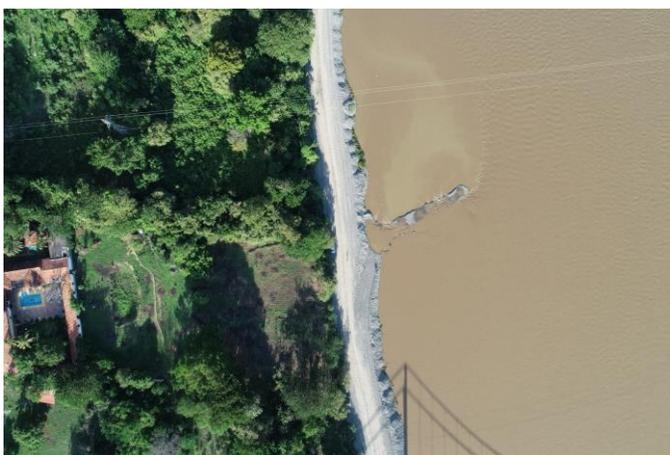
---

1 de octubre de 2019

Santa Fe de Antioquia

Corresponde a una Superficie de Agua Continental (Río Cauca) y a un territorio artificializado de zona de extracción Minera.

En sus márgenes se observan árboles de buen porte.



---

17 de abril de 2018

Caucasia

Corresponde a una Superficie de Agua Continental (Río Cauca) con árboles de buen porte en sus márgenes. Descargas de aguas residuales domésticas



---

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Características hidrológicas y climáticas de las cuencas

Se usó la información de nueve estaciones distribuidas en las tres cuencas. Ocho de ellas presentan la información pluviométrica, cuatro, información hidrométrica. En la Tabla 7 se muestran las coordenadas de cada una de las estaciones con un periodo de registro de 47 años para la estaciones Concordia, La Herradura, Sta. Bárbara, Andes, Olaya y Pueblo Rico; 37 años para la estaciones Bolombolo y La Coquera.

Tabla 7 Estaciones hidroclimatológicas usadas en el proyecto

Código	Estación	Parámetro			Coordenadas		Período registro años
		P	N	Q	Lat.	Long.	
26215010	Concordia	X	-	-	6.0°2.0'22.4" N	75.0°55.0'10.3"W	1970-2017
26210080	La Herradura	X	-	-	6.0°5.0'57.2" N	75.0°52.0'26.3" W	1970-2017
26190100	Sta. Barbara	X	-	-	5.0°33.0'50.3" N	75.0°54.0'0.3" W	1970-2017
26195020	Andes	X	-	-	5.0°41.0'27.6" N	75.0°52.0'48.8" W	1970-2016
26200130	Bolombolo	X	X	-	5.0°58.0'4.0" N	75.0°50.0'32.0" W	1980-2017
26230010	Olaya	X	-	-	6.0°37.0'43.4" N	75.0°48.0'39.2" W	1970-2017
26240160	La Coquera	X	X	X	7.0°57.0'43.7" N	75.0°11.0'45.6" W	1980-2017
26170150	Pueblo Rico	X	X	-	5.0°47.0'27.8" N	75.0°50.0'19.7" W	1970-2017

P= precipitación (mm/mes), N: nivel (m.s.n.m), Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)

Con esta información se generó un mapa de distribución espacial de la precipitación para cada una de las cuencas el cual se determinó mediante interpolación espacial gracias al “Atlas climatológico interactivo de Colombia”(Ideam, 2015). La información fuente de las estaciones hidroclimatológicas fue la disponible en el Sistema de Información del Recurso Hídrico -SIRH- del IDEAM (Ideam, 2012).

En la Figura 5 se presentan las estaciones pluviométricas más cercanas a los sitios de muestreo, distribuidas en toda la zona de estudio. Los datos fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).



Figura 5. Distribución espacial de las estaciones de las diferentes estaciones pluviométricas en la zona de estudio.

#### 6.1.1. Datos hidráulicos y climáticos

La velocidad de la corriente fue medida a través de dos metodologías. La primera de ellas conocida como el método del flotador y para la segunda se realizó un aforo usando el método del vadeo, empleando un correntómetro Modelo FP211 en cinco de las nueve estaciones, en

tres de la quebrada La Nitrera (NE1, NE2, NE3) y en las dos primeras estaciones del río San Juan (SJE1, SJE2), cuando las condiciones climáticas y de acceso al lugar lo permitían. Para las otras estaciones se usó la información secundaria de estaciones climatológicas e hidrometeorológicas disponibles en las plataformas del IDEAM y Corantioquia.

La Figura 6 presenta la sección transversal (azul) e imágenes de la Estación 1 en el Río San Juan, para el cálculo del caudal del año 2017 con los puntos donde se tomaron los valores de velocidad con ayuda del correntómetro (rojo).

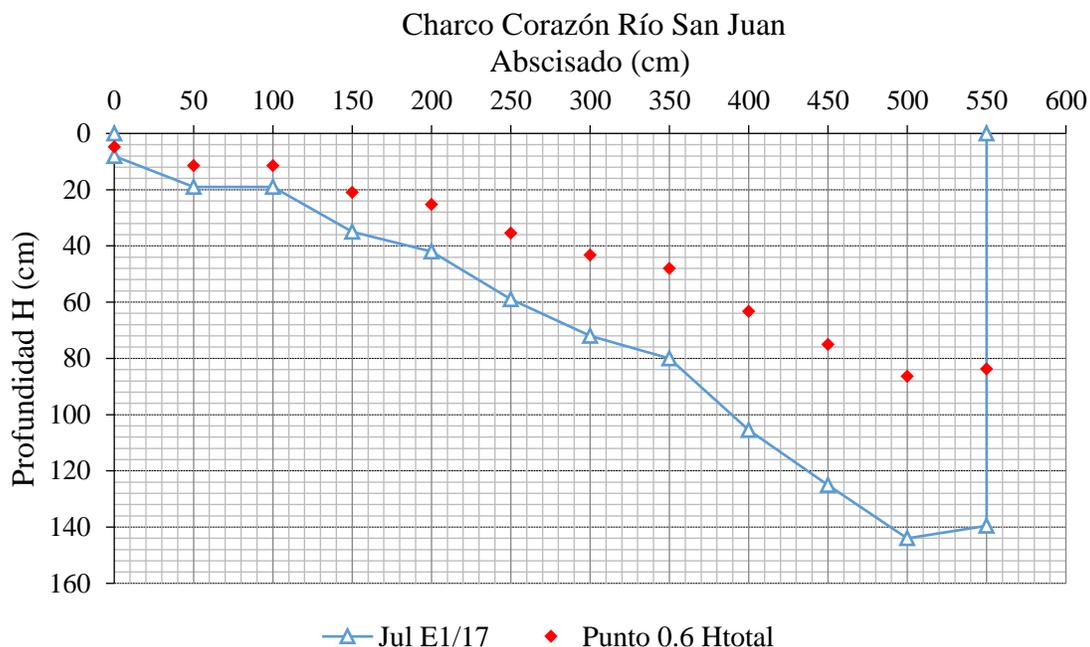


Figura 6. Sección transversal del la Estación 1 del Río San Juan para cálculo de caudal.

El aforo en épocas secas para la quebrada la Nitrera y cuyas profundidades no superaron los 0.1 m se realizó el método del flotador definiendo una sección longitudinal del cauce y usando una pelota de pinpong para medir el tiempo tomando cuatro repeticiones por tramo. En las estaciones que permitían el uso del correntómetro fue realizado por el método de vadeo, para lo cual se hizo un levantamiento de la sección transversal, el ancho y la profundidad con la ayuda de una cinta métrica. El tramo fue dividido en secciones iguales y

con ayuda del correntómetro se determinó la velocidad ( $V_i$ ) a 0.6 de la profundidad total (Figura 6). Una vez establecidas el número de secciones ( $n$ ) se procedió a calcular el área de cada sección o trapecio ( $a_i$ ) y luego se determinó el caudal total  $Q_{total}$  (Agualimpia & Castro, 2006; Ruiz-Toro et al., 2020).

El caudal  $Q_i$  con una velocidad  $V_i$  correspondiente al área de influencia  $a_i$ , se presenta en la ecuación 1:

$$Q_i = V_i * a_i \quad [1]$$

El caudal total,  $Q_T$ , será entonces [2]:

$$Q_{total} = \sum_1^n Q_i \quad [2]$$

### 6.1.2. Cálculo de la longitud del perímetro mojado

El cálculo del perímetro mojado (P) es importante para conocer la estructura geomorfológica de la sección transversal de cada uno de los reoambientes. Este se calculó para la quebrada La Nitrrera en cada monitoreo y se puede definir matemáticamente usando la ecuación 3 (Knighton, 2014):

$$P = \sum_{i=0}^{\infty} l_i \quad [3]$$

Donde,  $l_i$  es la longitud de cada superficie en contacto con el cuerpo acuoso.

### 6.1.3. Gradiente altitudinal, Mapa de pendientes y Relieve

Para el levantamiento de las redes de drenaje y el mapa de elevación digital se seleccionaron en total 10 DEM (Alos-palsar) formato .tif distribuidos en toda la zona de estudio. Con el programa Qgis se usaron las funciones del paquete *análisis hidrológico*; allí se generaron los diferentes raster con las subcuencas y redes de drenaje, entre otros.

Para la descripción de los sitios de muestreo se siguió la metodología propuesta por el Ideam (2010) por Unidades de Coberturas de la Tierra para la Leyenda Nacional, escala 1:100.000, según CORINE (*Coordination of Information on the Environmental*) Land Cover adaptada para Colombia. Los recursos usados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8 Portal web de la información cartográfica usada en la investigación

Recurso	Sitio web
Mapas del suelo	<a href="https://geoportal.igac.gov.co/es/contenido/datos-abiertos-agrologia">https://geoportal.igac.gov.co/es/contenido/datos-abiertos-agrologia</a>
DEM Colombia	<a href="https://vertex.daac.asf.alaska.edu/">https://vertex.daac.asf.alaska.edu/</a>

Esta información es de libre acceso y solo requiere el registro y un login para acceder. El proceso de escogencia de las imágenes se describe en las secciones siguientes.

## 6.2. Cobertura vegetal- terrestre asociada a las cuencas

El mapa de coberturas terrestres utilizó la metodología CORINE y mediante la fotointerpretación de imágenes satelitales se pudo establecer el mapa correspondiente a todo el tramo de la cuenca de estudio. Se usó el programa ENVI 5.3 y ArcMap 10.7 para el procesamiento del mapa de coberturas. Se escogieron para este análisis 15 imágenes satelitales que presentaran poca nubosidad y que permitieran la interpretación (Tabla 9).

Tabla 9 Imágenes satelitales utilizadas para el procesamiento y generación de mapas

Satélite	Path	Row	Fecha
Landsat 8	9	55	2017/jul/27
	9	56	
	9	55	2017/dic/24
	9	56	
	9	55	2018/jun/15
	9	56	
	9	55	2018/jul/30
	9	56	
Landsat 7	9	55	2017/jul/03
	9	56	2017/oct/07
	9	55	
	9	55	2018/ago/07
	9	56	
	9	55	2018/dic/29

Los pasos para la fotointerpretación fueron:

1. A cada imagen se le realizó corrección atmosférica y radiométrica, para minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada elemento.
2. Aplicación del coeficiente NVDI para identificar mediante la respuesta espectral, las diferentes coberturas vegetales presentes.

Las coberturas que se tuvieron en cuenta a la hora de interpretar, usando la metodología del Ideam (2010), fueron las siguientes:

- *Territorios artificializados*: Las áreas de las ciudades y las poblaciones y, aquellas áreas periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.
  - *Territorios agrícolas*: Terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos en rotación y en descanso o barbecho. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas.
  - *Bosques*: Los cuales comprenden las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. En esta categoría se incluyen otras formas biológicas naturales, tales como la palma y la guadua.
  - *Área con vegetación herbácea y/o arbustiva*: Grupo de cobertura vegetal de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrollados sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica.
  - *Áreas abiertas o con poca vegetación*: Territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesto principalmente por suelos desnudos y quemados, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve.
  - *Superficies de agua*: Cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente y los que bordean o se encuentran adyacentes a la línea de costa continental, como los mares. Se incluyen en esta clasificación los fondos asociados con los mares, cuya profundidad no supere los 12 metros.
3. Se realizó un barrido en las imágenes satelitales, tomando puntos de interés donde se identificaron claramente las coberturas esto se realizó en el programa ENVI 5.3. De cada cobertura se marcaron entre 800 – 1000 puntos y así minimizar los errores.
  4. Con los puntos marcados, la clasificación se realizó con el método de “*Supervised classification: Maximum Likelihood Classification en ENVI 5.3*”.
  5. Para eliminar los errores y las coberturas que no eran apreciables (mayores a 2 hectáreas), se utilizaron los siguientes métodos en ENVI 5.3:
    - Combinación de clases: En donde se redefinían píxeles que no fueron posibles de clasificar.
    - “*Sieve clases - Clump clases y Majority/Minority analysis*”: Para eliminar los grupos de píxeles menores a 2 hectáreas ya que no eran apreciables para la escala del mapa.
  6. Conversión de píxeles a vectores para así poder exportarlo como shapefile y modificarlos en ArcGis 10.7.

7. Con la ayuda de la tabla de atributos y la herramienta de “*Data management tools- Generalization- Eliminate*” se eliminaron los polígonos con áreas menores a 2 hectáreas, unificando más el mapa.
8. Para corroborar la información que se encontraba bajo las nubes y algunas zonas que no eran fáciles de identificar en las imágenes Landsat, se hizo uso de las ortofotos del departamento de Antioquia. Estas modificaciones se realizaron de manera manual en el programa de ArcGis 10.7.

### **6.3. Usos del suelo y clasificación de las actividades socioeconómicas**

A partir del mapa de coberturas terrestres, se realizó el mapa de usos de suelo actual. La leyenda de este mapa se tomó de (POMCA, 2017), la cual da las siguientes definiciones:

- *Uso urbano*: Tejido urbano continuo, discontinuo, red vial, ferroviaria y terrenos asociados, zonas industriales o comerciales, zonas de disposición de residuos.
- *Uso agrícola*: Cultivos transitorios, cultivos permanentes herbáceos, cultivos permanentes arbustivos, cultivos permanentes arbóreos, tubérculos.
- *Uso agrosilvopastoril*: Mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales.
- *Uso forestal productivo*: Plantaciones forestales.
- *Uso forestal protector*: Bosque (ripario, denso, abierto, fragmentado), vegetación secundaria.
- *Uso minero*: Zonas de extracción minera y escombreras.
- *Uso para conservación, protección y/o manejo especial*: Áreas de reserva naturales, zonas pantanosas, ríos, lagunas, lagos y ciénagas naturales y cuerpos de agua artificiales.
- *Sin uso*: Tierras desnudas y degradadas, zonas arenosas naturales.

### **6.4. Análisis y toma de muestras en campo y laboratorio**

En cada una de las nueve estaciones se realizó la georeferenciación, recolección de muestras y la descripción de los sitios. Allí se levantó la información hidráulica, fisicoquímica y los macroinvertebrados acuáticos. Cada una de estas variables se tomaron con réplica. El trabajo de campo se desarrolló en febrero, julio, agosto y septiembre de 2017 y abril, julio, agosto y septiembre de 2018, considerando épocas secas, lluvias y Transiciones. La Tabla 10 presenta la matriz de consistencia de la investigación.

Tabla 10 Matriz de consistencia

Pregunta de investigación	Objetivo	Variables	Métodos	Diseño propuesto	Regla de decisión
¿Cómo el gradiente altitudinal puede generar cambios en la estructura de los macroinvertebrados acuáticos en un reoambiente?	Determinar el gradiente altitudinal, oferta hídrica, usos del suelo, coberturas vegetales en las cuencas de tres reoambientes a través de sistemas de información geográfica para la gestión del recurso hídrico.	-Velocidad -Caudal -Perímetro húmedo -Variables climáticas -Usos del suelo -Coberturas terrestres	-Sistema de información geográfica (SIG) -Correntómetro -Sección transversal	Tres cuencas Meses de Época de lluvia, época de transición y época seca. Mapa coberturas Mapa de usos Mapa de elevación Mapa de precipitación	Fotointerpretación Descriptiva
¿Cómo se refleja la estabilidad de un reoambiente en tanto a las características ambientales de una cuenca y la variabilidad de los biotopos de macroinvertebrados acuáticos?	Analizar la variación de los biotopos de macroinvertebrados acuáticos en tres reoambientes considerando su gradiente altitudinal y la variación hidrológica en temporada secas, lluvias y Transiciones.	-Densidad de organismos -Diversidad -Riqueza -Equidad -Épocas: seca, transición y lluvia -Número organismos -Variables fisicoquímicas	-Determinación taxonómica Diversidad: $H' = - \sum \frac{n_i}{N} \cdot \ln \frac{n_i}{N}$ Dominancia: $D = \frac{\sum n_i (n_i - 1)}{N (N - 1)}$ Equidad: $J = \frac{H'}{\max H'}$ Riqueza: S=Número de taxa	Muestreo semi-cuantitativo. Muestreo cuantitativo. 9 estaciones. 2 réplicas por estación.	- Índices de diversidad. - Análisis de componentes principales (ACP) - Análisis Multifactorial
¿Cuáles son roles tróficos de los principales morfotipos de macroinvertebrados y especies indicadoras de macroinvertebrados	Modelar los Grupos Funcionales de Alimentación de los principales morfotipos de macroinvertebrados	-Modularidad -Filtradores -Depredadores -Colectores -Fragmentadores	abundancia relativa de biomasas de los llamados grupos funcionales alimentarios (GFA)	Muestreo cuantitativo 8 estaciones 2 réplicas por estación	p-value (S-K, Shapiro ó Kruskal Wallis ) -Análisis Multifactorial

<b>Pregunta de investigación</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Variables</b>	<b>Métodos</b>	<b>Diseño propuesto</b>	<b>Regla de decisión</b>
acuáticos en tres reoambientes y que presentan un criterio importante de bioindicación?	acuáticos en los tres reoambientes mediante redes ecológicas.	-Raspadores		Hojarasca (HOJ), grava (GRA),	
¿Qué técnica de procesamiento digital de imágenes puede ser una herramienta que suministre beneficios adicionales a las metodologías tradicionales usadas en el análisis de la calidad del agua usando los macroinvertebrados acuáticos?	Desarrollar un método basado en procesado de imágenes y aprendizaje de máquinas que permitan la determinación de los principales organismos presentes en los reoambientes.	-Imágenes	-Clasificador Máquinas de soporte vectorial	-Obtención de la imagen. -Segmentación de características. -Decisión.	Clasificador Máquinas de soporte Vectorial

#### 6.4.1. Datos fisicoquímicos

En la Tabla 11 se presentan las variables medidas en campo y los equipos utilizados en esta investigación, las cuales fueron: velocidad de la corriente, determinación de organismos, e imágenes, captura de imágenes, análisis estomacal, Turbiedad, Oxígeno disuelto, Saturación de Oxígeno, pH, Conductividad eléctrica, Alcalinidad total.

Tabla 11 Equipos utilizados para los análisis hidráulicos y fisicoquímicos

<b>Variable</b>	<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
Velocidad de la corriente	Correntómetro	Global Water	FP211
Determinación organismos	Estereomicroscopio	Boeco	BST - 606
Captura de imágenes	Estereomicroscopio	Zeiss	Stemi™ DV4
Captura de imágenes aéreas	Dron	Phantom 4 Pro V2.0	
Análisis estomacal	Microscopio invertido	Boeco	BIB100
Turbiedad	Turbidímetro	HACH	2100Q
Oxígeno disuelto	Multiparamétrico	WTW	3630 IDS
Saturación de Oxígeno	Multiparamétrico	WTW	3630 IDS
pH	Multiparamétrico	WTW	3630 IDS
Conductividad eléctrica	Multiparamétrico	WTW	3630 IDS
Alcalinidad total	Kit nanocolor		

#### 6.4.2. Recolección de los macroinvertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados acuáticos fueron colectados mediante un muestreo cuantitativo y uno semi cuantitativo. El primero de ellos se utilizó una red Surber de área de 0.09 m<sup>2</sup> por un tiempo de un minuto en una de las márgenes de los reoambientes estudiados. El segundo se tomó, a lo largo de la margen de cada reoambiente definiendo una sección de 10 m donde se hizo un barrido con la red triangular con un área de 0.037 m<sup>2</sup> por un tiempo de 5 minutos. Las muestras se tomaron por duplicado. Con las muestras cuantitativas se pudo calcular los índices de diversidad y los análisis estadísticos. Mientras que las muestras semicuantitativas permitieron realizar el cálculo y asignación de los GFA que para incluyó los sustratos: hojarasca y roca para la Nitrera y roca en San Juan y Cauca. El aporte de hojarasca para los últimos reoambientes fue despreciable.

El material extraído fue separado *in situ* en bandejas plásticas y posteriormente almacenados en frascos plásticos con alcohol al 70% debidamente rotulados con fecha, lugar, tipo de sustrato, replica, responsable, para luego ser llevados al laboratorio de Hidrobiología Sanitaria de la Universidad de Antioquia. En el laboratorio se determinaron todas las muestras de los organismos, los cuales fueron llevados a nivel taxonómico de familia y género cuando era posible. Para ello se usó un estereomicroscopio BST-606, la cámara que

se usó fue una B-CAM 16. De 16 megapíxeles 1/3,33” Panasonic cmos sensor. El software de visualización es Boeckel B-Wiew versión x64. Compatible con Windows XP/Vista/7/8/10.

Las referencias bibliográficas que sirvieron de base para la determinación de los macroinvertebrados acuáticos fueron:(Roldán Pérez, 1996)(Domínguez E. & Fernández H., 2009)(Álvarez & Daza, 2005)(Posada & Roldan, 2003)(Roldán, 2003)(Machado & Rincon, 1989)(Lasso, Morales-Betancourt, Vera-Ardila, & Linares, 2018)(Campos & Lasso, 2015)(Campos, 2014)(Roldán-Pérez, 2016). Algunos crustáceos y moluscos fueron determinados con el apoyo del Dr. Carlos Lasso del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt en la ciudad de Bogotá. Se aprovechó también el grupo de especialistas que participaron en el Congreso latinoamericano de macroinvertebrados acuáticos en Ecuador, para verificar algunos morfotipos. Dos ejemplares adultos del género *Hetaerina* capturados en la estación Comfenalco SJE2 fueron enviados al grupo de entomología del Instituto de Biología de la Universidad de Antioquia, con el apoyo de la profesora Dra. Martha Wolf y el Dr. Cornelio Bota Sierra (Anexo 5).

En la Figura 7 se presentan la red tipo Surber (A) y la red Triangular (B) utilizadas en las diferentes campañas



A. Red Surber



B. Sección 10 m



C. Red triangular

Figura 7. Tipos de muestreo y redes utilizadas para la recolección de los macroinvertebrados acuáticos.

La red tipo Surber se usó como muestreo cuantitativo y se ubicó en la margen izquierda de cada reoambiente. Para el muestreo semi-cuantitativo se marcó un transecto de 10 m (B) y por un periodo de 5 minutos se recolectaron los organismos en la ribera de cada reoambiente. Cada unos de estas por réplica.

#### 6.4.3. Análisis de las variables ambientales y biológicas

Se realizaron análisis descriptivos usando estadística inferencial de las variables fisicoquímicas, hidromorfológicas y biológicas por cada reoambiente considerando promedios, máximos, mínimos, con el propósito de visualizar tendencias y extremos en cada una de las variables usadas en esta investigación.

El análisis de componentes de varianza (ACV) se realizó mediante el paquete estadístico *Statgraphics Centurion XVI.I*, para las variables ambientales, tipo de muestreo, tipo de río e

índices de diversidad. En aquellas que representaron un porcentaje de variabilidad mayor del 25% por cada uno de los factores, se procedió a usar la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza.

Se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) relacionando las variables ambientales presentadas en la sección 6.4.1 con las morfoespecies más representativas en el muestreo cuantitativo y los grupos funcionales alimentarios. Para el análisis de estos últimos se usó una ANOVA multifactorial permitiendo conocer variaciones estadísticamente significativas con la altitud y la época, una de las hipótesis de esta investigación.

Finalmente, se usó como variable respuesta la modularidad asociada a las interacciones tróficas. De esta manera, mediante una ANOVA multifactorial, se pudo conocer si existían diferencias significativas asociadas a la época o al sitio de muestreo.

Los índices de diversidad fueron determinados a través del programa *Biodiversity Pro* y *Excel*. Además, la información fue recolectada y sistematizada en el programa Excel, se usaron herramientas como Tablas dinámicas para generar algunos gráficos interactivos.

## 6.5. Estructura de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos

Para conocer la estructura de la comunidad de macroinvertebrados se calcularon los siguientes índices de diversidad presentados en la Tabla 12, los cuales fueron calculados mediante el software *Biodiversity Pro* y el programa Excel.

Tabla 12 Índices de diversidad propuestos para el análisis de la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos

ÍNDICE	ECUACIÓN
Diversidad de Shannon & Weaver (1949)	$H' = - \sum \frac{n_i}{N} \cdot \ln \frac{n_i}{N}$ donde, n <sub>i</sub> : Número de individuos de cada taxa. N: Número total de individuos.
Dominancia de Simpson (1949)	$D = \frac{\sum n_i (n_i - 1)}{N (N - 1)}$ donde, n <sub>i</sub> : Número de individuos de cada taxa. N: Número total de individuos.
Equidad de Pielou (1966)	$J = \frac{H'}{\max H'}$ donde, H': Diversidad de Shannon. max H' = Ln (S); S:riqueza.

## 6.6. Grupos Funcionales Alimentarios (GFA)

Para la asignación de los grupos funcionales alimentarios de los organismos presentes en los reoambientes, se realizó en primer lugar el análisis estomacal de algunos organismos con las mayores abundancias. En segundo lugar, se usó la información secundaria por clase taxonómica propuesta por diferentes autores (ver Tabla 13).

Tabla 13 Información secundaria para asignación del grupo funcional alimentarios para los macroinvertebrados encontrados en los tres reoambientes

Clase	Referencia
Hirudinea	Govedich & Moser, 2015.
Insecta	Chará-Serna, Chará, Zúiga, Pedraza, & Giraldo, 2010; Cummins, Merritt, & Andrade, 2005; Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, 2014.
Arachnoidea	Fashing, 1994, 1998.
Gastropoda	Cummins et al., 2005; Lasso et al., 2018; Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, 2014; Thorp & Covich, 2009
Bivalvia	Boltovskoy, Izaguirre, & Correa, 1995
Collembola	Petersen, 2002.

En la Tabla 14 se presta la nomenclatura utilizada para cada uno de los grupos funcionales de alimentación descritos en este trabajo. El listado completo de organismos se presenta en los anexos.

Tabla 14 Nomenclatura asignada para cada grupo funcional de alimentación. Tomado de Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, (2014)

Grupo funcional alimentario (GFA)	Inglés (FFG)	Nomenclatura	Símbolo
Depredadores	Predator	Pr	
Filtradores	Filter feeders	Ft	
Colectores-Recolectores	Collector-Gatherers	CG	

Raspadores	Scrapers	Sc	
fragmentadores	Shredders	Sh	
Perforadores	Piercers	Pc	

### 6.6.1. Análisis estomacal de los principales GFA

Se realizó el análisis digestivo para los morfotipos más representativos seleccionando cinco ejemplares por cada género. Además, se usaron cinco categorías de dietas alimentarias como lo muestra la Tabla 15.

Tabla 15 Nomenclatura y rangos para la dieta alimentaria usadas por Cheshire, Boyero, & Pearson, (2005)

<b>Dieta alimenticia</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Tamaño de partícula</b>
Materia Orgánica Particulada Fina	MOPF	<50 $\mu$ m
Materia Orgánica Particulada Gruesa	MOPG	50 $\mu$ m -1 mm
Restos de Organismos	RO	Enteros o fragmentos de exoesqueleto
Algas perifíticas	AP	Algas
Tejido Vegetal	TV	> 1mm

Todo esto con el fin de verificar la preferencia alimenticia de cada organismo reportada por la literatura. Para el análisis del contenido estomacal de los invertebrados acuáticos se usó el protocolo presentado en el capítulo 19: *Relaciones tróficas en el ecosistema fluvial* (Muñoz, Román, Rodríguez-Capítulo, González Esteban, & García-Berthou, 2009).

En campo se usó la red tipo Surber dispuesta en contracorriente, se extrajo el material de gran tamaño como piedras con el pie, y con la mano se removió el material en el cuadrante, asegurando que el sedimento y los organismos caigan en la red; el procedimiento es el mismo detallado anteriormente. Una vez en el laboratorio, después de la determinación de los macroinvertebrados, se separaron los organismos por género y con ayuda de estereomicroscopio BOECO BST – 606 de alto poder de resolución, se extrajo el material digestivo más cercano a la zona bucal con unas pinzas de disección, este se depositó en un portaobjetos y se adicionó una gota de glicerol, luego con un cubreobjetos se homogenizó la muestra y se procedió a realizar la observación al microscopio invertido donde se llevo a cabo el inventario de material y registro fotográfico que presentaba cada placa (Muñoz et al., 2009).

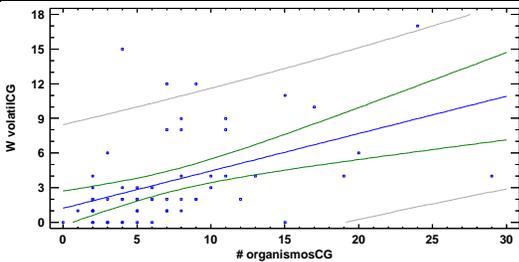
La metodología usada para la asignación de las dietas alimenticias fue la realizada por Cheshire, Boyero, & Pearson, (2005) y para la asignación de los GFA se usó lo propuesto por Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, (2014) para el Neotrópico. Las imágenes fueron tomadas con un microscopio Boeco BIB100 con el objetivo de 40x (0.05mm) a excepción del *Phylloicus* que se realizó con el objetivo 10x. Según Rosi-Marshall, Wellard Kelly, Hall, & Vallis, (2016) se deben preservar al menos 4, pero idealmente de 15 a 20 individuos de cada taxón de interés para caracterizar la variabilidad en la composición de la dieta entre individuos. Para este caso se analizaron 5 individuos por cada taxón.

#### 6.6.2. Determinación de la biomasa de los GFA

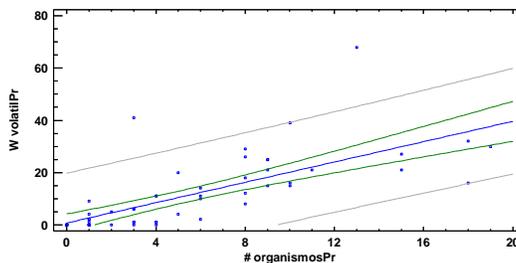
La biomasa se determinó en el Laboratorio de Hidrobiología Sanitaria mediante el peso seco relativo siguiendo el protocolo de Molina & P.B., (2009). Para ello, se usaron las muestras colectadas en el muestreo semicuantitativo de la quebrada la Nitrera integrando los sustratos (roca y hojarasca) y dispuestas en crisoles de porcelana. Inicialmente se filtró la muestra por 30 minutos removiendo la mayor cantidad de alcohol. Posteriormente se separaron los organismos de acuerdo con el grupo alimenticio funcional. Se llevaron a una mufla eléctrica MF-2001 a 105 °C por dos horas. La determinación de los sólidos fijos (fracción inorgánica) se realizó al calcinar la muestra a una temperatura de 550 °C por media hora. Se pesó la muestra en una balanza analítica marca Shimadzu TX323L con una sensibilidad 0.001 mg. Este procedimiento se realizó con réplica. De esta manera los sólidos volátiles se determinaron mediante la diferencia de peso para así obtener la biomasa disponible que puede ser utilizada como la energía para organismos de orden superior (Ruiz-Toro et al., 2020).

Los datos de abundancias y peso volátil fueron usados para construir las curvas por grupo funcional. Para cada uno se realizó la prueba de normalidad usando Shapiro-Wilk en R. Para el modelo de regresión se usó el software *Statgraphics Centurión XVI*. II. El modelo lineal presentó el mejor ajuste con un p-valor estadísticamente significativo y con un valor de R por encima de 0.4 para cada uno de los FFG (Tabla 16).

Tabla 16 Modelo ajustado para la determinación de la biomasa por cada uno de los grupos funcionales alimentarios. Datos tomados de Ruiz-Toro et al., (2020)

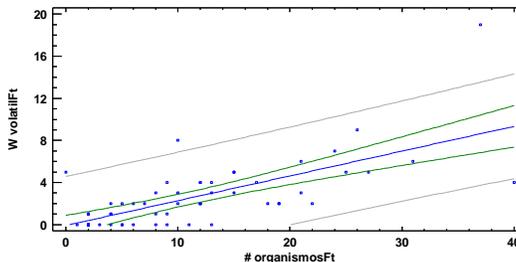
GFA	R	p-valor	Ecuación
CG	0.468	0.0002	 $WCG = 1.21289 + 0.323525 * No.OrgCG$

Pr      0.693      0.0000



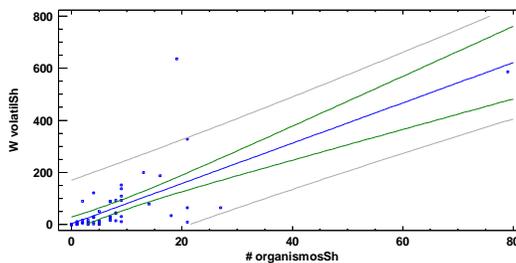
$$WPr = 0.662961 + 0.17305 * No.OrgPr$$

Ft      0.693      0.0000



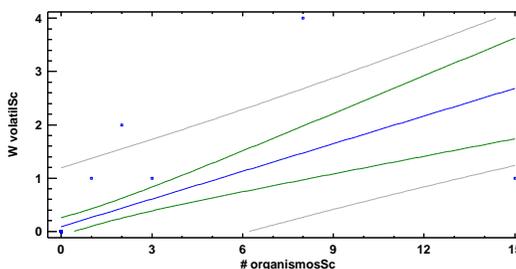
$$WFt = 0.088479 + 0.17305 * No.OrgFt$$

Sh      0.633      0.0000



$$WSh = 2.27427 + 7.74171 * No.OrgSh$$

Sc      0.730      0.0000



$$WSc = 0.088479 + 0.17305 * No.OrgSc$$

Este resultado de la Tabla 16 permitió usar el número de organismos de cada grupo funcional para estimar el peso de cada muestra por GFA. Además se presenta la ecuación de la regresión lineal para cada GFA. Para el caso los CG la correlación fue de 0.468. Los Ft y Pr presentaron una de 0.69, mientras que para los Sh y Sc fue de 0.63 y 0.73 respectivamente. Todos presentaron un nivel de significancia.

## 6.7. Modelo de redes de análisis y visualización “Gephi”

### 6.7.1. Análisis de la Modularidad

En la ecuación [4], se presenta el cálculo del valor de la modularidad para conocer el grado de intensidad de agrupamiento de una red, que mide la calidad de las particiones resultantes y cuyo valor escalar puede estar en el rango de -1 y 1 (Blondel, Guillaume, Lambiotte, & Lefebvre, 2008).

$$Q(P) = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[ A_{ij} - \frac{d_i d_j}{2m} \right] \delta(C_i, C_j) \quad [4]$$

Donde:

$Q$ : Modularidad

$P$ : Partición determinada

$A_{ij}$ : Matriz de adyacencia al grafo

$d_j$ : Grado del nodo  $i$

$d_i$ : Grado del nodo  $j$

$m$ : Número de aristas o links

$\frac{d_i d_j}{2m}$ : Según el modelo nulo, corresponde al número esperado de aristas entre los nodos  $i$  y  $j$

La función  $\delta$  es uno si es que los nodos  $i$  y  $j$  están en la misma comunidad ( $C_i=C_j$ ) y cero en caso contrario.

Si una red presenta una alta modularidad entonces esto se ve reflejado en el grado de compartimentación de las redes tróficas alimentarias. Esto determina la estabilidad de las comunidades. Además una red con una alta modularidad es resiliente ante las perturbaciones o cambios externos.

Se usó el software *Gephi* 0.9.2, como herramienta de fácil acceso para la representación y análisis de las redes ecológicas (Bastian, Heymann, & Jacomy, 2009; Martin, 2015). Este software se aplicó para los grupos funcionales alimentarios de los muestreos semicuantitativos. Los grafos se conforman de dos componentes: el listado de nodos que componen la red (Grupos funcionales alimentario y abundancias de morfoespecies) y un listado de interacciones entre los nodos (Biomasa). La

Tabla 17 muestra la entrada de los datos al programa, mientras que la Figura 8, la salida gráfica. El tamaño de los nodos indica el número de organismos y el tamaño de las flechas es la biomasa que llega a los predadores (Pr).

Tabla 17 Listado de Nodos (Izq.) y Aristas (Der.) de la Estación 3 de la quebrada La Nitrera en el mes de abril de 2018

ID	Label	Origen	Destino	Tipo	Label	Peso
2	CG	7	3	Dirigida	Ft	3.0
3	Ft	8	2	Dirigida	CG	1.0
4	Sh	9	2	Dirigida	CG	1.0
5	Sc	10	4	Dirigida	Sh	2.0
6	Pr	11	5	Dirigida	Sc	1.0
7	<i>Thraulodes</i>	12	3	Dirigida	Ft	2.0
8	<i>Baetis</i>	13	6	Dirigida	Pr	1.0
9	Elmidae	14	4	Dirigida	Sh	4.0
10	<i>Ptilodactylidae</i>	15	2	Dirigida	CG	1.0
11	<i>Psephenops</i>	16	2	Dirigida	CG	1.0
12	<i>Smicridea</i>	17	6	Dirigida	Pr	5.0
13	<i>Atopsyche</i>	18	2	Dirigida	CG	1.0
14	<i>Phylloicus</i>	19	3	Dirigida	Ft	1.0
15	<i>Triplectides</i>	2	6	Dirigida		7.52025
16	<i>Oecetis</i>	3	6	Dirigida		1.4112
17	<i>Anacroneuria</i>	4	6	Dirigida		47.127945
18	Chironomidae	5	6	Dirigida		0.174879
19	<i>Simulium</i>					

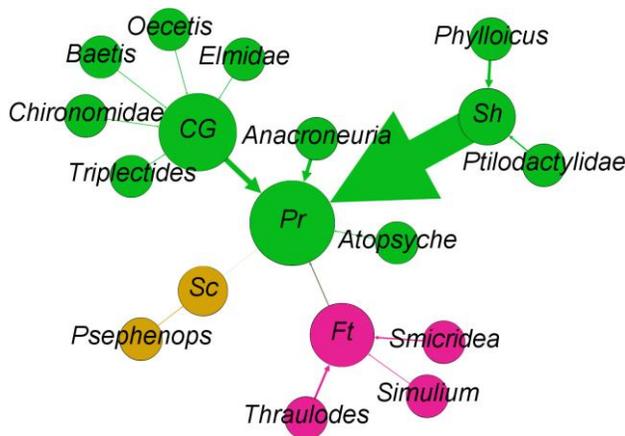


Figura 8. Ejemplo de Diagrama para NE3 usando Gephi con las conexiones.

El tamaño de los nodos indica el número de organismos en términos de abundancia por cada taxón y GFA. Mientras que el sentido de las flechas muestran si la relación es dirigida o no dirigida. En este caso, es el aporte de biomasa que llega hasta el grupo funcional Pr. El grosor de las flechas representa la cantidad de biomasa que puede ser consumida por los predadores (Pr). Finalmente los colores indican el número de módulos. El modelo permite calcular un único valor numérico de modularidad para cada estación. Así mismo, se asigna a cada nodo una clase de modularidad, la cual es representada en el gráfico por colores. Se

realiza la separación de la red en módulos o segmentos, agregando a cada uno de ellos un color (Anexo 7). En la Figura 8 es de resaltar que para la NE3 se presenta una red estable con 3 módulos. El mayor aporte de biomasa lo hacen los Sh, seguido de los Ft. Los géneros *Anacroneuria* y *Atopsyche* son los depredadores presentes en esta red.

## 6.8. Método de determinación de macroinvertebrados acuáticos

### 6.8.1. Organismos e instrumento utilizado para la determinación

Se usaron cuatro diferentes morfotipos de macroinvertebrados acuáticos cuyo criterio de selección fue el de las mayores abundancias en cada uno de los ríos estudiados, con el fin de tener una gran cantidad de imágenes distintas para alimentar la base de datos de imágenes. Ellos fueron las familias Perlidae, Hydropsychidae, Leptophlebiidae. Dentro de esta última familia se escogieron los géneros *Thraulodes* sp y *Traverella* sp, para un total de cuatro clases. Las fotografías fueron obtenidas de un estereomicroscopio *Zeiss Stemi*<sup>TM</sup> DV4 iluminación LED ocular de 10X. Para la captura de las imágenes se usó un adaptador de celular incorporado en el ocular del equipo conectado a un celular iPhone 7 con una cámara integrada de 12 megapíxeles con apertura de  $f/1.8$  formato “JPEG” (Figura 9).



Figura 9. Montaje para la captura de las imágenes usando un estereomicroscopio.

### 6.8.2. Pasos para la captura de las imágenes

- i. Configuración de la cámara: se enciende el estereomicroscopio y se coloca el soporte en el ocular con el celular.
- ii. Ubicación del objeto: una vez separados los macroinvertebrados en el laboratorio se disponen en una caja de Petri con alcohol al 70% con los organismos completamente sumergidos, en la base del estereomicroscopio.
- iii. Se ubica el objeto en el centro del campo visual. Se coloca la máxima luz.
- iv. Se ajusta la imagen con el tornillo micrométrico y se ajusta el tornillo macrométrico hasta lograr el enfoque.
- v. Se captura la imagen y se almacena con una etiqueta.

En la Figura 10 se observan las imágenes de los macroinvertebrados acuáticos capturadas con el dispositivo propuesto.

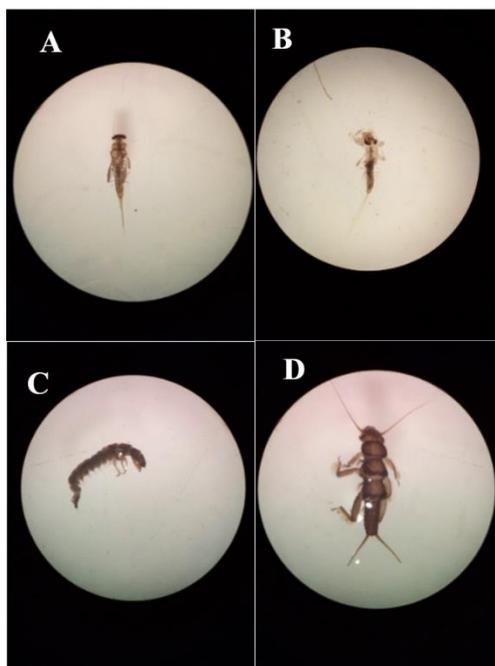


Figura 10. Imágenes capturadas para el procesamiento y el entrenamiento de la red. A. *Thraulodes* sp B. *Traverella* sp C. *Anacroneuria* sp D. *Smicridea* sp.

Se observan las cuatro imágenes que corresponden a las cuatro clases para los cuatro géneros de macroinvertebrados acuáticos más abundantes en los reoambientes analizados.

### 6.8.3. Modelo de clasificación de los macroinvertebrados acuáticos

A continuación, se describe el procedimiento seguido para la determinación de macroinvertebrados basados en una imagen. En primera instancia se recolectó un conjunto de imágenes de macroinvertebrados acuáticos que fueron tomadas bajo las mismas condiciones de tamaño, resolución y localización del objeto de interés. Los macroinvertebrados individualizados que estaban contenidos en las cajas de Petri eran observados a través de un estereomicroscopio con cámara. En cada imagen había un macroinvertebrado que ocupaba entre el 50% y el 60% de la imagen y otros elementos menores, resultado de la toma. Una vez obtenida la imagen, fue preprocesada eliminando cualquier objeto libre más pequeño que el macroinvertebrado y se unificó el fondo de tal forma que sólo quedara el macroinvertebrado en fondo negro.

Se creó un banco de fotos de macroinvertebrados compuesto por 587 imágenes para todas las *Clases*, de las cuales se usaron un 70% entrenamiento y un 30% para la predicción, con el fin de construir un modelo de determinación basado en la técnica de bolsas de palabras aplicado a imágenes (Venegas-Barrera, J. Manjarrez, 2004). En este caso la *clase* se refiere en informática a la representación de entidades o conceptos, no a la categoría taxonómica. Se probaron varios clasificadores que utilizan técnicas de soporte vectorial para determinar nuevas imágenes que contenían macroinvertebrados, de los cuales se desconocía su clase.

#### 6.8.4. Composición de la imagen desde los pixeles

Una imagen digital, se representa como una aplicación  $f: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}^3$  a la cual se le asocia la dupla  $(x, y)$ ,  $(1 \leq x \leq n, 1 \leq y \leq m)$ , que determina la posición en la cual se encuentra un pixel compuesto por los colores rojo, verde y azul respectivamente. Estos colores son representados por la tripleta  $(r, g, b) \in [0, 255]$  que a su vez significa la intensidad de los colores que componen el pixel. Dicho de otra forma, la función  $f(x, y)$  se conoce como el valor de los pixeles que conforman la imagen.

Una imagen  $f(x, y)$  está compuesta a su vez por un conjunto de regiones denominadas región de pixeles  $Obj_1, Obj_2, Obj_2 \dots Obj_n$ , que se obtienen al ser sometidos a un proceso de segmentación  $S\{f(x, y)\}$  donde son individualizados mediante la asignación de una etiqueta  $e_i$  a todos los pixeles que conforman cada objeto. Las etiquetas son tomadas de un conjunto de etiquetas posibles  $\{e_1, e_2, e_3, \dots e_n\}$  y los pixeles que conforman un objeto  $Obj_i$  serán aquellos que tienen la etiqueta  $e_i$ .

#### 6.8.5. Descripción de cada región desde sus características

Una imagen puede ser descrita por las características de los objetos que la conforman, esto es, se puede utilizar un método que aplicado a los objetos  $M\{Obj_1, Obj_2, Obj_2 \dots Obj_n\}$ , que conforman la imagen  $f(x, y)$ , extrae un conjunto de características  $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2 \dots \chi_n) \in \mathbb{R}^n$  únicas a cada objeto, las cuales mediante una función de clasificación  $D: \mathbb{R}^n \rightarrow \Omega$  permitirá determinar si el objeto  $Obj_i$  contenido en una imagen conformado por pixeles con etiqueta  $e_i$  pertenece a una clase  $\omega_i$  de un conjunto de clases  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n\}$ .

#### 6.8.6. Funcionamiento del modelo

Para aplicar la técnica de *Bag of Words* se realizaron los siguientes pasos que se muestra en la Figura 11:

1. A la imagen  $f(x, y)$  que contiene inicialmente el macroinvertebrado y otros objetos  $\{Obj_1, Obj_2, Obj_2 \dots Obj_n\}$ , se le somete a un preprocesado donde estos objetos son segmentados  $S\{f(x, y)\}$  lo que etiqueta cada objeto  $\{e_1, e_2, e_3, \dots e_n\}$  para dejar sólo aquel que cumpla como condición que su área sea la mayor, quedando al final una imagen  $f(x, y)'$ , sólo nuestro objeto de interés  $Obj_i$  rodeado de un fondo agregado de color homogéneo – negro.
2. A cada macroinvertebrado que se quiere clasificar se le asigna un valor en el espacio de clases  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n\}$ . A la imagen depurada  $f(x, y)'$  se le extrae un vector de

características, basado en metodología Surf(Bay, Tuytelaars, & Gool, 2008) que son reducidas en cantidad, utilizando la técnica de *K-means* entregando los centroides y los centrados(Simovici, 2012) quedando por resultado un vector  $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2 \dots \dots \chi_n)$  de 500 datos por imagen llamado palabra. Es así que nuestro método aplicado a la imagen preprocesada que tiene el objeto  $Obj_i$  con fondo blanco dará como resultado un vector de características  $M\{f(x, y)\} \Rightarrow \vec{\chi}$  que será el insumo para las siguientes etapas de entrenamiento para la determinación.

3. Se implementaron varios clasificadores  $D$  siendo la máquina de soporte vectorial SVM(Jakkula, 2016) el de mejor eficiencia en el marco de trabajo clasificación de imágenes utilizando “*Bag of Visual Words*” implementado en Matlab(MathWorks, 2018) versión 2018a.
4. La distribución de las muestras puede observarse en la Tabla 18. Con el fin de evitar el problema del submuestreo se ampliaron las muestras a 500 por cada clase utilizando técnicas de aumento de muestras reportadas en(Zheng & Wang, 2015) y así evitar problemas en el desbalance.
5. Una vez entrenado el modelo, se tomaron las nuevas imágenes para la predicción, a las cuales se les aplicó el preprocesado expuesto en el primer paso, luego se les extrajo las características expuestas en el segundo paso y se les aplicó el clasificador  $D$  descrito en el anterior paso.

Tabla 18. Número de imágenes iniciales y ampliadas para las cuatro clases (587 imágenes) que corresponden a cuatro géneros de macroinvertebrados acuáticos.

<b>C</b>	<b>Orden</b>	<b>Familia</b>	<b>Género</b>	<b>ii</b>	<b>%</b>	<b>ia</b>
1	Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	124	21	176
2	Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella</i>	240	41	360
3	Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	73	12	227
4	Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	150	26	150

C: Clase; ii: Número de imágenes inicial; ia: Número de imágenes ampliadas

En la Tabla 18 se pudo apreciar que el mayor número de imágenes capturadas fueron del género *Traverella* seguido de *Smicridea*, *Thraulodes* y *Anacroneuria*. De la misma manera de observa el porcentaje que representa dentro de la base de datos y la base de datos ampliada.

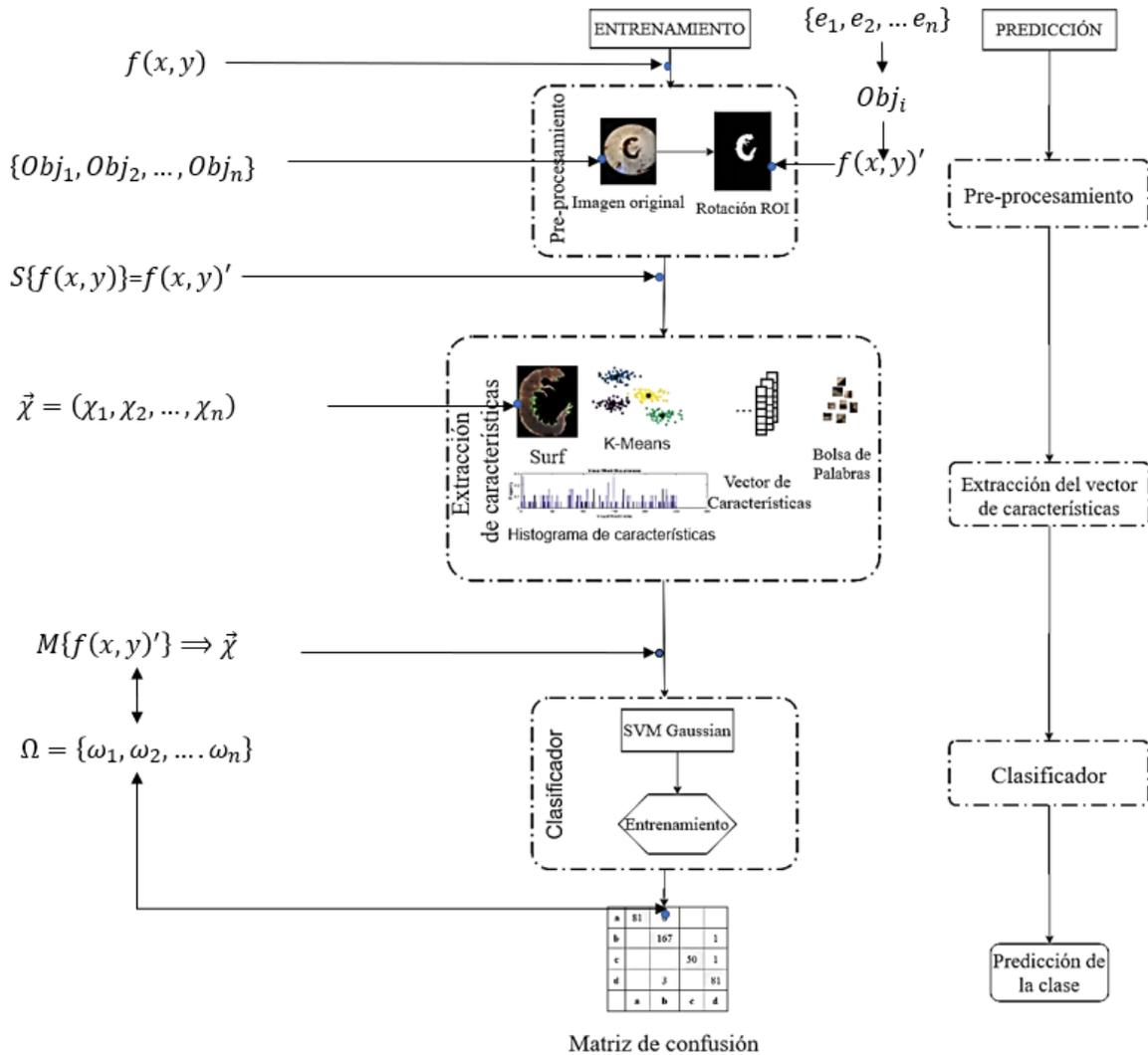


Figura 11. Diagrama del proceso de entrenamiento y uso del modelo propuesto para la clasificación de macroinvertebrados. Elaboración propia.

Finalmente, se realizó un histograma de palabras; se utilizan como muestras positivas y negativas para entrenar el clasificador (MathWorks, 2019a). Una vez se extraen las características mediante técnicas Surf y se usa el vecino más cercano *K-means*; se obtiene el histograma que muestra las ocurrencias de palabras visuales que forman una base, para cada una de las clases, logrando entrenar el clasificador y finalmente la clasificación de las imágenes que se quieren predecir.

## 6. RESULTADOS

La presentación de los resultados a continuación sigue el orden planteado por los objetivos específicos que a su vez están relacionados con las escalas espaciales al momento de abordar el análisis de la estabilidad de un reoambiente. En la sección 6.1 a la 6.4, se presenta una descripción detallada de la cuenca y cada uno de los sitios de estudio, incluido relieve, mapa de usos del suelo, coberturas vegetales y terrestres. En la sección 6.5 a la 6.7 se muestra un análisis de los macroinvertebrados acuáticos de acuerdo con su estructura y composición en los sitios de estudio, los roles alimentarios y biocenosis de los mismos usando las redes ecológicas. Finalmente en la sección 6.8 se muestra el uso de las técnicas de procesamiento de imágenes y aprendizaje de máquinas para la determinación de un grupo de taxones.

### 6.1. Características hidroclimáticas y de oferta hídrica de las cuencas

En la Figura 12 se muestra las distribución mensual multianual de la precipitación mediante el diagrama de cajas y bigotes para cada una de las estaciones elegidas en este estudio.

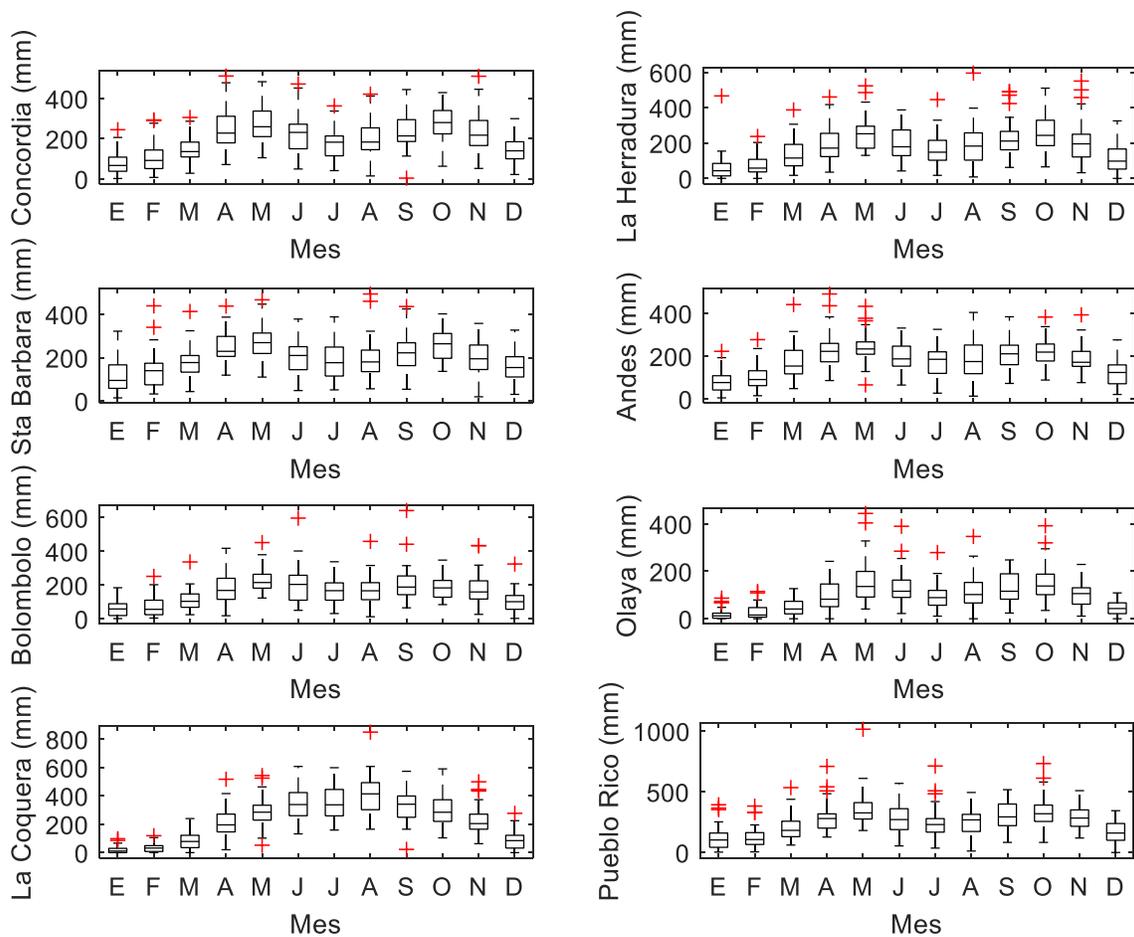
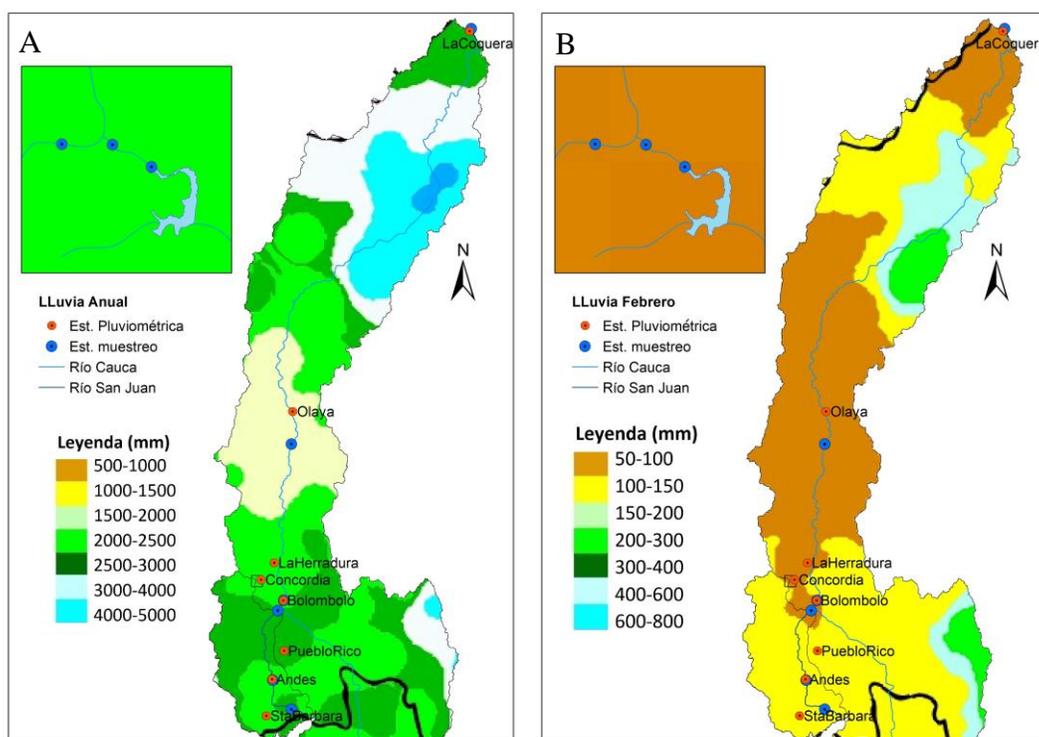


Figura 12. Series mensuales multianuales de las estaciones pluviométricas cercanas a las estaciones de monitoreo en el tramo de la cuenca del Río Cauca.

La estación La Coquera cercana al municipio de Caucasia (CE3) es la única que presenta una distribución unimodal en el régimen de precipitación, siendo el período de diciembre a marzo el más seco, y de mayo a octubre el de más alta pluviosidad en la zona. El resto de estaciones tienen un régimen bimodal, con dos períodos secos, el primero de ellos de diciembre a febrero y otro en el mes de julio (veranillo de San Juan). Los meses con valores de precipitación alta son mayo y octubre. De las estaciones consideradas en el estudio, los valores más altos de pluviosidad han sido registrados en Concordia, Pueblo Rico y La Coquera, con valores que superan los 300 mm/mes. Mientras la estación Olaya presenta los más bajos 150 mm/mes.

En la Figura 13 se presentan los mapas de distribución de colores de acuerdo con la intensidad de la lluvia en las zonas de estudio y las estaciones pluviométricas (naranja) para cada una de las campañas (febrero, abril, julio, agosto, septiembre), las estaciones de muestreo (azul) y el mapa distribución multianual en la cuenca (A).



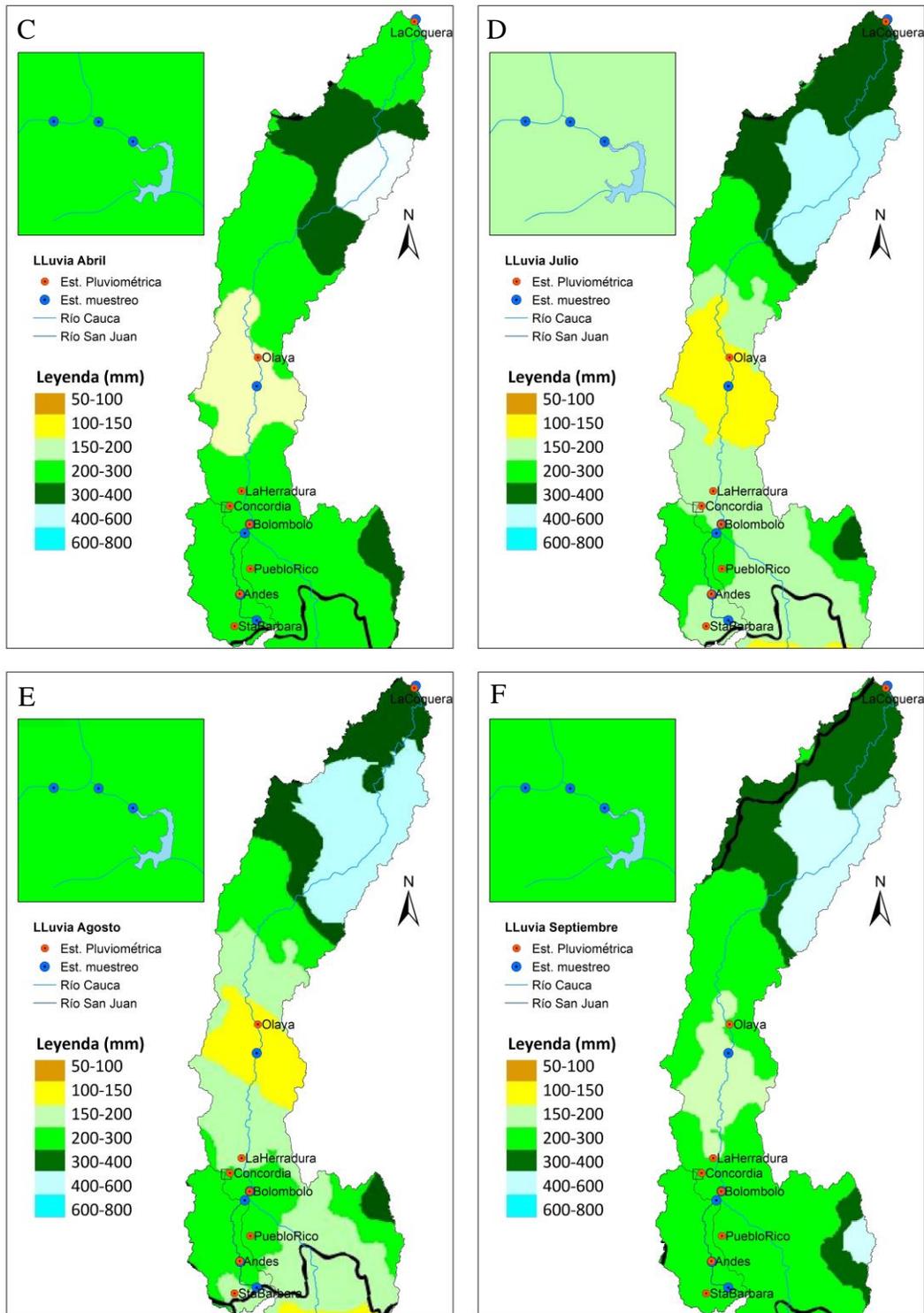


Figura 13. Distribución espacial de la precipitación anual y mensual multianual para las campañas de muestreo en las tres cuencas incluidas las diferentes estaciones pluviométricas. A) Mapa de lluvias multianual B) Mapa de lluvias en febrero C) Mapa de lluvias en abril D) Mapa de lluvias en julio E) Mapa de lluvias en agosto F) Mapa de lluvias en septiembre. Elaboración propia adaptado de Ideam, (2015).

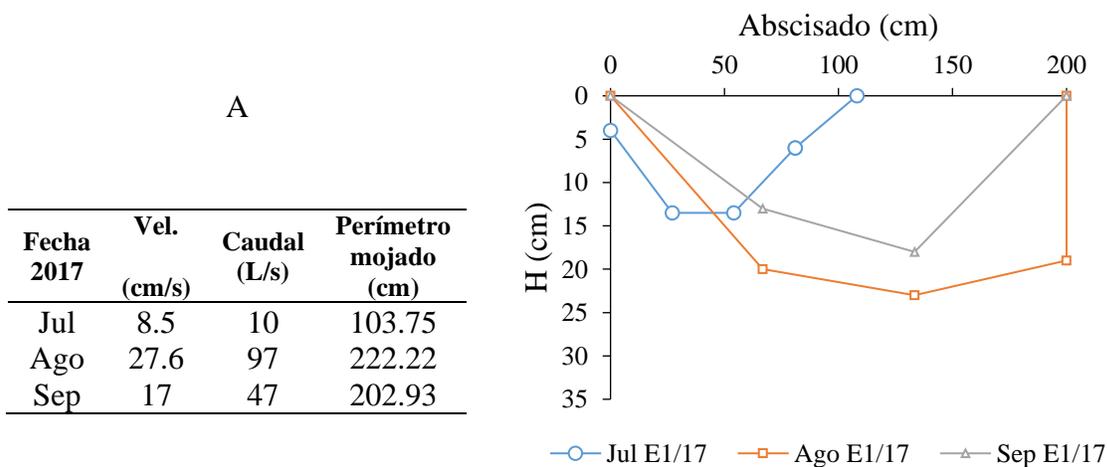
Para el caso de la microcuenca de la Nitrera el promedio anual varía entre los 2000 y 2500 mm. En los meses de abril, agosto y septiembre (época de lluvias) se alcanzan valores de hasta 300 mm, mientras que los meses de febrero y julio presentan los valores más bajos 50-100 mm y 150-200 mm respectivamente.

En la cuenca del río San Juan se presentan cambios en la intensidad de las lluvias a nivel mensual y espacial. Abril y septiembre son los meses más lluviosos en las tres estaciones, mientras que julio y agosto lo son para las estaciones Andes y Peñalisa (200-300 mm). Sin embargo, en febrero las lluvias disminuyen con valores de 100-150 mm. El tramo de la cuenca del río Cauca, presenta variaciones en cada una de las estaciones. La estación de Bolombolo tiene durante todos los monitoreos lluvias en el rango de los 200-300 mm. Caucasia por su parte, tiene los cambios más significativos con valores en el rango de los 50-100 mm en febrero, aumentan en abril (150-200 mm) y julio, agosto y septiembre alcanzan (300 mm). En la estación de Santa Fe de Antioquia se observa claramente el comportamiento bimodal. Bajas precipitaciones en febrero, julio y agosto y un aumento en abril y septiembre.

La disponibilidad hídrica que presenta la quebrada La Nitrera permite ver los cambios a nivel temporal y espacial del caudal en las estaciones monitoreadas. Este resultado permitió relacionar variables como perímetro húmedo y velocidad de la corriente con la distribución y colonización de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos presentes en estos puntos de muestreo. Los meses en los cuales se realizó el aforo en el año 2017 fueron julio, agosto y septiembre. Mientras que en el año 2018 fueron abril, julio, agosto y septiembre.

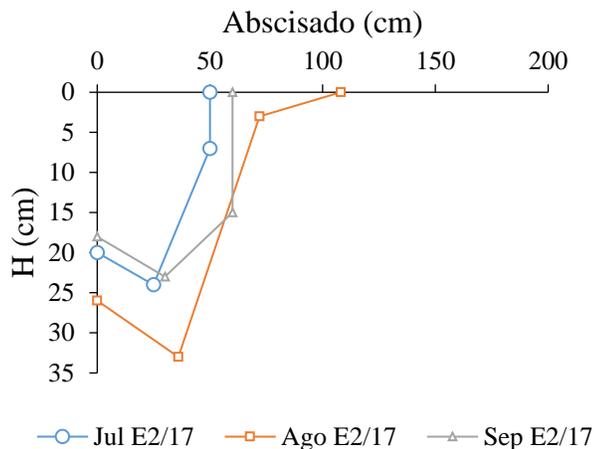
#### 6.1.1. Oferta hídrica quebrada la Nitrera año 2017

En la Figura 14 se presenta la información de velocidad, caudal, perímetro mojado y secciones transversales para cada una de las estaciones durante las campañas de julio, agosto y septiembre de 2017.



**B**

Fecha 2017	Vel. (cm/s)	Caudal (L/s)	Perímetro mojado (cm)
Jul	33	28	82.55
Ago	27.3	59	145.65
Sep	17	41	94.46



**C**

Fecha 2017	Vel. (cm/s)	Caudal (L/s)	Perímetro mojado (cm)
Jul	30.5	35	148.13
Ago	31.8	56	119.91
Sep	17	51	93.57

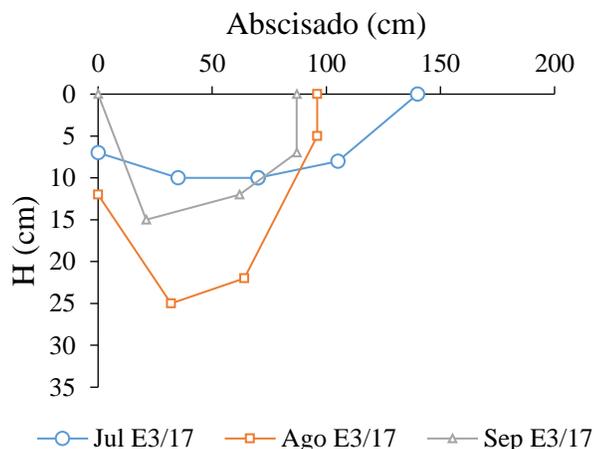


Figura 14. Sección transversal para la quebrada La Nitrera en los diferentes meses de monitoreo para el año 2017. A) Tabla y esquema por campaña para la Estación 1 B) Tabla y esquema por campaña para la Estación 2 C) Tabla y esquema por campaña para la Estación 3.

Al comparar las secciones durante las distintas campañas realizadas en el 2017 (Figura 14 A, B y C), se puede observar que la sección NE1 presenta un abscisa de 200 cm que luego se reduce en el mes de julio hasta 100 cm. En la NE2 y se mantiene esta longitud de la lámina de agua hasta la NE3, antes de la entrada al embalse. Las profundidades (H) mayores se localizaron en la NE2 para el mes de agosto con un valor de 33 cm. De acuerdo con los datos de caudal, el mes de julio presentó los valores más bajos de caudal 10 L/s, 28 L/s y 35 L/s para las tres estaciones respectivamente. Mientras que los valores más altos corresponden al mes de septiembre para las estaciones NE1, NE2 y agosto para NE3.

El valor de longitud del perímetro mojado más alto se presentó en agosto para la estación NE1 (222.2 cm). En esta misma estación julio fue el más bajo (103.7 cm). Situación similar

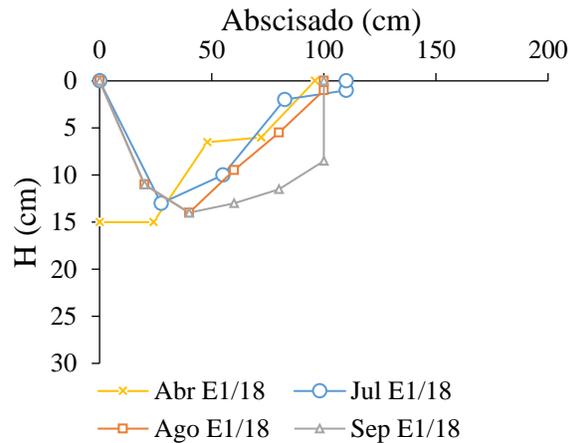
se presentó en la NE2, a diferencia de la NE3 donde el perímetro mayor fue para julio. Las velocidades más altas se alcanzaron en NE3 mientras que en mes de septiembre esta variable se mantuvo estable en cada una de las estaciones (17 cm/s).

### 6.1.2. Oferta hídrica quebrada la Nitrera año 2018

La oferta hídrica para la quebrada la Nitrera para el 2018 fue determinada para los meses de abril, julio, agosto y septiembre de 2018. En la Figura 15 se presenta la sección transversal de cada estación durante las campañas medidas y además la información hidráulica de cada tramo.

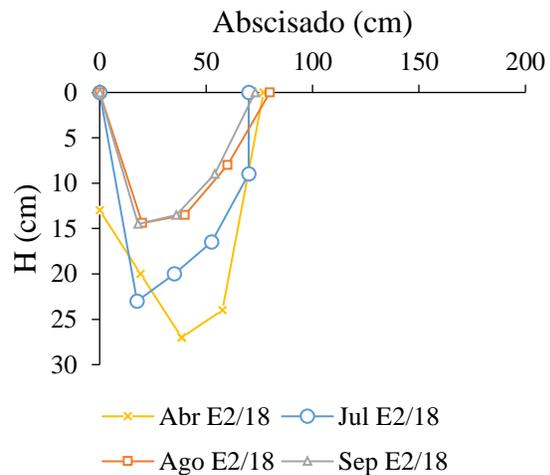
A

Fecha 2018	Vel. (cm/s)	Caudal (L/s)	Perímetro mojado (cm)
Abr	6.9	5	98.32
Jul	14.8	20	115.24
Ago	1.6	2	105.44
Sep	0.5	7	111.84



B

Fecha 2018	Vel. (cm/s)	Caudal (L/s)	Perímetro mojado (cm)
Abr	11.4	5	104.17
Jul	13.4	17	92.76
Ago	6.9	6	86.94
Sep	12.6	9	79.81



C

Fecha 2018	Vel. (cm/s)	Caudal (L/s)	Perímetro mojado (cm)
Abr	12.2	2	159.87
Jul	11.6	22	137.09
Ago	3.9	12	147.35
Sep	7.1	12	129.61

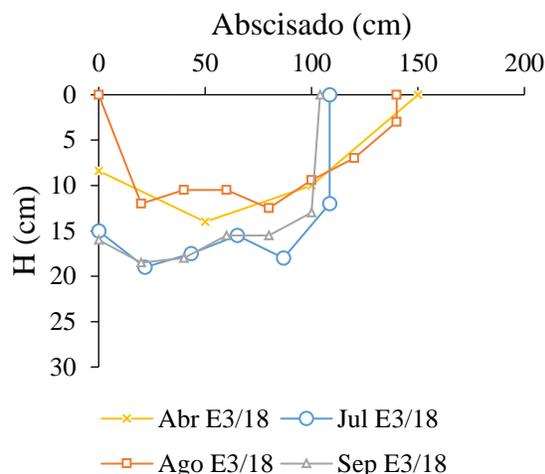


Figura 15. Sección transversal para la quebrada La Nitrera en los diferentes meses de monitoreo para el año 2018. A) Tabla y esquema por mes para la Estación 1 B) Tabla y esquema por mes para la Estación 2 C) Tabla y esquema por mes para la Estación 3.

En las campañas para el año 2018 Figura 15 (A) los valores de caudal se redujeron significativamente en comparación con los del 2017. El aporte más alto de caudal en las tres estaciones se presentó en el mes de julio con 20 L/s, 17 L/s y 22L/s. el perímetro mojado no tuvo cambios significativos entre las campañas de la estación NE1. La NE2 no tuvo cambios importantes en el perímetro húmedo. Los valores más altos de esta variable fueron en la E3. Las velocidades más bajas fueron en el mes de septiembre para NE1 (0.5cm/s) y en agosto para NE3 (3.9 cm/s).

### 6.1.3. Oferta hídrica del Río San Juan

Se realizó el aforo del río San Juan en dos de las tres estaciones de monitoreo; Charco Corazón y Comfenalco en los años 2017 y 2018. La Figura 16 muestra la información hidráulica de SJE1 y la sección en este punto. Sin embargo, en algunas campañas no fue posible el acceso por alto nivel de río.

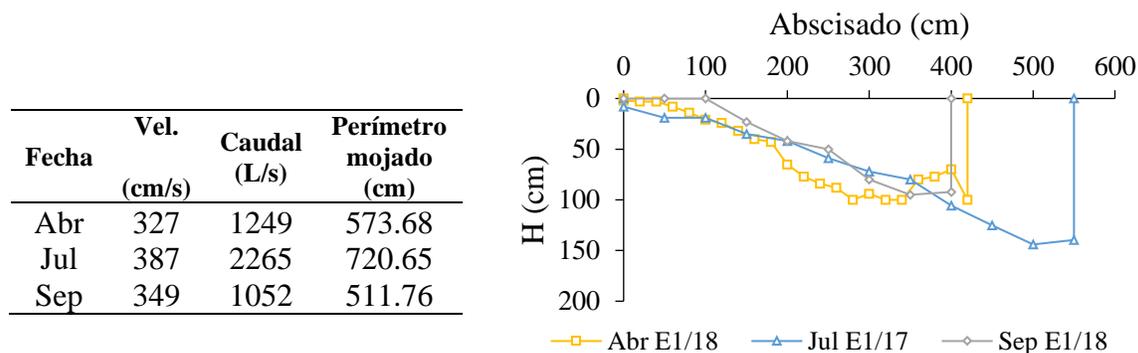


Figura 16. Sección transversal del río San Juan en la estación E1, Charco Corazón, para los meses de julio de 2017, abril, septiembre de 2018.

La Figura 16 muestra la sección transversal de la E1 para tres campañas distintas febrero de 2017, abril de 2018 y septiembre de 2018, donde se puede observar un gradiente descendente en el sustrato de izquierda a derecha con una zona profunda muy pronunciada en el extremo de la sección. El mes de julio presentó el valor de caudal más alto, casi el doble de los otros meses (2265 L/s). Los meses de abril y septiembre no se presentan diferencias importantes sin embargo septiembre tuvo el menor perímetro mojado y caudal pero la velocidad más baja fue en abril.

La Figura 17 muestra la sección del río San Juan en la E2 en el punto Comfenalco para los períodos julio y septiembre de 2018.

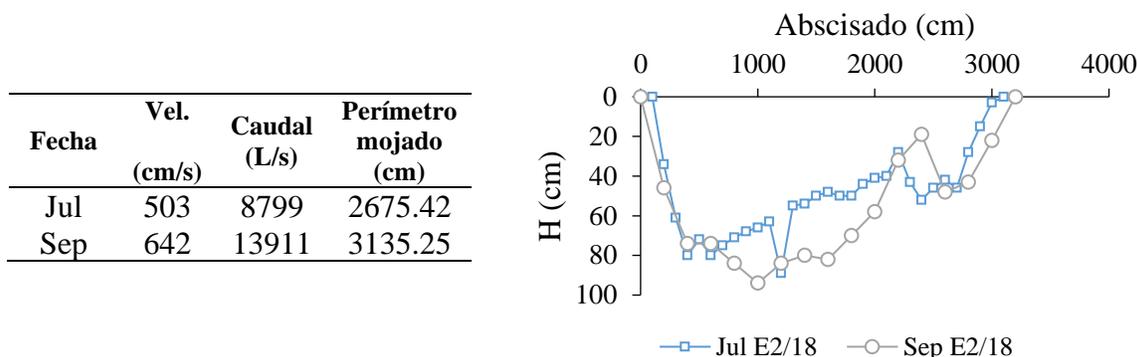


Figura 17. Sección transversal del río San Juan en la estación E2 (Comfenalco) para los meses de julio y septiembre de 2018.

La longitud del abscisado alcanzó en ambos casos los 30 metros aproximadamente. En el mes de septiembre se presentó los mayores valores en la velocidad, caudal y perímetro mojado en comparación con julio.

#### 6.1.4. Oferta hídrica del Río Cauca

Para el estudio de la oferta hídrica sobre el río Cauca se usó la información de las estaciones hidrometeorológicas dispuesta por el Ideam. En la Tabla 19 se presenta el promedio de los caudales mensuales multianuales y los correspondientes para el año 2000 y el periodo comprendido entre los años 1971 y 1998 en la estación de Bolombolo. La Figura 18 presenta la sección del río en la estación de Bolombolo para los meses históricos.

Tabla 19 Aporte hídrico del río Cauca en la estación E1 (Bolombolo) para los meses de enero a agosto en el 2017 y abril a diciembre de 2018. Tomado de (Mejía, 2008)

Mes	Media mensual	Media mensual
	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
	1971-1998	2000
Ene	805	1550
<b>Feb</b>	<b>738</b>	<b>1324</b>
Mar	771	1583
<b>Abr</b>	<b>946</b>	<b>1481</b>
May	1111	1742
Jun	916	1605
<b>Jul</b>	<b>670</b>	<b>978</b>
<b>Ago</b>	<b>563</b>	<b>797</b>
<b>Sep</b>	<b>651</b>	<b>1114</b>
Oct	903	1042
Nov	1152	1417
Dic	1009	793
Ene	805	648
promedio	849	1236
Mínimo	563	648

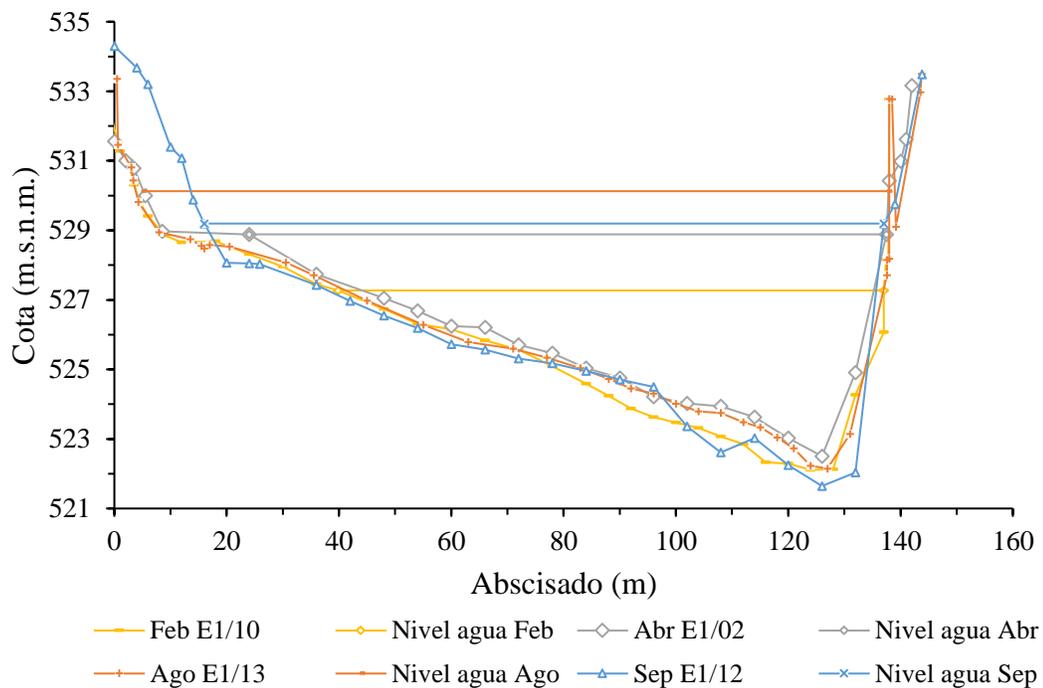


Figura 18. Perfiles históricos del río Cauca para los meses de febrero/10, abril/02, agosto/13 y septiembre/12 en la estación Limnométrica ubicada en Bolombolo CE1. Adaptado de Ideam (2019).

En negrilla se muestran los meses que sirven de comparación con las campañas de esta investigación. Históricamente se puede observar que abril presenta la media más alta indicando un periodo de lluvias mientras que julio, agosto y septiembre son épocas seca y de transición. El perfil realizado históricamente en la estación de Bolombolo ubicada a 300 m agua arriba de la estación de monitoreo CE1. Se puede observar que los niveles más bajos se presentaron en febrero de 2010 y alcanzaron una cota de 527 m.s.n.m. Mientras que los más altos correspondieron al mes de agosto de 2013 alcanzando una cota de 530 m.s.n.m.

## 6.2. Características altitudinales de las Cuencas

Con ayuda de Arcmap 10.7 y el DEM compilado de la zona de estudio, se pudo elaborar el mapa de elevación digital del área de estudio. En la Figura 19 se presenta este mapa con un detalle sobre la quebrada La Nitrera para identificar los cambios en la elevación de los sitios de muestreo.

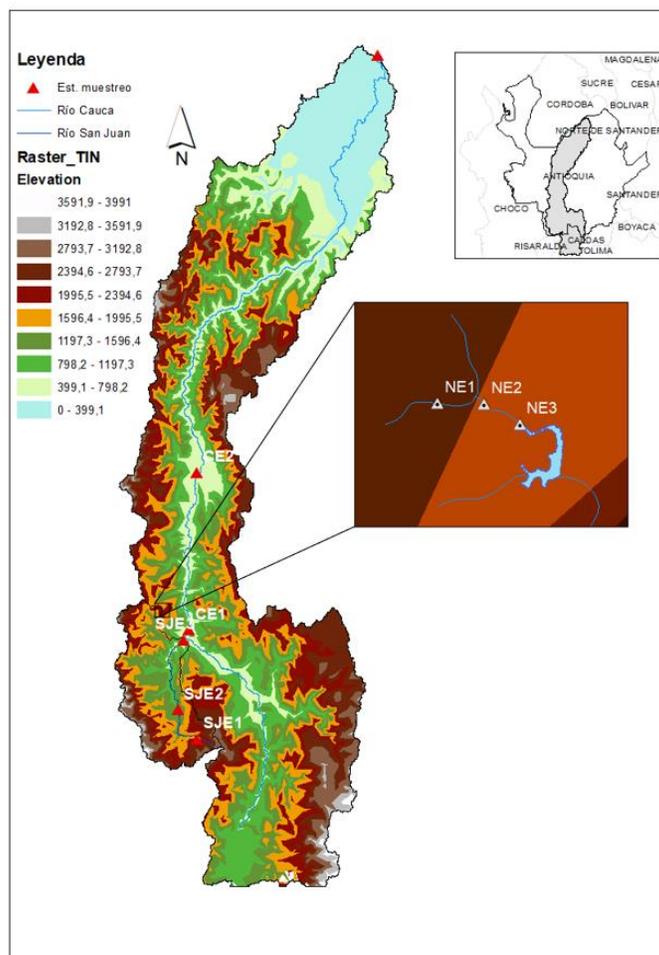


Figura 19. Mapa de elevación de la cuenca de estudio y la zona de la Nitrera en los diferentes puntos de muestreo. Elaboración propia.

El mapa de relieve muestra los valores más altos en color blanco que alcanzan los 3991 m.s.n.m. hasta valores de cero sobre el nivel del mar, de color azul. La estaciones sobre la quebrada la Nitrera presentaron una baja variación pasando de un altura de 2220 m.s.n.m. en la NE1 a 2183 m.s.n.m., NE2 y terminando en 2093 m.s.n.m. en la E3. La temperatura ambiente osciló entre los 15 °C y 19 °C en las diferentes campañas.

En la Figura 20 se muestra los niveles altitudinales de cada una de las estaciones de muestreo por reoambiente siguiendo diferentes escalas de representación por ejes. Para el eje x la escala que se usó fue logarítmica con base 10.

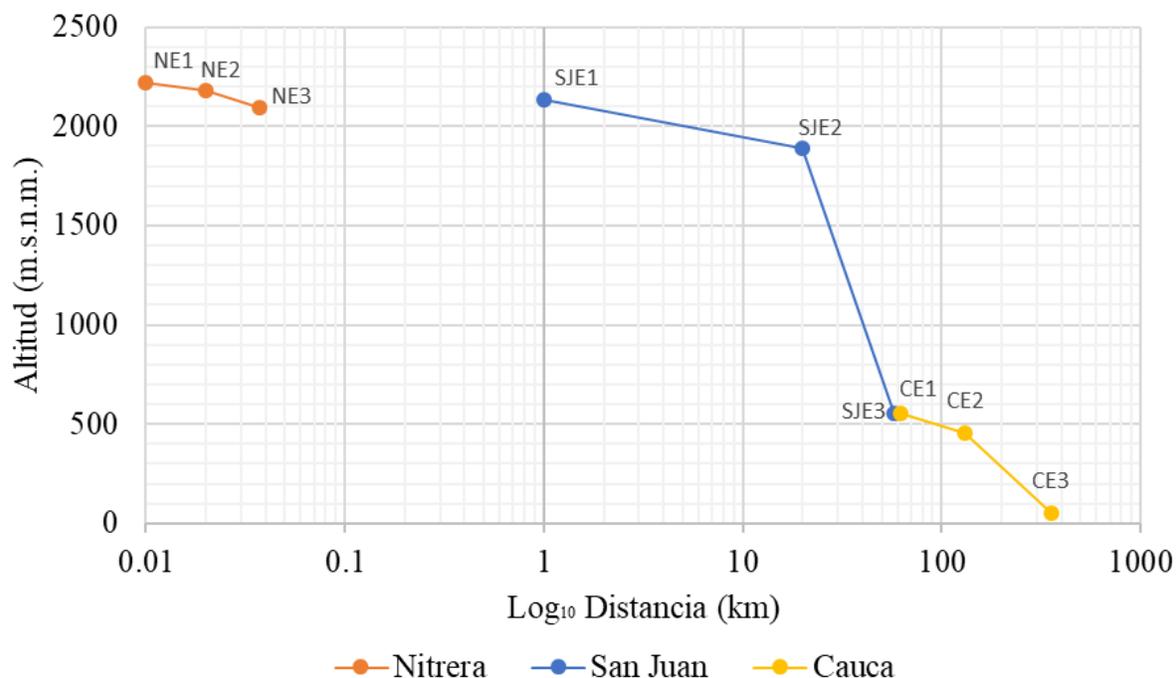


Figura 20. Perfil altitudinal de las estaciones de muestreo en las tres subcuencas de estudio.

El perfil presentado en la Figura 20 muestra los cambios altitudinales de cada una de las estaciones por cada reoambiente que van desde los 2200 m.s.n.m. hasta los 50 m.s.n.m. Para el caso de la quebrada La Nitrera el cambio de pendiente es baja y la distancia entre cada estación no supera los 20 m. El río San Juan es el que presenta un cambio de pendiente más alta entre estaciones SJE2 y SJE3. Finalmente el tramo de río Cauca presenta las distancias más altas entre estaciones con cambios de pendiente menores que el San Juan.

En la Figura 21 se muestra el mapa de elevación de la cuenca del río San Juan donde se muestra en detalle los tramos con cada una de las estaciones para este reoambiente.

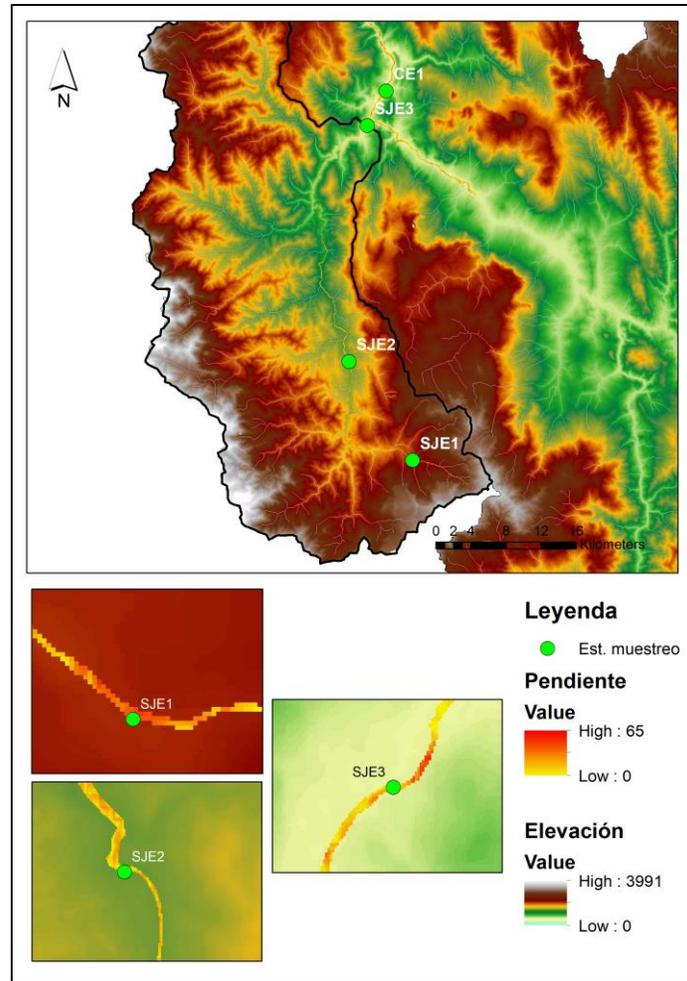


Figura 21. Mapa de elevación y de pendiente de la cuenca del río San Juan en los puntos de muestreo. Elaboración propia.

La primera estación cerca al municipio de Jardín SJE1 se localiza a una altura de 2134 m.s.n.m. y una temperatura de 16.4 °C. Esta zona presenta un alta pendiente (9.6%) y el tramo del río presenta un regimen torrencial. En agosto de 2018 se presentó una creciente súbita lo que impidió realizar en monitoreo en este punto. En la estación SJE2 se encuentra a una altitud de 1892 m.s.n.m. con una pendiente cero. Finalmente, la estación SJE3 ubicada en el sector de Peñalisa a unos metros de la desembocadura sobre el río Cauca presenta una pendiente de -0.1% a una altitud de 556 m.s.n.m.

En el tramo de la cuenca del río Cauca se puede apreciar la configuración topográfica de las secciones media y baja del río. La Figura 22, muestra las estaciones sobre este reoambiente y la información de pendientes y de elevaciones del terreno para las subcuencas que convergen a los puntos de muestreo.

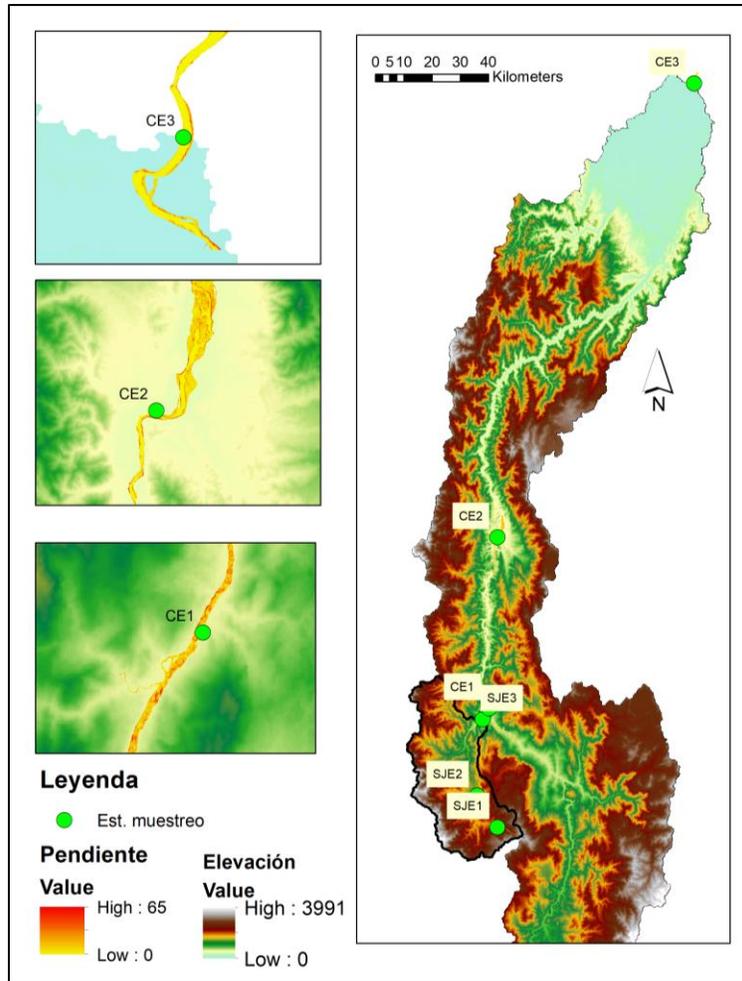


Figura 22. Mapa de elevación y de pendiente del tramo de la cuenca del río Cauca en los diferentes puntos. Elaboración propia.

En la zona alta del tramo sobre el río Cauca se ubica la estación CE1 cerca al corregimiento de Bolombolo con una altitud de 555 m.s.n.m. y temperatura ambiente que alcanza los 25 °C. El río en esta zona presenta pendientes bajas lo que permite la depositación de material aluvial. El gradiente va disminuyendo con pendientes de -0.9% hasta llegar a la segunda estación CE2 a una altitud de 450 m.s.n.m. y 28 °C de temperatura ambiente. En este sector el ancho del cauce del río aumenta y la pendiente disminuye a -0.7%; la zona de ribera es más arbustiva. De ahí el río pasa por el cañón del Cauca hasta llegar a la región de llanura de inundación en el municipio de Caucasia, a 50 m.s.n.m. con una pendiente de cero.

### 6.3. Caracterización del uso del suelo en las diferentes cuencas

La Figura 23 presenta la distribución de los usos del suelo para cada una de las cuencas: quebrada La Nitrera, río San Juan y río Cauca. El mapa detalla cada una de las categorías

según la gama de colores asignado a cada uso. En términos generales la cuenca presenta un predominante uso agrosilvopastoril con algunas zonas de uso forestal productor y protector en la parte baja de la cuenca, y algunos parches de uso agrícola en la parte media y alta del tramo de la cuenca estudiado.

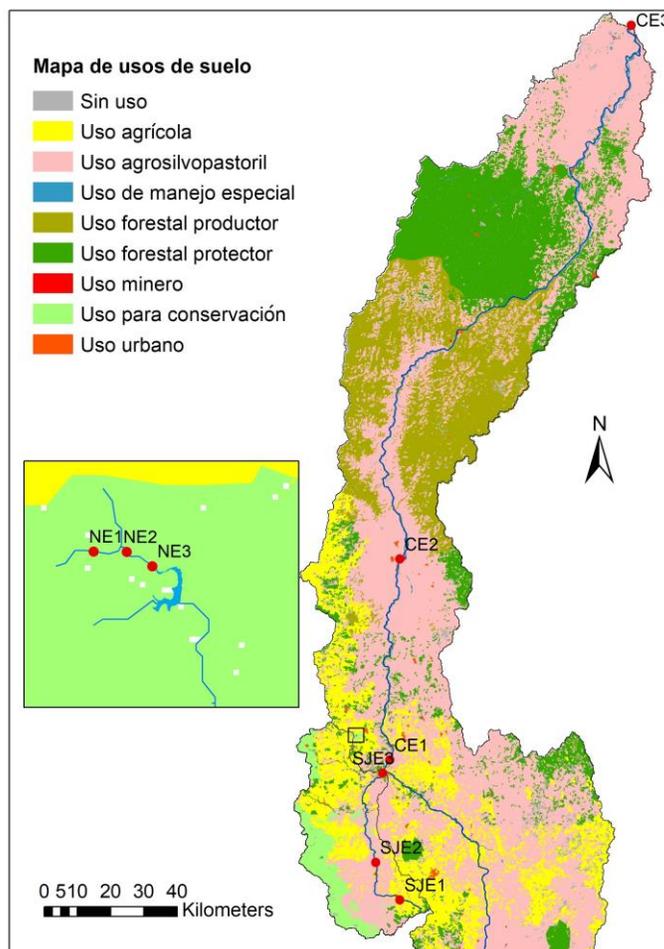


Figura 23. Mapa de usos del suelo para el tramo de estudio sobre la cuenca del Río Cauca. Escala 1:250.000. Elaboración propia. Trabajo de grado en desarrollo (Orozco, Vélez, Serna, & Aguirre, 2019).

En la zona de la cuenca cercana a los 550 m.s.n.m (CE1) el uso que predomina es el agrícola. En la cuenca del río San Juan se presenta en el sector occidental áreas protegidas, sin embargo, se observa el uso agrosilvopastoril en la parte alta y un uso agrícola en la zona baja. Se pueden apreciar en algunas zonas urbanas al igual que zonas de uso minero y extracción de material en CE2. La cuenca de la Nitrera es un área de conservación.

#### 6.4. Caracterización de las coberturas vegetales en las estaciones de muestreo

El mapa presentado en la Figura 24 permite ver la clasificación, según la combinación de colores indicando las áreas de coberturas terrestres predominantes en la zona de estudio incluyendo las estaciones de muestreo zonas de estudio.

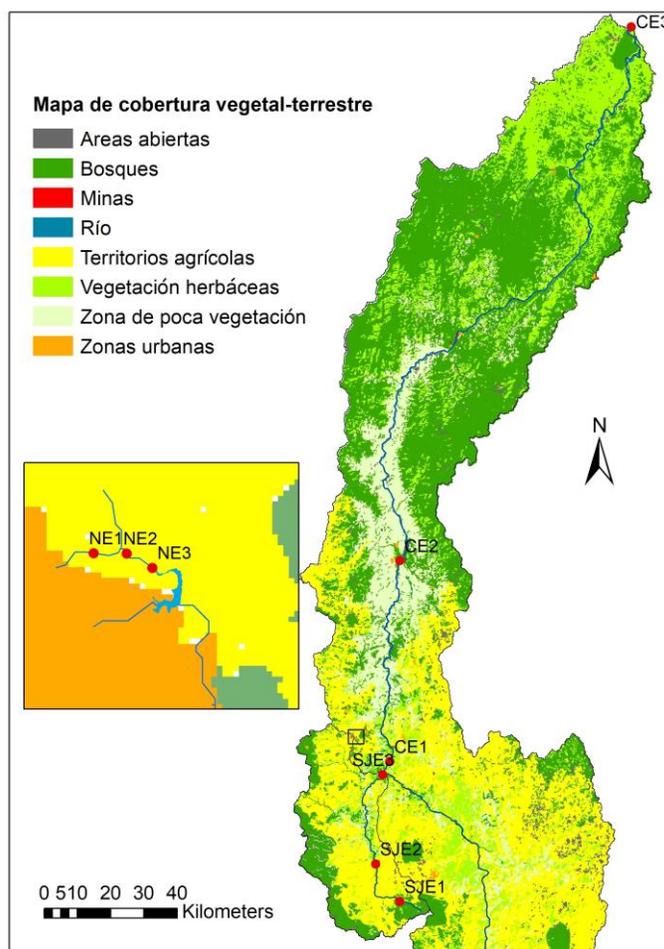


Figura 24. Mapa de coberturas terrestre para el tramo de estudio sobre la cuenca del Río Cauca. Escala 1:250.000. Elaboración propia. Trabajo de grado en desarrollo(Orozco et al., 2019).

La parte alta del tramo de cuenca del río Cauca se divide en vegetación herbácea alrededor del drenaje del río y territorios agrícolas. En la parte media poca vegetación mientras que en la parte baja la presencia de bosques y vegetación herbácea es bastante representativa. En la cuenca de la quebrada La Nitrera predomina casi en un 50% coberturas agrícolas principalmente café y algunos asentamientos urbanos.

En la parte más alta de la cuenca del río San Juan (SJE1) el uso del suelo es agrícola y con coberturas de bosque natural y algunos parches de vegetación arbustiva los cuales ayudan a

mantener la parte alta de la cuenca en unas condiciones estables. En la SJE2 el uso es agrosilvopastoril con zonas de cultivos principalmente de café, algunas plantaciones de plátano y pastos que son usados generalmente para la ganadería. La estación presenta territorios agrícolas y algunas zonas mineras de extracción de arena y material para construcción que tienen impacto en los hábitats de macroinvertebrados acuáticos. La parte baja de la cuenca se presenta con usos en plantaciones forestales y agrosilvopastoriles, y según las coberturas, con vegetación herbácea y algunos boques en la margen izquierda de la estación. En este punto (SJE3) el cauce ha sufrido una transformación debido a la extracción de materiales de playa y por obras de protección de las viviendas que se encuentran en la zona.

El tramo de la cuenca del río Cauca que se abordó en esta investigación presenta como eje articulador el drenaje de este cuerpo de agua, el cual tiene una longitud aproximada 295 km desde la primera estación ubicada en cercanía al corregimiento de Bolombolo hasta la última estación en el puente Carlos Lleras Restrepo, en el municipio de Caucasia. El tamaño del área de este tramo es de 17100 km<sup>2</sup> aproximadamente y el relieve presenta picos de montaña que pueden alcanzar los 3500 m.s.n.m. En la parte baja del tramo de la cuenca, en lo que se conoce como el bajo Cauca, se presentan alturas de 50 m.s.n.m.

La CE1 no presenta meandros, esto hace que el perfil del río este bien configurado y se presente algo de depositación en la margen derecha. El área aledaña a este punto presenta zonas de grandes extensiones de pastos para el ganado, con coberturas de vegetación herbácea, zona agrícola y unos cuantos parches de bosque fragmentado. Una de las características propias de esta parte de la cuenca, son las altas temperaturas que alcanzan en promedio los 27.5 °C. La sección en la ribera donde se realizó el muestreo presentaba material rocoso aluvial y alta cantidad de sedimento.

La estación CE2 se localiza cerca al municipio de Santa Fe de Antioquia con una pendiente de -0.7 justo después de la desembocadura del río Tonusco sobre el Cauca. La zona hace parte del cañón del Río Cauca. En este punto se dan procesos de depositación de material aluvial que favorecen las actividades mineras de extracción de material de playa; el uso del suelo es agrosilvopastoril. Así mismo en esta zona se encuentran algunos arbustos el bosque seco tropical el cual está altamente amenazado.

La última estación CE3 está ubicada sobre los 50 m.n.s.m., donde el río presenta amplios meandros; allí las actividades principales son la pesca y la ganadería, casi todo el sector es de uso agrosilvopastoril. El municipio más cercano es Caucasia con cobertura de vegetación herbácea predominante.

## **6.5. Análisis estadístico**

En esta sección se presenta el análisis estadístico de los datos para cada uno de los reoambientes estudiados, análisis de varianza, Pruebas de Hipótesis, análisis de componentes

principales y análisis multifactorial para dar respuesta a la Hipótesis planteada en esta investigación. El resumen estadístico se realizó por cada reoambiente. No se realizó transformación de las variables debido a que según el rango de curtosis la distribución de las variables se encuentra entre -2 y 2 los que indica que las variables presentan una distribución normal (ver Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3).

El análisis de componentes de varianza (ACP) entre las variables ambientales y biológicas y los factores propuestos se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20 Análisis de componentes de Varianza para las variables ambientales y biológicas. Porcentajes de contribución a la variabilidad

<b>Variable Dependiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Época</b>	<b>Río</b>	<b>Estación</b>	<b>Muestreo</b>
Temperatura agua	°C	0	0	0	81.56	18.44	0
pH	Unidades de pH	20.55	0	0	35.80	41.15	2.49
Oxígeno disuelto	mg/L	0	35.04	0	39.39	25.55	0.01
Saturación de Oxígeno	%	13.17	49.04	0	31.36	6.43	0
Conductividad eléctrica	µS/cm	0	0	0	97.31	2.68	0.01
Alcalinidad total		0	0	0	85.12	14.57	0.31
Turbiedad	UNF	0	0	0	87.79	12.21	0
Depredadores	# Org	4.19	0	0	66.64	29.16	-
Filtradores	# Org	5.61	0	0	10.63	83.76	-
Colectores	# Org	1.86	0	0	30.72	67.42	-
Fragmentadores	# Org	4.49	0	0	17.97	77.54	-
Raspadores	# Org	0	0	0	26.97	73.03	-
Abundancia	-	3.12	0	30.52	0	23.50	42.86
Densidad	-	0	0	50.29	2.59	74.12	-
Riqueza	-	0	0	58.72	23.53	11.75	-
Diversidad	-	0	0	74.89	12.21	7.9	-
Equidad	-	0	0	39.98	8.29	51.73	-
Dominancia	-	0	0	32.64	16.48	50.88	-
Modularidad	-	0	0	12.10	5.72	82.18	0

% de Contribución a la variabilidad de la variable. Mayor variabilidad (rojo). Segunda mayor variabilidad (azul)

La Tabla 20 indica que 11 de las 19 variables consideradas presentan los porcentajes de variabilidad más altos para el factor *Río* y 7 del total fue para el factor *Estación*. Las variables fisicoquímicas presentaron un alto porcentaje de variabilidad por el tipo de río mientras que las biológicas tuvieron mayor variabilidad de acuerdo con la estación. La *Época* fue el factor que representó mayor variabilidad para la densidad, diversidad y riqueza mientras que la *Estación* lo fue para la equidad, dominancia y el valor de modularidad.

Estadísticamente las variables que presentaron una alta variabilidad tienen porcentajes mayores al 41%. Adicionalmente se quiso analizar aquellas variables que presentaron un porcentaje de variabilidad mayor al 25%. A todas ellas se le aplicó una prueba de Kruskal

Wallis para determinar si existen diferencias significativas con un acierto del 95%, el valor p se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21 Prueba de Kruskal-Wallis para las variables ambientales y bióticas

Variable Dependiente	Unidades	Valor-P Kruskal Wallis				
		Mes	Época	Río	Estación	Muestreo
Temperatura agua		-	-	0.0	-	-
pH		-	-	1.35 E <sup>-8</sup>	0.557	-
Oxígeno disuelto		-	-	0.00008	-	-
Saturación de Oxígeno		3.0E <sup>-5</sup>	-	2.82E <sup>-7</sup>	-	-
Conductividad eléctrica		-	-	0.0	-	-
Alcalinidad total		-	-	2.04E <sup>-7</sup>	-	-
Turbiedad		-	-	1.09E <sup>-9</sup>	-	-
Depredadores		-	-	0.00022	0.773	-
Filtradores		-	-	-	0.043	-
Colectores		-	-	0.021	0.068	-
Fragmentadores		-	-	-	0.395	-
Raspadores		-	-	0.00019	0.643	-
Abundancia		-	0,86	-	-	-
Densidad		-	0.77	-	0.041	-
Riqueza		-	0.52	2.0E <sup>-5</sup>	-	-
Diversidad		-	0.27	-	-	-
Equidad		-	0.47	-	0.69	-
Dominancia		-	0.30	-	0.76	-
Modularidad		-	0.29	0.009	0.40	-

\*Valor-P <0.05 Diferencias estadísticamente significativas

En la Tabla 21 se resalta de color rojo los las variables que son estadísticamente significativas en cuanto a cada factor. Casi todas las variables a excepción de los Filtradores y la densidad de organismos varían significativamente de acuerdo con el tipo de río.

En las Figura 25, Figura 26 y Figura 27, se presenta el Análisis de Componentes Principales (ACP) entre las variables ambientales con las bióticas. En la Figura 25 se muestra el resultado del análisis con las variables fisicoquímicas, época y altitud y los morfotipos más representativos.

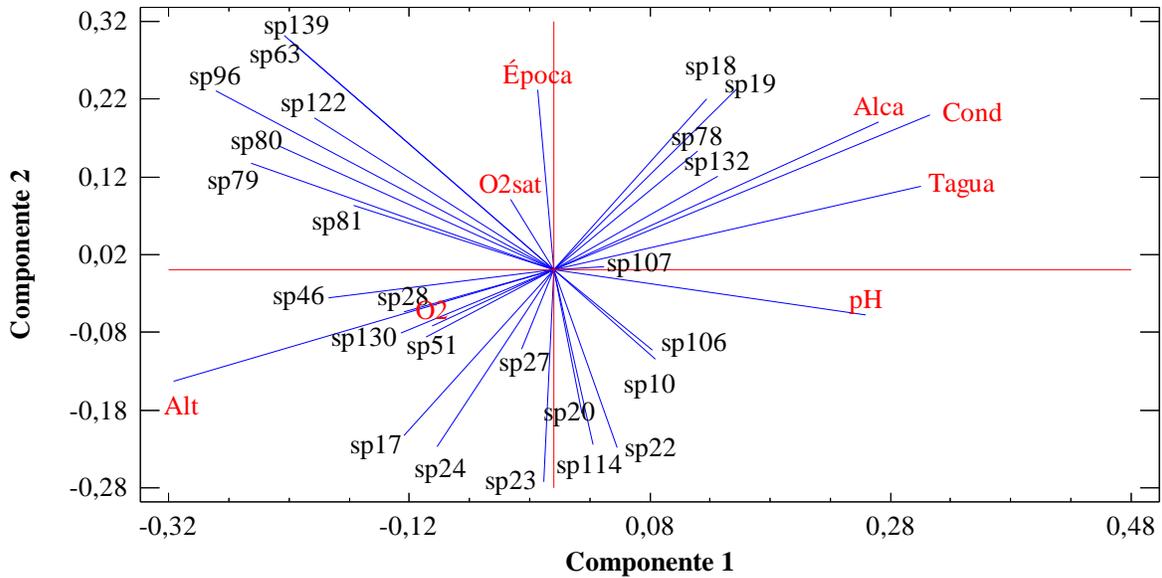


Figura 25. Análisis de componentes principales de las especies más representativas en el muestreo cuantitativo con las variables fisicoquímicas, altitud y época.

Se puede observar que existen grupos de morfoespecies que tienen una correlación importante con la altitud y el oxígeno disuelto, es decir, predominaron en zonas altas, conformados por los géneros *Lepthoyphe* (sp 28), *Argia* (sp30), *Heterelmis ad.* (sp51) y *Cylloepus ad.* (sp46). Mientras que *Thraverella1*(sp18), *Thraverella2*(sp19), se correlacionan de manera directa con la alcalinidad, la conductividad y la temperatura del agua. Estas morfoespecies predominan en zonas bajas. Por otra parte, la explicación del análisis es baja. Otro grupo de especies prefieren habitar en pH bajos como los son *Smicridea* (sp79), *Phylloicus* (sp81), *Atopsyche* (sp80), *Anacroneuria* (sp96). Al parecer las variables ambientales presentan en general una correlación baja con las morfoespecies, tan solo dos componentes explican el 32% de la variabilidad. Para que sea significativo el número de componentes, debe ser 12 con un 85.5%. También se realizó el ACP con las variables ambientales y los Grupos Funcionales Alimentarios ( Figura 26).

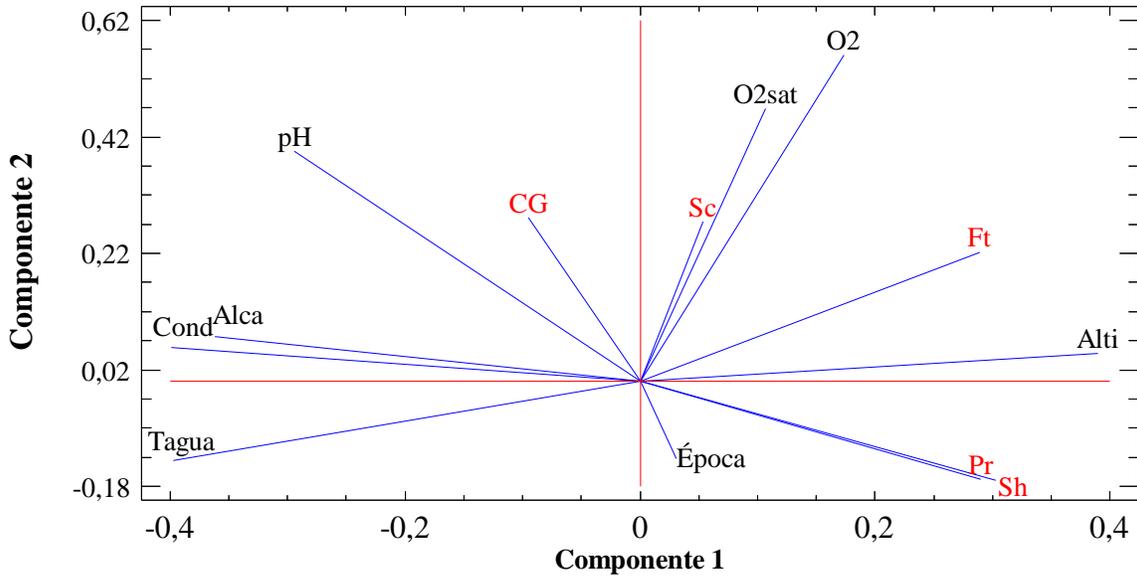


Figura 26. Análisis de componentes principales de los grupos funcionales alimentarios en el muestreo cuantitativo con las variables fisicoquímicas, altitud y época.

El análisis indicó que cuatro componentes explicaron el 76.51% de la variabilidad de los datos: Los grupos funcionales que están más relacionados con los valores mayores de altitud son los Depredadores (Pr), Filtradores (Ft) y Fragmentadores (Sh). Los Raspadores (Sc) por su parte se relacionan más con valores altos de oxígeno en el agua. Mientras que los colectores (CG) de manera inversa con la época, es decir, presentes en épocas secas. En la Figura 27 se muestran los índices de diversidad y las variables fisicoquímicas e hidráulicas.

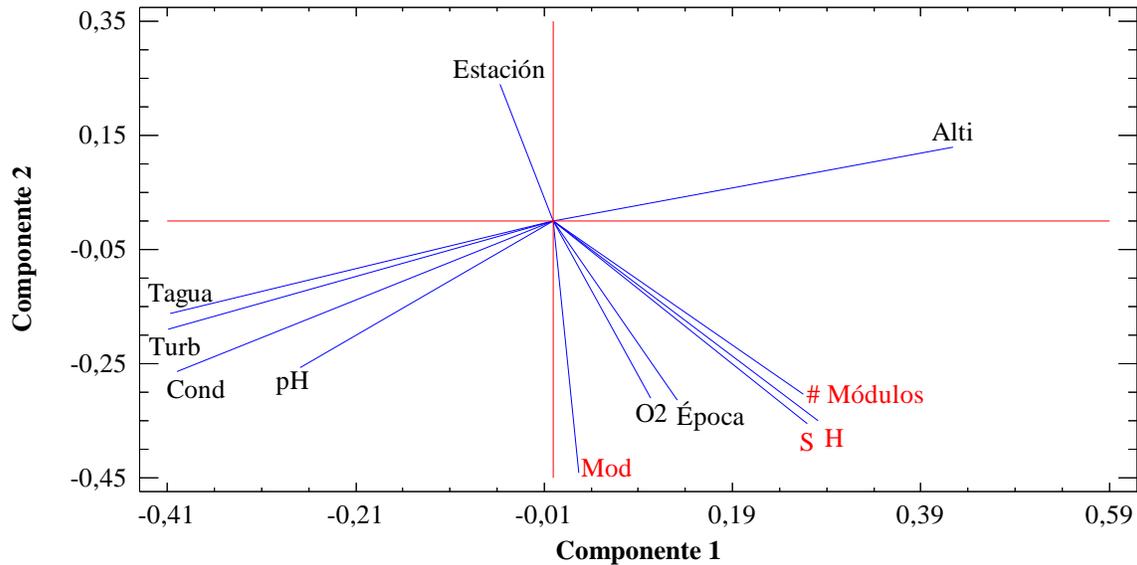


Figura 27. Análisis de componentes principales de la estructura de los macroinvertebrados en el muestreo cuantitativo con las variables fisicoquímicas, altitud, modularidad, estación y época.

Este ACP indicó que tres componentes explican el 73.53% de la variabilidad de los datos. La riqueza de especies (S) se encuentra altamente correlacionada la diversidad (H'), el oxígeno disuelto y el número de módulos. La altitud se relaciona de manera inversa con la conductividad, turbiedad, temperatura y pH. Por su parte la modularidad está más correlacionada directamente con la riqueza, diversidad y el número de módulos, e inversamente a la estación. Es decir, la modularidad disminuye a medida que se avanza en cada estación por cada reoambiente.

Durante las campañas de muestreo se recolectaron en total 7702 organismos distribuidos en 63 familias 149 géneros, siendo los más predominantes, los insectos acuáticos. La mediana de la riqueza de especies por estación fue de 6 taxa y la de la abundancia por estación fue de 15 individuos. Según el muestreo cuantitativo la quebrada la Nitrera presentó un promedio de riqueza por estación de 11 taxa, en el río San Juan fue de 6 taxa mientras que en el río Cauca de 4 taxa. Para el caso de las densidades, en todos las campañas la Nitrera presentó en total 1316 Org/0.09 m<sup>2</sup>, San Juan 1122 Org/0.09 m<sup>2</sup> y el Cauca 516 Org/0.09 m<sup>2</sup>. En promedio se presentaron 31 Org/0.09 m<sup>2</sup>, 27 Org/0.09 m<sup>2</sup> y 12 Org/0.09 m<sup>2</sup> en la Nitrera, San Juan y Cauca respectivamente.

En la Tabla 22 se muestra el resumen de la ANOVA multifactorial relacionando las abundancias de los grupos funcionales con los factores época hidrológica y altitud además de la interacción entre estos factores.

Tabla 22 Análisis de Varianza Multifactorial para los grupos funcionales alimentarios

EFECTOS PRINCIPALES	Ft		CG		Pr		Sc		Sh	
	F	ValorP								
A: Época	0.49	0.6186	0.83	0.4444	0.48	0.6243	1.94	0.1583	0.76	0.4733
B: Altitud	4.70	0.0005	3.39	0.0051	5.14	0.0002	5.45	0.0001	4.75	0.0005
<b>INTERACCIONES</b>										
AxB	0.74	0.7394	0.24	0.9983	0.37	0.9809	1.88	0.0561	0.98	0.5002

Estos valores permiten ver que las diferencias estadísticamente significativas se presentan entre los GFA y la *Altitud*. Teniendo este último factor relación directa con los sitios de muestreos. Mientras que la *Época* no parece tener efecto significativo en la abundancia de los grupos funcionales en los tres reoambientes.

La Figura 28 muestra la variación de las abundancias de los organismos filtradores siguiendo el gradiente altitudinal, en las tres épocas seleccionadas en esta investigación.

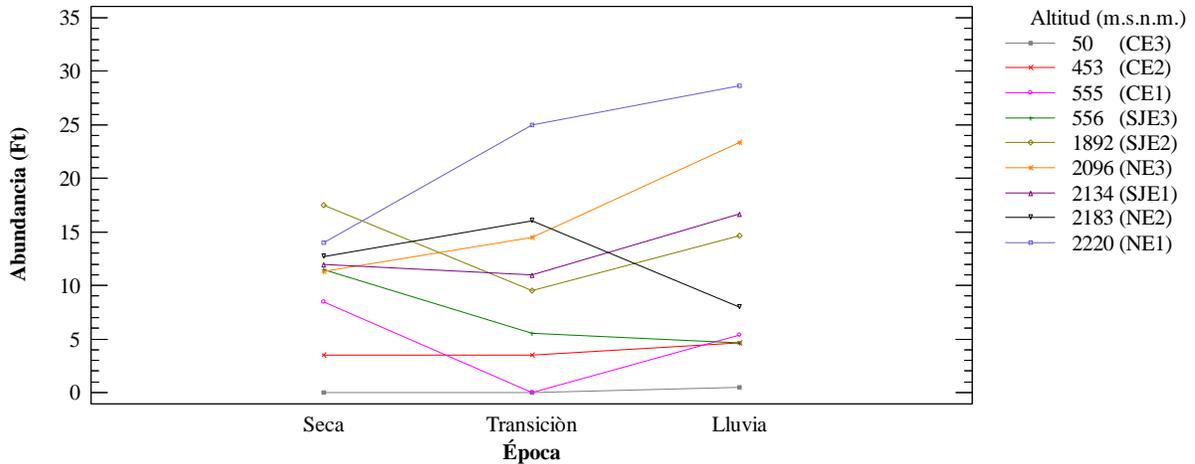


Figura 28. Variación de la abundancia de Filtradores (Ft) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas.

Las diferencias estadísticamente significativas se presentaron en la altitud; los valores más altos correspondieron a la quebrada La Nitrera (NE3) para la época de lluvia, con cerca de 30 organismos, mientras que los más bajos se ubicaron en el Río Cauca. En algunas estaciones se presentó un leve aumento de filtradores de la temporada seca a la de lluvias.

La Figura 29 muestra los organismos Colectores los cuales presentaron las abundancias más altas durante las tres épocas, destacándose el incremento significativo para la época de transición.

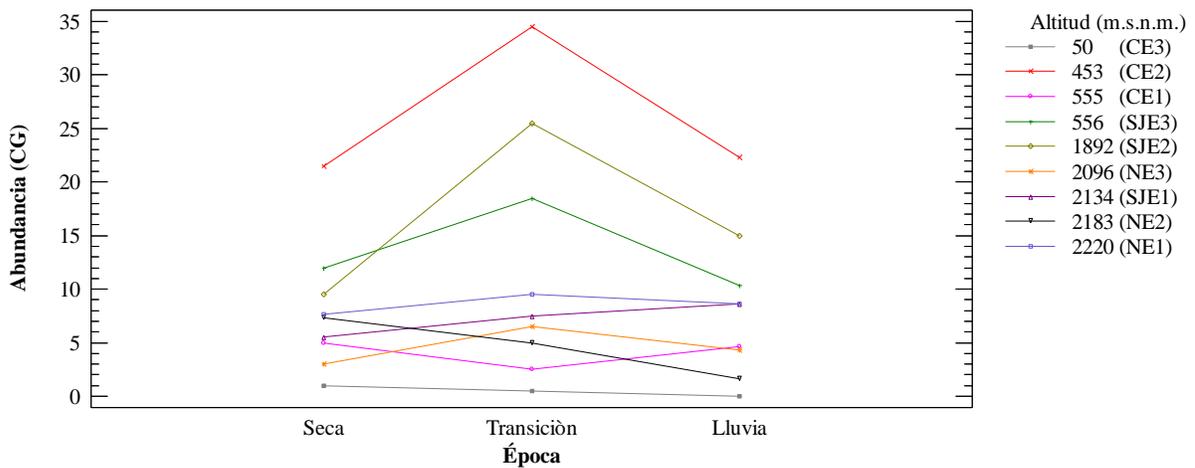


Figura 29. Variación de la abundancia de Colectores (CG) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas.

La estación CE3 a los 453 m.s.n.m., donde alcanzaron las mayores abundancias en todas las épocas en relación con los otros puntos de muestreo. En casi todas las estaciones se presentó un aumento en la época de transición y una disminución en la época de lluvia. Los colectores

predominan en áreas de flujo de corriente lento, condición que puede favorecer este aumento en épocas de transición.

Para el caso de los depredadores (Pr) las abundancias fueron menores que los otros grupos en términos generales (Figura 30).

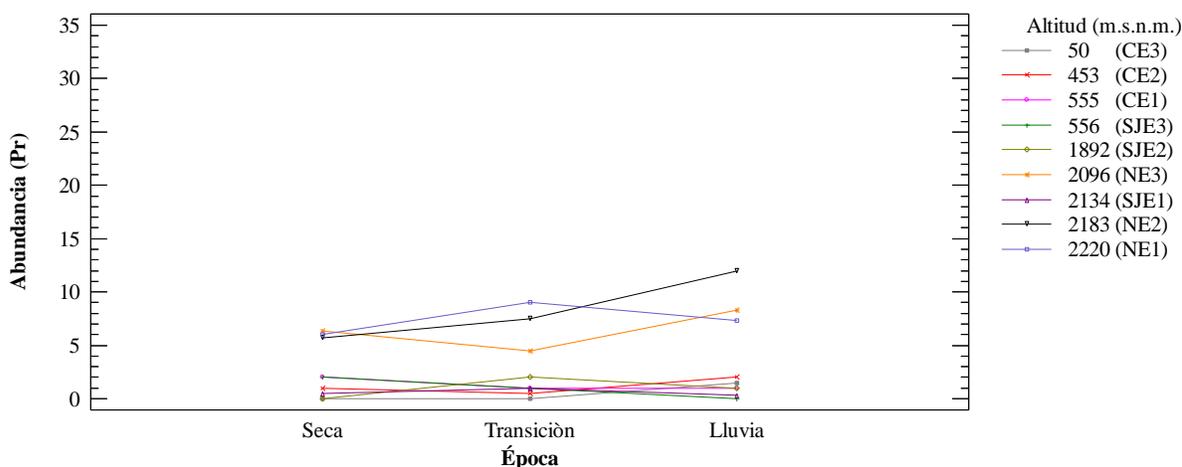


Figura 30. Variación de la abundancia de Depredadores (Pr) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas.

Las estaciones ubicadas en la quebrada La Nitrera presentaron los valores más altos en abundancias de depredadores, en donde la época de lluvias favorece el aumento de este grupo funcional. En general fue el grupo con las abundancias más bajas, los que posiblemente permitan el equilibrio en las relaciones tróficas de estos reoambientes.

La Figura 31 presenta la variación de los organismos raspadores (Sc) a diferentes alturas y épocas.

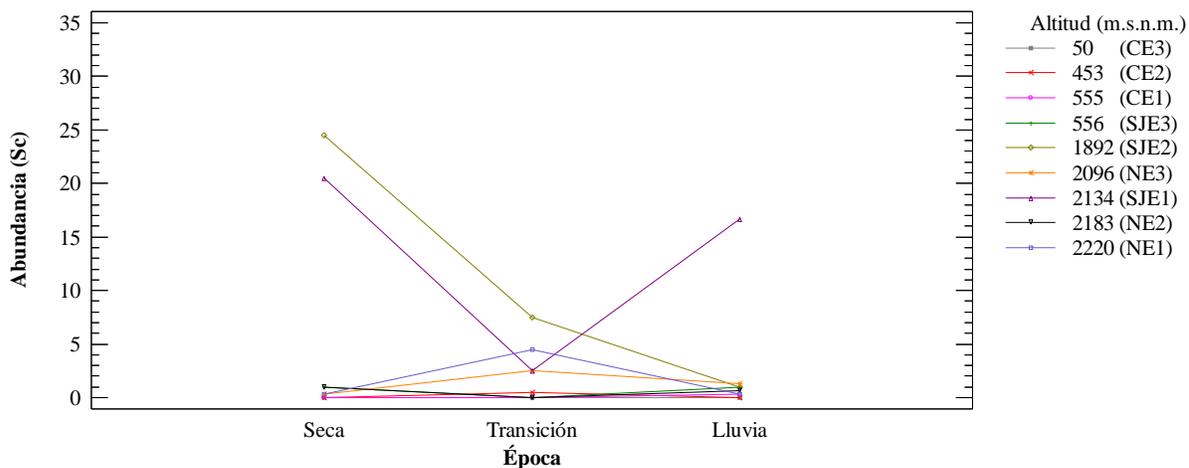


Figura 31. Variación de la abundancia de Raspadores (Sc) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas.

Las abundancias más altas de este grupo se encontraron en la época seca en dos estaciones del río San Juan ubicadas a 2134 m.s.n.m. y 1892 m.s.n.m. A pesar de que se evidencia una disminución en las abundancias pasando de seca a transición y lluvias, en la mayoría de las altitudes, esta variación no es estadísticamente significativa ( $F=1.94$ ,  $p=0.1583$ ). Sin embargo, puede estar asociada a la disponibilidad de sustratos ya que en general estos organismos se alimentan de perifiton localizado en rocas y troncos.

La Figura 32 presenta los organismos fragmentadores (Sh) en las diferentes épocas de muestreo para los cambios de altitud.

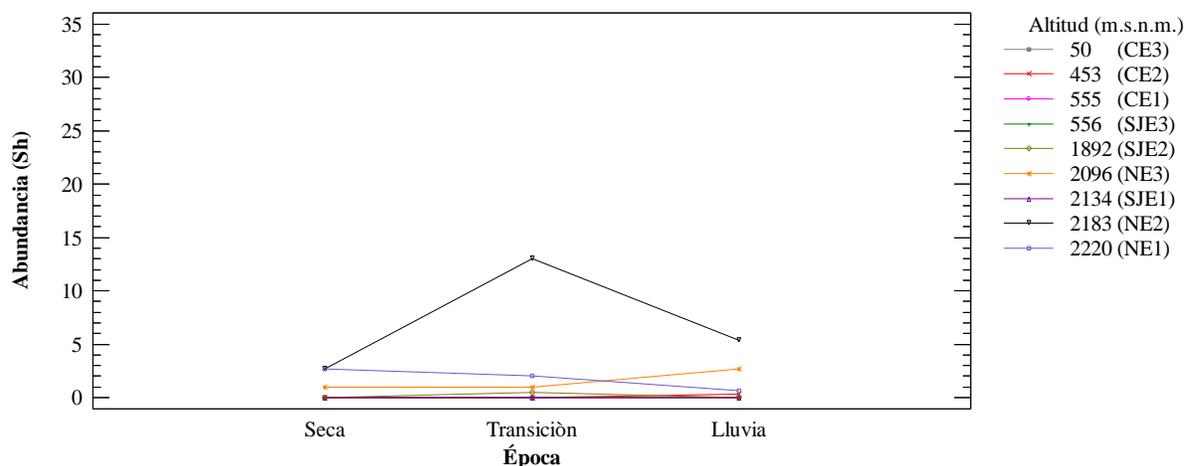


Figura 32. Variación de la abundancia de Fragmentadores (Sh) a diferentes valores de altitud en tres épocas hidrológicas.

La abundancia de Sh fue muy baja a casi nula en las altitudes bajas. La única estación que presentó un aumento en los Sh fue la NE2, la cual en época de transición presentó abundancias cercaas a los 15 organismos.

Las Figura 33 presentan la distribución de la riqueza taxonómica a diferentes valores altitudinales. Los tres primeros corresponden a la quebrada La Nitrera, los siguiente tres al río San Juan y los tres últimos al río Cauca. La riqueza en la Quebrada la Nitrera no presenta diferencias significativas entre la estaciones cuyos valores están entre 9 y 10 taxa. Mientras que, entre las estaciones del río San Juan y Cauca, sí se presentan diferencias.

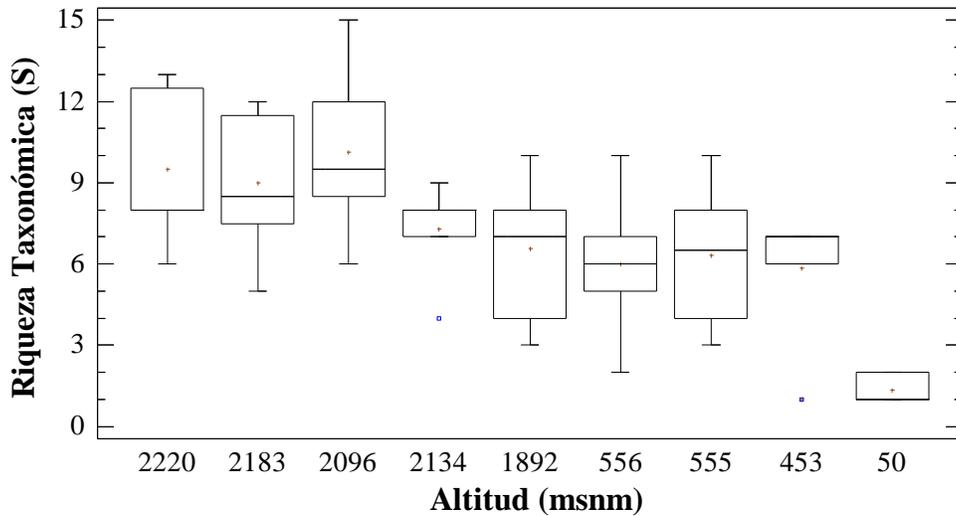


Figura 33. Distribución de la riqueza de macroinvertebrados acuáticos a diferentes altitudes en cada una de las estaciones de monitoreo por reoambiente.

En la Figura 34 se presenta las densidades de organismos por unidad de área, en este caso la que presenta la red Surber, para todos los muestreo relacionándolos con la variación altitudinal.

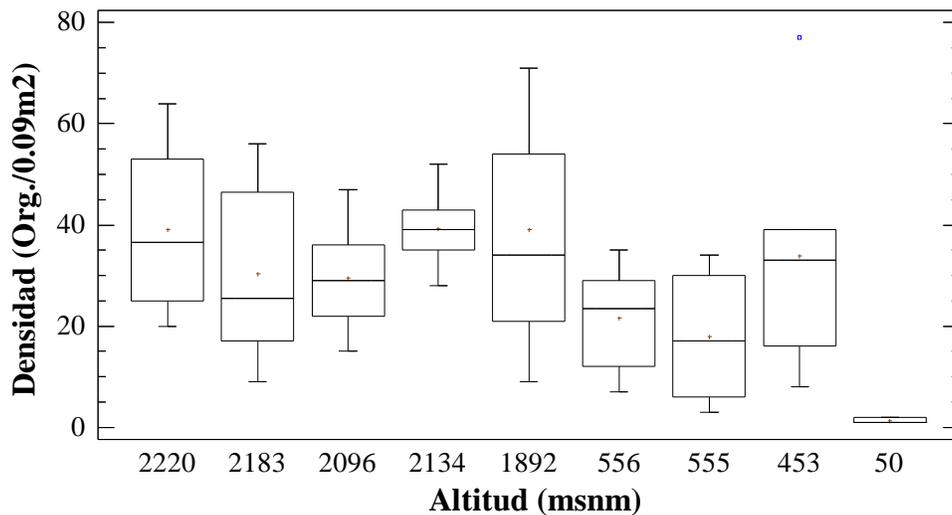
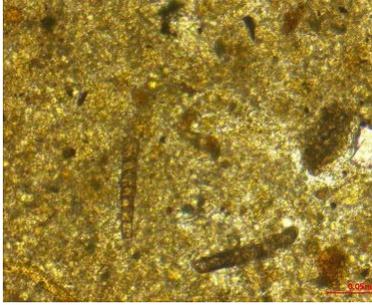


Figura 34. Distribución de la densidad de macroinvertebrados acuáticos a diferentes altitudes en cada una de las estaciones de monitoreo por reoambiente.

En general se produce una tendencia decreciente en los valores de mayor a menor altitud. La densidad de organismos varía significativamente de los diferentes ríos a diferentes altitudes. La altitud 2096 m.s.n.m. (NE3) y la de 453 m.s.n.m. (CE2) fueron las únicas estaciones que mostraron un incremento posiblemente asociado a la época.

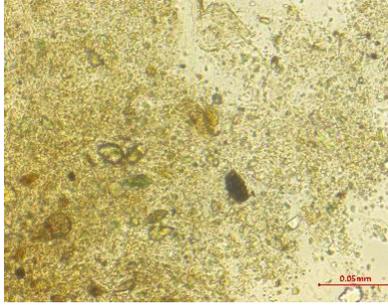
## 6.6. Análisis de los contenidos estomacales de los morfotipos estudiados

En la



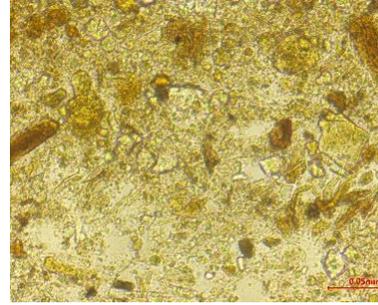
Leptophlebiidae (*Traverella*)

MOPF: X MOPG: RO: X AP: TV:



Baetidae (*Baetodes*)

MOPF: X MOPG: RO: AP: TV: X



Baetidae (*prebaetodes*)

MOPF: X MOPG: RO: AP: TV:



Tricorythidae (*Leptohyphes*)

MOPF: MOPG: X RO: AP: TV: X



Calopterygidae (*Hetaerina*)

MOPF: X MOPG: X RO: X AP: X TV: X



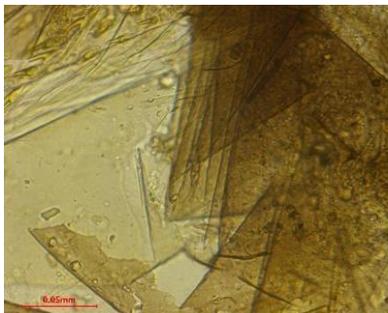
Hydropsychidae (*Smicridea*)

MOPF: MOPG: RO: AP: TV: X



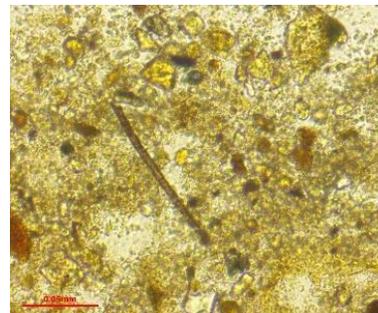
Calamoceratidae (*Phylloicus*)

MOPF: MOPG: X RO: AP: TV: X



Perlidae (*Anacroneuria*)

MOPF: MOPG: X RO: X AP: TV: X



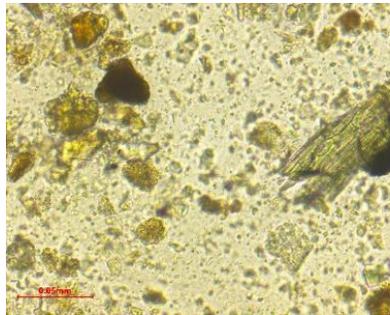
Chironomidae (*Sd*)

MOPF: MOPG: X RO: AP: TV:



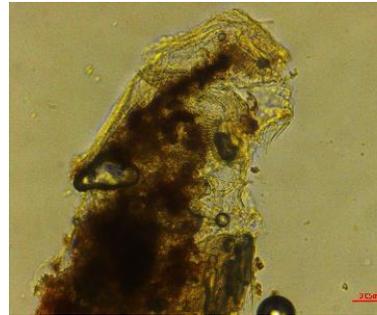
Simuliidae (*Simulium*)

MOPF: X MOPG: RO: AP: TV: X



Physidae (*Physa*)

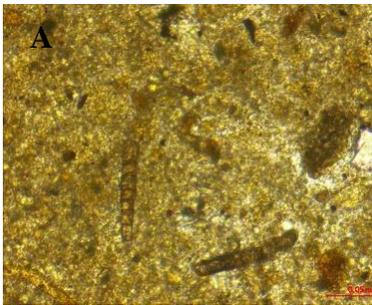
MOPF: MOPG: X RO: AP: TV: X



Gamaridae (*Gamarus*)

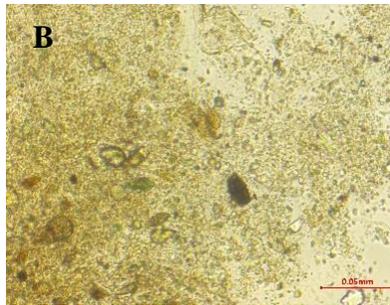
MOPF: MOPG: X RO: X AP: TV:

Figura 35 se muestra una colección de imágenes que registran el contenido estomacal de algunos de los géneros representativos en los ambientes estudiados.



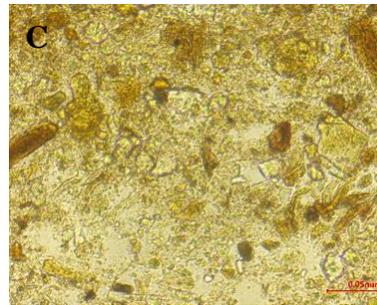
Leptophlebiidae (*Traverella*)

MOPF: X MOPG: RO: X AP: TV:



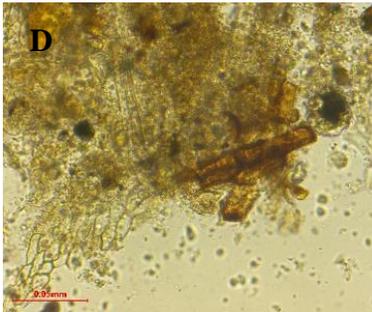
Baetidae (*Baetodes*)

MOPF: X MOPG: RO: AP: TV: X



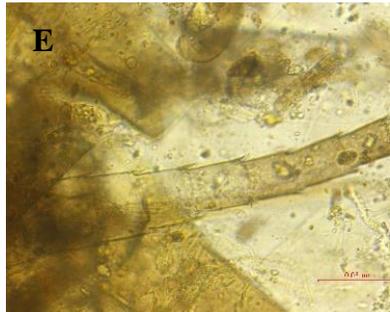
Baetidae (*prebaetodes*)

MOPF: X MOPG: RO: AP: TV:



Tricorythidae (*Leptohyphes*)

MOPF: MOPG: X RO: AP: TV: X



Calopterygidae (*Hetaerina*)

MOPF: X MOPG: X RO: X AP: X TV: X



Hydropsychidae (*Smicridea*)

MOPF: MOPG: RO: AP: TV: X

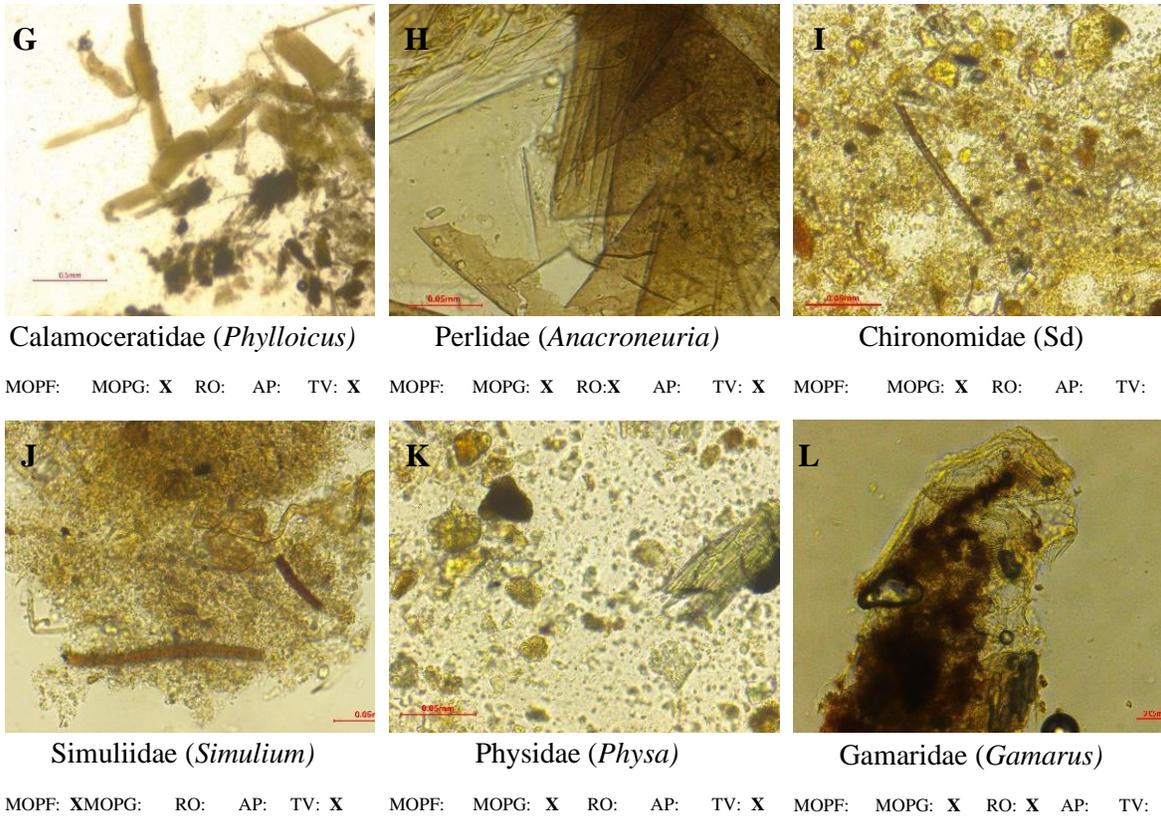


Figura 35. Análisis cualitativo del contenido estomacal de algunos de los taxa presentes en los reoambientes estudiados. MOPF: Materia Orgánica Fina, MOPG: Materia Orgánica Gruesa, RO: Restos de Organismos, AP: Algas Perifíticas, TV: Tejido Vegetal. Sd: Sin determinar.

En las imágenes analizadas se pudo determinar la materia orgánica fina y gruesa en la mayoría de los aparatos digestivos, restos de organismos; generalmente estructuras bucales del orden Díptera, algunos restos de antenas, entre otros (E). Además, estructuras vegetales de hojarasca o macrorestos de troncos, semillas, cáscaras, fibras, etc. (D, F, G, J, K).

La Tabla 23. presenta un cuadro comparativo con la asignación del grupo funcional encontrado a través de la dieta alimenticia presentada en el análisis estomacal de algunos de los taxones representativos en esta investigación y la reportada por algunos autores de la comunidad científica, en ríos tropicales (ver Tabla 13).

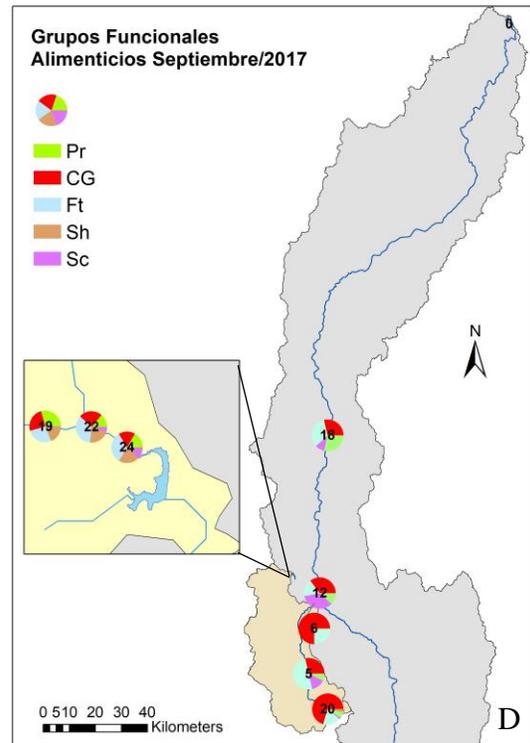
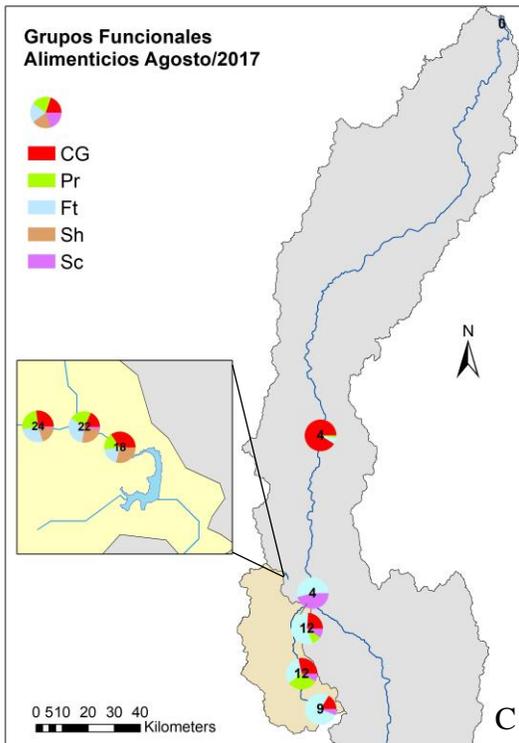
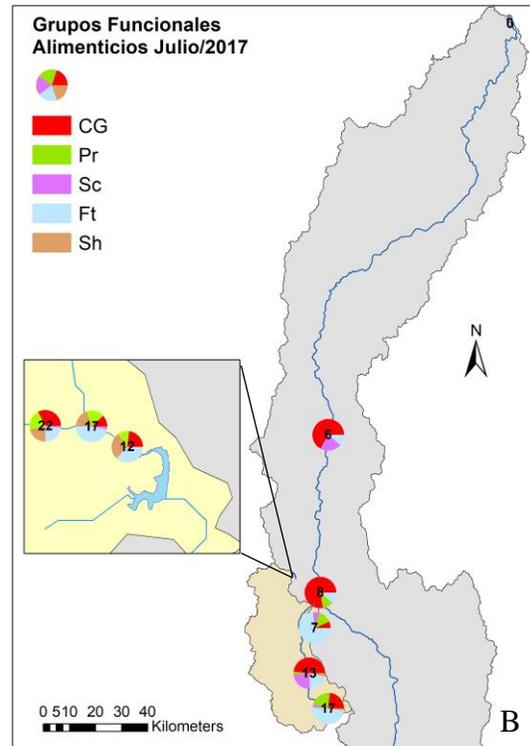
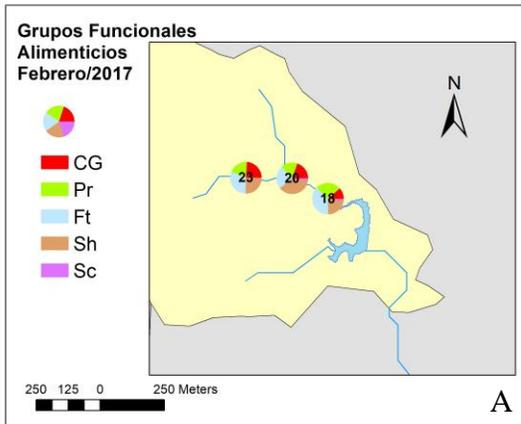
Tabla 23. Dieta alimenticia y Grupo Funcional Alimenticio de algunos taxa identificados en esta investigación y el reportado por la literatura.

Taxa	Dieta Alimenticia	GFA en el presente estudio	GFA en la literatura
<i>Traverella</i>	MOPF, RO	CG, Pr	CG
<i>Baetodes</i>	MOPF, TV	Ft, Sc	Sc
<i>Prebaetodes</i>	MOPF	CG	CG
<i>Lepthoyphes</i>	MOPG, TV	CG, Sh	CG

<i>Hetaerina</i>	MOPF, MOPG, RO, AP, TV	Pr	Pr
<i>Smicridea</i>	TV	Ft	Ft
<i>Phylloicus</i>	MOPG, TV	Sh	Sh
<i>Anacroneuria</i>	MOPG, RO, TV	Pr	Pr
Chironomidae (Sd)	MOPG	CG, Sh	CG
<i>Simulium</i>	MOPF, TV	Ft	Ft
<i>Physa</i>	MOPG, TV	Sc	Sc
<i>Gammarus</i>	MOPG, RO	Pr	Sh

De los 12 taxones analizados, 5 taxa presentan en su estómago MOPF, 7 taxa presentan MOPG. 8 contenido vegetal TV, en 4 se encontraron restos de organismos y en solo uno algas perifíticas. Esto permitió asignarle una función alimenticia a cada uno de ellos. Al compararlos con los reportes de autores como Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, (2014). Se tiene que casi el 92% de los grupos coincide con lo registrado en este análisis.

La Figura 36 ilustra los cambios espaciales que se presentan a lo largo de las diferentes cuencas estudiadas. El diagrama de tortas, en diferentes colores, muestra la composición en porcentajes de la abundancia de los grupos funcionales alimentarios en el muestreo semicuantitativo para cada una de las estaciones monitoreadas. El valor numérico en el centro de cada torta corresponde a la riqueza de especies en la estación. En las estaciones donde no hay tortas, no se encontraron organismos, o la estación no pudo ser monitoreada por causas externas, como lo ocurrido en la SJE1 a finales de agosto de 2018 por una creciente en la época de lluvia.



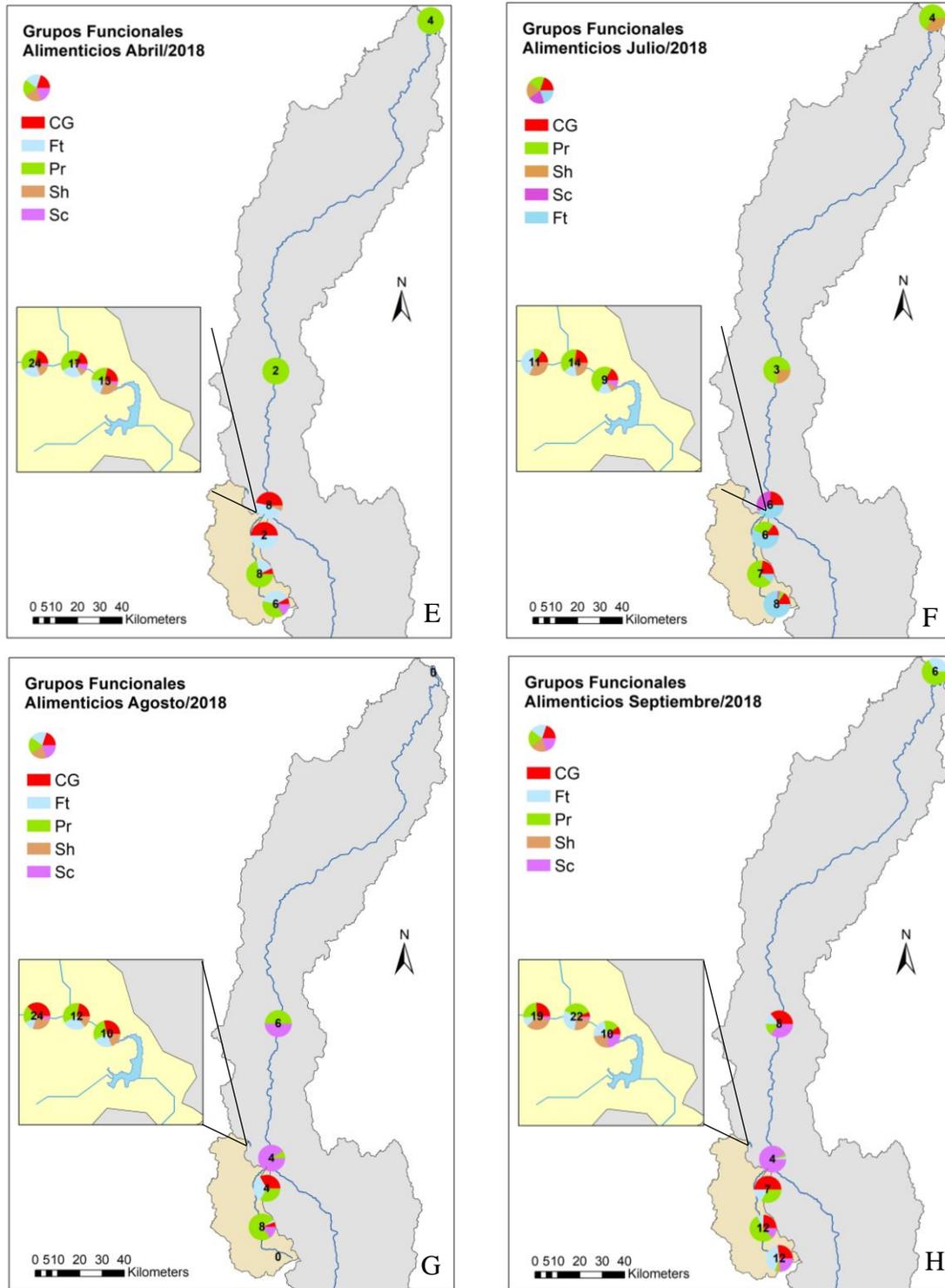


Figura 36. Distribución espacial por estaciones de los GFA en cada una de las campañas de muestreo A) Febrero/17 B) Julio/17 C) Agosto/17 D) Septiembre/17 E) Abril/18 F) Julio/18 G) Agosto/18 H) Septiembre/18.

En la Figura 36A, se presentan los GFA para la quebrada La Nitrera en el mes de febrero de 2017. Allí se observa que las tres estaciones presentan una distribución equitativa en los GFA

encontrados, y la riqueza presenta un mínimo de 18 taxa. En el muestro de julio de 2017 (Figura 36B) se pudieron monitorear todas las estaciones. La distribución de los GFA en la Nitrera parece no cambiar significativamente. En las estaciones del San Juan y el Cauca si se observó una disminución de la riqueza. Los CG aumentan desde la JSE1 hasta CE2. En la SJE3 el mayor porcentaje es de filtradores. Solo se encontraron Sh en la Nitrera y en SJE2, esto por el bajo aporte de hojarasca debido la vegetación riparia en los sitios. En el mes de agosto de 2017 (Figura 36C) se presentaron valores altos en la riqueza en la quebrada La Nitrera. Los CG fueron abundantes en la CE2. Sin embargo, no fueron tan abundantes como lo fueron los Ft. En el mes de septiembre de 2017, se presentaron organismos Raspadores en las estaciones NE2 y NE3 (Figura 36D). En esta época, las lluvias parecen favorecer el aumento de la riqueza tanto en SJE1 como en CE2 predominando Colectores y Depredadores respectivamente. En abril de 2018 (Figura 36E) se colectaron organismos en CE3 con 4 taxa, todos ellos depredadores. La riqueza fue alta en la Nitrera, mientras que en San Juan y Cauca fueron bajas con valores máximos de 8 taxa. En la estación SJE3 y CE1 la composición fue similar entre CG y Ft; esto debido al tipo de sustrato y altitud 556 y 555 m.s.n.m. respectivamente. Por su parte la riqueza disminuyó en julio de 2018 (Figura 36F) en casi todas las estaciones. A pesar de esto, en las estaciones CE2 y CE3 se colectaron depredadores y fragmentadores. En agosto de 2018 (Figura 36G) no se pudo realizar el muestreo en SJE1 por un evento torrencial en esta estación. La riqueza más alta se presentó en la NE1. Finalmente, en el muestreo de septiembre de 2018 (Figura 36H) se presentó un aumento en la riqueza en las estaciones de los ríos San Juan y Cauca; la estación CE1 no tuvo cambios en la composición de GFA de agosto a septiembre. La quebrada La Nitrera en la NE2 presentó el valor más alto en la riqueza. Lo depredadores fueron más abundantes en NE2 y NE3 que en la primera estación.

### **6.7. Análisis de la estabilidad mediante la modularidad en redes ecológicas usando *Gephi***

En total se elaboraron 62 diagramas de la estructura de la comunidad de macroinvertebrados, que corresponden a los años 2017 y 2018 con cuatro campañas de muestreo para cada uno en tres reoambientes (Anexo 7). Los diagramas presentados en la Figura 37 muestran la configuración de la red ecológica a través de las relaciones de los GFA con el valor de modularidad para cada una de las estaciones en la campaña de septiembre de 2018.

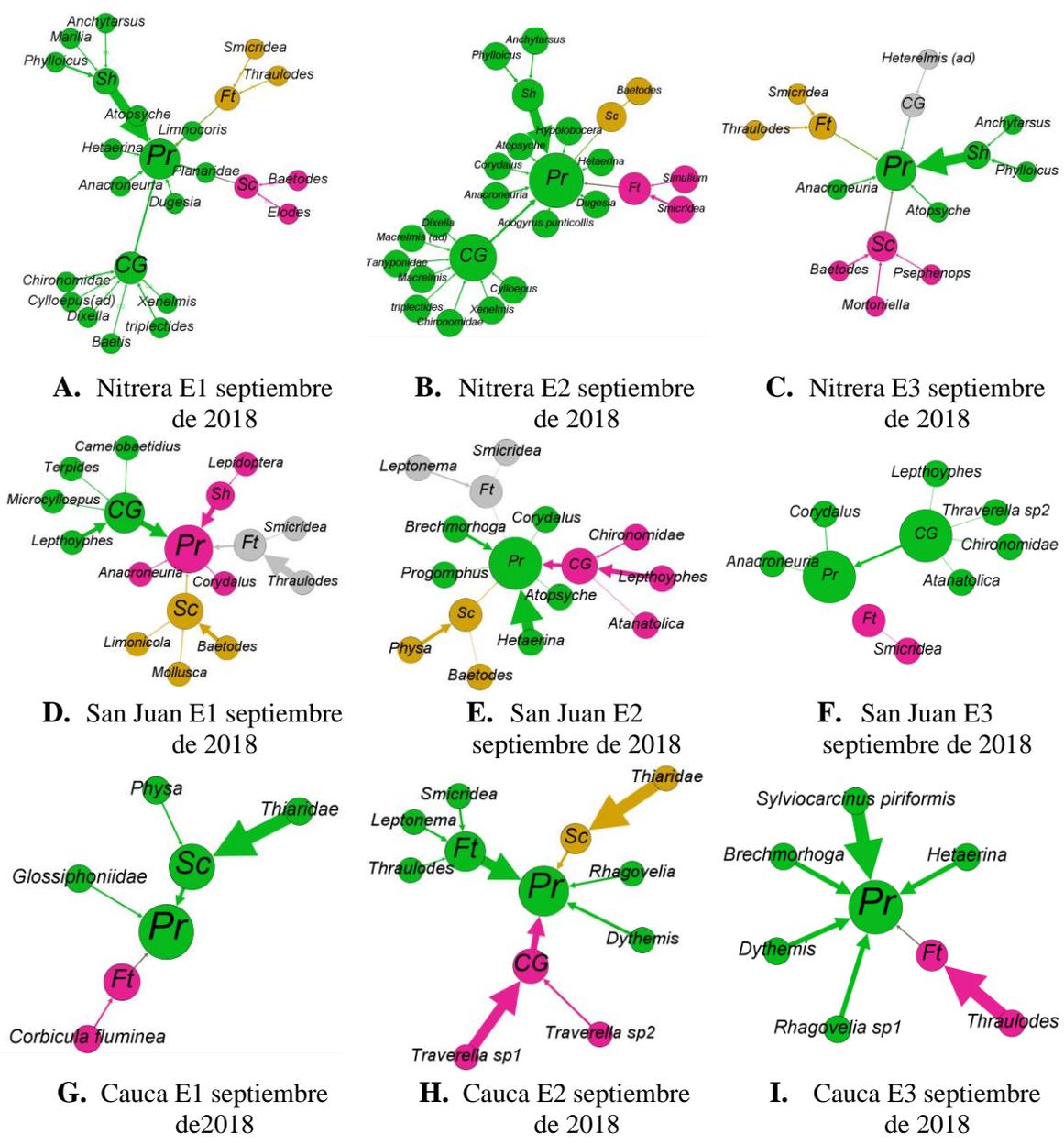


Figura 37. Diagramas de relaciones tróficas en septiembre de 2018 en las tres estaciones de los tres reoambientes usando redes ecológicas.

Para el caso de la Nitrera, el número de nodos es mayor debido a la presencia de un mayor número de morfotipos en comparación con los otros ríos. El mayor aporte de biomasa en la Nitrera lo hacen los fragmentadores (A, B, C), mientras que en el San Juan son los colectores (D, E, F). En las estaciones del Cauca el aporte de biomasa cambia. Para el caso G), son los Raspadores en especial la familia Thiaridae. En H) son los filtradores los que aportan más que los otros grupos. Finalmente, en la estación CE3 solo se encontraron filtradores como únicos aportantes de biomasa.

La Figura 38 muestra la variación de los valores de modularidad en las diferentes épocas hidrológicas para los años 2017 y 2018

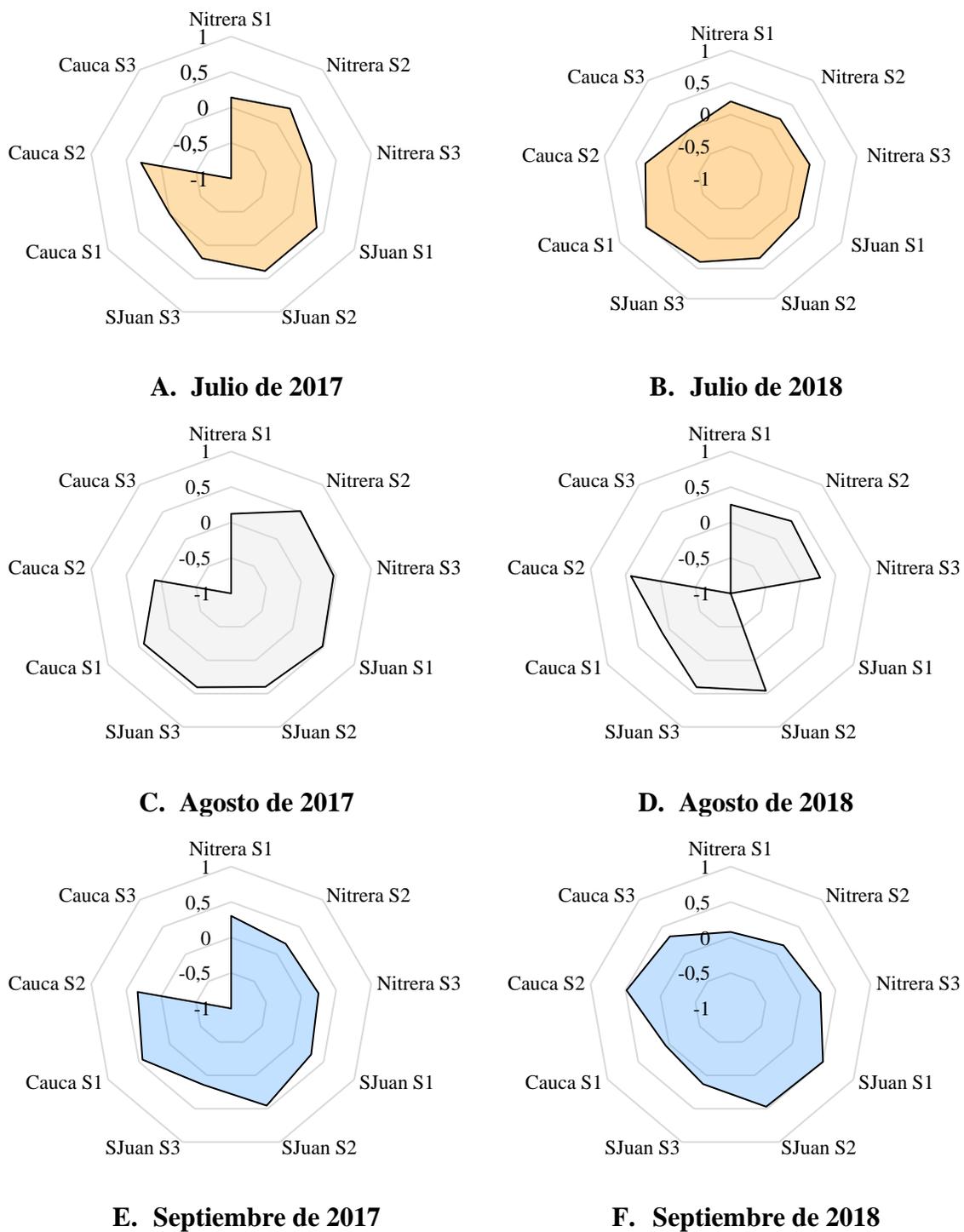


Figura 38. Valores de modularidad para tres épocas hidrológicas: seca (naranja), transición (gris), lluvias (azul), en los tres reoambientes estudiados para los años 2017 y 2018.

Los vértices de los polígonos indican el valor de modularidad por cada estación. Los colores cambian de acuerdo con la época. Se pueden ver cambios espaciales y temporales. El rango de modularidad en cada figura se encuentra entre -1 a 1. Si el valor es más cercano a uno entonces el grado de compartimentación de la red alimentaria es mayor. Si el polígono permanece estable espacialmente entonces se va a cerrar completamente, los que significa que la modularidad es homogénea a lo largo de los cambios de elevación. Los meses que presentaron mejor compartimentación son julio de 2018 y septiembre de 2018. Los valores de modularidad más altos se encontraron en la época de transición. Es importante recordar que, para agosto de 2018, no se pudo tomar la muestra de organismos por una creciente en el río en la estación SJE1. La estación CE3 presenta las modularidades más bajas y en algunos casos no fue posible calcularla debido a la baja diversidad de biotopos.

El análisis de componentes de varianza (ACV) usando como variable dependiente la modularidad (ver Tabla 20), mostró que el factor estación, es el que más contribuye en la varianza con un 65.49% seguido de época con un 27.57%. De ahí que se realizó una ANOVA multifactorial para establecer si existen diferencias estadísticas para cada uno, o para la interacción de estos factores en los tres reoambientes estudiados.

Tabla 24 Análisis de Varianza Multifactorial para la Modularidad

EFECTOS PRINCIPALES	La Nitrera		San Juan		Cauca	
	F	ValorP	F	ValorP	F	ValorP
A: Estación	3.54	0.0552	1.88	0.1949	2.64	0.1124
B: Época	5.43	0.0168	0.28	0.7628	0.01	0.9912
<b>INTERACCIONES</b>						
AxB	1.10	0.3909	2.39	0.1084	0.08	0.9856

Se obtuvo, que solo existen diferencias estadísticamente significativas en la modularidad de la quebrada La Nitrera para el factor época con un p-valor de 0.0168 (Tabla 24). Además, la combinación de los factores época y estación no parece influir en la modularidad. Posiblemente la época sea un factor perturbador importante en reoambientes de órdenes menores.

Las Figura 39, Figura 40 y Figura 41 muestran los gráficos de medias para ver las interacciones que ayudan a interpretar los efectos significativos que relacionan las épocas con las estaciones de muestreo para cada reoambiente, usando la modularidad como variable respuesta.

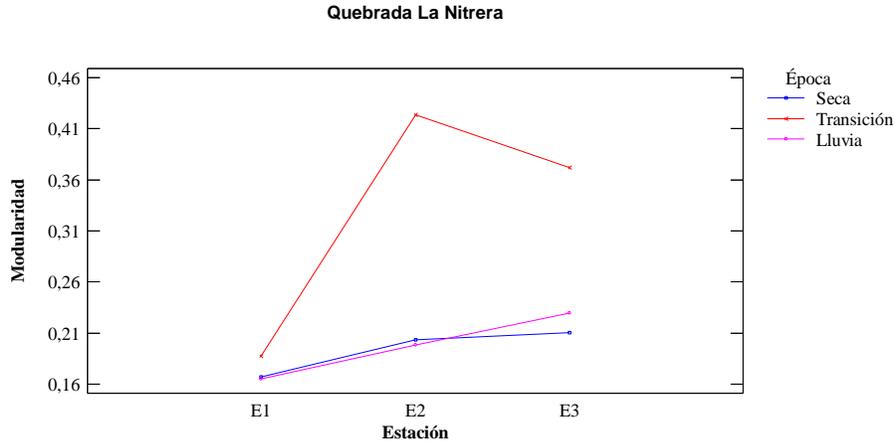


Figura 39. Variación de las Modularidades en las diferentes estaciones, en tres épocas hidrológicas, para la quebrada La Nitrera.

En la época de transición se presentan los valores de modularidad más altos en las diferentes estaciones de la Nitrera. El valor más alto de modularidad se alcanza en la NE2 con un valor promedio de 0.42 mientras que en la época seca o de lluvias los valores no superan los 0.25.

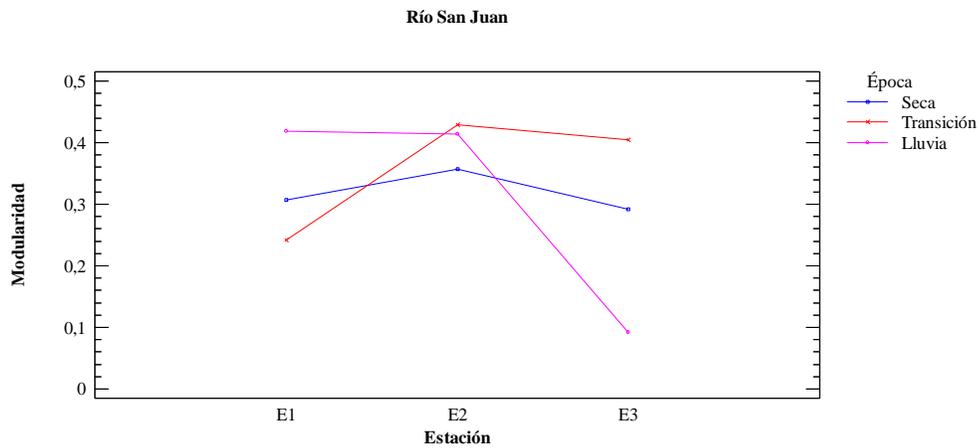


Figura 40. Variación de la Modularidades en las diferentes estaciones en tres épocas hidrológicas para el Río San Juan.

Según el ACV no se presentaron diferencias estadísticamente significativas del río San Juan para los factores *estación* y *época*. Sin embargo, se puede observar que la significancia de la estación ( $p\text{-valor}=0.19$ ) es más baja que la de la época ( $p\text{-valor}=0.76$ ). De ahí que la SJE3 es la que presenta el valor más bajo en la época de lluvia.

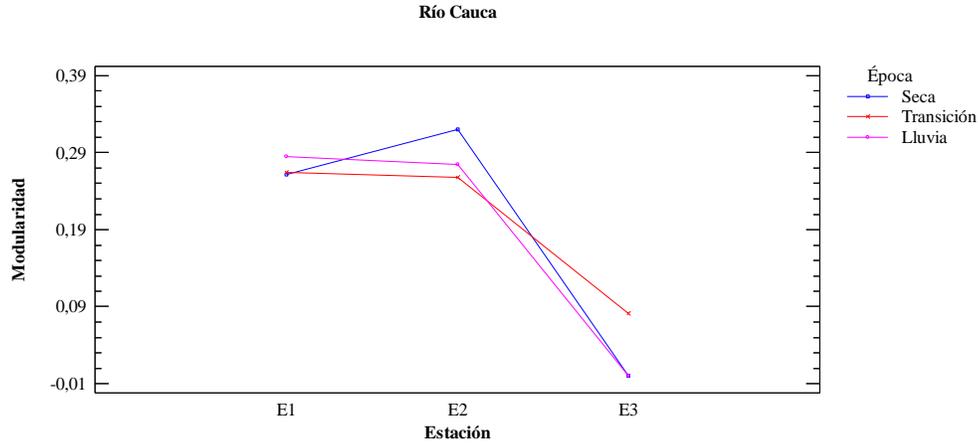


Figura 41. Variación de las Modularidades en las diferentes estaciones, en tres épocas hidrológicas, para el Río Cauca.

Finalmente, la modularidad para el río Cauca parece tener la misma tendencia durante las épocas analizadas (Figura 41). No existen diferencias estadísticamente significativas para esta variable.

### 6.8. Análisis del procesamiento y uso aprendizaje de máquinas

La Tabla 25 presenta un cuadro resumen de los tipos de clasificador probados en este análisis, máquinas de soporte vectorial y k vecinos más próximos, la velocidad de predicción, el uso de memoria, la interpretación y el porcentaje de aciertos, después de la evaluación de cada modelo.

Tabla 25 Descripción de modelos de clasificación probados en el análisis con sus respectivos porcentajes de acierto.

Tipo de clasificador	Velocidad de predicción	Uso de memoria	Interpretación	Acierto (%)
<i>Linear SVM</i>	B: Rápido M: Medio	Medio	Fácil	96.4
<i>Quadratic SVM</i>	B: Rápido M: Lento	B: Medio M: Largo	Difícil	96.4
<i>Cubic SVM</i>	B: Rápido M: Lento	B: Medio M: Largo	Difícil	96.4
<i>Fine Gaussian SVM</i>	B: Rápido M: Lento	B: Medio M: Largo	Difícil	40.9
<b><i>Medium Gaussian SVM</i></b>	<b>B: Rápido</b> <b>M: Lento</b>	<b>B: Medio</b> <b>M: Largo</b>	<b>Difícil</b>	<b>97.1</b>
<i>Coarse Gaussian SVM</i>	B: Rápido M: Lento	B: Medio M: Largo	Difícil	79.6
<i>Fine KNN</i>	Medio	Medio	Difícil	91.5

<i>Medium KNN</i>	Medio	Medio	Difícil	60.8
<i>Coarse KNN</i>	Medio	Medio	Difícil	41.1
<i>Cosine KNN</i>	Medio	Medio	Difícil	93.7
<i>Cubic KNN</i>	Lento	Medio	Difícil	66.4

B: Binario, M: Multiclase

Fuente: adaptado de MathWorks, (2019b)

En la mayoría de los métodos se obtuvo un porcentaje de acierto superior al 90%. Sin embargo, el método que presenta la mejor eficiencia fue la media gaussiana con una velocidad en la predicción Binaria rápida y Multiclase lenta. El uso de memoria es medio para Binaria y largo para Multiclase. La interpretación es difícil y el porcentaje de acierto fue del 97.1%. Una fácil interpretación permite a los especialistas en taxonomía modificar las reglas con base en su experiencia y así mejorar la eficacia del clasificador (León Hernández, Ochoa Carrasco, & Palancar Hernández, 2010).

En la Figura 42 se presenta el histograma de frecuencias para cada una de los géneros.

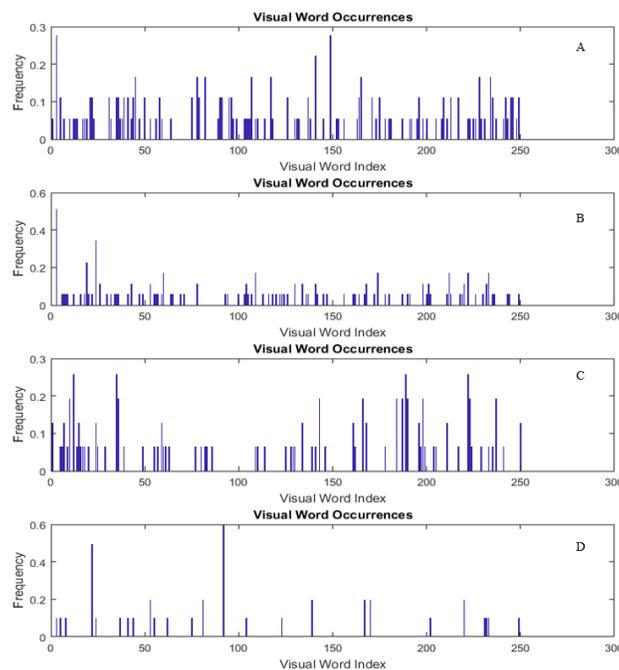


Figura 42. Histogramas de apariciones visuales de palabras, vector de características para cada una de las clases evaluadas en el modelo. A) *Thraulodes* sp B) *Traverella* sp C) *Anacroneuria* sp D) *Smicridea* sp.

La longitud del histograma corresponde al número de palabras visuales que el objeto construyó. El histograma se convierte en un vector de características. El resultado se convierte en la *huella dactilar* característico de las clases abordadas en esta investigación.

#### 6.8.1. Evaluación del sistema

En la Figura 43 se muestra la Interfaz Gráfica de Usuario (IGU) del aplicativo llamado *Macrodex* que permite la visualización de los resultados y respuesta inmediata a la determinación de los organismos.

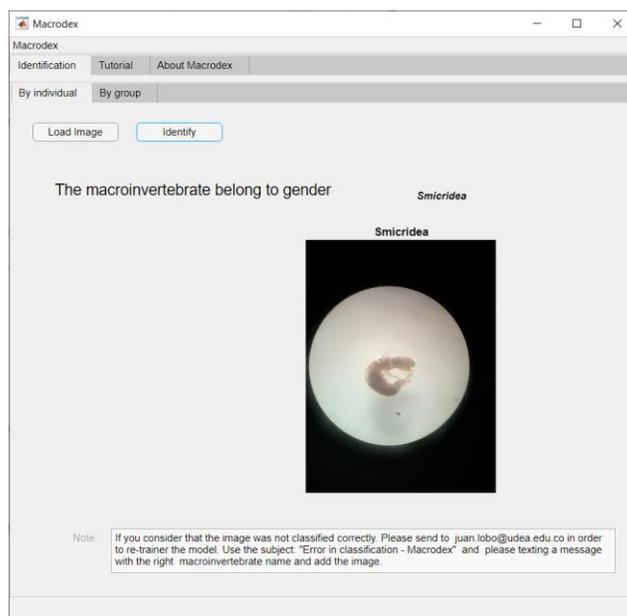


Figura 43. Interfaz gráfica de usuario (IGU) para la determinación automática de cuatro macroinvertebrados acuáticos.

Esta interfaz fue realizada mediante la extensión *AppDesigner* de Matlab(MathWorks, 2018), brinda la opción de determinar en una sola imagen o un grupo de imágenes, si así se requiere. El software se encuentra actualmente registrado para derechos de autor por el Ministerio del Interior en Colombia y se encuentra disponible en Mathworks en la página web: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70077-macrodex> (Serna et al., 2019). La publicación del artículo fue publicado en la revista *Environmental Monitoring and Assessment* en septiembre de 2020. Se encuentra disponible en el siguiente enlace <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08545-2> (Serna López, Fernández Mc Cann, Vélez Macías, & Aguirre Ramírez, 2020)

#### 6.8.2. Matriz de confusión

La matriz de confusión permitió evaluar el desempeño de la clasificación para las diferentes clases que se usaron en el entrenamiento y las imágenes usadas para la predicción (Tabla 26).

Tabla 26 Matriz de confusión a) *Thraulodes* sp b) *Traverella* sp c) *Anacroneria* sp d) *Smicridea* sp.

<b>a</b>	81	6		
<b>b</b>		167		1
<b>c</b>			50	1
<b>d</b>		3		81
	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>

Según la respuesta de la SVM para el caso del género *Thraulodes* sp de 87 imágenes de prueba, 81 fueron clasificadas correctamente. Para *Traverella* sp presentó un acierto en 167 de 168 imágenes. Por su parte, *Anacroneuria* sp tuvo un acierto en 50 de 51 imágenes y finalmente de un total de 84 imágenes de *Smicridea* sp, el clasificador logró acertar en 81 imágenes, lo que representa un porcentaje aceptable en la clasificación (Tabla 26).

La Figura 44 muestra de manera integral y sintetizada todos los componentes considerados en esta investigación. Se consideran la estructura jerárquica y altitudinal de las diferentes cuencas en un plano cartesiano Altitud vs Distancia desde la fuente, usando la misma información del modelo conceptual prestando en la Figura 2 para cada cuenca. La microcuenca de la Quebrada La Nitrera de color rojo en la parte más alta seguido de la mesocuenca del río San Juan de color azul y ambos contenidos en el tramo de la macrocuenca del río Cauca de color naranja. En cada uno se observa las variaciones espaciales de las principales variables por cada uno de los reoambiente en promedios. A medida que se avanza en la dirección del flujo de los reoambientes, las variables que disminuyen son la altitud, la diversidad y riqueza de especies y en número de módulos. Las que aumentan son el caudal, el orden del río, la turbiedad, la conductividad, la temperatura del agua y dominancia. Por su parte la modularidad y la equidad son variables que pueden cambiar debido a la composición y flujos de energía y materia entre las comunidades de macroinvertebrados.



## 7. DISCUSIÓN

Uno de los principales enfoques de esta investigación es el análisis de tres niveles: En primer lugar, el análisis de la cuenca, en segundo lugar, los biotopos de macroinvertebrados acuáticos y, en tercer lugar, la biocenosis de macroinvertebrados acuáticos. En esta sección se dará la discusión en torno al análisis de cada uno de estos elementos constitutivos en la ecología del paisaje y de comunidades y luego se integrarán estos tres elementos para aceptar o negar la hipótesis planteada.

En el análisis de la estabilidad de un reoambiente que se aborda desde una escala cuenca, se tienen en cuenta las características hidroclimáticas, geomorfológicas, ambientales y antrópicas que pueden tener efectos directos o indirectos en la abundancia y riqueza de las comunidades bénticas (Collier, 1992), en este caso, en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos que habitan en los diferentes biotopos en un reoambiente.

Los reoambientes escogidos para esta investigación presentan características bien diferenciadas. Las tres cuencas hacen parte de una misma unidad biogeográfica perteneciente a la cuenca de los ríos Magdalena-Cauca (Ideam, 2013). El tramo estudiado se encuentra en la cuenca media-baja del Río Cauca. A pesar de ello la variabilidad hidroclimática presenta algunas diferencias a lo largo de las estaciones instaladas en los reoambientes. Según la información pluviométrica del Ideam, se presenta un comportamiento bimodal en la distribución mensual multianual de la lluvia en casi todas las estaciones a excepción de la estación la Coquera, cuyo comportamiento es unimodal y que incide sobre estación CE3 en el municipio de Caucasia. De ahí que se pudieron diferenciar tres épocas: seca, transición y de lluvias. Esta variación por épocas es determinante en la composición y estructura de los macroinvertebrados (Rendoll et al., 2019).

El régimen de lluvias mensual define los mayores aportes de caudales en cada uno de los tramos. La época seca comprende los meses de febrero y julio en todas las estaciones. La época de transición de seca a lluvias se presenta en el mes de agosto. Sin embargo, para CE3 el régimen pluviométrico cambia de acuerdo a la información de la estación “La Coquera” (Figura 12), donde las épocas de transición de lluvia a seca se presenta en septiembre y de seca a lluvias en abril. Finalmente, la época de lluvia fue predominante en los meses de abril y septiembre en todas las estaciones. Mientras que para CE3 se presenta en julio y agosto.

La oferta hídrica es determinante, no solo para la disponibilidad del recurso para uso humano sino para las comunidades que habitan en estos ecosistemas (Mejía, 2008). Los caudales en el año 2018 fueron casi el doble a los presentados en el 2017 en todos los reoambientes. Al monitorear constantemente y durante todas las campañas la quebrada La Nitrera, se tiene que no hay diferencias significativas en la variación de caudal espacial ni temporal. Las distancias entre estación están por el orden de los 18 metros como se muestra en la Tabla 1. El aporte más alto de caudal se presenta en los meses de abril, agosto y septiembre con valores en promedio de 120 L/s, 92.3 L/s y 74.8 L/s respectivamente. Estos meses pueden garantizar una oferta caudal ecológico vital para los usos que se dan aledaños a la reserva, y la demanda

de agua potable que se requiere. Así mismo, se garantiza que en los otros meses la extracción no afecte la estabilidad y colonización de los macroinvertebrados acuáticos. Este monitoreo es importante en la gestión del recurso hídrico debido a que esta corriente es uno de los principales afluentes del embalse La Nitrera que suministra de agua potable a la cabecera del municipio de Concordia, Antioquia.

Para el caso del Río San Juan, la oferta hídrica se determinó a través del aforo con el correntómetro de una sección, en dos de las estaciones, Charco Corazón SJE1 y Comfenalco SJE2. En ambos sitios el aporte más alto fue en julio con 2265 L/s en el año 2017 y 13911 L/s en el 2018. A pesar de que en abril y septiembre son época de lluvias y en julio, seca, según la estación Santa Bárbara muy cercana al SJE1, el caudal para julio de 2017 fue mayor. En la estación SJE2 el caudal de la sección evidencia la transición de la época de lluvias a seca (Figura 17). Esta estación presenta actividades cercanas de extracción minera, lo cual tiene un efecto directo en la geomorfología del tramo.

En la estación CE1 del río Cauca, se pudo obtener el perfil de la sección. La parte más profunda de la sección se encuentra al costado izquierdo. En febrero de 2010 alcanzó los niveles más bajos y en agosto de 2013 el nivel alcanzó los 530 m.s.n.m.

En relación con el gradiente altitudinal, el mapa de elevación digital de la cuenca en la sección 6.2 permitió ubicar las estaciones de muestreo y diferenciar espacialmente cada uno de los tramos. A escala de microcuenca, las estaciones ubicadas sobre la quebrada la Nitrera hacen parte, según el mapa de uso de suelos, de una zona de conservación y en los alrededores se halla una extensa área de uso agrícola (Figura 24). Las coberturas en la zona son predominantemente de vegetación herbácea y algunos parches de bosques secundario. Es importante mencionar que este cuerpo de agua se encuentra en una reserva forestal que hace parte de las Empresas Públicas del municipio de Concordia. Además se localiza en un bosque muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB), considerado un ambiente de muy buenas condiciones para la biota acuática.

Siguiendo con la cuenca del río San Juan, el gradiente varía desde los puntos de monitoreo a los 2134 m.s.n.m. hasta los 556 m.s.n.m. El área de la cuenca alcanza los 1410.70 km<sup>2</sup>. Las coberturas vegetales en la cuenca del río San Juan, según la información cartográfica de base disponible, correspondiente al *shape* de coberturas vegetales del *Corine Land Cover* de 2007, se encuentran representadas por áreas de bosque, rastrojo, pastos, cultivos y barbecho, principalmente (Corantioquia, 2018).

Luego de realizar el ACP y la prueba no paramétrica Kruskal Wallis se pudo determinar aquellas variables que presentan diferencias estadísticamente significativas. Las variables fisicoquímicas tuvieron una alta variabilidad de acuerdo con el tipo de reoambiente y esto debido a que las características ambientales en zonas altas cambia en comparación con las zonas bajas, no solo en relación con la geomorfología sino también con los procesos físicos, biológicos y de impacto por las actividades humanas en la zona. Generalmente los reoambientes tropicales que se originan a gran altura, a menudo tienen mejor calidad de agua que las corrientes más abajo. Según Jacobsen (2008), la precipitación a grandes altitudes es

menor que en bajas altitudes. La temperatura baja del agua es el rasgo más característico de corrientes de zonas altas y la concentración de oxígeno es casi constante con el aumento de la altitud.

En la zona de estudio estas diferencias posiblemente estén relacionadas por el grado de protección en la parte alta de las cuencas. La Nitrera, como se mencionó en la sección 5.1 se encuentra en una reserva natural mientras que el río San Juan disminuye la estabilidad en relación con la calidad del recurso por las actividades agrícolas a lo largo de la cuenca. Finalmente, el río Cauca presenta turbiedades altas en comparación con los otros reoambientes del orden de los 300 a 800 UNF y conductividades mayores a los 130  $\mu\text{S}/\text{cm}$  debido los diferentes procesos naturales en las zonas bajas de la cuenca y de extracción de materiales mineros, entre otros. La variabilidad espacial se manifiesta con valores de mayor conductividad para los sitios de menor altitud. La conductividad responde entonces a factores físicoquímicos y biológicos debido a su estrecha asociación con estas variables (Reynaga & Santos, 2012).

Al momento de analizar la estructura de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos a lo largo del gradiente altitudinal se encontró que el factor que más influye es la *época*; al igual que se presenta en otros estudios, la estacionalidad determina la composición de organismos presentes en los ríos (Callisto, Goulart, Medeiros, Moreno, & Rosa, 2004). Sin embargo, las diferencias no fueron significativas. Lo mismo ocurrió con los grupos funcionales alimentarios donde las variables *río* y *estación*, influyeron significativamente en la variabilidad de las comunidades. Al analizar cada grupo funcional por separado, se obtuvo que la *época* no tiene significancia estadística, mientras que la *altitud*, la cual está asociada con cada estación, si presenta diferencias estadísticamente significativas según el análisis multifactorial.

Para el caso de los organismos filtradores, las abundancias mayores se presentaron en las estaciones de la quebrada la Nitrera, predominando las familias Leptophlebiidae (*Thraulodes*), Hydropsychidae (*Leptonema* y *Smicridea*), Simuliidae (*Simulium*). Los colectores por su parte fueron dominantes en altitudes entre los 1892 m.n.s.m. y los 453 m.s.n.m.. Las mayores abundancias se encontraron en CE3 seguida de SJE2 y SJE3. Estos ambientes son propicios para colectores-recolectores así como para colectores-filtradores, que aprovechan la disponibilidad de MOPF presente en el sedimento o en el material orgánico suspendido (Soledad, 2014). Además, la época de transición es la que presenta las abundancias más altas en la mayoría de las estaciones debido a que en esta época disminuye el arrastre de material fluvial (Poff & Ward, 1991). Los predadores presentaron en general menores abundancias que los otros grupos funcionales, siendo la Nitrera la que presentó los valores más altos en comparación con las otras estaciones. Los morfotipos más representativos en todas las estaciones corresponden a las familias Planariidae (*Dugesia*), Hydrobiosidae (*Atopsyche*), Calopterygidae (*Hetaerina*), Perlidae (*Anacroneuria*). Los Raspadores en especial el género *Baetodes* fue el más abundante en época seca para las estaciones SJE1 y SJE2. En estas estaciones la corriente es alta, lo que favorece la formación de biopelícula en las rocas, presentando un efecto directo en la producción primaria (Ramírez

& Gutiérrez-Fonseca, 2014). En general para las otras estaciones, la abundancia de Sc es baja con un leve aumento en época de transición. Finalmente, los fragmentadores también presentan bajas abundancias siendo la estación NE2 la única que presentó valores altos de abundancia en época de transición. Las familias más abundantes fueron Ptilodactylidae (*Tetraglossa*), Calamoceratidae (*Phylloicus*), Gamaridae, encontradas principalmente en la quebrada La Nitrera debido principalmente al aporte de hojarasca.

Según el concepto de *el río como continuo* propuesto por Vannote y colaboradores (1980) se describe cómo las corrientes de bajo orden ubicadas en áreas altas y boscosas presentan una producción primaria restringida debido al sombreado ribereño. En consecuencia, gran parte de la demanda de energía por parte de los consumidores es satisfecha por fuentes alóctonas.

Es importante mencionar que el uso de los grupos funcionales alimentarios para los macroinvertebrados acuáticos está en evolución. Ya son más los estudios e investigadores que trabajan con estas comunidades para evaluar las características ambientales de una corriente, pero aún se usa información de otras latitudes (Tomanova et al., 2006). Esto representa una limitación al momento de caracterizar los organismos a niveles taxonómicamente mayores. Sin embargo, una valoración de preferencias alimenticias para cada uno de los taxa analizados fue la estrategia para poder agruparlos de acuerdo con su grupo alimenticio. Los datos de contenido intestinal son particularmente útiles para construir redes de conectividad y redes alimentarias del flujo de la biomasa.

Este análisis consideró la relación de biomasa que es potencialmente transferible a otros según su GFA, en este caso la transferencia a los depredadores por parte de los otros GFA. No se consideraron las relaciones que existen entre los GFA cuyos procesos derivan de la transformación del sustrato para la asimilación de otros. De acuerdo con los contenidos estomacales analizados para cada una de las morfoespecies, se encontró que el 58% de los organismos incorporan materia orgánica particulada gruesa, mientras que el 42% materia orgánica fina. Este material hace parte de detritos muy abundantes en los ecosistemas de agua dulce de Sudamérica (Soledad, 2014). La mayoría de los contenidos estomacales estudiados correspondieron a detritos finos, como lo plantea Tomanova y colaboradores (2006), lo que indica, en términos del aporte de materia orgánica, la importancia de este recurso alimenticio en las corrientes neotropicales.

Se establecieron cinco categorías: MOPF, MOPG, RO, AP, TV. La materia orgánica particulada fina (MOPF) se genera por procesos físicos en las altas altitudes de los ríos, ya sea por degradación de la MOPG, por la floculación del material orgánico disuelto o por la acción combinada de procesos físicos, químicos y biológicos y puede ingresar al cauce debido a su escorrentía desde las laderas (Rodríguez & Ospina, 2011). De los morfotipos analizados; aquellos organismos que tienen la capacidad de ingerir y a su vez transformar la MOPG son *Traverella*, *Baetodes*, *Prebaetodes*, *Hetaerina*.

Según el Análisis de Componentes principales (ACP), cuatro componentes explicaron el 76.51% de la variabilidad de los datos; los raspadores están más correlacionados con la

cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Es decir, van a preferir ambientes en donde la disponibilidad sea alta, siendo más sensibles a las perturbaciones. El criterio de selección para poder realizar el ACP de los taxa, fue que se presentaran más de 9 individuos en las estaciones y campañas de muestreo. Aquellos que tenían menores individuos, generalmente corresponden a morfoespecies con una condición ecológica especial, pero pueden sesgar la información global del análisis.

Respecto al análisis de redes ecológicas, los macroinvertebrados acuáticos son fundamentales para las redes alimentarias en ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos. Además, el estudio de las redes alimentarias acuáticas proporciona información sobre la transferencia de energía y nutrientes en un ecosistema (Rosi-Marshall et al., 2016).

El ACV mostró que el porcentaje de variabilidad más alto para la modularidad corresponde en primer lugar al factor estación con un 82.18%. Esto se debe a los cambios de altitud que se presentan en los diferentes reoambientes. Si bien es cierto que las características físicas, químicas e hidráulicas varían por estación, también lo hace la distribución de las especies en las cuencas. Como lo muestra la Equidad (J) con una variabilidad del 12.10%. Se presentan altos valores de modularidad cuando la equidad es menor. Al realizar el análisis de Kruskal Wallis, se mostró que no eran estadísticamente significativas ( $p=0.40$ ). Sin embargo, lo fue para el factor río ( $p=0.009$ ). La modularidad está correlacionada de manera directa con la diversidad y la riqueza de especies, esto indica que un valor alto en la modularidad está asociada riqueza y diversidad alta, por ende, indica que hay estabilidad en la red (Delsol, Loreau, & Haegeman, 2018; Lurgi, Montoya, & Montoya, 2016; Pennekamp et al., 2018).

En análisis de la modularidad se realizó por cada reoambiente; la quebrada la Nitrera presenta modularidades altas en época de transición para las estaciones NE2 y NE3 (Figura 39). Es posible que las corrientes de orden bajo, en especial quebradas y arroyos, sean más sensibles a las variaciones hidrológicas, afectando la estabilidad de las comunidades; así se pudo evidenciar en el análisis multifactorial (ver Tabla 24), en donde la *época* presentó diferencias estadísticamente significativas para este reoambiente ( $p=0.0168$ ). Ni el río San Juan, ni el río Cauca, presentaron diferencias estadísticamente significativas por *estación* y *época*. El río San Juan presentó las modularidades y el número de módulos mayores,  $>0.4$  para SJE2, lo que implica que la red tiene un buen agrupamiento. El valor positivo en la red para las estaciones indica que la red posee una estructura basada en comunidades constituídas (Contreras & Zúñiga, 2016). En el río Cauca, las modularidades no superaron el valor de 0.35, debido a los pocos morfotipos encontrados. La riqueza taxonómica de especies en el río Cauca fue baja en la CE3 en comparación con las estaciones CE1 y CE2 en todas la épocas hidrológicas.

Dado que la modularidad representa una función que refleja qué tan buena es la partición de una red, entendiendo que entre mayor sea el valor, mejor es la partición de la red encontrada, esta se usó para definir el criterio de estabilidad en cada uno de los reoambientes estudiados.

Al momento de relacionar la modularidad con el número de módulos presentes en cada una de las redes por estaciones, se obtuvo una relación directamente proporcional. De acuerdo

con la estructura modular, entre mayor sea el número de módulos más se podrá amortiguar la propagación de perturbaciones, determinando la estabilidad o resistencia de las redes ecológicas (Gauzens et al., 2015). La época de transición presenta la modularidades más altas, esto posiblemente se deba a la recolonización de algunos biotopos por la disminución de velocidad del lecho, entre otras causas. La quebrada La Nitrera y el río San Juan presentaron valores más altos que el río Cauca, lo que puede indicar que el cambio altitudinal sí incide en la red ecológica, presentando un grado de compartimentación mayor por el número de nodos (GFA).

Los métodos de aprendizaje prometen ser herramientas importantes en el reconocimiento y determinación automático de macroinvertebrados acuáticos basados en imágenes, estas metodologías permiten trabajar con datos desequilibrados. Aunque se requieren expertos en cada etapa, se pueden obtener importantes beneficios como tiempo de determinación, reducción del esfuerzo físico, bajos costos y asertividad. La presente estrategia basada en técnicas de aprendizaje de máquinas usando visión por computador para la determinación de macroinvertebrados a nivel de género logró una eficiencia del 97.1 %. Este proceso utilizó la técnica de extracción de características *bag of features* y un SVM como clasificador. Sin embargo, el desarrollo de la base de datos puede ser un factor limitante a la hora de incluir nuevas especies en el algoritmo. Además, el clasificador permite el reconocimiento de MA específicas para sitios de estudio como los tres ambientes de cursos de agua estudiados aún se deben garantizar condiciones muy específicas en la captura de las imágenes para que, en el momento de evaluarlas en el clasificador, se obtengan unos resultados satisfactorios (Serna López et al., 2020).

De acuerdo con todo lo anterior se aprueba la hipótesis planteada en esta investigación ya que si posible analizar la estabilidad ecológica de un reoambiente teniendo en cuenta las variaciones espacio-temporales mediante el análisis de la Cuenca, los biotopos de macroinvertebrados y la biocenosis que estructura la comunidad de macroinvertebrados acuáticos.

## **8. CONCLUSIONES**

En análisis a escala de cuenca como una sola ecorregión permitió identificar y relacionar características hidroclimáticas, geomorfológicas, ambientales y antrópicas que pueden tener efectos directos o indirectos en la abundancia, riqueza e interacciones de las comunidades bénticas. En cada cuenca se pudieron diferenciar los tipos representativos de usos y coberturas. La microcuenca de la quebrada la Nitrera se encuentra en una zona de conservación y alrededor existe una extensa área de uso agrícola. La mesocuenca del río San Juan presenta coberturas de bosque natural en la parte alta, seguido de usos agrícolas y vegetación arbustiva, con zonas de extracción de materiales en la parte baja. El tramo de la cuenca de río Cauca presenta zonas de grandes extensiones de pastos para el ganado, con coberturas de vegetación herbácea, zona agrícola y unos cuantos parches de bosque

fragmentados. Sumado a la extracción minera y obras civiles como hidroeléctricas, entre otros.

La oferta hídrica es determinante, no solo para la disponibilidad del recurso para uso humano, sino también para las comunidades que habitan estos ecosistemas, como es el caso de la quebrada La Nitrera, que sirve de afluente para un embalse que suministra de agua al Municipio de Concordia. El aporte más alto de caudal se presenta en los meses de abril, agosto y septiembre con valores en promedio de 120 L/s 92.3 L/s y 74.8 L/s respectivamente. De ahí que es importante garantizar la estabilidad de las comunidades aguas arriba haciendo control en el punto de captación, buscando una gestión adecuada del recurso hídrico.

Las variables fisicoquímicas tuvieron una alta variabilidad de acuerdo con el tipo de reoambiente y esto debido a que las características ambientales en zonas altas cambian en comparación con las zonas bajas, no solo en relación con la geomorfología sino también a los procesos físicos, biológicos y de impacto por las actividades humanas en la zona.

Al analizar cada grupo funcional alimentario, se obtuvo que existe una variación estadísticamente significativa por el cambio de la *altitud*, la cual está asociada a cada estación de muestreo. Si se disminuye el gradiente, las abundancias de estos GFA también disminuyen. Esta variación ocurre por aspectos como: disponibilidad de biotopos para colonización, aumento de la turbiedad del agua, aumento en la temperatura del agua.

El análisis estomacal de algunos morfotipos permitió la asignación de GFA a estos organismos. Al compararlos con los reportes de autores se tiene que casi el 92% de los organismos analizados coincide con lo registrado en este análisis.

El modelo de redes ecológicas usando la estructura modular permitió conocer que las estaciones que presentan mayores GFA, es decir una mayor diversidad de organismos relacionada con el número de funciones ecológicas, pueden ser capaz de amortiguar la propagación de perturbaciones, determinando la estabilidad o resistencia de estas redes.

Los polígonos indicaron que la época de transición presenta las modularidades más altas, esto posiblemente se deba a la recolonización de algunos biotopos por la disminución de velocidad del lecho. La quebrada La Nitrera y el río San Juan presentaron valores más altos que el río Cauca, lo que puede indicar que el cambio altitudinal si incide en la red ecológica presentando un grado de compartimentación mayor por el número de nodos.

El método de reconocimiento y determinación de los cuatro morfotipos de macroinvertebrados usando imágenes, el preprocesamiento de imágenes, técnicas de extracción de características, y usando como clasificador SVM, mostró una eficiencia del 97%. Los resultados mostraron exitosamente el procesamiento de un grupo de imágenes, la cual puede ser una herramienta importante para acercarse al reconocimiento de estos organismos. Aunque aún se requieren condiciones muy específicas en el momento de la captura de la imagen, su entrenamiento, procesamiento computacional para la clasificación, se logró estandarizar una metodología adecuada que servirá como punto de partida para el inventario y biomonitorio acuático en Colombia.

El desarrollo metodológico a diferentes escalas implementado en esta investigación arrojó resultados importantes ya que se pudo analizar la estabilidad ecológica en tres reoambientes mediante diferentes niveles altitudinales usando las redes ecológicas de acuerdo a los grupos funcionales alimentarios de macroinvertebrados acuáticos. La información hidrológica, hidráulica, coberturas, usos del suelo, oferta hídrica, fisicoquímica, estructura y composición de macroinvertebrados, las relaciones alimentarias entre ellos, el uso de métodos espaciales y de procesamiento digital de imágenes, etc. ayudaron a entender relaciones, definir patrones y avanzar en la comprensión en un sistema complejo desde tres escalas: Cuenca, reoambiente y biotopo.

## **9. RECOMENDACIONES**

El modelo conceptual propuesto permitió reconocer elementos a diferentes escalas, la integración de estos elementos sirvió como base para dar respuesta a la hipótesis propuesta. Si bien los macroinvertebrados acuáticos logran dar respuesta a tensiones naturales y antrópicas que pueden alterar la estabilidad de un reoambiente, se deben incluir otros elementos ecológicos y ambientales que son relevantes como lo son otras comunidades hidrobiológicas, aspectos socioeconómicos y demográficos y elementos geomorfológicos en los tramos de corriente y a una escala de biotopo.

Los métodos matemáticos de reconocimiento a escala de organismo son importantes para analizar la estabilidad debido a que su determinación permite conocer la composición y la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos. Esta investigación sirvió como punto de partida y deja una línea de trabajo definida en las técnicas mediante el aprendizaje de máquinas aplicado a sistemas ecológicos. Sin embargo aun se requiere avanzar en estos métodos y elementos que puedan fortalecer la comprensión de los ecosistemas acuáticos en Colombia.

## 9. REFERENCIAS

- Agualimpia, Y. del C., & Castro, C. E. (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestion*, 3(1). Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/4333>
- Aguirre, N., Vélez, F., Grajales, H., Hernández, E., Caicedo, O., Mesa, J., & Cortes, F. (2015). *Calidad fisicoquímica e hidrobiológica del agua en el río San Juan, Andes, Antioquia*. 75.
- Alcaldía de Concordia. (2016). Alcaldía de Concordia, Antioquia. Recuperado de <http://www.concordia-antioquia.gov.co/index.shtml#3>
- Álvarez, L. F., & Daza, E. M. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Recuperado de <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31357>
- Anand, M., González, A., Guichard, F., Kolasa, J., & Parrott, L. (2010). Ecological systems as complex systems: Challenges for an emerging science. *Diversity*, 2(3), 395–410. <https://doi.org/10.3390/d2030395>
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. *Third International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, 361–362. <https://doi.org/10.1136/qshc.2004.010033>
- Bay, H., Tuytelaars, T., & Gool, L. Van. (2008). *SURF: Speeded Up Robust Features*. Recuperado de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11744023\\_32](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11744023_32)
- Blondel, V. D., Guillaume, J. L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>
- Boltovskoy, D., Izaguirre, I., & Correa, N. (1995). Feeding selectivity of *Corbicula fluminea* (Bivalvia) on natural phytoplankton. *Hydrobiologia*, 312(3), 171–182. <https://doi.org/10.1007/BF00015510>
- Brandt, J., Holmes, E., & Larsen, D. (1994). *Monitoring 'small biotopes'*. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1384-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1384-9_12)
- Burden, F. R., Foerstner, U., McKelvie, I. D., & Guenther, A. (2002). Biological monitoring and assessment using invertebrates. En *Handbook of Environmental Engineering Calculations*. Recuperado de <http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2058/browse/environmental-monitoring-handbook/p2000a1fd99705.1001>
- Bustos, J., & Ulloa, P. (2015). Mirmecofauna y perturbación en un bosque de niebla neotropical (Reserva Natural Hato Viejo, Valle del Cauca, Colombia). *Revista de Biología Tropical/International Journal of Tropical Biology and Conservation*.
- Callejas, R., & Idárraga, Á. (2011). *Flora de Antioquia: catálogo de las plantas vasculares*

Vol I. Medellín.

- Callisto, M., Goulart, M., Medeiros, A. O., Moreno, P., & Rosa, C. A. (2004). Diversity assessment of benthic macroinvertebrates, yeasts, and microbiological indicators along a longitudinal gradient in Serra do Cipó, Brazil. *Brazilian journal of biology = Revista brasileira de biologia*. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842004000500003>
- Campos, M. R. (2014). *Crustáceos decápodos de agua dulce de Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Campos, M. R., & Lasso, C. A. (2015). Libro rojo de los cangrejos dulceacuícolas de Colombia. En *Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Carmina, E., Balderas, S., Grac, C., Berti-equille, L., Aurora, M., & Hernandez, A. (2015). Potential application of macroinvertebrates indices in bioassessment of Mexican streams. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.007>
- Chará-Serna, A. M., Chará, J. D., Zúñiga, M. del C., Pedraza, G. X., & Giraldo, L. P. (2010). Clasificación trófica de insectos acuáticos en ocho quebradas protegidas de la ecorregión cafetera Colombiana. *Universitas Scientiarum*, 15(1), 27–36. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC15-1.tcoa>
- Chará-Serna, A. M., Chará, J. D., Zúñiga, M. del C., Pedraza, G. X., & Giraldo, L. P. (2010). Trophic classification of aquatic insects in eight sheltered streams of the Colombian coffee ecoregion. *Universitas Scientiarum*, 15(1), 27–36. <https://doi.org/10.11144/javeriana.SC15-1.tcoa>
- Cheshire, K., Boyero, L., & Pearson, R. G. (2005). Food webs in tropical Australian streams: Shredders are not scarce. *Freshwater Biology*, 50(5), 748–769. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01355.x>
- Collier, K. (1992). *Assessing river stability: use of the Pfankuch method*. (131), 21. Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Assessing+river+stability:+Use+of+the+Pfankuch+method#0>
- Colombiano, E. (2018). Cronología de la emergencia en Hidroituango. Recuperado el 1 de marzo de 2019, de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/hidroituango-cronologia-de-la-emergencia-MH8845248>
- Contreras, M. P., & Zúñiga, J. A. (2016). *Detección de comunidades en redes complejas o grafos usando metaheurísticas* (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso). Recuperado de [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-5000/UCD5101\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-5000/UCD5101_01.pdf)
- Corantioquia. (2018). Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico del Río San Juan. Recuperado el 15 de septiembre de 2019, de <http://www.corantioquia.gov.co/Paginas/VerContenido.aspx?List=MenuSuperior&item=165>
- CTA. (2012). *Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de*

*Antioquia 2010 - 2012* (Vol. 7).

- Cummins, K., Merritt, R., & Andrade, P. (2005). The use of invertebrate functional groups to characterize ecosystem attributes in selected streams and rivers in south Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 40(1), 69–89. <https://doi.org/10.1080/01650520400025720>
- Dell, A. I., Bender, J. A., Branson, K., Couzin, I. D., de Polavieja, G. G., Noldus, L. P. J. J., ... Brose, U. (2014). Automated image-based tracking and its application in ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 29(7), 417–428. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.05.004>
- Delsol, R., Loreau, M., & Haegeman, B. (2018). The relationship between the spatial scaling of biodiversity and ecosystem stability. *Global Ecology and Biogeography*. <https://doi.org/10.1111/geb.12706>
- Domínguez E. & Fernández H. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biológica. Fundación Miguel Lillo. Argentina.* 654.
- DPN. (2018). Las 16 grandes apuestas de Colombia para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de Departamento Nacional de Planeación website: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Las-16-grandes-apuestas-de-Colombia-para-cumplir-los-Objetivos-de-Desarrollo-Sostenible.aspx>
- Evans, L. J., & Norris, R. H. (1997). Prediction of benthic macroinvertebrate composition using microhabitat characteristics derived from stereo photography. *Freshwater Biology*. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00188.x>
- FAO. (2009). *¿Por qué invertir en la ordenación de las cuencas hidrográficas ?*
- Fashing, N. J. (1994). Life-History Patterns of Astigmatid Inhabitants of Water-Filled Treeholes. En *Mites*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2389-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2389-5_7)
- Fashing, N. J. (1998). Functional morphology as an aid in determining trophic behaviour: The placement of astigmatic mites in food webs of water-filled tree-hole communities. *Experimental and Applied Acarology*. <https://doi.org/10.1023/A:1006081622519>
- Fortunato, S. (2010). Community detection in graphs. En *Physics Reports* (Vol. 486). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2009.11.002>
- Frissell, C. A., Liss, W. J., Warren, C. E., & Hurley, M. D. (1986). A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 10(2), 199–214. <https://doi.org/10.1007/BF01867358>
- Gauzens, B., Thébault, E., Lacroix, G., & Legendre, S. (2015). Trophic groups and modules: Two levels of group detection in food webs. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(106). <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.1176>
- Gigon, A. (2013). Typology and Principles of Ecological Stability and Instability. *Mountain Research and Development*, 3(2), 95. <https://doi.org/10.2307/3672989>
- Girvan, M., & Newman, M. (2002). Community structure in social and biological networks.

- Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(12), 7821–7826. <https://doi.org/10.1073/pnas.122653799>
- Govedich, F. R., & Moser, W. E. (2015). Clitellata: Hirudinida and Acanthobdellida. *Thorpe and Covich's Freshwater Invertebrates*, 565–588. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385026-3.00023-1>
- Grimm, V., & Wissel, C. (1997). Babel, or the ecological stability discussions: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia*, 109(3), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s004420050090>
- Hidroituango. (2019). Hidroituango. Recuperado de <https://www.hidroituango.com.co/hidroituango>
- Holdridge, L. R. (1967). Life zone ecology. *Life zone ecology*.
- Holling, C. S. (2013). Resilience and stability of ecological systems. En *The Future of Nature: Documents of Global Change* (pp. 245–256). Yale University Press.
- Hone, D. (2013). How species are identified. Recuperado el 15 de julio de 2019, de Guardian, The website: <https://www.theguardian.com/science/lost-worlds/2013/jun/20/dinosaurs-fossils>
- Hou, W., & Walz, U. (2014). Extraction of small biotopes and ecotones from multi-temporal RapidEye data and a high-resolution normalized digital surface model. *International Journal of Remote Sensing*, 35(20), 7245–7262. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.967890>
- Hurtado, S., García-Trejo, F., & Gutiérrez-Yurrita, P. J. (2005). Importancia ecológica de los macroinvertebrados bentónicos de la subcuenca del Río San Juan, Querétaro, México. *Folia Entomologica Mexicana*, 44(October 2016), 271–286.
- Hussain, Q. A., & Pandit, A. K. (2012). Macroinvertebrates in streams: A review of some ecological factors. *International Journal of Fisheries and Aquaculture*, 4(7), 114–123. <https://doi.org/10.5897/IJFA11.045>
- Ideam. (2010). *National Legend of Land Coverings. CORINE Land Cover Methodology adapted for Colombia*. Recuperado de [http://siatac.co/c/document\\_library/get\\_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762](http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762)
- Ideam. (2012). Sistema de Información del Recurso Hídrico. Recuperado el 15 de mayo de 2019, de <http://sirh.ideam.gov.co:8230/Sirh/faces/observatorioSuperficiales.jsp>
- Ideam. (2013). Zonificación y codificación de uniades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. En *Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM*. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- Ideam. (2015). Atlas Climatológico de Colombia (1981-2010). Recuperado el 5 de mayo de 2019, de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

- Ideam. (2018). Solicitud de Informacion Hidrometeorológica. Recuperado el 12 de febrero de 2018, de <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- IGAC, & Corpoica. (2002). *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*.
- Ives, A. R., & Carpenter, S. R. (2007). Stability and diversity of ecosystems. *Science (New York, N.Y.)*, 317(5834), 58–62. <https://doi.org/10.1126/science.1133258>
- Ives, J., & Messerli, B. (1989). The Himalayan dilemma. *Reconciling development and conservation*.
- Jacobsen, D. (2008). Tropical high-altitude streams. En *Tropical Stream Ecology* (pp. 219–256). <https://doi.org/10.1016/B978-012088449-0.50010-8>
- Jakkula, V. (2016). Tutorial on Support Vector Machine. *Special Issue “Some Novel Algorithms for Global Optimization and Relevant Subjects”, Applied and Computational Mathematics (ACM)*. <https://doi.org/10.11648/j.acm.s.2017060401.11>
- Jorgensen, S., Xu, F. L., & Costanza, R. (2010). *Ecological indicators for assessment of ecosystem health* (Second).
- Joutsijoki, H. (2014). *Half-Against-Half Structure with SVM and k -NN Classifiers in Benthic Macroinvertebrate Image Classification*. 9(2), 454–462. <https://doi.org/10.4304/jcp.9.2.454-462>
- Knighton, D. (2014). Fluvial forms and processes: a new perspective. En *Journal of Chemical Information and Modeling* (2a ed., Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Larios, N., Deng, H., Zhang, W., Sarpola, M., Yuen, J., Paasch, R., ... Dietterich, T. G. (2008). Automated insect identification through concatenated histograms of local appearance features: Feature vector generation and region detection for deformable objects. *Machine Vision and Applications*, 19(2), 105–123. <https://doi.org/10.1007/s00138-007-0086-y>
- Lasso, C. A., Morales-Betancourt, M. A., Vera-Ardila, M. L., & Linares, E. L. (2018). *Moluscos dulceacuícolas de Colombia*. <https://doi.org/10.21068/a2018n03>
- León Hernández, R., Ochoa Carrasco, J., & Palancar Hernández, J. (2010). Desarrollo de Clasificadores basados en Reglas de Asociación.
- Leow, L. K., Chew, L.-L., Chong, V. C., & Dhillon, S. K. (2015). Automated identification of copepods using digital image processing and artificial neural network. *BMC Bioinformatics*, 16(Suppl 18), S4. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-16-S18-S4>
- López, P. A. (2013). Propuesta de prevención y manejo de la contaminación por mercurio en la región de La Mojana. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lurgi, M., Montoya, D., & Montoya, J. M. (2016). The effects of space and diversity of interaction types on the stability of complex ecological networks. *Theoretical Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s12080-015-0264-x>

- Maass, M. (2000). Principios Generales Sobre Manejo De Ecosistemas. *Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM*.
- Machado, T., & Rincon, J. (1989). *Distribución ecológica e identificación de los coleópteros acuáticos en diferentes pisos altitudinales del departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia*.
- Manfredi, F., Piazzolla, D., Mancini, E., Scanu, S., Bonamano, S., Piermattei, V., & Marcelli, M. (2018). Benthic biocenosis as spatial unit to assess ecosystem services. *20th EGU General Assembly, EGU2018*, 4556. Recuperado de <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..20.4556M/abstract>
- Margalef, R. (1983). *Limnología* (Ediciones). Barcelona.
- Martin, G. (2015). Gephi -Introduction to network analysis and visualization. *Digital Humanities*. Recuperado de <http://www.martingrandjean.ch/gephi-introduction/>
- Mathers, K. L., Chadd, R. P., Extence, C. A., Rice, S. P., & Wood, P. J. (2016). The implications of an invasive species on the reliability of macroinvertebrate biomonitoring tools used in freshwater ecological assessments. *Ecological Indicators*, *63*, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.051>
- MathWorks. (2018). Computer Vision System Toolbox – MATLAB & Simulink.
- MathWorks. (2019a). Image Classification with Bag of Visual Words. Recuperado de [https://www.mathworks.com/help/vision/ug/image-classification-with-bag-of-visual-words.html?searchHighlight=histogram of visual word occurrences&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/vision/ug/image-classification-with-bag-of-visual-words.html?searchHighlight=histogram%20of%20visual%20word%20occurrences&s_tid=doc_srchtile)
- MathWorks, T. (2019b). Choose Classifier Options. Recuperado de <https://www.mathworks.com/help/stats/choose-a-classifier.html>
- Mejía, O. A. (2008). *El Recurso Hídrico en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA 1995-2007*.
- Mérigoux, S., & Dolédec, S. (2004). Hydraulic requirements of stream communities: A case study on invertebrates. *Freshwater Biology*, *49*(5), 600–613. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01214.x>
- Molina, F., & P.B. (2009). *Manual de Procesos Biológicos*. Medellín: Reimpresos-Universidad de Antioquia.
- Morales-Quintero, D. E., Velez-Macías, F. de J., & Guerrero-Hoyos, B. (2019). Caracterización hidrogeológica y geomorfológica de la cuenca y embalse del parque natural la Nitrrera. *Revista de la Facultad de Ciencias*. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v8n1.71399>
- Muñoz, I., Romaní, A. M., Rodrigues-Capítulo, A., Gonzáles Esteban, J., & Garcia-Berthou, E. (2009). Relaciones tróficas en el ecosistema fluvial - Cap. 19. *Conceptos y Técnicas en Ecología fluvial*, 1–22.
- Newman, M. (2010). Networks: An Introduction. En *Networks: An Introduction*. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.0001>

- Newman, M., & Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 69(2 2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.026113>
- Olesen, J. M., Bascompte, J., Dupont, Y. L., & Jordano, P. (2007). The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50), 19891–19896. <https://doi.org/10.1073/pnas.0706375104>
- Orozco, M. F., Vélez, F. de J., Serna, J. P., & Aguirre, N. J. (2019). *Variación de las coberturas terrestres de cuencas pertenecientes al Río Cauca, entre los 2200 m.s.n.m. y los 40 m.s.n.m. en Antioquia y su relación con los usos del suelo*. Universidad Nacional.
- Parparov, A., Gal, G., & Zohary, T. (2015). Quantifying the ecological stability of a phytoplankton community: The Lake Kinneret case study. *Ecological Indicators*, 56, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.002>
- Pennekamp, F., Pontarp, M., Tabi, A., Altermatt, F., Alther, R., Choffat, Y., ... Petchey, O. L. (2018). Biodiversity increases and decreases ecosystem stability. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0627-8>
- Petersen, H. (2002). General aspects of collembolan ecology at the turn of the millennium. *Pedobiologia*, 46(3–4), 246–260. Elsevier GmbH.
- Pielou, E. C. (1966). *Ecological Diversity*. New York.
- Pilosof, S., Porter, M. A., Pascual, M., & Kéfi, S. (2017). The multilayer nature of ecological networks. *Nature Ecology and Evolution*, 1(4). <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0101>
- Poff, N. L., & Ward, J. V. (1991). Drift responses of benthic invertebrates to experimental streamflow variation in a hydrologically stable stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. <https://doi.org/10.1139/f91-229>
- POMCA. (2017). Actualización POMCA río Aurra. Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá. *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá*, (1), 5–6. Recuperado de <https://www.metropol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/Paginas/POMCA.aspx>
- Posada, J., & Roldan, G. (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el Nor-Occidente de Colombia. *Caldasia*, 25(1), 169–192.
- Puertas, O. L., Carvajal, Y., & Quintero, M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna*, 169, 112–120.
- Quintero, C., Merchán, F., Cornejo, A., & Galán, J. S. (2018). Uso de Redes Neuronales Convolucionales para el Reconocimiento Automático de Imágenes de Macroinvertebrados para el Biomonitorio Participativo. *KnE Engineering*, 3(1), 585. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1462>
- Ramírez, A., & Gutiérrez-Fonseca, P. E. (2014). Functional feeding groups of aquatic insect families in Latin America: A critical analysis and review of existing literature. *Revista de Biología Tropical*, 62, 155–167. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i0.15785>

- Real Academia Española. (2019). Diccionario de la lengua Española. Recuperado el 21 de noviembre de 2019, de <https://dle.rae.es/alimentario>
- Rendoll, J., Contador, T., Gañán, M., Pérez, C., Maldonado, A., Convey, P., ... Rozzi, R. (2019). Altitudinal gradients in Magellanic sub-Antarctic lagoons: the effect of elevation on freshwater macroinvertebrate diversity and distribution. *PeerJ*, 7, e7128. <https://doi.org/10.7717/peerj.7128>
- Reyes, J. F., & Navas, G. R. (2000). El escáner convencional, una herramienta útil para la catalogación de organismos marinos. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, (29), 41–50.
- Reynaga, M. C., & Santos, D. A. Dos. (2012). Rasgos biológicos de macroinvertebrados de ríos subtropicales: Patrones de variación a lo largo de gradientes ambientales espacio-temporales. *Ecología Austral*.
- Rodríguez, J., & Ospina, R. (2011). *Descriptorios funcionales en un sistema fluvial de montaña, Santa Marta, Colombia*. 161.
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: propuesta para el uso del método BMWP Col.* Recuperado de <https://searchworks.stanford.edu/view/5799477%0Ahttp://books.google.com.co/books?id=ZEjgIKZTF2UC>
- Roldán, G., & Ramírez, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología Neotropical* (2a. ed.). Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Roldán Pérez, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*.
- Rosenberg, D., & Resh, V. (1993). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. (Chapman & Hall), 488p.
- Rosi-Marshall, E. J., Wellard Kelly, H. A., Hall, R. O., & Vallis, K. A. (2016). Methods for quantifying aquatic macroinvertebrate diets. *Freshwater Science*. <https://doi.org/10.1086/684648>
- Ruiz-Toro, J., Aguirre-Ramírez, N., Serna-López, J., Hernández-Atilano, E., & Vélez-Macías, F. (2020). Energía calórica, biomasa y estructura de los macroinvertebrados acuáticos en la reserva La Nitrera, Concordia, Antioquia, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 25(1). <https://doi.org/DOI: http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n1.76435>
- Sarpola, M. J., Paasch, R. K., Dietterich, D. A., Lytle, A. R., & Shapiro, L. G. (2008). An Aquatic Insect Imaging system to automate insect classification. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1–14. <https://doi.org/10.13031/2013.25375>
- Serna, J. P., Fernandez, D., Lobo, J. S., Uribe, D., Velez, F., & Aguirre, N. (2019). Macrodex. Recuperado el 23 de julio de 2019, de

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70077-macrodex>

- Serna López, J. P., Fernández Mc Cann, D. S., Vélez Macías, F. de J., & Aguirre Ramírez, N. J. (2020). An image processing method for recognition of four aquatic macroinvertebrates genera in freshwater environments in the Andean region of Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08545-2>
- Shannon, C., & Weaver, W. (1949). The mathematical theory of communication. *University of Illinois Press. Urbana*, 144p.
- Simovici, D. A. (2012). The k -Means Clustering . En *Linear Algebra Tools for Data Mining*. [https://doi.org/10.1142/9789814383509\\_0015](https://doi.org/10.1142/9789814383509_0015)
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. En *Nature* (p. 688).
- Soledad, E. (2014). *Hábitats y grupos funcionales alimentarios de los macroinvertebrados bentónicos en la costa bonaerense del río de la plata: relación con la contaminación*. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/33628>
- Stevenson, P., Pérez-Torres, J., & Muñoz-Saba, Y. (2006). Informe Nacional sobre el Avance en el Conocimiento y la Información de la Biodiversidad 1998 – 2004. *Informe Nacional sobre el Avance en el Conocimiento y la Información de la Biodiversidad 1998 – 2004*, (May), 151–171.
- Stouffer, D. B., & Bascompte, J. (2011). Compartmentalization increases food-web persistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(9), 3648–3652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014353108>
- Tamaris-Turizo, C. E., Pinilla-A, G. A., & Muñoz, I. (2018). Trophic network of aquatic macroinvertebrates along an altitudinal gradient in a Neotropical mountain river. *Revista Brasileira de Entomologia*, 62(3), 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2018.07.003>
- Thorp, J. H., & Covich, A. P. (2009). *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates* (3rd ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-02669-5>
- Tomanova, S., Goitia, E., & Helešić, J. (2006). Trophic levels and functional feeding groups of macroinvertebrates in neotropical streams. *Hydrobiologia*, 556(1), 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1255-5>
- Torres, J. F., & Pinilla, G. a. (2011). *Revisión de las características limnológicas de los sistemas acuáticos de la región de la Mojana*. 70.
- USEPA. (2013). U.S.E.P. Agency, National Rivers and Streams Assessment 2008-2009. *Office of Wetlands*.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. <https://doi.org/10.1139/f80-017>

- Venegas-Barrera, J. Manjarrez, C. S. (2004). Visual Categorization with Bags of Keypoints. *Rev. Mex. Biodivers.*
- Vilche, A., Gil-Pérez, D., Toscano, J. C., & Macías, O. (2014). *Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad*. Recuperado de <https://www.oei.es/historico/decada/accion.php?accion=5>
- Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, *116*(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
- W3C. (2015). The World Wide Web Consortium. Recuperado de <http://www.w3.org/>
- Wagner, R. G., & Zasada, J. C. (1991). Integrating plant autecology and silvicultural activities to prevent forest vegetation management problems. *The Forestry Chronicle*, *67*, 506–513.
- Wang, J., Lin, C., Ji, L., & Liang, A. (2012). A new automatic identification system of insect images at the order level. *Knowledge-Based Systems*, *33*, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.03.014>
- Watson, M. (2013). Bioassessment in ephemeral rivers: constraints and challenges in applying macroinvertebrate sampling protocols. *African Journal of Aquatic Science*, *38*(1).
- Welcomme, R. L. (1980). *Cuencas fluviales (FAO)*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/x6853s/X6853S02.htm>
- Wilson, E. O. (1988). The current state of biological diversity. En *Biodiversity* (In E. O. W, pp. 3–18). Recuperado de <http://www.nap.edu/read/989/chapter/2>
- Worrall, T. P. (2012). *The influence of hydromorphology on instream ecology in lowland rivers*. Recuperado de <http://scholar.google.comhttps://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/10141>
- Zheng, A., & Wang, M. (2015). *Convolutional Neural Networks-based Plankton Image Classification System*.

## Hoja de Vida

---

### **Juan Pablo Serna López**

Docente Universitario  
Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Escuela Ambiental  
Medellín, Colombia  
jpablo.serna@udea.edu.co

### **Formación académica**

---

2016–Actual. Doctorado en Ingeniería Ambiental (Candidato) – Recursos Hidráulicos. Universidad de Antioquia. Medellín. (En curso, último año, finalización en 2019).

2013–2016. Magister en Ingeniería Ambiental Universidad de Antioquia, Medellín.

2004 –2011. Ingeniero Ambiental. Universidad del Cauca, Popayán, Cauca.

### **Líneas de Trabajo**

---

Hidrobiología, Ecología, Modelación ambiental y Gestión Ambiental.

### **Experiencia Profesional**

---

#### **Docencia**

2014 – 2017 Docente de Cátedra. Escuela Ambiental. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

#### **Investigación**

2016- Actual. Estudiante doctoral. Proyecto: Análisis de la estabilidad ecológica de tres reoambientes a través de los macroinvertebrados acuáticos y el procesamiento digital de imágenes. Doctorados nacionales de COLCIENCIAS: Conv. 727 de 2105.

### **Publicaciones**

---

#### **Publicados**

**Serna López J.P.**, Fernández Mc Cann, D.S., Vélez Macías, F. et al. An image processing method for recognition of four aquatic macroinvertebrates genera in freshwater environments in the Andean region of Colombia. *Environ Monit Assess* 192, 617 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08545-2>

**J. P. Serna** and J. E. Cañón. Projecting the future of Ayapel Ciénaga: A hydro-ecological analysis under climate change scenarios, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.17533/udea.redin.20190940>

Ruiz-Toro JA, Aguirre-Ramírez NJ, **Serna-López JP**, Hernández-Atilano E, Vélez-Macías FJ. Energía calórica, biomasa y estructura de los macroinvertebrados acuáticos en la reserva La Nitrrera, Concordia, Antioquia, Colombia. Acta biol. Colomb., Volumen 25, Número 1, 2020. ISSN electrónico 1900-1649. ISSN impreso 0120-548X. Doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n1.76435>

Atehortúa, Benjamín. Hernández, Esneddy. Aguirre, Néstor. Vélez, Fabio. **Serna, Juan P.** Ruiz, Julián. Monsalve, Mabel. Medición y análisis de la diversidad de comunidades hidrobiológicas: una perspectiva desde la ingeniería ambiental. En: Colombia Revista Politécnica ISSN: 1900-2351 ed: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid v.15 fasc./A p.32 - 41, 2019, DOI: 10.33571/rpolitec.v15n28a3

**Serna, Juan P.**, Casas, Juan C., Peñuela, Gustavo. Aguirre, Néstor. 2013. Respirimetría de *Phragmites australis* en presencia de materia orgánica disuelta y el xenobiótico clorotalonilo. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 18, p. 195-208. [https:// DOI: https://doi.org/10.24050/reia.v9i18.270](https://doi.org/10.24050/reia.v9i18.270)

### **En evaluación/sometidos**

**Serna, Juan Pablo** Fernández, David S. Velez, Fabio de J. Ruiz, Julián A. Breckling, Broder. Aguirre, Néstor J. Altitudinal distribution of the functional feeding groups of aquatic macroinvertebrate using an ecological network in two Andean Rivers an a stream in Colombia. Aquatic Ecology. Springer,

### **Registro de software**

**Serna, J. P.**, Fernández, D., Lobo, J. S., Uribe, D., Vélez, F., & Aguirre, N. (2019). Macrodex. Disponible en <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70077-macrodex>

### **Participación en eventos académicos**

---

#### **Presentaciones orales**

2019- Análisis funcional de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad ambiental de tres ríos mediante el procesamiento digital de imágenes en Antioquia, Colombia. I Congreso Nacional de investigación en innovación Bogotá (Colombia).

2019- Análisis de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en el río Cauca usando el procesamiento digital de imágenes. II Workshop en Ecohidrología y Ecohidráulica Tipo de evento: Taller Ámbito: Nacional. Ayapel (Córdoba).

2018- Grupo GEOLIMNA: Un Análisis de Los Ecosistemas Acuáticos desde la Ingeniería. Expoingeniería 2018. Tipo de evento: Congreso Medellín - Plaza mayor

2018- Análisis de la estabilidad ecológica de tres reoambientes a través de los macroinvertebrados y el procesamiento digital de imágenes. Congreso AQUATROP: Ecosistemas acuáticos tropicales en el Antropoceno. Universidad San Francisco de Quito y UDLA. Quito (Ecuador).

2018- Análisis de comunidad de macroinvertebrados acuáticos en tres reoambientes del departamento de Antioquia usando procesamiento digital de imágenes. Congreso Colombiano de Ecología. Tipo de evento: Congreso Ámbito: Nacional. Popayán (Cauca). Segunda Mejor ponencia.

### **Participación presentaciones orales**

2019- Variación de la estructura trófica del ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos en los ríos Cocorná, San Lorenzo y la quebrada Guarinó, El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia. 46° congreso de Entomología 2019. Expositor: Esteffany Paola Barros. Medellín (Antioquia).

### **Asistente**

European Conference of Tropical Ecology 2018. Paris (Francia).

### **Pasantía**

2017-2018 Universidad de Vechta. Alemania.

### **Asesoría de trabajos académicos**

---

### **Pregrado**

2019-actual Asesor. Estudiante: María Fernanda Orozco Candelario. Título: Variación de las coberturas terrestres de cuencas pertenecientes al Río Cauca, entre los 2200 m.s.n.m y los 40 m.s.n.m en Antioquia y su relación con los usos del suelo. Programa: Ingeniería geológica. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. (En curso)

2017-2018 Asesor. Estudiante: Noris Emilse Quintero Ramírez. Título: Análisis de las variables físico-químicas y bióticas para determinación de la calidad del agua de la quebrada Santa Mónica, embalse la Nitrera, Concordia Antioquia-Colombia. Programa: Ingeniería Sanitaria. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. (Finalizado)

### **Especialización**

2016-2016 Asesor. Estudiante Cindy Yisela Rodríguez Solano. Título: Revisión de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua en sistemas leníticos colombianos. Programa: Especialización en Gestión Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. (Finalizado).

### **Maestría**

2017-Actual Asesor. Estudiante: Esteffany Paola Barros. Título: Hábitats de preferencia del ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos en tres ríos andinos de Colombia. Programa: Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, Medellín, Medellín.

2016- 2019 Asesor. Estudiante: Julián Andrés Ruiz Toro. Título: Distribución de la energía y la biomasa de los macroinvertebrados acuáticos en la quebrada la Nitrera, Concordia, Antioquia. Programa: Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, Medellín. (Finalizada)

---

### **Redes y grupos de investigación**

2016-Actual Estudiante - Investigador. Grupo de Investigación en Geografía, Limnología y Modelación Ambiental GeoLimna. Universidad de Antioquia

2016-Actual Investigador. Grupo de Ciencia en Ingeniería en Sistemas Ambientales (GCISA) Universidad del Cauca

2010-2016 Estudiante - Investigador. Grupo de Investigación en gestión y modelación ambiental GAIA. Universidad de Antioquia (Finalizado).

### **Organización de eventos académicos**

2012- IX Seminario Colombiano de limnología Tipo de evento: Seminario Ámbito: Nacional - Sede de Investigación Universitaria (SIU). Medellín

### **Reconocimientos**

---

2018- Segundo lugar a mejor ponencia oral. Congreso Colombiano de Ecología.

2016- Distinción meritoria por trabajo de maestría: Modelación del comportamiento hidrosocial de la Ciénaga de Ayapel, Córdoba bajo diferentes escenarios de cambio climático. Tesis de Maestría.

2016- Becario de Colciencias-Convocatoria 727 de 2015.

200- Matrículas de honor

---

### **Pasantía internacional**

La pasantía doctoral se realizó en la Universidad de Vechta en Alemania con el profesor Dr. Broder Breckling desde octubre 1 de 2017 hasta marzo 31 de 2018. Donde se realizaron las siguientes actividades:

1. Curso de Modelación ecológica (Concepts of aquatic ecology / Introduction of system analysis). Universidad de Bremen. Programa ISATEC. 30 Oct-3 Nov. y 27 Nov-1 Dic. /2017. PD Dr. Broder Breckling, PD Dr. Hauke Reuter. Bremen, Alemania.
2. Presentación del trabajo de investigación en el programa ISATEC de la Universidad de Bremen. Nov. 28th/17 Dr. Broder Breckling. Bremen, Alemania.
3. Participación en un curso en Alemán DF-1 Deutsch als Fremdsprache A1 and speaking German class. Universidad de Vechta, Alemania Oct./17-Jan/18.
4. Visitan al museo de historia natural en Francia. Galería de evolución. Enero/2018. Paris, Francia
5. Intercambio de información relacionado con el análisis estadístico de datos usando R con el Dr. Stefan Nickel. Universidad de Vechta, Alemania
6. Presentación del trabajo de investigación en la Universidad de Giessen. Tierökologie & Spezielle Zoologie. Intercambio de información acerca de análisis estadístico, manejo de datos y claves para identificación de insectos acuáticos. Dr. Elisabeth Pohlen and Dr. Klemens Ekschmitt. Giessen, Alemania.
7. Intercambio de información con EOPATH software. Moritz Stäbler. ZMT scientific assistant. Universidad de Bremen, Alemania.
8. Visita al instituto de investigación en agua (Eawag). Intercambio de información con el Dr. Christopher Robinson. Departamento de ecología acuática. Dübendorf, Switzerland.
9. Participación en un día de sesión en la European Conference of tropical Ecology en Paris, 26th Marzo/2018. Francia.

## **Certificados**



La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR  
**CERTIFICA QUE LA PONENCIA**  
**“Análisis Funcional De La Comunidad De Macroinvertebrados Acuáticos Como Indicadores De Calidad Ambiental De Tres Ríos Mediante El Procesamiento Digital De Imágenes En Antioquia, Colombia ”**  
 Realizado Por: Juan Pablo Serna  
 Participó en el 1er Congreso de Investigación e Innovación Ambiental CAR - CNIIA 2019  
 Se firmó en Bogotá a los 4 días del mes de junio de 2019.

*[Signature]*  
 Director General  
 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

*[Signature]*  
 Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental - CAR




## II WORKSHOP EN ECOHIDROLOGÍA Y ECOHIDRÁULICA

ENFOQUES INTEGRALES PARA LA GESTIÓN DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN COLOMBIA

Se certifica que *Juan Pablo Serna* de Universidad de Antioquia, participó como ponente en el II WORKSHOP EN ECOHIDROLOGÍA Y ECOHIDRÁULICA, desarrollado en el municipio de Ayapel (Córdoba) del 8 al 10 de marzo de 2019.

*[Signature]*  
 Ana Carolina Santos-R  
 Instituto Humboldt

*[Signature]*  
 Jorge Escobar-V  
 Pontificia Universidad Javeriana



**CCE-2018**  
 Congreso Colombiano de Ecología  
 Conociendo nuestra biodiversidad más allá de las fronteras  
 El Comité Organizador

PREMIA EN SEGUNDO PUESTO A:  
**Juan Pablo Serna López**  
 Identificado con número 10.308.180  
 en modalidad de ponencia con el trabajo:

Análisis de comunidad de macroinvertebrados acuáticos en tres reoambientes del departamento de Antioquia usando procesamiento digital de imágenes

presentado en el Congreso Colombiano de Ecología, realizado en la ciudad de Popayán del 06 al 09 de noviembre de 2018




El Comité Organizador del Congreso Ecosistemas Acuáticos Tropicales en el Antropoceno  
**AQUATROP**  
 Confiere el presente  
 CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN A:  
*Juan Serna*  
 Presentación Oral: Análisis de la estabilidad ecológica de tres reoambientes a través de los macroinvertebrados acuáticos y el procesamiento digital de imágenes

El Congreso AQUATROP se realizó del lunes 23 al jueves 26 de julio del 2018, en las Sedes de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ) y de la Universidad de Las Américas (ULDA) en Quito, Ecuador

*[Signature]* Andreea C. Encicлада, Ph.D. Comité Organizador  
*[Signature]* Blanca Ríos-Touma, Ph.D. Comité Organizador  
*[Signature]* Alonso Fomíer, Ph.D. Comité Organizador



CERTIFICADO

# Aplicativo

 <b>MINISTERIO DEL INTERIOR</b> DIRECCIÓN NACIONAL DE DERECHO DE AUTOR UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL OFICINA DE REGISTRO		Libro - Tomo - Partida <b>13-73-482</b> Fecha Registro <b>22-may-2019</b>
<b>CERTIFICADO DE REGISTRO DE SOPORTE LOGICO - SOFTWARE</b>		
Página 1 de 2		
<b>1. DATOS DE LAS PERSONAS</b>		
<b>AUTOR</b>		
Nombre y Apellido	DAVID FERNANDEZ MC CANN	No de Identificación CC: 71639489
Nacional de Dirección	COLOMBIA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - CIUDAD	Ciudad: MEDELLIN
<b>AUTOR</b>		
Nombre y Apellido	NESTOR JAIME AGUIRRE RAMIREZ	No de Identificación CC: 10285050
Nacional de Dirección	COLOMBIA CALLE 77 SUR NO. 35-140	Ciudad: SABANETA
<b>AUTOR</b>		
Nombre y Apellido	FABIO VELEZ MACIAS	No de Identificación CC: 71594213
Nacional de Dirección	COLOMBIA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - CIUDAD	Ciudad:
<b>AUTOR</b>		
Nombre y Apellido	JUAN PABLO SERNA LOPEZ	No de Identificación CC: 10308180
Nacional de Dirección	COLOMBIA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - CIUDAD	Ciudad:
<b>AUTOR</b>		
Nombre y Apellido	JUAN SEBASTIAN LOBO RAMIREZ	No de Identificación CC: 1152211840
Nacional de Dirección	COLOMBIA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - CIUDAD	Ciudad:
<b>AUTOR</b>		
Nombre y Apellido	DANIEL URIBE GIRALDO	No de Identificación CC: 1152217294
Nacional de Dirección	COLOMBIA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - CIUDAD	Ciudad:
<b>TITULAR DERECHO PATRIMONIAL</b>		
Razón Social	UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	NIT: 8909800408
Dirección	CL 67 E3 - 108	Ciudad: MEDELLIN
<b>PRODUCTOR</b>		
Razón Social	UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	NIT: 8909800408
Dirección	CL 67 E3 - 108	Ciudad: MEDELLIN
<b>2. DATOS DE LA OBRA</b>		
Título Original	MACROCOEX	
Año de Creación	2019	Pais de Origen: COLOMBIA, Año Edición:
CLASE DE OBRA	INEDITA	
CARACTER DE LA OBRA	OBRA ORIGINARIA	
CARACTER DE LA OBRA	OBRA EN COLABORACION	
ELEMENTOS APORTADOS DE SOPORTE LOGICO	MATERIAL AUXILIAR	
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA</b>		

# Publicación

Environ Monit Assess (2020) 192:617  
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-08545-2>



## An image processing method for recognition of four aquatic macroinvertebrates genera in freshwater environments in the Andean region of Colombia

Juan Pablo Serna López · David Stephen Fernández  
 Mc Cann · Fabio de Jesús Vélez Macías · Néstor  
 Jaime Aguirre Ramírez

Received: 27 May 2020 / Accepted: 9 August 2020  
 © Springer Nature Switzerland AG 2020

**Abstract** The aquatic macroinvertebrate community reflects the ecological status of a river. Typically, some extraction methods have been implemented, but the capture and preservation of organisms are necessary. The techniques of digital image processing applied to ecology have become innovative tools for the characterization of aquatic macroinvertebrates. This research implements a methodology for the processing and classification of four aquatic macroinvertebrates genera *Thraulodes*, *Traverella* (Ephemeroptera), *Amacronerua* (Plecoptera), and *Sintaxia* (Trichoptera) present in three rivers in Antioquia (Colombia), which includes two phases. The first of these was the collection and capture of organisms to obtain a database of the most abundant genera, at laboratory scale. The second was the use of simulations that allow the classification of data through a process of selection and extraction of

characteristics using the *bag of visual words* technique. Of all the classifiers tested, Gaussian vector support machines obtained a percentage of success in the recognition up method of four organisms to the genus level of 97.1 %. The training and computational processing for classification enabled the standardization of an appropriate methodology that will serve as a starting point for aquatic biomonitoring and inventory in Colombia and internationally.

**Keywords** Machine learning · Vector support machines · Digital image processing · Aquatic macroinvertebrates · Water quality monitoring

### Introduction

## 10. ANEXOS

Anexo 1. Resumen estadístico variables hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas para la quebrada La Nitrera

Variable	Recuento	Promedio ( $\bar{x}$ )	Mediana ( $M_e$ )	Desviación Estándar ( $\sigma$ )	Coficiente de Variación (CV)	Máx.	Mín.	Curtosis Estandarizada
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	42	0.028	0.02	0.024	83.63	0.097	0.002	1.51
Velocidad (m/s)	42	0.151	0.13	0.096	64.03	0.33	0.005	-0.92
Altitud (m.s.n.m)	48	2166.33	2183.0	52.52	2.424	2220.0	2096.0	-2.16
Temperatura agua (°C)	38	15.698	15.6	0.287	1.833	16.27	15.2	-0.89
pH (unid pH)	48	7.173	7.041	0.455	6.353	8.841	6.63	8.29
Oxígeno disuelto (mg/l)	48	7.465	7.46	0.486	6.517	8.53	6.79	0.21
Saturación de Oxígeno (%)	34	103.65	97.8	17.33	16.72	150.6	93.95	5.04
Conductividad eléctrica (μS/cm)	48	35.463	35.7	3.801	10.71	41.3	27.83	-1.17
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	42	20.59	20.0	5.457	26.49	32.5	13.5	0.17
Turbiedad (NFU)	24	4.408	4.35	1.012	22.97	6.05	2.4	-0.17
Riqueza de especies	24	9.541	9.0	2.604	27.29	15.0	5.0	-0.75
Abundancia total (# Org)	19	34.05	30.0	16.31	47.89	64.0	9.0	-0.87
Densidad (Org/0.09 m <sup>2</sup> )	24	33.0	30.0	15.22	46.12	64.0	9.0	-0.64
Diversidad Shannon	24	1.812	1.814	0.283	5.66	2.22	1.275	-0.86
Equidad Pielou	24	0.820	0.822	0.080	9.816	0.98	0.080	-0.50
Dominancia Simpson	24	0.198	0.204	0.080	40.47	0.33	0.027	-0.66
Modularidad	48	0.228	0.222	0.104	45.81	0.516	0.079	1.80
Número de módulos	48	3.083	3.0	0.767	24.88	5.0	2.0	0.19

Anexo 2. Resumen estadístico variables hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas para el Río San Juan

Variable	Recuento	Promedio ( $\bar{x}$ )	Mediana ( $M_e$ )	Desviación Estándar ( $\sigma$ )	Coficiente de Variación (CV)	Máx.	Mín.	Curtosis Estandarizada
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	9	5.083	2.265	5.561	109.4	13.91	1.052	-0.49
Velocidad (m/s)	9	0.435	0.39	0.128	29.55	0.642	0.327	-0.37
Altitud (m.s.n.m)	39	1561.6	1892.0	686.7	43.97	2134.0	556.0	-1.70
Temperatura agua (°C)	33	20.94	21.38	2.864	13.67	25.8	16.3	-1.16
pH (unid pH)	39	7.469	7.62	0.463	6.200	8.01	6.42	-0.13
Oxígeno disuelto (mg/l)	39	7.968	7.965	0.679	8.525	9.38	6.795	0.27

Saturación de Oxígeno (%)	29	103.92	102.45	6.65	6.40	126.6	97.78	9.55
Conductividad eléctrica (μS/cm)	39	67.71	68.65	17.208	25.41	98.15	32.65	-0.15
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	34	21.88	24.65	15.766	72.05	43.3	0	-1.51
Turbiedad (NFU)	18	121.79	66.32	157.99	129.7	491.0	1.89	1.40
Riqueza de especies	20	6.65	7.0	2.158	32.46	10.0	2.0	-0.05
Abundancia total (# Org)	19	30.42	25.0	22.96	75.50	72.0	3.0	-0.79
Densidad (Org/0.09 m <sup>2</sup> )	20	33.9	34.5	16.15	47.66	71.0	7.0	0.17
Diversidad Shannon	20	1.329	1.491	0.387	29.18	1.77	0.41	-0.06
Equidad Pielou	20	0.723	0.715	0.122	16.87	0.94	0.500	-0.25
Dominancia Simpson	20	0.354	0.297	0.164	46.25	0.714	0.163	-0.13
Modularidad	19	0.359	0.389	0.113	31.66	0.502	0.132	-0.32
Número de módulos	20	3.05	3.0	0.686	22.50	4.0	2.0	-0.57

### Anexo 3. Resumen estadístico variables hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas para el Río Cauca

Variable	Recuento	Promedio (x̄)	Mediana (M <sub>e</sub> )	Desviación Estándar (σ)	Coficiente de Variación (CV)	Máx.	Mín.	Curtosis Estandarizada
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	24	1210.7	670.0	1160.52	95.84	4257.4	499.9	2.64
Velocidad (m/s)	-	-	-	-	-	-	-	-
Altitud (m.s.n.m)	32	431.4	453.0	173.4	40.19	555.0	50.0	1.61
Temperatura agua (°C)	32	26.09	25.4	2.328	8.923	30.3	20.77	0.45
pH (unid pH)	32	7.742	7.689	0.281	3.633	8.313	7.319	-0.48
Oxígeno disuelto (mg/l)	32	7.286	7.321	1.089	14.95	8.93	3.786	6.42
Saturación de Oxígeno (%)	27	92.34	94.17	11.55	12.50	100.3	53.87	9.14
Conductividad eléctrica (μS/cm)	32	183.67	191.83	36.33	19.78	246.3	123.16	-1.23
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	27	64.14	70.0	37.16	57.94	146.0	0	0.35
Turbiedad (NFU)	20	453.7	449.0	217.6	47.95	800.0	137.0	-0.72
Riqueza de especies	16	4.5	3.0	3.326	73.92	12.0	1.0	0.17
Abundancia total (# Org)	16	23.93	23.0	19.44	81.24	77.0	1.0	2.03
Densidad (Org/0.09 m <sup>2</sup> )	16	20.75	16.5	18.123	87.34	64.0	1.0	0.31
Diversidad Shannon	16	0.979	1.024	0.738	75.41	2.425	0	-0.43
Equidad Pielou	15	0.773	0.788	0.211	27.34	1.0	0.165	3.33
Dominancia Simpson	15	0.407	0.320	0.348	85.41	1.0	0	-0.49
Modularidad	15	0.256	0.326	0.193	75.30	0.524	0	-1.31
Número de módulos	15	2.133	2.0	0.915	42.91	4.0	1.0	-0.38

Anexo 4. Tabla con los valores de Modularidad para cada una de las estaciones en el muestreo semicuantitativo durante las diferentes campañas de muestreo

Año	Mes	Época	Río	Est	Modularidad	No Módulos	Año	Mes	Época	Río	Est	Modularidad	No Módulos
2017	Feb	Seca	Nitrera	E1	0.157	2	2018	Abr	Lluvia	San Juan	E1	0.456	4
2017	Feb	Seca	Nitrera	E2	0.111	3	2018	Abr	Lluvia	San Juan	E2	0.316	3
2017	Feb	Seca	Nitrera	E3	0.234	3	2018	Abr	Lluvia	San Juan	E3	NA	3
2017	Jul	Seca	Nitrera	E1	0.14	3	2018	Jul	Seca	San Juan	E1	0.226	3
2017	Jul	Seca	Nitrera	E2	0.288	3	2018	Jul	Seca	San Juan	E2	0.326	3
2017	Jul	Seca	Nitrera	E3	0.143	2	2018	Jul	Seca	San Juan	E3	0.389	2
2017	Ago	Transición	Nitrera	E1	0.123	2	2018	Ago	Transición	San Juan	E1	NA	-
2017	Ago	Transición	Nitrera	E2	0.516	5	2018	Ago	Transición	San Juan	E2	0.458	4
2017	Ago	Transición	Nitrera	E3	0.462	4	2018	Ago	Transición	San Juan	E3	0.404	2
2017	Sep	Lluvia	Nitrera	E1	0.305	4	2018	Sep	Lluvia	San Juan	E1	0.502	4
2017	Sep	Lluvia	Nitrera	E2	0.192	3	2018	Sep	Lluvia	San Juan	E2	0.471	4
2017	Sep	Lluvia	Nitrera	E3	0.247	3	2018	Sep	Lluvia	San Juan	E3	0.132	2
2018	Abr	Lluvia	Nitrera	E1	0.111	2	2017	Jul	Seca	Cauca	E1	0	1
2018	Abr	Lluvia	Nitrera	E2	0.241	3	2017	Jul	Seca	Cauca	E2	0.29	3
2018	Abr	Lluvia	Nitrera	E3	0.158	3	2017	Jul	Lluvia	Cauca	E3	NA	-
2018	Jul	Seca	Nitrera	E1	0.205	2	2017	Ago	Transición	Cauca	E1	0.42	2
2018	Jul	Seca	Nitrera	E2	0.211	4	2017	Ago	Transición	Cauca	E2	0.092	2
2018	Jul	Seca	Nitrera	E3	0.255	3	2017	Ago	Lluvia	Cauca	E3	NA	3
2018	Ago	Transición	Nitrera	E1	0.252	4	2017	Sep	Lluvia	Cauca	E1	0.441	3
2018	Ago	Transición	Nitrera	E2	0.331	3	2017	Sep	Lluvia	Cauca	E2	0.338	3
2018	Ago	Transición	Nitrera	E3	0.282	3	2017	Sep	Transición	Cauca	E3	NA	-
2018	Sep	Lluvia	Nitrera	E1	0.079	3	2018	Abr	Lluvia	Cauca	E1	0.365	4
2018	Sep	Lluvia	Nitrera	E2	0.161	3	2018	Abr	Lluvia	Cauca	E2	0	1
2018	Sep	Lluvia	Nitrera	E3	0.284	4	2018	Abr	Transición	Cauca	E3	0	1
2017	Jul	Seca	San Juan	E1	0.388	3	2018	Jul	Seca	Cauca	E1	0.524	4
2017	Jul	Seca	San Juan	E2	0.387	3	2018	Jul	Seca	Cauca	E2	0.351	2
2017	Jul	Seca	San Juan	E3	0.195	3	2018	Jul	Lluvia	Cauca	E3	0	1

Año	Mes	Época	Río	Est	Modularidad	No Módulos	Año	Mes	Época	Río	Est	Modularidad	No Módulos
2017	Ago	Transición	San Juan	E1	0.483	3	2018	Ago	Transición	Cauca	E1	0.109	1
2017	Ago	Transición	San Juan	E2	0.399	3	2018	Ago	Transición	Cauca	E2	0.423	2
2017	Ago	Transición	San Juan	E3	0.405	3	2018	Ago	Lluvia	Cauca	E3	NA	-
2017	Sep	Lluvia	San Juan	E1	0.298	4	2018	Sep	Lluvia	Cauca	E1	0.05	2
2017	Sep	Lluvia	San Juan	E2	0.455	3	2018	Sep	Lluvia	Cauca	E2	0.486	3
2017	Sep	Lluvia	San Juan	E3	0.145	2	2018	Sep	Transición	Cauca	E3	0.326	2

Anexo 5. Campañas de muestreo realizadas durante los años 2017 y 2018

Campaña	Fecha	Reoambiente	Epoca hidrológica
1	23 y 24 de febrero de 2017	Nitrera	Seca todas las estaciones
		Nitrera	Seca todas las estaciones
2	18,19, 20 y 21 de julio de 2017	San Juan	Seca todas las estaciones
		Cauca	Seca (CE1, CE2)
	26 y 27 de julio de 2017	Cauca	Lluvia (CE3)
		Nitrera	Transición todas las estaciones
3	17, 18, 19 y 20 de agosto de 2017	San Juan	Transición todas las estaciones
		Cauca	Transición (CE1, CE2)
	29 y 30 de agosto de 2017	Cauca	Lluvia (CE3)
4	14,15,16 y 17 de septiembre de 2017	Nitrera	Lluvia todas las estaciones
		San Juan	Lluvia todas las estaciones
		Cauca	Lluvia (CE1, CE2)
	22,23 de septiembre de 2017	Cauca	Transición (CE3)
		Nitrera	Lluvia todas las estaciones
5	19,20 y 21 de abril de 2018	San Juan	Lluvia todas las estaciones
		Cauca	Lluvia (CE1, CE2)
	17 y 18 de abril de 2018	Cauca	Transición (CE3)
6	16,17 y 18 de julio de 2018	Nitrera	Seca todas las estaciones

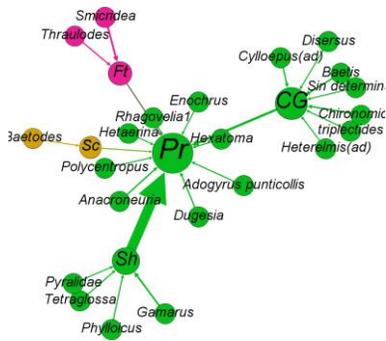
		San Juan	Seca todas las estaciones
		Cauca	Seca (CE1, CE2)
	12 y 13 de julio de 2018	Cauca	Lluvia (CE3)
		Nitrera	Transición todas las estaciones
7	3,4 y 5 de septiembre de 2018	San Juan	Transición todas las estaciones
		Cauca	Transición (CE1, CE2)
	29 y 30 de agosto de 2018	Cauca	Lluvia (CE3)
		Nitrera	Lluvia todas las estaciones
8	1,2 y 3 de octubre de 2018	San Juan	Lluvia todas las estaciones
		Cauca	Lluvia (CE1, CE2)
	26 y 27 de septiembre de 2018	Cauca	Transición (CE3)

Anexo 6. Preservación *Hetaerina caja* (24 de agosto de 2017)

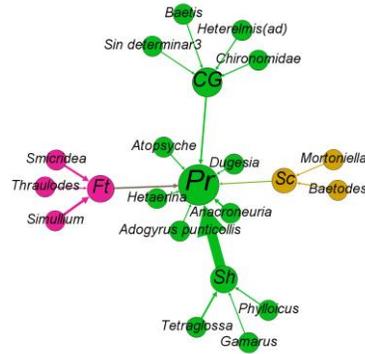
Imágenes	Descripción
	<p>Se tomaron ejemplares del género <i>Hetaerina</i>.</p>

			<p>Se inyectó en el tórax poca cantidad de acetona líquida con una jeringa de 3ml.</p>
			<p>Se depositó en una caja de petri completamente sumergida en acetona por 8 horas</p>

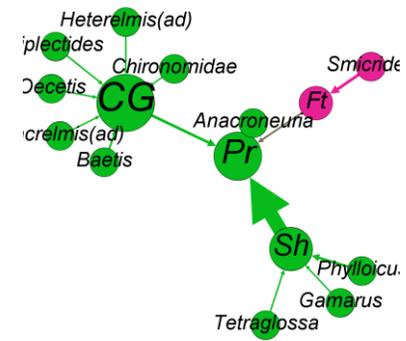




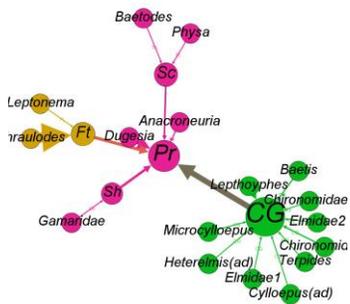
Nitrera E1 julio de 2017



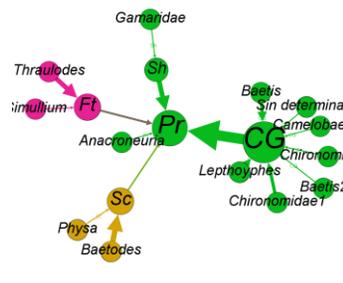
Nitrera E2 julio de 2017



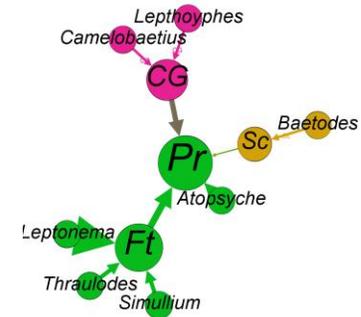
Nitrera E3 julio de 2017



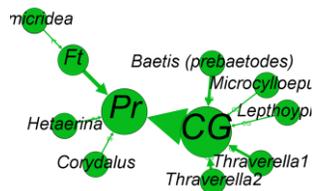
San Juan E1 julio de 2017



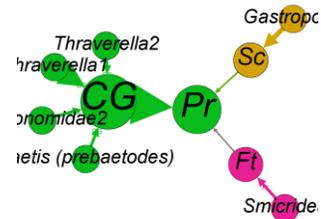
San Juan E2 julio de 2017



San Juan E3 julio de 2017

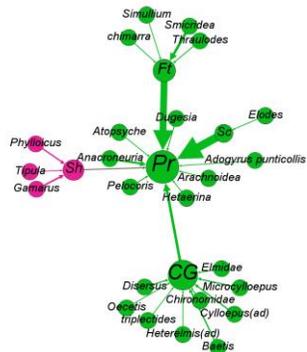


Cauca E1 julio de 2017

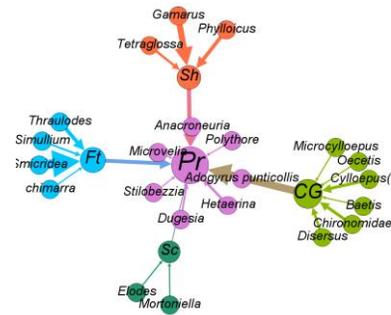


Cauca E2 julio de 2017

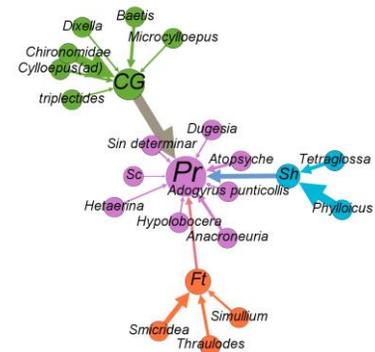
Cauca E3 julio de 2017



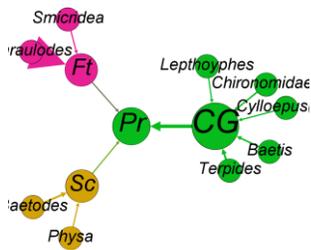
Nitrera E1 agosto de 2017



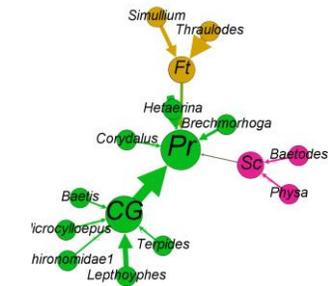
Nitrera E2 agosto de 2017



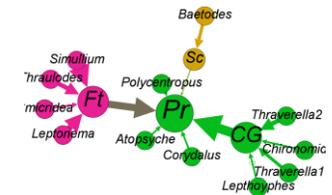
Nitrera E3 agosto de 2017



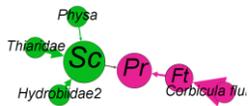
San Juan E1 agosto de 2017



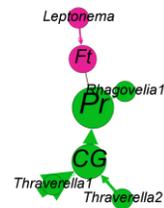
San Juan E2 agosto de 2017



San Juan E3 agosto de 2017

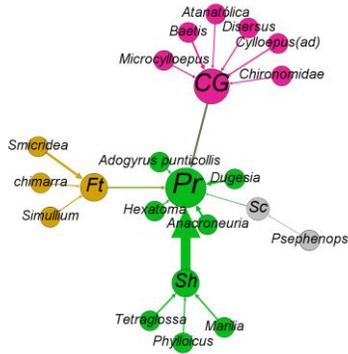


Cauca E1 agosto de 2017

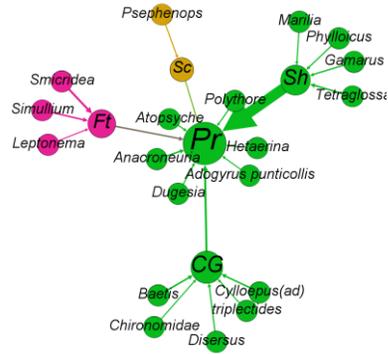


Cauca E2 agosto de 2017

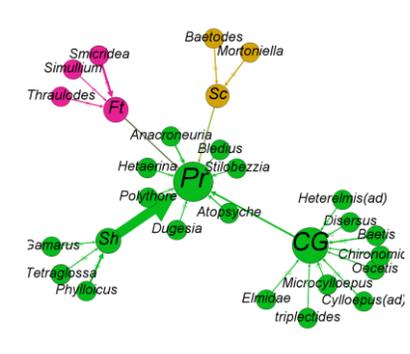
Cauca E3 agosto de 2017



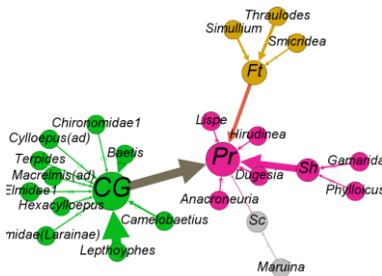
Nitrera E1 septiembre de 2017



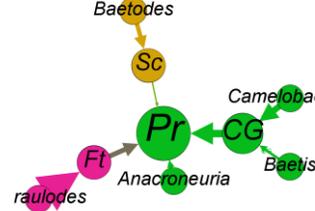
Nitrera E2 septiembre de 2017



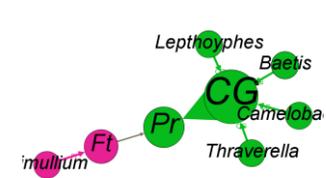
Nitrera E3 septiembre de 2017



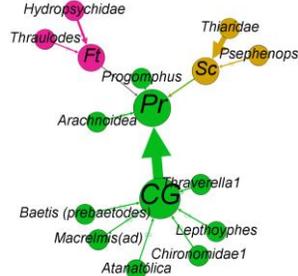
San Juan E1 septiembre de 2017



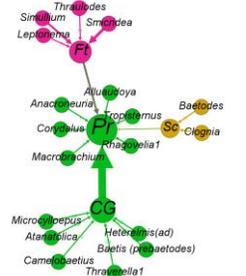
San Juan E2 septiembre de 2017



San Juan E3 septiembre de 2017



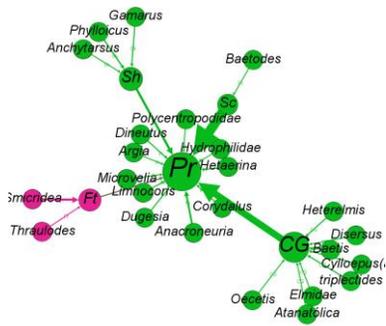
Cauca E1 septiembre de 2017



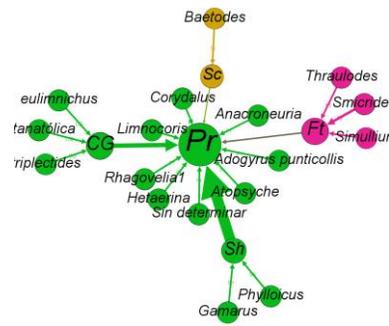
Cauca E2 septiembre de 2017



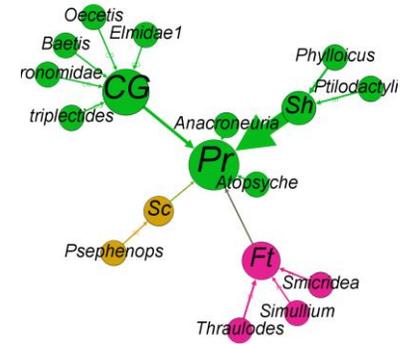
Cauca E3 septiembre de 2017



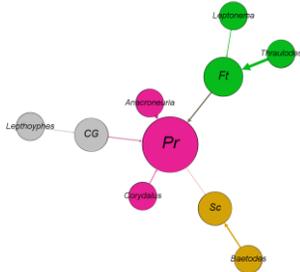
Nitrera E1 abril de 2018



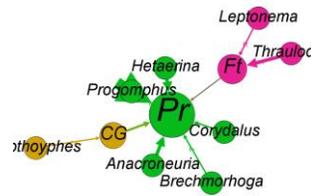
Nitrera E2 abril de 2018



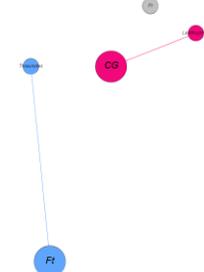
Nitrera E3 abril de 2018



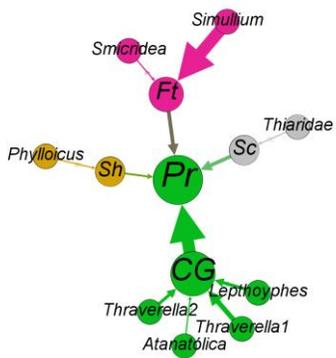
San Juan E1 abril de 2018



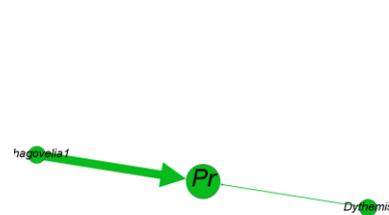
San Juan E2 abril de 2018



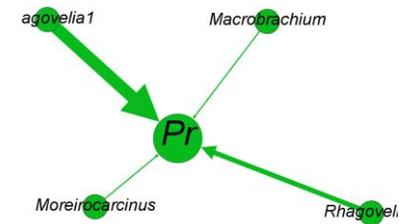
San Juan E3 abril de 2018



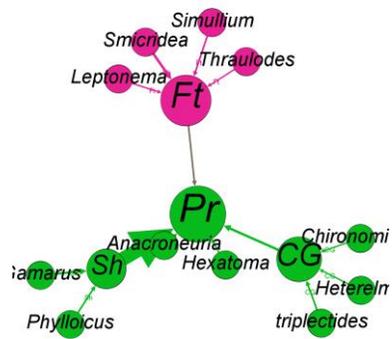
Cauca E1 abril de 2018



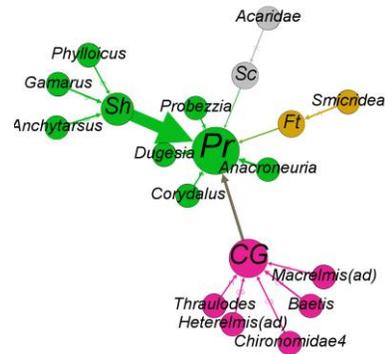
Cauca E2 abril de 2018



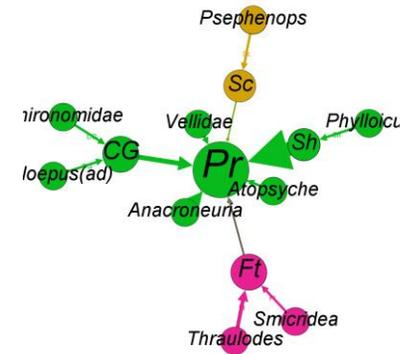
Cauca E3 abril de 2018



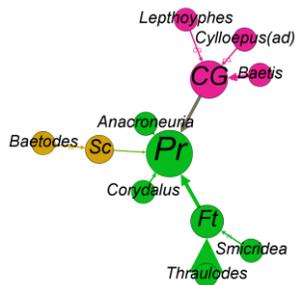
Nitrera E1 julio de 2018



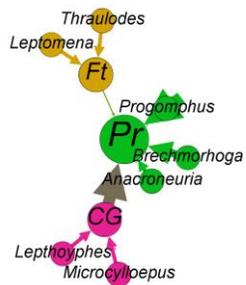
Nitrera E2 julio de 2018



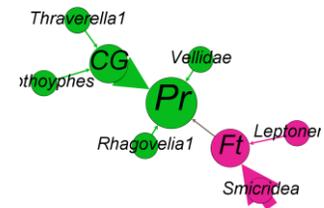
Nitrera E3 julio de 2018



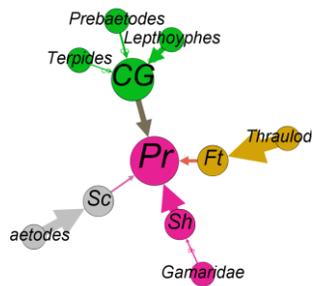
San Juan E1 julio de 2018



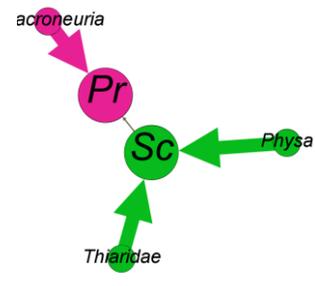
San Juan E2 julio de 2018



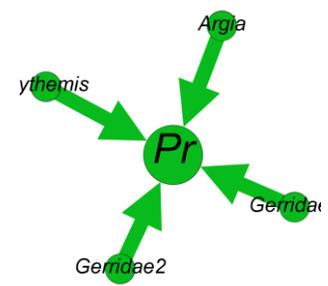
San Juan E3 julio de 2018



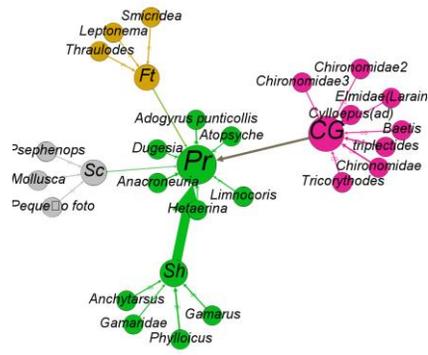
Cauca E1 julio de 2018



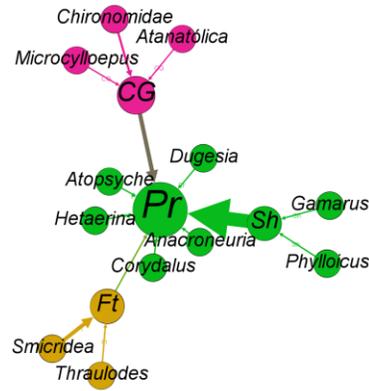
Cauca E2 julio de 2018



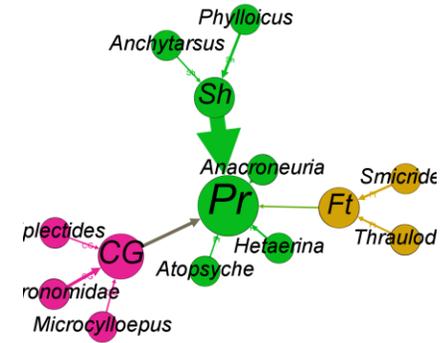
Cauca E3 julio de 2018



Nitrera E1 agosto de 2018

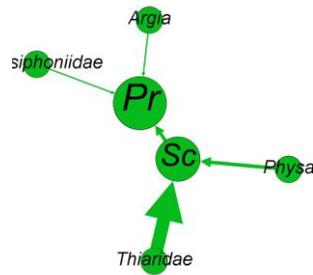


Nitrera E2 agosto de 2018



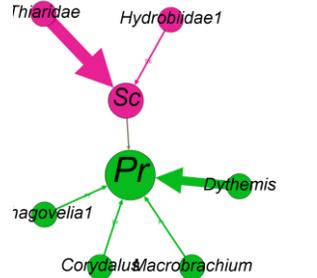
Nitrera E3 agosto de 2018

San Juan E1 agosto de 2018



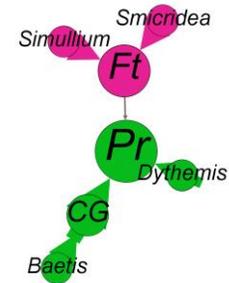
Cauca E1 agosto de 2018

San Juan E2 agosto de 2018



Cauca E2 agosto de 2018

San Juan E3 agosto de 2018



Cauca E3 agosto de 2018

Anexo 8. Listado de organismos encontrados en la quebrada La Nitrera en el muestreo semi-cuantitativo usando la red triangular

Orden	Familia	Género	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Ft	3			1	4			1				1			3			
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Terpides</i>	CG						1												
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Sc				1					1									
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis (prebaetodes)</i>	CG	1	3			1	2	1		1	3								
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Tricorythodes</i>	CG	1										1							
Odonata	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	Pr							1									1		
Coleptera	Elmidae	Sin determinar	CG				2														
Coleptera	Elmidae	<i>Xenelmis</i>	CG											1							
Coleptera	Elmidae	<i>Cylloepus (ad)</i>	CG			1		1			1	2						1			
Coleptera	Elmidae	<i>Disersus</i>	CG	2	2			1	5			3	2								
Coleptera	Elmidae	<i>Heterelmis (ad)</i>	CG	2											1						
Coleptera	Elmidae	<i>Macrelmis (ad)</i>	CG							1											
Coleptera	Elmidae	<i>Phanocerus</i>	CG							1											
Coleptera	Ptilodactylidae	<i>Tetraglossa</i>	Sh				1														
Coleptera	Ptilodactylidae	<i>Anchytarsus</i>	Sh											1							
Coleptera	Psephenidae	<i>Psephenops</i>	Sc																1		
Coleptera	Gyrinidae	<i>Dineutus</i>	Pr										2								
Trichoptera	Odontoceridae	<i>Marilia</i>	Sh							9	3				1						
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	Ft	7							1		1	1							
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	Ft	24	14	13	18	24	8	14	9	31	12	1	1	4	4	9	2	3	5
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Atopsyche</i>	Pr		4							1							1		
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	Sh			1	3		1	7	1		4	6	17				4	1	

Orden	Familia	Género	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Atanatolica</i>	CG	1												1					
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Triplectides</i>	CG							1			2	4					1		
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Oecetis</i>	CG					1				1							2		
Trichoptera	Glossosomatidae	<i>Mortoniella</i>	Sc		1							4								3	
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	Pr	1				1		1	1			1					4		
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	Pr												1	2					
Diptera	Chironomidae	Sin determinar1	CG		1	2	3		1	5			1	10	3		1		2		
Diptera	Chironomidae	Sin determinar2	CG											1							
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	Ft				19	1	1												
Tricladida	Planariidae	<i>Dugesia</i>	Pr	1	3	2		3		11	4	1	3	1	4	2	2				
Amphipoda	Gamaridae	Sin determinar	Sh											1							
Amphipoda	Gamaridae	<i>Gamarus</i>	Sh						2				2								

Anexo 9. Listado de organismos encontrados en la quebrada La Nitrera en el muestreo cuantitativo con la red tipo surber

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Hemiptera	Vellidae	<i>Rhagovelial</i>	Pr															3			
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Ft	11	4	5	7	4		14	3	1	2	6	14	1	1	10	4	11	12
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Sc				1				1		1	8		2			1	1	3
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis (prebaetodes)</i>	CG	3	4	12	8			1	3		1	2	3					1	2
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Tricorythodes</i>	CG											1				2			3
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Lepthoyphes</i>	CG	9			4	2	2	1		1			5		2				
Odonata	Polythoridae	<i>Polythore</i>	Pr		2										3				1		
Odonata	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	Pr					1	3		1				1						
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	Pr	1				1													
Coleoptera	Elmidae	Sin determinar <sup>3</sup>	CG																	1	
Coleoptera	Elmidae	<i>Xenelmis</i>	CG											1		3				1	
Coleoptera	Elmidae	<i>Cylloepus (ad)</i>	CG	3	3	2					3	1		3	1		3			1	1
Coleoptera	Elmidae	<i>Microcylloepus</i>	CG		1	1						1									
Coleoptera	Elmidae	<i>Disersus</i>	CG	1		1					1	1									
Coleoptera	Elmidae	<i>Heterelmis (ad)</i>	CG		1		5			1				1					1	1	
Coleoptera	Elmidae	<i>Macrelmis (ad)</i>	CG	1			1							1					2		
Coleoptera	Elmidae	<i>Phanocerus</i>	CG																1		
Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Tetraglossa</i>	Sh	2	2	1		14	4	2	1	4									
Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Anchytarsus</i>	Sh	1									1	1		1				1	
Coleoptera	Psephenidae	<i>Psephenops</i>	Sc					2		2	1				1					1	
Coleoptera	Gyrinidae	<i>Adogyrus puncticollis</i>	Pr	1	1		1														
Trichoptera	Odontoceridae	<i>Marilia</i>	Sh				1										1				1

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	Ft	5			1										1		1		
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	Ft	13	31	34	14	13	6	9	11	20	10	5	33	11	14	4	4	2	27
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Atopsyche</i>	Pr		1		3	2	2	1	1	4			1						3
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	Sh	1				9	1						1	2	2				1
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Atanatolica</i>	CG							1											2
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Triplectides</i>	CG					1					1				1			1	
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Oecetis</i>	CG							1											
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	Pr	10	5	8	6	8	16	11	1	10	3	7	2	1	3	4	2	2	3
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalis</i>	Pr						1					1							
Diptera	Chironomidae	Sin determinar1	CG	1			1									1					
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	Ft	1	4		2		1						2				1	10	
Gastropoda	Tipulidae	<i>Hexatoma</i>	Pr						2	1	2	1				2		1	1		2
Tricladida	Planariidae	<i>Dugesia</i>	Pr	2			3						1	1						1	2
Amphipoda	Gamaridae	Sin determinar	Sh				1														
Amphipoda	Gamaridae	<i>Gamarus</i>	Sh		1		1	1	2			2			1			6			

Anexo 10. Listado de organismos encontrados en el río San Juan en el muestreo semi-cuantitativo usando la red triangular

Orden	Familia	Género	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Hemiptera	Vellidae	<i>Rhagovelial</i>	Pr															2			
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Ft	35	7	1	40	5	6	6	13		44		25	1		2			2
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella1</i>	CG						3			1									
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Terpides</i>	CG				3								1						
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius</i>	CG			1				6	6	2			1						
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Sc		10		2	1	3		3		1		13						
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis (prebaetodes)</i>	CG	1	4			2		19	2	1	9							1	
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Leptohyphes</i>	CG	12	6	1	2	5	1	19		2			9	2		4	1		1
Odonata	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	Pr					8									25	38			
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	Pr												5			5			
Odonata	Libellulidae	<i>Brechmorhoga</i>	Pr					3							2	2	13				
Coleoptera	Elmidae	<i>Cylloepus (ad)</i>	CG	1			1						1								
Coleoptera	Elmidae	<i>Microcylloepus</i>	CG	1				1							1						
Coleoptera	Elmidae	<i>Heterelmis (ad)</i>	CG	1																	
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	Ft			11			6						1			3	1		
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	Ft							2			1				1	1	4	1	
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Atopsyche</i>	Pr			3												1			
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	Sh							1											
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Atanatolica</i>	CG																		2
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	Pr	3	1						1		2		4	1		1			1
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	Pr										1					2			2

Orden	Familia	Género	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Diptera	Chironomidae	Sin determinar1	CG	2	8		1	1	1	1						1	1				
Diptera	Chironomidae	Sin determinar2	CG	2	1																
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	Ft		1			3	1	3		2							1		
Gastropoda	Physidae	<i>Physa</i>		1											3	14					
Tricladida	Planariidae	<i>Dugesia</i>	Pr	12						4											
Amphipoda	Gamariidae	Sin determinar	Sh	1						2											

Anexo 11. Listado de organismos encontrados en el río San Juan en el muestreo cuantitativo con la red tipo surber

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Hemiptera	Vellidae	<i>Rhagovelial</i>	Pr			3															
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Ft		3		14	8	2	5	27	1	2		39	6	5	15	1	2	3
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella1</i>	CG						15											2	3
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella2</i>	CG					5													2
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Terpides</i>	CG				10							1		5					
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius</i>	CG		4	5		3		7				2		10				1	4
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Sc		16	1	5	8		25	2		34		25	33	7	1	1		3
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis (prebaetodes)</i>	CG			5			1		2		1		1		2	8	2	1	5

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018									
				E1			E2			E3			E1			E2			E3			
				Seca	Transición	Lluvia																
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Tricorythodes</i>	CG										2		1	1						
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Leptohyphes</i>	CG				2	3			2	3		1		11	5		20	1		3
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	Pr																1			
Odonata	Libellulidae	<i>Brechmorhoga</i>	Pr						1										1			
Coleptera	Elmidae	<i>Microcylloepus</i>	CG		1				1													
Coleptera	Elmidae	<i>Heterelmis (ad)</i>	CG													1						1
Coleptera	Elmidae	<i>Phanocerus</i>	CG												1							
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	Ft						1						2		1					
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	Ft						1						2	1		2			3	2
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Atopsyche</i>	Pr			1												1				
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Atanatolica</i>	CG				1															
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	Pr				2	2														
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalis</i>	Pr						1													
Diptera	Chironomidae	Sin determinar1	CG		1		1	23	1				1					5	11	11	10	13
Diptera	Chironomidae	Sin determinar2	CG		6														1			
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	Ft		1	20	8	5				6	2		1	24				2	2	2
Tricladida	Planariidae	<i>Dugesia</i>	Pr						2						1							

Anexo 12. Listado de organismos encontrados en el río Cauca en el muestreo semi-cuantitativo usando la red triangular

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Hemiptera	Vellidae	<i>Rhagovelial</i>	Pr						1									5		8	
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Ft			3			2					17				2		3	
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella1</i>	CG	4		2	8	49	2						6			5		0	
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella2</i>	CG	3			1	9							3						
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius</i>	CG						1												
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Sc						2					13							
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis (prebaetodes)</i>	CG	3		2	1		1					2							
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Lepthoypes</i>	CG	2		2								5		4					
Odonata	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	Pr	1																1	
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	Pr			1															
Odonata	Libellulidae	<i>Dythemis</i>	Pr														2	7			
Coleoptera	Elmidae	<i>Microcylloepus</i>	CG	1																	
Coleoptera	Elmidae	<i>Heterelmis (ad)</i>	CG						1												
Coleoptera	Elmidae	<i>Macrelmis (ad)</i>	CG			1															
Coleoptera	Psephenidae	<i>Psephenops</i>	Sc			1															
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	Ft					6	1									2			
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	Ft	1			1								1			2			
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	Sh												1						
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Atanatolica</i>	CG			1			2						1						
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	Pr						1												
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	Pr	1					1								1				
Diptera	Chironomidae	Sin determinar1	CG			1															

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Diptera	Chironomidae	Sin determinar2	CG				1														
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	Ft					2						13							
Gastropoda	Physidae	<i>Physa</i>			1								7		1						
Rhynchobdellida	Glossiphoniidae	Sin determinar											2	1							
Gastropoda	Thiaridae	Sin determinar			6	9							30	41	1	7	20				
Amphipoda	Gamaridae	Sin determinar	Sh										1								
Collembola	Corbiculidae	<i>Corbicula fluminea</i>			13																

Anexo 13. Listado de organismos encontrados en el río Cauca en el muestreo cuantitativo con la red tipo surber

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Hemiptera	Vellidae	<i>Rhagovelia1</i>	Pr						1								5		8		
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Ft			3			2				17				2		3		
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella1</i>	CG	4		2	8	49	2						6		5				
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Traverella2</i>	CG	3			1	9						3							
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius</i>	CG						1												
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Sc						2				13								
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis (prebaetodes)</i>	CG	3		2	1		1				2								
Ephemeroptera	Tricorythidae	<i>Lepthoypes</i>	CG	2		2							5		4						

Orden	Familia	Taxón	GFA	2017									2018								
				E1			E2			E3			E1			E2			E3		
				Seca	Transición	Lluvia															
Odonata	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	Pr	1															1		
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	Pr			1															
Odonata	Libellulidae	<i>Dythemis</i>	Pr												2	7					
Coleptera	Elmidae	<i>Microcylloepus</i>	CG	1																	
Coleptera	Elmidae	<i>Heterelmis (ad)</i>	CG					1													
Coleptera	Elmidae	<i>Macrelmis (ad)</i>	CG			1															
Coleptera	Psephenidae	<i>Psephenops</i>	Sc			1															
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	Ft				6	1									2				
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	Ft	1			1							1			2				
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	Sh											1							
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Atanotolica</i>	CG			1		2						1							
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	Pr					1													
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	Pr	1				1								1					
Diptera	Chironomidae	Sin determinar1	CG			1															
Diptera	Chironomidae	Sin determinar2	CG				1														
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	Ft					2						13							
Gastropoda	Physidae	<i>Physa</i>			1									7		1					
Rhynchobdellida	Glossiphoniidae	Sin determinar												2	1						
Gastropoda	Thiaridae	Sin determinar			6	9								30	41	1	7	20			
Amphipoda	Gammaridae	Sin determinar	Sh										1								
Collembola	Corbiculidae	<i>Corbicula fluminea</i>			13																

Anexo 14. Registro fotográfico principales morfotipos encontrados en esta investigación





*Ephemeroptera*



*Hetaerina*



*Leptonema*



*Dythemis*



*Progomphus*



*Phylloicus*



*Simulium*



*Tetráglossa*



*Thraulodes*



*Traverella*



*Thiaridae*



*Nectopsyche*



*Rhagoelia*



Gamarridae