



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua en la altillanura plana colombiana**

**César Augusto Botero Vargas**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Palmira, Colombia

2020



# **Efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua en la altillanura plana colombiana**

**César Augusto Botero Vargas**

Tesis de grado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ciencias Agrarias**

Director:

**Ph.D. Oscar Chaparro Anaya**

Universidad Nacional de Colombia

Sede Palmira

Codirectores:

**Ph.D. Mirjam Margreet Pulleman**

**Centro Internacional de Agricultura Tropical**

**Ph.D. Patrick Marie Lavelle**

**Línea de Investigación en Suelos**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Palmira, Colombia

2020



# Declaración de obra original

Yo César Augusto Botero Vargas declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

César Augusto Botero Vargas

Fecha 18 de Agosto de 2020

*Dedicatoria*

*A mis hijos Juan Camilo y Maria Alejandra por todo su amor y comprensión en las largas jornadas de trabajo fuera de casa.*

*A mi nueva hija Paulina quien, a sus pocos meses de vida, se ha convertido en motivación de mi superación.*

*A mi esposa Paula Andrea por ser la compañera de vida y constante apoyo que Dios me regaló.*

## **Agradecimientos**

Al Dr. Patrick Lavelle por la oportunidad de trabajar en CIAT y darme a conocer el fascinante mundo de la investigación, por ser el motor, la motivación y el apoyo para realizar mi trabajo de grado.

A mis grandes amigos Norbey Marín, Julio César González, Israel Agudelo, Gonzalo Borrero, Juan Carlos Suárez y María del Pilar Hurtado por el apoyo brindado para enriquecer esta investigación.

A la Universidad Nacional de Colombia y al Centro Internacional de Agricultura Tropical, por ser parte fundamental en mi formación profesional.

A mis compañeros Catalina Sanabria, Carolina Quintero, Edgar Rodríguez, Sandra Loaiza y Arvey Álvarez por su ayuda en las arduas jornadas de campo que permitieron recolectar la información base para esta investigación.

Al Dr. Oscar Chaparro y a la Dra. Mirjam Pulleman por su orientación y consejos claves para culminar ésta etapa tan importante en mi vida.

A mi familia que, a pesar de no estar a mi lado, siempre recibí sus voces de aliento para no decaer.

A los fondos de educación de CIAT y CRECIAT, por incentivar y apoyar a sus trabajadores y asociados en su crecimiento profesional.



## Resumen

### **Efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua en la altillanura plana colombiana**

La altillanura plana colombiana, posee una extensa reserva biodiversa de bienes agrícolas y pecuarios con gran potencial productivo ubicada entre los 100 y 300 m.s.n.m. Cuenta con características ecológicas únicas, compuesta por una densa red de riachuelos bordeados de bosques y zonas de sabana. Sin embargo, el aumento de la frontera agrícola, así como el uso excesivo de fertilizantes, ha hecho más susceptible la contaminación hacia los afluentes. Este impacto se analizó en seis fincas localizadas en dos municipios con diferentes grados de intensificación agrícola. Se analizaron 30 puntos de muestreo en suelo por finca, distribuidos en cinco transectos con diferentes sistemas de uso, que terminaban en el afluente donde se analizó la calidad del agua. Se midieron variables químicas, físicas, morfológicas (macro agregación), diversidad y abundancia de macroinvertebrados en el suelo que se transformaron en cinco indicadores sintéticos, con el fin de analizar el efecto del uso de suelo sobre la calidad del agua superficial más cercana. Para tal fin, se utilizó el análisis estadístico de componentes principales (ACP) y posteriormente un análisis de Colnercia (COIA) para analizar los vínculos existentes entre las variables. Las condiciones de la calidad del agua de los afluentes estudiados en la altillanura metense de los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán se encuentran afectadas por los procesos de alteración de las características, físicas, químicas y biológicas del suelo y están relacionados con su uso en actividades agrarias y pecuarias, con el depósito de elementos contaminantes en los cuerpos de agua. Las diferencias encontradas en los niveles de contaminación del agua entre las localidades están dadas principalmente por las variables biológicas. El test de Montecarlo del COIA entre el indicador de morfología en el borde del bosque y la calidad del agua fue significativo ( $p < 0.001$ ) explicando el 33% la variabilidad de los datos.

**Palabras clave:** Altillanura colombiana, biodiversidad, calidad de suelos, calidad de agua, análisis de componentes principales, análisis de Colnercia.

# Abstract

## Effect of land use on water quality in the Colombian flat highlands

The Altillanura Plana of Colombia, is a vast biodiverse reserve of agricultural, energy, and livestock resources with high productivity potential situated between 100 and 300 m a.s.l. The region contains unique ecological characteristics, composed of a dense network of tributaries with riparian forests and savanna land cover. However, recent expansion of the agricultural zones, as well as increased use of fertilizers has made the waterways susceptible to contamination. These trends and impacts were analyzed in six farms located in two municipalities at varying levels of agricultural intensification. At each farm research site, 30 points were sampled for soil analysis, distributed across 5 transects (each with a different land use) and concluding in the tributary downslope, where water quality was measured. chemical, physical, and morphological (macro-aggregation) characteristics were analyzed, as well as diversity and abundance of macroinvertebrates in the soil, providing five categories of indicators of land use impacts. These were compared to the water quality of the tributary location receiving upslope contributions from these sampled locations. In order to compare soil indicators and water quality, Principal Components Analysis (PCA) and further Co-Inertia Analysis (CIA) were used to describe the existing relationship between the variables. The measured water quality parameters of the studied altillanura research sites in Puerto López and Puerto Gaitán were found to demonstrate impacts related to the alteration of physical, chemical, and biological soil characteristics. These alterations are linked to agricultural and livestock activity, which enable contaminants to transport through and over the soil to the studied tributaries. The levels of contaminants found in studied water sites differed in each locality primarily according to the biological variables. A Monte Carlo analysis for the CIA between the morphology of forested soils and water quality indicated a significant relationship ( $p < 0.001$ ), explaining 33% of the variability in the data.

**Keywords:** Colombian Altillanura, biodiversity, soil quality, water quality, principal components analysis, co-inertia analysis.

# Contenido

|  | Pág.        |
|--|-------------|
| <b>Resumen</b> .....   | <b>IX</b>   |
| <b>Lista de figuras</b> .....  | <b>XIII</b> |
| <b>Lista de tablas</b> .....   | <b>XV</b>   |
| <b>Lista de símbolos y abreviaturas</b> .....  | <b>XVI</b>  |
| <b>Introducción</b> .....  | <b>1</b>    |
| <b>Capítulo 1. Revisión. Calidad del suelo y del agua</b> .....                          | <b>4</b>    |
| 1.1. Calidad del suelo.....  | 4           |
| 1.2. Calidad del agua .....  | 5           |
| <b>Capítulo 2: Generalidades</b> .....   | <b>7</b>    |
| 2.1. Zona de estudio.....  | 7           |
| 2.1.1. Descripción de los afluentes y coordenadas de los puntos.....                     | 8           |
| 2.2. Descripción del muestreo .....  | 12          |
| 2.2.1. Parámetros a evaluar .....  | 13          |
| 2.3. Análisis estadístico de datos .....   | 20          |
| <b>Capítulo 3. Resultados y discusión</b> .....  | <b>22</b>   |
| 3.1. Variables químicas .....  | 22          |
| 3.1.1. Análisis de componentes principales para las variables químicas .....             | 25          |
| 3.1.2. Indicador de fertilidad química de suelo.....                                     | 27          |
| 3.2. Variables físicas .....   | 29          |
| 3.2.1. Indicador de funciones hídricas .....   | 32          |
| 3.3. Variables biológicas (macrofauna).....  | 37          |
| 3.3.1. Indicador biológico.....  | 38          |
| 3.4. Variables morfológicas (Macroagregación).....                                       | 40          |
| 3.4.1. Indicador morfológico .....   | 41          |
| 3.5. Variables de calidad de agua .....  | 43          |
| 3.5.1. Indicador de calidad de agua.....   | 44          |
| 3.6. Relación entre los indicadores generados y las variables de calidad de agua .....   | 46          |
| 3.7. Discusión.....  | 47          |
| 3.7.1. Indicador de fertilidad de suelos .....   | 47          |
| 3.7.2. Indicador de funciones hídricas .....   | 49          |
| 3.7.3. Indicador biológico.....  | 51          |
| 3.7.4. Indicador morfológico .....   | 52          |
| 3.7.5. Calidad del agua .....  | 53          |
| 3.7.6. Relación de los indicadores con respecto a las variables de calidad del agua..... | 56          |
| <b>Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones</b> .....                                  | <b>58</b>   |
| 4.1. Conclusiones.....   | 58          |
| 4.2. Recomendaciones.....  | 59          |
| <b>A. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca PLAN</b> .....         | <b>61</b>   |
| <b>B. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca PLSC</b> .....         | <b>62</b>   |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>C.</b> | <b>Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca PLLC .....</b>                             | <b>63</b> |
| <b>D.</b> | <b>Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca CARIM.....</b>                             | <b>64</b> |
| <b>E.</b> | <b>Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca CAMER .....</b>                            | <b>65</b> |
| <b>F.</b> | <b>Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca CAPAJ .....</b>                            | <b>66</b> |
| <b>G.</b> | <b>Anexo: Datos de almacenamiento de carbono en los diferentes usos<br/>evaluados .....</b>               | <b>67</b> |
| <b>H.</b> | <b>Anexo: ANOVA para el indicador de fertilidad entre las dos localidades<br/>evaluadas .....</b>         | <b>68</b> |
| <b>I.</b> | <b>Anexo: ANOVA para el indicador biológico entre los puntos de muestreo.....</b>                         | <b>69</b> |
| <b>J.</b> | <b>Anexo: ANOVA para el indicador biológico entre las fincas seleccionadas ...</b>                        | <b>70</b> |
| <b>K.</b> | <b>Anexo: ANOVA para el indicador de calidad de agua entre los diferentes<br/>predios evaluados .....</b> | <b>71</b> |
| <b>L.</b> | <b>Anexo: ANOVA para el indicador de calidad de agua entre las dos localidades<br/>evaluadas. ....</b>    | <b>72</b> |
|           | <b>Bibliografía .....</b>   | <b>74</b> |

## Lista de figuras

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 2-1:</b> Ubicación de las fincas seleccionadas para el desarrollo de la investigación.   | 7    |
| <b>Figura 2-2:</b> Características y ubicación del caño Piedra Candela, predio PLAN. Municipio de Puerto López.  | 9    |
| <b>Figura 2-3:</b> Características y ubicación del caño La Cocora, predio PLLC. Municipio de Puerto López.   | 9    |
| <b>Figura 2-4:</b> Características y ubicación del caño La Primavera, predio PLSC, municipio de Puerto López.  | 10   |
| <b>Figura 2-5:</b> Características y ubicación del caño Carabo, predio CARIM. Municipio de Puerto Gaitán.  | 11   |
| <b>Figura 2-6:</b> Características y ubicación del caño donde se evaluaron los puntos de calidad de agua del predio CAMER, Municipio de Puerto Gaitán.                   | 11   |
| <b>Figura 2-7:</b> Características y ubicación del caño donde se evaluaron los puntos de calidad de agua del predio CAPAJ. Municipio de Puerto Gaitán.                   | 12   |
| <b>Figura 2-8:</b> Ejemplo de la disposición de los puntos muestreados dentro de un transecto.   | 13   |
| <b>Figura 2-9:</b> Toma de muestras disturbadas y sin disturbar.   | 15   |
| <b>Figura 2-10:</b> Toma de muestras de macrofauna.  | 16   |
| <b>Figura 2-11:</b> Separación y almacenamiento de muestras de macrofauna.   | 16   |
| <b>Figura 2-12:</b> Determinación de la resistencia tangencial al corte con la ayuda del torcómetro.   | 17   |
| <b>Figura 2-13:</b> Toma de muestras para determinación de la morfología.  | 17   |
| <b>Figura 2-14:</b> Toma de muestra utilizando botellas Winkler para fijación de OD.   | 19   |
| <b>Figura 3-15:</b> Posición de las variables químicas evaluadas y ubicación de los sistemas en el plano factorial 1 y 2 del ACP.  | 25   |
| <b>Figura 3-16:</b> Distribución de los puntos de evaluados en el espacio F1 y F2 del ACP, de acuerdo con el análisis de las variables químicas registradas en cada una. | 26   |
| <b>Figura 3-17:</b> Distribución de las fincas en el ACP, de acuerdo con el análisis de las variables químicas evaluadas.  | 26   |
| <b>Figura 3-18:</b> Distribución de las localidades en los ejes 1 y 2 del ACP, según el análisis de las variables químicas registradas para cada una de ellas.           | 27   |
| <b>Figura 3-19:</b> Indicador de fertilidad química generado en los puntos dentro de los transectos evaluados.   | 28   |
| <b>Figura 3-20:</b> Indicador de fertilidad química generado en los diferentes usos de suelo evaluados.  | 28   |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 3-21:</b> Indicador de fertilidad química generado a nivel de paisaje, en las dos localidades donde se encontraban establecidos los sistemas evaluados.....  | 29 |
| <b>Figura 3-22:</b> Posición de las propiedades físicas evaluadas y distribución de los usos de suelo en el espacio del ACP. ....  | 33 |
| <b>Figura 3-23:</b> Distribución de los puntos muestreados dentro del transecto en los ejes 1 y 2 del ACP.....   | 34 |
| <b>Figura 3-24 y 3-24a:</b> Ubicación de las fincas y localidades en el plano factorial del ACP con respecto al indicador de funciones hídricas.....   | 34 |
| <b>Figura 3-25:</b> Valores del indicador de funciones hídricas en los diferentes puntos evaluados. ....   | 35 |
| <b>Figura 3-26:</b> Indicador de función hídrica generado en los sistemas de uso evaluados.  | 36 |
| <b>Figura 3-27:</b> Indicador de función hídrica generado en las dos localidades estudiadas..  | 36 |
| <b>Figura 3-28:</b> Dispersión de los diferentes usos de suelo evaluados en el plano factorial del ACP, con relación a los diferentes grupos de macrofauna encontrados. ....   | 38 |
| <b>Figura 3-29:</b> Dispersión de los puntos de muestreo dentro de los transectos en los ejes 1 y 2 del ACP.....   | 39 |
| <b>Figura 3-30:</b> Indicador biológico generado en los sistemas de uso evaluados. ....  | 40 |
| <b>Figura 3-31:</b> Circulo de correlación de las variables asociadas con la morfología del suelo: Agregados biogénicos (AB), agregados de raíz (AR), agregados físicos (AF) y suelos sin agregar (SSA) y su comportamiento en los diferentes usos evaluados. .... | 42 |
| <b>Figura 3-32:</b> Valores promedios del indicador morfológico en los diferentes sistemas evaluados. ....   | 42 |
| <b>Figura 3-33:</b> Proyección de las fincas seleccionadas en el plano factorial F1 y F2 del ACP. ....   | 45 |
| <b>Figura 3-34:</b> Valores promedios del indicador de calidad de agua en las diferentes fincas evaluadas. ....  | 45 |
| <b>Figura 3-35:</b> Valores promedios del indicador de calidad de agua en las dos localidades evaluadas. ....  | 46 |
| <b>Figura 3-36:</b> Gráfica de Colnercia entre los parámetros de calidad de agua y los indicadores generados.....  | 47 |

## Lista de tablas

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Tabla 1-1:</b> Indicadores de calidad de suelo más usados.....   | 5    |
| <b>Tabla 2-2:</b> Variables químicas analizadas y metodología utilizada para su análisis. ....  | 14   |
| <b>Tabla 2-3:</b> Variables físicas analizadas y metodologías utilizada para su determinación.<br>.....   | 15   |
| <b>Tabla 2-4:</b> Técnicas para la determinación de parámetros de calidad agua.....   | 20   |
| <b>Tabla 3-5:</b> Descripción estadística de las variables químicas evaluadas en cultivos<br>transitorios, sabana nativa y pastura degradada. ....  | 22   |
| <b>Tabla 3-6:</b> Descripción estadística de las variables físicas evaluadas en los sistemas de<br>borde de bosque, bosque primario y bosque secundario.....  | 30   |
| <b>Tabla 3-7:</b> Prueba de Tukey entre localidades .....   | 36   |
| <b>Tabla 3-8:</b> Descripción estadística de las comunidades de macroinvertebrados en el<br>suelo (0-20 cm) en cultivos transitorios, borde de bosque y bosque primario. ....                               | 37   |
| <b>Tabla 3-9:</b> Descripción estadística de la macroagregación del suelo discriminada en<br>agregados biofísicos (AB), agregados de raíces (AR), agregados físicos (AF) y suelo sin<br>agregar (SSA). .... | 41   |
| <b>Tabla 3-10:</b> Descripción estadística de las variables fisicoquímicas y microbiológicas<br>relacionadas con la calidad del agua en fincas seleccionadas. ....  | 43   |
| <b>Tabla 3-11:</b> Relaciones de Colnercia entre cada indicador y las variables de calidad de<br>agua. ....   | 47   |

## Lista de símbolos y abreviaturas

| <b>Símbolo</b>  | <b>Término</b>                              | <b>Unidad SI</b>    |
|-----------------|---|---------------------|
| <i>N</i>        | Nitrógeno                                   | g/kg <sup>-1</sup>  |
| <i>C</i>        | Carbono                                     | g/kg <sup>-1</sup>  |
| <i>P</i>        | Fósforo                                     | mg/kg               |
| <i>K</i>        | Potasio                                     | cmol/kg             |
| <i>S</i>        | Azufre                                      | mg/kg               |
| <i>Ca</i>       | Calcio                                      | cmol/kg             |
| <i>Mg</i>       | Magnesio                                    | cmol/kg             |
| <i>Al</i>       | Aluminio                                    | cmol/kg             |
| <i>Na</i>       | Sodio                                       | cmol/kg             |
| <i>CICe</i>     | Capacidad de intercambio catiónico efectiva | cmol/kg             |
| <i>B</i>        | Boro  | mg/kg               |
| <i>Fe</i>       | Hierro                                      | mg/kg               |
| <i>Mn</i>       | Manganeso                                   | mg/kg               |
| <i>Cu</i>       | Cobre                                       | mg/kg               |
| <i>Zn</i>       | Zinc  | mg/kg               |
| <i>MO</i>       | Materia orgánica                            | %                   |
| <i>Sat Al</i>   | Saturación de aluminio                      | %                   |
| <i>DBO</i>      | Demanda biológica de oxígeno                | mg/l                |
| <i>DQO</i>      | Demanda química de oxígeno                  | mg/l                |
| <i>DO</i>       | Oxígeno disuelto                            | mg/l                |
| <i>Da</i>       | Densidad aparente                           | g/cm <sup>-3</sup>  |
| <i>Dr</i>       | Densidad real                               | g/cm <sup>-3</sup>  |
| <i>Hg</i>       | Humedad gravimétrica                        | %                   |
| <i>CC</i>       | Capacidad de campo                          | %                   |
| <i>PMP</i>      | Punto de marchitez permanente               | %                   |
| <i>A. Disp.</i> | Agua disponible                             | %                   |
| <i>PT</i>       | Porosidad total                             | %                   |
| <i>RP</i>       | Resistencia a la penetración                | kgf/cm <sup>2</sup> |
| <i>Tor</i>      | Torcometría                                 | KPa                 |
| <i>Sand</i>     | Arenas                                      | %                   |
| <i>Clay</i>     | Arcillas                                    | %                   |
| <i>Silt</i>     | Limos                                       | %                   |

## Introducción

El suelo es un recurso vital para la vida en el planeta, se considera como base esencial para la producción agrícola, pecuaria y forestal. La generación de alimentos está dada en gran medida por el manejo que se les dé a los mismos (Martin y Adad, 2006).

En muchas ocasiones la degradación de los suelos y la contaminación de las fuentes hídricas solo se puede observar a largo tiempo, debido al ingreso continuo de insumos (fertilizantes, correctivos, etc), presenta una dinámica que sobrepasa los ciclos de cultivo y sus efectos ambientales en el corto plazo siendo difíciles de estimar ya que no se incorporan en los análisis de costos y rendimientos. La degradación de este recurso, sumado al deterioro de la calidad del agua, así como la contaminación ambiental, son percibidos como los mayores problemas en los trópicos (Lal R, 1991).

La Orinoquia colombiana posee grandes extensiones de tierras con una gran capacidad productiva, pero una vez establecidos sistemas productivos, son muy susceptibles a la pérdida de sus características química, física y biológica (Rivas et al, 2004). Al respecto, la organización ECOFONDO (sf) reconoce las características ecológicas únicas de la región la cual ha sido afectada de manera negativa, especialmente por la intervención humana, empezando a originar problemas serios principalmente en sectores de nacimientos de cuerpos de agua.

La adecuación y preparación de los suelos para la producción agropecuaria es un aspecto importante en el desarrollo agrícola de la zona, debido a sus contenidos bajos de nutrientes, alta acidez y compactación natural (Amézquita, 1997).

El acelerado establecimiento de cultivos transitorios y pasturas sin adecuado manejo, ayudó paulatinamente a la pérdida de productividad y degradación de los suelos de la región. En la zona, más del 85% del suelo utilizable se encuentra establecido en

ganadería extensiva (Rivera M., et al. 2013), esta situación tiene repercute considerablemente en la cantidad y la calidad del agua. Factores directos e indirectos son también un problema importante en el agua disponible, un ejemplo claro de ello es la actividad ganadera y sus aportes de patógenos a las fuentes de agua, los cambios en el uso de la tierra y la degradación de los suelos influyen de forma considerable en la disponibilidad estacional de “aguas verdes” (FAO, 2015). Al respecto, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019), menciona que:

“Las condiciones de la calidad del agua están dadas por sus características físicas, químicas y biológicas, las cuales se ven afectadas por los procesos de alteración relacionados con actividades antrópicas o naturales en las que se ven involucrados agentes contaminantes como nitratos, fosfatos, sulfatos, entre otros, que son aportados al recurso hídrico”.

El departamento del Meta posee un gran potencial hídrico, articulado por una red conformada por una serie de ríos y afluentes que irrigan todo el departamento; se encuentran, acuíferos subterráneos y humedales. El 21% del agua potable de las cabeceras municipales es tomada de fuentes superficiales (Plan de Desarrollo Departamental 2012, citado por Chaparro Naranjo et al, 2017), sin embargo, el deterioro de la calidad del agua en la zona es un problema progresivo. Esta problemática se asocia con el desarrollo de la región, asentamientos, industria y agricultura, que junto a la carencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales y a una demanda creciente de recursos para satisfacer los intereses y las necesidades de la población, vuelve crítica la sustentabilidad del recurso hídrico.

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto “Altillanura plana del departamento del Meta: Escenario para el manejo eco-eficiente del territorio”, financiado por el Ministerio de Agricultura de Desarrollo Rural (MADR) y ejecutado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), el cual tuvo como objetivo determinar el efecto del uso de los diferentes usos de suelo sobre la calidad del agua en dos microcuencas de la altillanura plana en el departamento del Meta, para esto se generaron indicadores independientes de las propiedades físicas, químicas, biofísicas y biológicas evaluadas en ocho distintos usos de suelo, para después tratar de precisar cuál o cuáles de los indicadores generados influyen directamente en el indicador de calidad de agua



# Capítulo 1. Revisión. Calidad del suelo y del agua

## 1.1. Calidad del suelo

La calidad del suelo se estima como la capacidad para funcionar adecuadamente en relación con un uso específico (Gregorich et al., 1994). Sin embargo, otros autores le han dado un concepto más ecológico al definirlo como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, y a la vez preservar un ambiente sano (Arshad et al., 1992).

El término de calidad de suelo se puede abordar también desde un concepto de conservación, como la capacidad que tiene este recurso de proteger las cuencas hidrográficas mediante la regulación de la infiltración y las precipitaciones, y prevenir la contaminación del agua y el aire amortiguando contaminantes potenciales como químicos agrícolas, desechos orgánicos y químicos industriales (National Research Council, 1993. Citado por Bünemann et al, 2018).

Para que este término sea eficaz, se necesita conocer variables que permitan examinar el estado del suelo. Aparecen entonces los indicadores, ya que son variables que simbolizan una condición y considera información sobre los procesos o tendencias (Dumanski et al., 1998).

Estos indicadores se perciben como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las características y procesos que permitan dar seguimiento a las consecuencias del manejo sobre la actividad del suelo en un espacio de tiempo (Astier et al., 2002). Son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar

fenómenos complejos, y son usados en muchas esferas del conocimiento como economía, salud, recursos naturales, entre otros (Adriaanse, 1993).

Al tener en cuenta que existen diferentes interacciones en el suelo, un solo indicador no puede proporcionar una completa información, para ello es necesario apoyarse en distintos indicadores tanto físicos como químicos y biológicos que nos ayuden a diagnosticar la calidad del suelo.

En la Tabla 1-1 se presentan los indicadores de suelo más utilizados para diagnosticar la calidad del suelo.

**Tabla 1-1:** Indicadores de calidad de suelo más usados.

| Indicador   | Relación con las funciones y condiciones del suelo  |
|---|---|
| <i>Físicos</i>  |   |
| Textura del suelo   | Retención y transporte de agua y minerales, erosión del suelo.  |
| Profundidad del suelo   | Estimación del potencial productivo y de erosión.   |
| Infiltración y densidad aparente                              | Potencial de lixiviación, productividad y erosión.  |
| Capacidad de retención de agua                                | Relacionado con el contenido de humedad, transporte y erosión.  |
| Estabilidad de agregados                                      | Erosión potencial de un suelo, infiltración de agua.  |
| <i>Químicos</i>   |   |
| Materia orgánica (C y N orgánico)                             | Fertilidad del suelo, estabilidad y grado de erosión. Potencial productivo.   |
| pH  | Actividad química y biológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.                         |
| Conductividad eléctrica                                       | Actividad microbiológica y de las plantas, límites para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiológica.      |
| N, P y K extraíble  | Disponibilidad de nutrientes para las plantas y pérdida potencial de N, indicadores de productividad y calidad ambiental. |
| Capacidad de intercambio catiónico                            | Fertilidad de suelo, potencial productivo.  |
| Metales pesados disponibles                                   | Niveles de toxicidad para el crecimiento de la planta y la calidad del cultivo.   |
| <i>Biológicos</i>   |   |
| Biomasa microbiana (C y N)                                    | Potencial catalizador microbiano y reposición de C y N.   |
| N potencial mineralizable                                     | Productividad del suelo y aporte potencial de N.  |
| Respiración edáfica, contenido de agua, temperatura del suelo | Medición de la actividad microbiana.  |
| Número de lombrices   | Relacionado con la actividad microbiana.  |
| Rendimiento del cultivo                                       | Producción potencial del cultivo, disponibilidad de nutrientes.   |

Fuente: De Chen (2000) modificado por Acevedo *et al.* (2005).

## 1.2. Calidad del agua

El agua es un recurso natural indispensable para la sobrevivencia de cualquier organismo sobre la tierra. Del agua existente en el planeta tierra, sólo el 2.5% es agua

dulce, de allí solo el 0.007% es agua potable (Fundación Aquae, sf). Al respecto, Gualdrón (2016) menciona que:

“La escasez de agua de calidad es un desafío crítico mundial que surge de la interacción sistémica entre el humano y el ambiente, donde factores condicionantes como: actividades productivas y/o extractivas, densidad poblacional, asentamientos humanos aledaños a cuerpos de agua; en conjunto, generan efectos graves en la disponibilidad espacio – temporal de la oferta hídrica, deteriorando las condiciones fisicoquímicas y biológicas del agua. Algunos aspectos como: contaminación, deforestación, erosión, pérdida de la capacidad de retención y regulación hídrica, han alterado directa o indirectamente la oferta hídrica”.

Las fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos que permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales; no obstante, de forma paradójica muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de las mismas (Torres P et al. 2009).

En el país, el deterioro del recurso hídrico también está asociado principalmente con vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales y de producción agrícola y ganadera. (IDEAM, 2001. Citado por Torres P et al. 2009).

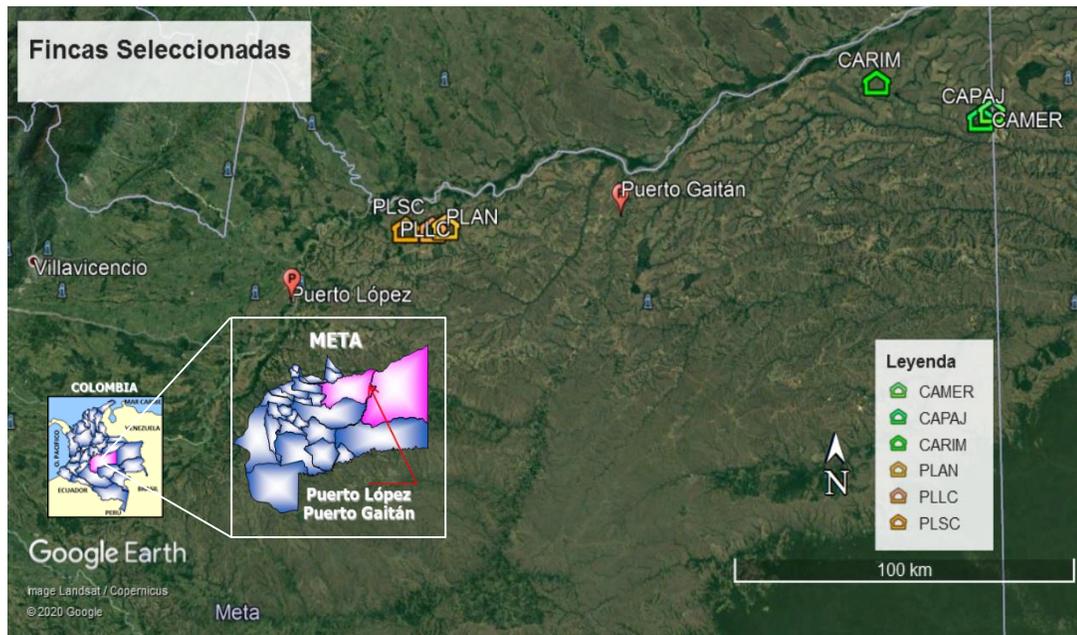
La medición y análisis de variables fisicoquímicas y biológicas como testigos de la calidad del agua son métodos complementarios en los procesos de evaluación de las condiciones ambientales de las aguas superficiales (Aguirre D, et al. 2008).

## Capítulo 2: Generalidades

### 2.1. Zona de estudio

El estudio se llevó a cabo en la altillanura metense en predios ubicados en los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, localizada al nororiente del departamento del Meta y como se puede observar en la Figura 2-1. De acuerdo con la posición geográfica está delimitada por el cruce del meridiano 05´ 45” de latitud Norte del paralelo 73° 57´ 30” de longitud oeste; con una altura que oscila entre 180 y 300 m.s.n.m y comprende un área de 2.268.418 hectáreas. En general todos los predios están ubicados en zonas planas con una altura promedio de 188 msnm para las localizadas en Puerto López y 178 msnm para las ubicadas en Puerto Gaitán. La distancia entre las dos zonas de estudio es de aproximadamente 230 kilómetros.

**Figura 2-1:** Ubicación de las fincas seleccionadas para el desarrollo de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

El área de estudio presenta suelos predominantes Oxisoles y Ultisoles, representados por suelos muy intemperizados, de baja fertilidad natural, que ocupan grandes extensiones en las zonas tropicales del mundo, encontrándose bajo vegetación de selva y sabana. Ambos órdenes cubren aproximadamente 64% de la superficie de Sur América Tropical (López I, 1980). Son suelos muy propensos a la erosión y a la degradación natural.

La precipitación anual supera los 3000 mm y en Carimagua pasa de 2200 mm distribuida durante ocho meses (abril a noviembre), con temperatura promedio anual de 26°C, humedad relativa que supera el 80%, régimen de humedad del suelo údico, se clasifica la zona agroecológica como Bosque húmedo tropical (BhT).

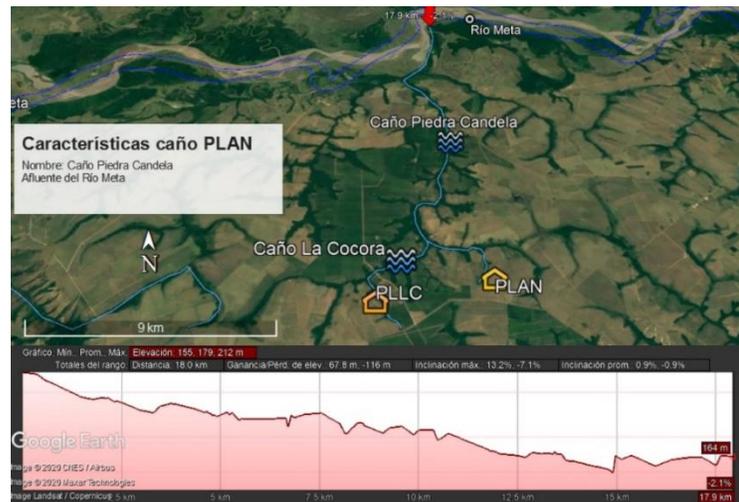
Las actividades económicas importantes están en el sector primario como la ganadería, la agricultura, la minería (explotación de yacimientos de petróleo) y la pesca, de manera complementaria está el comercio, el transporte y la agroindustria (INCODER, 2005).

### **2.1.1. Descripción de los afluentes y coordenadas de los puntos**

De acuerdo a la clasificación hidrográfica del "Estudio Nacional del Agua" (IDEAM, 2018), Los puntos ubicados en Puerto López están dentro de la sub-zona hidrográfica "Directos al río Meta" entre los ríos Guayuriba y Yucao, esta sub-zona hace parte de la zona hidrográfica del río Meta. Simultáneamente, los puntos ubicados en Puerto Gaitán están en la sub-zona hidrográfica del río Muco, y hace parte de la zona hidrográfica del río Vichada que pertenece al área hidrográfica del río Orinoco.

El caño Piedra Candela correspondiente al predio PLAN, tiene una longitud aproximada de 18 kilómetros desde su nacimiento a su desembocadura en el río Meta y presenta una inclinación promedio del 9% como se puede observar en la Figura 2-2. En los sitios de evaluación, sus riveras presentaban abundante hojarasca, angostos y con una profundidad aproximada de un metro.

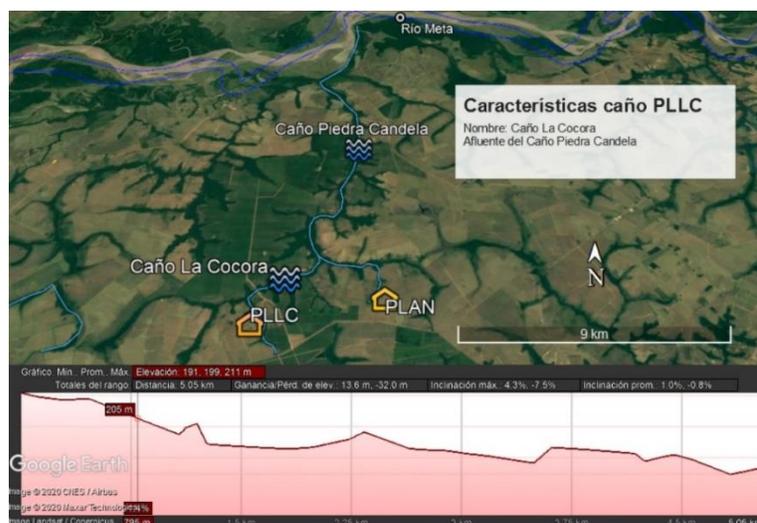
**Figura 2-2:** Características y ubicación del caño Piedra Candela, predio PLAN. Municipio de Puerto López.



Fuente: Elaboración propia

El caño La Cocora, en donde se analizaron los puntos de calidad de agua del predio PLLC, presentaba poco cauce al momento de la toma de las muestras, angosto, con presencia de arena y piedra sin mucha hojarasca. Tiene una longitud aproximada de cinco kilómetros desde su nacimiento a su desembocadura en el caño Piedra Candela, con una inclinación promedio de 1% como se ilustra en la Figura 2-3.

**Figura 2-3:** Características y ubicación del caño La Cocora, predio PLLC. Municipio de Puerto López.



Fuente: Elaboración propia

El caño La primavera ubicado en el predio PLSC, municipio de Puerto López, presentaba una profundidad al momento del muestreo de aproximadamente 1.6 m, con poco cauce, angosto y con buena presencia de hojarasca. Tiene una longitud aproximada de 20 kilómetros desde su lugar de nacimiento hasta su desembocadura en el río Meta, con una inclinación promedio de 1.2% y como se puede observar en la Figura 2-4.

**Figura 2-4:** Características y ubicación del caño La Primavera, predio PLSC, municipio de Puerto López.



Fuente: Elaboración propia

El caño Carabo, ubicado en el predio CARIM en la zona de Puerto Gaitán, presentaba un cauce principal profundo, aproximadamente de 2 metros, rodeado de árboles, con abundante hojarasca en los cinco puntos de muestreo y con presencia de rápidos en el tercero de ellos. Tiene una longitud aproximada de 17 kilómetros desde su lugar de nacimiento a su desembocadura en el río Muco, con una inclinación promedio del 1.1% como se puede observar en la Figura 2-5.

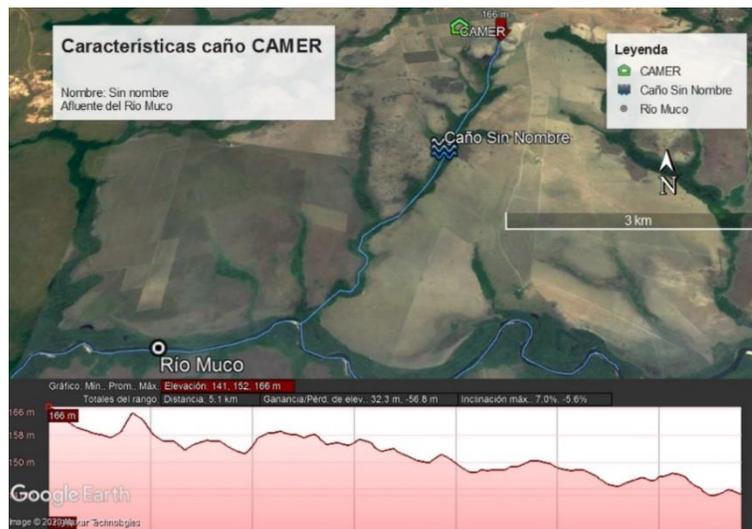
**Figura 2-5:** Características y ubicación del caño Carabo, predio CARIM. Municipio de Puerto Gaitán.



Fuente: Elaboración propia

El caño ubicado en el predio CAMER, no tenía un nombre reconocido, presentaba suelos arenosos, poco caudaloso y una profundidad que no superaba el metro en la mayoría de los puntos evaluados. Presenta una longitud aproximada de 5 kilómetros antes de llegar a su desembocadura en el río Muco con una inclinación promedio de 1.4% como se puede observar en la Figura 2-6.

**Figura 2-6:** Características y ubicación del caño donde se evaluaron los puntos de calidad de agua del predio CAMER, Municipio de Puerto Gaitán.



Fuente: Elaboración propia

El caño ubicado en el predio CAPAJ, presenta una longitud aproximada de 3.9 kilómetros antes de llegar a su desembocadura en el río Muco, con una altura máxima de 166 msnm y una inclinación máxima del 7% como se puede observar en la Figura 2-7. El caño presentaba una profundidad de 2.5 metros en promedio para los cinco puntos de evaluación y un ancho aproximado de siete metros en la mayoría de los puntos.

**Figura 2-7:** Características y ubicación del caño donde se evaluaron los puntos de calidad de agua del predio CAPAJ. Municipio de Puerto Gaitán.



Fuente: Elaboración propia

Las coordenadas y las alturas de los puntos evaluados en cada uno de los predios seleccionados se presentan en los anexos A, B, C, D, E y F.

## 2.2. Descripción del muestreo

Se concibió un protocolo de muestreo en transectos uniando el caño a la zona abierta, con sabana natural o cultivos para responder a los tres temas identificados, con una visión integral del paisaje. Se escogieron 6 fincas, tres en la zona más intensificada de Puerto López (PLSC, PLLC y PLAN) y tres en zona con menos intensificación en Puerto Gaitán, más específicamente cerca al Centro de Investigación de Carimagua (CARIM, CAPAJ y CAMER). Cinco transectos paralelos separados por 200 m fueron instalados en cada finca y cinco puntos de muestreo ubicados en cada uno de ellos, se presenta un ejemplo de la distribución de un transecto en la Figura 2-8.

El punto uno se ubicó en el medio abierto, a 200 m del bosque de galería; con sabana natural o un sistema derivado: pastura, cultivo transitorio o perene. El punto dos se localizó a 20 m del borde del bosque, en la zona abierta; el punto tres en el borde del bosque, del lado abierto, mientras que el punto cuatro estuvo dentro del bosque. El punto cinco se ubicó a media distancia entre el caño y el borde del bosque y el punto 6, en el caño mismo en donde se evaluaron los parámetros de calidad de agua. La ubicación y la dirección de los transectos están relacionadas con el sistema de drenaje favorecido por la pendiente.

**Figura 2-8:** Ejemplo de la disposición de los puntos muestreados dentro de un transecto.



Fuente: Elaboración propia

### 2.2.1. Parámetros a evaluar

En los puntos del uno al cinco, se midieron variables de suelo tanto químicas, como físicas y biológicas (macrofauna), de igual manera se tomaron muestras para la determinación de la macro agregación del suelo. Las determinaciones realizadas dentro de cada variable fueron el insumo para la construcción de cada indicador independiente.

- **Parámetros químicos**

Con el fin de crear el indicador de fertilidad, se tomaron las variables químicas relacionadas en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Variables químicas analizadas y metodología utilizada para su análisis.

| <b>Parámetro</b>                          | <b>Método utilizado</b>                                       |
|---|---|
| pH relación 1:1 (Agua:suelo).             | Potenciómetro.  |
| S (mg/kg)                                 | Azufre Extractable.   |
| MO (%)                                    | Walkley-Black – Espectrometría Molecular                      |
| P (mg/kg)                                 | Bray II   |
| K (cmol/kg)                               | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Ca (cmol/kg)                              | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Mg (cmol/kg)                              | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Al (cmol/kg)                              | (KCl 1M) Volumetría   |
| Na (cmol/kg)                              | Espectrometría de absorción atómica                           |
| CIC (cmol/kg)                             | Amonio Acetato.   |
| B (mg/kg)                                 | Espectrometría Molecular                                      |
| Fe (mg/kg)                                | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Mn (mg/kg)                                | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Cu (mg/kg)                                | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Zn (mg/kg)                                | Espectrometría de absorción atómica                           |
| Almacenamiento de carbono<br>(Ton C * ha) | Calculada a partir del %C y la densidad aparente en los 20 cm |

Fuente: Elaboración propia.

#### ▪ **Parámetros físicos.**

Para determinar los aspectos asociados al indicador de función hídrica del suelo, se tomaron muestras disturbadas y sin disturbar (Figura 2-9) las cuales se relacionan en la Tabla 2-3. Adicionalmente, se calculó la porosidad total y el porcentaje de cada uno de los tamaños de poros (macro, meso y microporos) así como el agua disponible calculada como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

**Tabla 2-3:** Variables físicas analizadas y metodologías utilizada para su determinación.

| Parámetro                      | Método utilizado             |
|--------------------------------|------------------------------|
| Curvas de retención de humedad | Ollas de presión             |
| Densidad aparente              | Cilindro de volumen conocido |
| Densidad real                  | Picnómetro                   |
| Humedad del suelo              | Gravimétrico                 |
| Textura                        | Hidrómetro                   |

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-9:** Toma de muestras disturbadas y sin disturbar.

Fuente: Propia

### ▪ Parámetros biológicos

Para generar el indicador de biodiversidad, se usó la metodología del Programa de Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales (TSBF por sus siglas en inglés) (Anderson & Ingram 1993), la cual consiste en recolectar los organismos del suelo, que se pueden observar a simple vista y así determinar la existencia y diversidad de la población en un bloque de suelo conocido, el cual es tomado utilizando un cuadro de hierro de 10 centímetros de altura y 25 centímetros tanto de largo como de ancho (Figura 2-10). Estas muestras fueron recolectadas en los cinco puntos de cada transecto donde a su vez, se tomaron las muestras para la determinación de las propiedades físicas y químicas.

**Figura 2-10:** Toma de muestras de macrofauna.



Fuente: Propia

Las muestras recolectadas fueron depositadas en sacos de lona para inmediatamente, realizar la separación de todos los invertebrados. Se utilizaron frascos con alcohol al 70% para conservar todos los insectos y para las lombrices frascos con formaldehído al 4% para después proceder con su conteo e identificación. Todos los recipientes estaban etiquetados con la información del predio, el transecto y el punto donde se colectaron.

**Figura 2-11:** Separación y almacenamiento de muestras de macrofauna.



Fuente: Propia

El análisis de las muestras tanto del parámetro químico como físico y biológico se realizaron en los laboratorios del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en la ciudad de Palmira (Valle del Cauca).

Adicionalmente, en cada punto donde se tomaron las muestras relacionadas anteriormente, se realizaron tres mediciones de resistencia a la penetración con la ayuda

de un penetrómetro T-310 y tres repeticiones para la determinación de la resistencia tangencial al corte con la ayuda de un torcómetro (Turvane) (Figura 2-12).

**Figura 2-12:** Determinación de la resistencia tangencial al corte con la ayuda del torcómetro.



Fuente: Propia

#### ▪ Parámetros morfológicos

La morfología del suelo es considerada aquí como un indicador transversal que tiene que ver con las funciones hídricas y biológicas, por el papel importante que juega la agregación del suelo. Se evaluó según la metodología desarrollada por Velásquez et al. (2007); en cada sitio de muestreo se retiró un monolito de 10x10 cm y 10 cm de profundidad (Figura 2-13), cada uno de ellos fueron separados cuidadosamente para clasificarlos en agregados biogénicos, producidos por la fauna del suelo (ingenieros del ecosistema), agregados físicos, agregados de raíces y suelo poco agregado.

**Figura 2-13:** Toma de muestras para determinación de la morfología.



Fuente: Propia

- **Parámetros de calidad de agua**

Para la determinación de los parámetros correspondientes a las características de calidad del agua superficial de los caños, se siguieron las recomendaciones establecidas por las técnicas descritas en los “Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales de AWWA – APHA edición 21”, basados en el « American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (Dirección Nacional de Medio Ambiente, 1996), en las cuales se presenta la forma de toma, preservación y transporte de muestras al laboratorio y las técnicas de análisis de estas; además se tomó como base el protocolo para el aforo, toma y preservación de muestras de agua establecido por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, 2004; la jornada de toma de muestras se desarrolló llevando a cabo los siguientes procedimientos necesarios para el control y vigilancia de éstas: selección de los recipientes para la toma de muestras, etiquetas y sellos; adicionalmente, se registró en campo los formatos de toma de muestras y entrega al laboratorio con su respectiva cadena de custodia.

Durante la ejecución de la campaña se utilizó la técnica de muestreo simple o puntual, con la cual se representa la composición del cuerpo de agua original para el lugar, tiempo y circunstancias particulares en las que se realizó su toma. Se evitaron las áreas de mayor turbulencia y se identificaron sitios de mezcla completa. La muestra fue tomada a un 20% de la orilla del río.

Se realizaron dos muestreos durante los meses de agosto y septiembre y consistió en tomar porciones de agua para el análisis de diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, para lo cual se empleó los siguientes recipientes:

Parámetros microbiológicos (Coliformes Totales y E-Coli): la muestra de agua fue tomada en un tarro plástico completamente esterilizado y con tapa para evitar contaminación de la muestra. El sentido de toma de muestra fue boca abajo, contra corriente, a una profundidad aproximada de 30 cm contada desde la superficie. Posteriormente se llevó a refrigeración a 4°C.

Para la determinación de otros parámetros fisicoquímicos como la Conductividad eléctrica del agua, la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), amonio, nitratos, nitritos y fosfatos), se tomó una muestra de agua en un recipiente plástico de 1000 ml, con tapa, para lo cual se sumergió aproximadamente a 30 cm desde la superficie, contra corriente y seguidamente se llevó a refrigeración a 4°C.

Oxígeno Disuelto: la determinación de este parámetro se realizó mediante la fijación del OD en campo utilizando botellas Winkler (Figura 2-14), las cuales fueron llevadas al laboratorio para su respectivo análisis. Para la toma de muestra de agua la botella Winkler fue sumergida en contra corriente en una zona con baja turbulencia, libre de rocas para evitar alteración de los valores y a una profundidad de 30 cm contada desde la superficie.

**Figura 2-14:** Toma de muestra utilizando botellas Winkler para fijación de OD.



Fuente: Propia

La botella se destapó dentro del agua, se dejó llenar y se tapó de nuevo dentro del agua. Para fijar el oxígeno se adicionó 1 ml de sulfato manganoso, 1 ml de álcali yoduro y 1 ml de ácido sulfúrico, se tapó la botella y se agitó de manera inversa, luego se llevó a refrigeración. Este parámetro se midió in situ.

Para minimizar la volatilización o biodegradación de los constituyentes de las muestras, se guardaron a una baja temperatura de aproximadamente 4°C adicionando HCl al 1 molar para fijación de la misma, evitando la exposición directa de éstas a la luz solar con el fin de que sus condiciones originales no se alteraran; para ello se utilizó un gel refrigerante. La preservación y transporte de las muestras se realizó siguiendo la metodología descrita en los Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales de la AWWA – APHA – WEF, edición 21, relacionada anteriormente.

Los análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar) y TECNO Ambiental s.a.s, certificados por

el IDEAM y localizado en CIAT (Palmira) y Villavicencio respectivamente. En la Tabla 2-4 se presentan los métodos de análisis para cada parámetro.

**Tabla 2-4:** Técnicas para la determinación de parámetros de calidad agua.

| Parámetro  | Laboratorio Invemar                          |                     | Laboratorio |
|--|--|---------------------|-------------|
|  | Técnica                                      | Límite de detección | Técnica     |
| DBO5   | Electrodo de membrana                        | 2 ± 1 mg/l          | SM 5210 B   |
| DQO  | Reflujo Cerrado                              | 2 ± 1 mg/l          | SM 5220 C   |
| Oxígeno Disuelto                                 | Titulación con tiosulfato de sodio - Winkler | ---                 | ---         |
| Coliformes Totales                               | Filtración por membrana                      |                     | SM 9223 B   |
| E - Coli   | Filtración por membrana                      |                     | SM 9223 B   |
| Nutrientes (Nitrato, Nitrito, Amonio y Fosfatos) | Espectrofotometría                           | --                  |             |

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3. Análisis estadístico de datos

Se realizaron análisis multivariantes (ACP) con el paquete R, con ade4 colección de trabajos de análisis multivariable [R Development Core Team, 2004]. ADE-4 software. Para la generación de cada uno de los indicadores se usó el análisis estadístico de componentes principales (ACP), que explica la mayor parte de la variabilidad del conjunto de datos originales (Castaño y Moreno, 1994). Se redujo la dimensión del espacio de los datos, permitiendo realizar descripciones sintéticas, como combinación lineal que resume el conjunto de características, ya sean químicas, físicas o biológicas más importantes, con valores ajustados entre 0,1 para la peor y 1,0 para la mejor (Velásquez et al., 2007). Se utilizó la librería ADE4 1.4.5. (Análisis de datos ecológicos y ambientales con procedimientos exploratorios euclidianos) del programa R. La prueba estadística aplicada fue la prueba de Montecarlo. Para determinar la existencia de diferencias significativas entre los diferentes usos evaluados y los indicadores generados, se utilizaron modelos generales y mixtos usando como factor fijo los diferentes usos evaluados y como aleatorios los diferentes puntos de muestreo de suelo dentro de los transectos, se corrigió la heterogeneidad de la varianza de los puntos y se ajustó el modelo en el

---

programa InfoStat el cual incluía el programa R. Para determinar las diferencias entre la calidad de agua tanto en los predios evaluados como en las dos zonas, se realizaron análisis de varianza (ANOVA), y comparación de medias mediante el test GLM (Modelos lineales generalizados) al 95% de confianza, empleando el paquete estadístico SAS 9.4. Los resultados de los indicadores de suelo, se conectaron con el indicador de calidad de agua mediante un análisis de Colnercia, que permite analizar las relaciones entre variables ambientales y biológicas cuando se consideran muchas variables en pocos sitios de muestreo. La significación del análisis de Colnercia se determinó con el test de Monte Carlo. El software utilizado fue ADE-4 incluido en el paquete R3.6.3.

## Capítulo 3. Resultados y discusión

En éste capítulo se realizará una descripción general de los resultados de cada variable (química, física, biológica, morfológica y de calidad de agua), las cuales posteriormente, sirvieron de insumo para la construcción de cada indicador, utilizando el respectivo análisis de componentes principales.

### 3.1. Variables químicas

El análisis de las variables químicas se realizó a dos profundidades 0-10 y 10-20 cm. Las características a determinar fueron pH, Carbono (C), Materia orgánica (M.O.) Fósforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Aluminio (Al), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Azufre (S), Boro (B), Nitrógeno (N), saturación de aluminio y CICE. La Tabla 3-5, 3-5a y 3-5b presentan la descripción estadística de las variables químicas para la primera profundidad (0-10 cm) seleccionadas en el análisis multivariado relacionadas con los sistemas de uso de suelo establecidos.

**Tabla 3-5:** Descripción estadística de las variables químicas evaluadas en cultivos transitorios, sabana nativa y pastura degradada.

|                               | CULTIVOS TRANSITORIOS |                 |      | SABANA NATIVA |                |      | PASTURA DEGRADADA |                |       |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|------|---------------|----------------|------|-------------------|----------------|-------|
|                               | Med                   | Ran             | Des  | Med           | Ran            | Des  | Med               | Ran            | Des   |
| pH1                           | 4.44                  | (4.30 - 4.55)   | 0.07 | 4.5           | (4.28 - 4.70)  | 0.12 | 4.51              | (4.34 - 4.67)  | 0.09  |
| MO %                          | 0.35                  | (0.02 - 0.61)   | 0.20 | 0.67          | (0.17 - 1.60)  | 0.39 | 0.76              | (0.14 - 3.49)  | 0.85  |
| C g/kg <sup>-1</sup>          | 1.55                  | (0.11 - 2.69)   | 0.91 | 2.93          | (0.74 - 7.07)  | 1.75 | 3.37              | (0.61 - 15.38) | 3.75  |
| N g/kg <sup>-1</sup>          | 1.32                  | (0.14 - 3.96)   | 1.22 | 2.6           | (1.03 - 5.99)  | 1.35 | 1.97              | (0.13 - 5.74)  | 1.79  |
| P Bray II mg/kg <sup>-1</sup> | 25.58                 | (15.48 - 46.48) | 9.66 | 5.99          | (0.46 - 20.62) | 6.59 | 24.67             | (6.17 - 65.06) | 15.67 |
| K cmol/kg <sup>-1</sup>       | 0.05                  | (0.01 - 0.10)   | 0.03 | 0.05          | (0.00 - 0.21)  | 0.05 | 0.08              | (0.02 - 0.29)  | 0.07  |
| Ca cmol/ kg <sup>-1</sup>     | 0.45                  | (0.20 - 0.75)   | 0.20 | 0.21          | (0.01 - 0.49)  | 0.14 | 0.56              | (0.20 - 0.85)  | 0.24  |
| Mg cmol/ kg <sup>-1</sup>     | 0.07                  | (0.03 - 0.14)   | 0.03 | 0.08          | (0.03 - 0.26)  | 0.06 | 0.13              | (0.05 - 0.60)  | 0.14  |
| Al cmol/ kg <sup>-1</sup>     | 2.66                  | (0.44 - 4.93)   | 1.41 | 2.31          | (0.11 - 5.38)  | 1.77 | 3.27              | (1.44 - 5.90)  | 1.24  |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

**Tabla 3-5:** (Continuación)

|                            | CULTIVOS TRANSITORIOS |                 |       | SABANA NATIVA |                 |       | PASTURA DEGRADADA |                 |       |
|----------------------------|-----------------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
|                            | Med                   | Ran             | Des   | Med           | Ran             | Des   | Med               | Ran             | Des   |
| CICE cmol/kg <sup>-1</sup> | 2.78                  | (0.44 - 5.20)   | 1.53  | 2.55          | (0.17 - 5.83)   | 1.92  | 3.64              | (1.46 - 7.65)   | 1.62  |
| Sat Al %                   | 79.72                 | (54.99 - 85.99) | 10.32 | 76.84         | (27.25 - 94.57) | 20.72 | 80.35             | (64.57 - 91.92) | 7.26  |
| Cu mg/kg <sup>-1</sup>     | 0.57                  | (0.29 - 0.94)   | 0.24  | 0.4           | (0.07 - 0.76)   | 0.14  | 0.42              | (0.09 - 1.10)   | 0.30  |
| Zn mg/kg <sup>-1</sup>     | 0.72                  | (0.38 - 1.45)   | 0.32  | 0.77          | (0.36 - 2.03)   | 0.41  | 0.94              | (0.41 - 1.56)   | 0.38  |
| Mn mg/kg <sup>-1</sup>     | 1.89                  | (1.06 - 2.87)   | 0.61  | 1.95          | (0.73 - 3.03)   | 0.67  | 2.24              | (0.47 - 3.77)   | 0.96  |
| Fe mg/kg <sup>-1</sup>     | 44                    | (17.03 - 78.81) | 25.36 | 60.68         | (13.01 - 95.07) | 24.52 | 40.79             | (10.87 - 71.99) | 20.84 |
| S mg/kg <sup>-1</sup>      | 42.36                 | (9.15 - 69.23)  | 21.95 | 57.7          | (33.15 - 78.70) | 14.68 | 51.84             | (4.53 - 78.44)  | 22.32 |
| B mg/kg <sup>-1</sup>      | 0.33                  | (0.19 - 0.43)   | 0.10  | 0.2           | (0.08 - 0.47)   | 0.12  | 0.35              | (4.53 - 78.44)  | 0.10  |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

Fuente: Elaboración propia.

Los suelos evaluados mostraron un comportamiento fuertemente ácido, con un pH <5 en todos los puntos muestreados, con valores promedio de 4.25 en bosque primario (Tabla 3-5a) y 4.55 en plantaciones de caucho (Tabla 5b), esta acidez limita prácticamente la disponibilidad de todos los nutrientes para las plantas, esta condición es característica para éste tipo de suelos generalmente Oxisoles

**Tabla 3-5a:** Descripción estadística de las variables químicas evaluadas en bosque primario y bosque secundario.

|                               | BOSQUE PRIMARIO |                 |       | BOSQUE SECUNDARIO |                 |       |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
|                               | Med             | Ran             | Des   | Med               | Ran             | Des   |
| pH1                           | 4.25            | (4.19 - 4.34)   | 0.06  | 4.40              | (4.20 - 4.67)   | 0.11  |
| MO %                          | 1.53            | (1.20 - 1.73)   | 0.18  | 0.96              | (0.39 - 3.41)   | 0.56  |
| C g/kg <sup>-1</sup>          | 6.69            | (5.32 - 7.66)   | 0.84  | 4.18              | (1.72 - 15.02)  | 2.44  |
| N g/kg <sup>-1</sup>          | 5.14            | (4.21 - 5.57)   | 0.50  | 3.04              | (0.11 - 0.62)   | 1.31  |
| P Bray II mg/kg <sup>-1</sup> | 12.19           | (8.54 - 19.08)  | 4.01  | 19.81             | (0.54 - 50.87)  | 14.82 |
| K cmol/kg <sup>-1</sup>       | 0.12            | (0.08 - 0.15)   | 0.03  | 0.09              | (0.01 - 0.23)   | 0.04  |
| Ca cmol/kg <sup>-1</sup>      | 0.25            | (0.10 - 0.47)   | 0.14  | 0.28              | (0.02 - 0.74)   | 0.17  |
| Mg cmol/kg <sup>-1</sup>      | 0.15            | (0.11 - 0.20)   | 0.04  | 0.12              | (0.04 - 0.35)   | 0.05  |
| Al cmol/kg <sup>-1</sup>      | 7.42            | (6.39 - 8.04)   | 0.64  | 3.98              | (0.71 - 9.01)   | 1.87  |
| CICE cmol/kg <sup>-1</sup>    | 8.05            | (6.86 - 8.77)   | 0.70  | 4.40              | (0.84 - 9.77)   | 2.02  |
| Sat Al %                      | 93.46           | (91.64 - 94.75) | 1.21  | 86.57             | (58.28 - 96.32) | 8.63  |
| Cu mg/kg <sup>-1</sup>        | 0.11            | (0.001 - 0.20)  | 0.08  | 0.39              | (0.04 - 0.96)   | 0.20  |
| Zn mg/kg <sup>-1</sup>        | 1.16            | (0.85 - 1.40)   | 0.22  | 1.19              | (0.54 - 2.23)   | 0.31  |
| Mn mg/kg <sup>-1</sup>        | 3.55            | (2.83 - 4.76)   | 0.77  | 2.48              | (0.25 - 4.17)   | 0.98  |
| Fe mg/kg <sup>-1</sup>        | 67.90           | (6.28 - 121.68) | 44.09 | 68.52             | (5.06 - 202.36) | 33.16 |
| S mg/kg <sup>-1</sup>         | 49.77           | (9.73 - 76.25)  | 28.19 | 77.29             | (8.16 - 154.01) | 30.06 |
| B mg/kg <sup>-1</sup>         | 0.38            | (0.29 - 0.48)   | 0.07  | 0.36              | (0.07 - 0.74)   | 0.14  |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

Fuente: Elaboración propia.

Los mayores contenidos de carbono y nitrógeno se encontraron en las coberturas de bosque primario y bosque secundario con 6.69% y 4.17% (Tabla 3-5a) respectivamente en relación con los sistemas de pasturas mejoradas y caucho con los valores promedios más bajos de 1.45% y 1.75% (Tabla 3-5b) respectivamente.

**Tabla 3-5b:** Descripción estadística de las variables químicas evaluadas en pastura mejorada, plantaciones de caucho y borde de bosque.

|                               | PASTURA MEJORADA |                  |       | PLANTACIONES DE CAUCHO |                  |       | BORDE DE BOSQUE |                 |       |
|-------------------------------|------------------|------------------|-------|------------------------|------------------|-------|-----------------|-----------------|-------|
|                               | Med              | Ran              | Des   | Med                    | Ran              | Des   | Med             | Ran             | Des   |
| pH1                           | 4.47             | (4.33 - 4.62)    | 0.12  | 4.55                   | (4.31 - 4.77)    | 0.16  | 4.49            | (4.1 - 5.04)    | 0.16  |
| MO %                          | 0.33             | (0.01 - 0.60)    | 0.19  | 0.40                   | (0.18 - 0.75)    | 0.16  | 0.66            | (0.14 - 1.62)   | 0.46  |
| C g/kg <sup>-1</sup>          | 1.46             | (0.07 - 2.65)    | 0.81  | 1.75                   | (0.80 - 3.31)    | 0.68  | 2.93            | (0.61 - 7.15)   | 2.01  |
| N g/kg <sup>-1</sup>          | 0.88             | (0.19 - 1.85)    | 0.56  | 1.81                   | (0.84 - 2.98)    | 0.59  | 2.45            | (0.05 - 6.08)   | 1.67  |
| P Bray II mg/kg <sup>-1</sup> | 28.23            | (18.22 - 36.53)  | 6.30  | 8.43                   | (0.64 - 27.86)   | 9.70  | 16.12           | (0.56 - 39.58)  | 11.68 |
| K cmol/kg <sup>-1</sup>       | 0.05             | (0.02 - 0.08)    | 0.02  | 0.03                   | (0.001 - 0.09)   | 0.03  | 0.07            | (0.004 - 0.16)  | 0.05  |
| Ca cmol/ kg <sup>-1</sup>     | 0.58             | (0.36 - 0.81)    | 0.13  | 0.34                   | (0.004 - 0.78)   | 0.22  | 0.36            | (0.05 - 0.95)   | 0.23  |
| Mg cmol/kg <sup>-1</sup>      | 0.07             | (0.04 - 0.09)    | 0.02  | 0.06                   | (0.02 - 0.10)    | 0.03  | 0.10            | (0.003 - 0.40)  | 0.08  |
| Al cmol/kg <sup>-1</sup>      | 2.49             | (1.16 - 3.81)    | 0.90  | 0.73                   | (0.16 - 2.70)    | 0.71  | 2.52            | (0.28 - 8.79)   | 1.99  |
| CICE cmol/kg <sup>-1</sup>    | 2.61             | (1.19 - 3.98)    | 0.94  | 0.82                   | (0.06 - 2.98)    | 0.78  | 2.86            | (0.59 - 9.46)   | 2.13  |
| Sat Al %                      | 76.62            | (65.39 - 87.83)  | 7.71  | 55.13                  | (24.93 - 90.68)  | 23.79 | 76.86           | (23.30 - 94.34) | 15.56 |
| Cu mg/kg <sup>-1</sup>        | 0.55             | (0.25 - 0.79)    | 0.20  | 0.40                   | (0.11 - 0.60)    | 0.18  | 0.45            | (0.13 - 1.21)   | 0.26  |
| Zn mg/kg <sup>-1</sup>        | 0.75             | (0.60 - 0.95)    | 0.13  | 0.66                   | (0.31 - 0.93)    | 0.20  | 0.96            | (0.20 - 1.78)   | 0.44  |
| Mn mg/kg <sup>-1</sup>        | 2.33             | (1.49 - 3.50)    | 0.63  | 1.35                   | (0.22 - 2.54)    | 0.65  | 1.85            | (0.48 - 3.78)   | 0.87  |
| Fe mg/kg <sup>-1</sup>        | 44.96            | (18.18 - 84.69)  | 21.13 | 64.35                  | (25.28 - 111.28) | 1.53  | 53.99           | (7.69 - 124.89) | 28.31 |
| S mg/kg <sup>-1</sup>         | 56.74            | (17.07 - 104.65) | 30.41 | 65.19                  | (32.57 - 100.86) | 21.29 | 56.85           | (9.99 - 117.65) | 26.52 |
| B mg/kg <sup>-1</sup>         | 0.35             | (0.24 - 0.48)    | 0.08  | 0.16                   | (0.07 - 0.24)    | 0.05  | 0.30            | (0.10 - 0.60)   | 0.14  |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

Fuente: Elaboración propia.

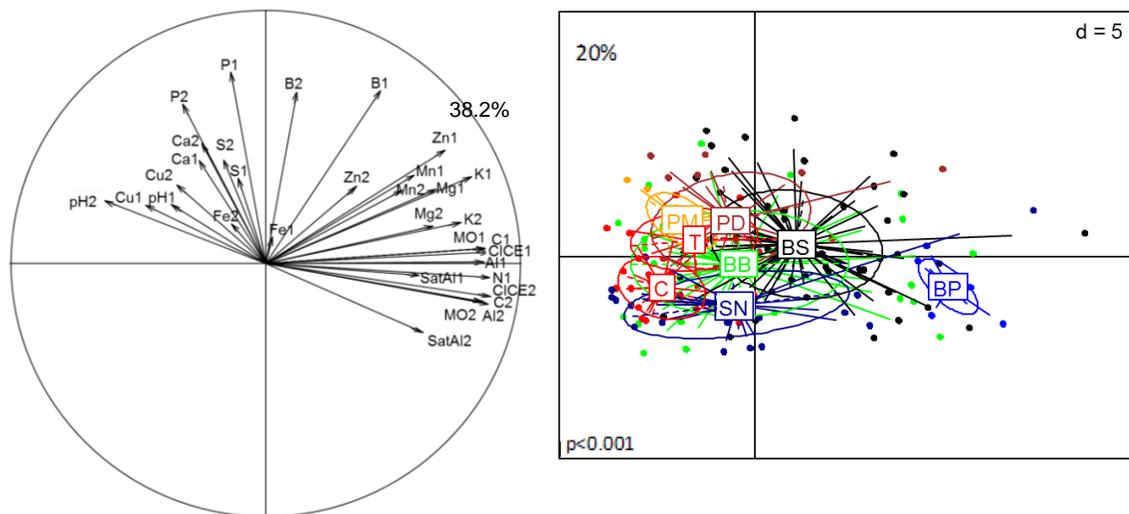
El contenido de nutrientes del suelo, estuvo influenciado por los procesos de fertilización en los sistemas intervenidos, el P pasó de contenidos medios en sistemas transitorios y de pasturas (Tabla 3-5) a contenidos bajos encontrados en sabana nativa y bosques. El mismo comportamiento se presentó en los contenidos de Ca, con valores más altos en sistemas intervenidos, pero con un nivel generalizado de deficiencia en éste elemento para todos los sistemas evaluados.

El almacenamiento de carbono en el suelo fue mayor en los bosques primarios y secundarios con 4.6 y 4 Ton C\* ha respectivamente. Los valores más bajos para ésta variable se encontraron en las pasturas mejoradas y cultivos transitorios, con valores de 1.9 Ton C\* ha y 2 Ton C\* ha respectivamente (Anexo G).

### 3.1.1. Análisis de componentes principales para las variables químicas

El factor 1 del análisis de componentes principales explicó el 38.2% de la variabilidad de los datos, expresando claramente un gradiente de disponibilidad de nutrientes, así mismo separó de manera significativa ( $p < 0.001$ ) los sistemas evaluados y fue explicada en un 20% por las variables químicas del suelo a través de la prueba de Montecarlo (Figura 3-15), por un lado, los valores más altos de pH, P y Ca en ambas profundidades evaluadas para los sistemas intervenidos con adiciones de fertilizantes y enmiendas, pertenecientes a pastura degradada (PD), transitorios (T) y pastura mejorada (PM) y en posición opuesta la CICE, C, N, MO y saturación de aluminio para los sistemas poco intervenidos correspondientes a bosque primario (BP) y bosque secundario (BS).

**Figura 3-15:** Posición de las variables químicas evaluadas y ubicación de los sistemas en el plano factorial 1 y 2 del ACP.

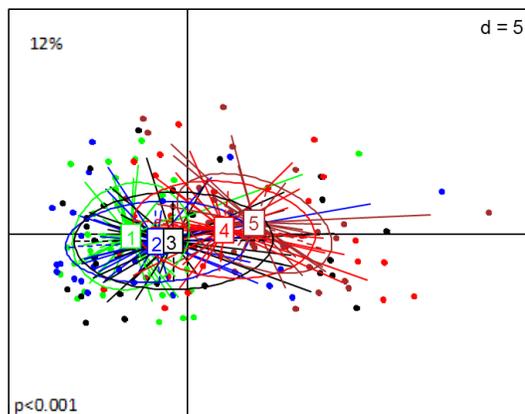


Este alejamiento entre sistemas está marcado por el incremento del pH en el suelo la cual reduce la acidez intercambiable, debida principalmente por la presencia de aluminio típico para este tipo de suelos generalmente Oxisoles.

El componente F1 explicó la variabilidad de todas las muestras en un 38,2% y el componente F2 en un 11,2%, para un total de 49,4%, explicando la variabilidad con el comportamiento de las variables químicas en el suelo.

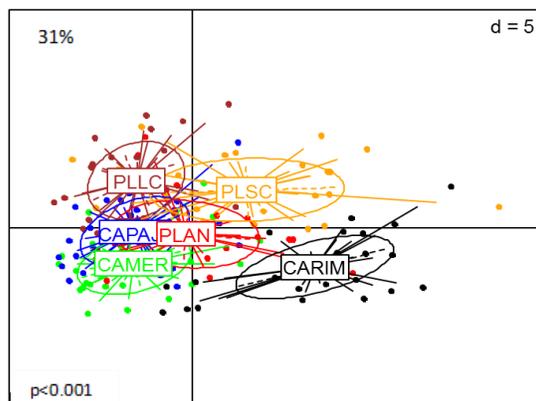
Los puntos de muestreo (del 1 al 5) aunque mostraron de igual manera un gradiente de fertilidad significativo, presentaron una menor discriminación por las variables químicas de suelos (Figura 3-16), lo cual se corrobora por el valor de 12% ( $p < 0,001$ ) generado por la prueba de Montecarlo.

**Figura 3-16:** Distribución de los puntos de evaluados en el espacio F1 y F2 del ACP, de acuerdo con el análisis de las variables químicas registradas en cada una.



La variabilidad entre fincas (Figura 3-17) fue explicada por los parámetros químicos evaluados en un 31% y de forma significativa ( $p < 0,001$ ). En el análisis se observa la separación de CARIM en un extremo y PLLC en el otro, dado principalmente por la intensificación agrícola. CARIM presenta los sistemas menos intervenidos correspondientes al bosque primario y secundario bordeados de sabana nativa, por el contrario, PLLC tenía los sistemas más intervenidos con pasturas mejoradas (Humidicola CIAT 679 y Humidicola cv Llanero CIAT 6133) y cultivos transitorios de maíz (ICA V 156) y soya (Panorama 29).

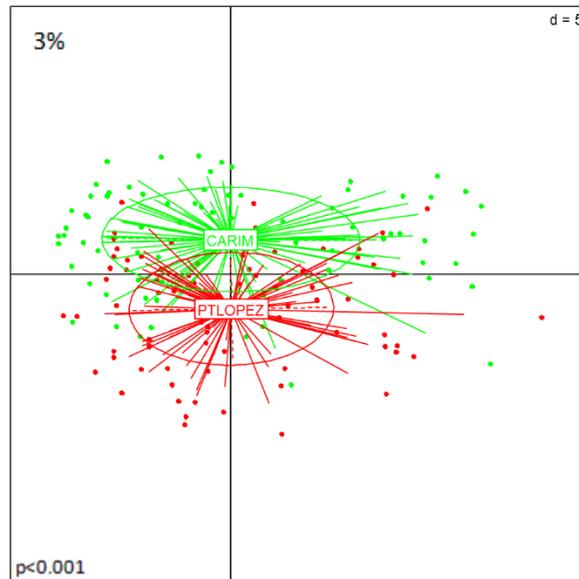
**Figura 3-17:** Distribución de las fincas en el ACP, de acuerdo con el análisis de las variables químicas evaluadas.



Se observa una agrupación de tres fincas que tiene menos intensificación, PLAN con cultivo de maíz (ICA V 156) y pasturas degradadas y CAPAJ y CAMER con sistemas de caucho, algunos abandonados y sabana nativa.

Las localidades de Puerto López y Carimagua presentaron una menor discriminación por las variables químicas de suelos (Figura 3-18), con un valor de 4% ( $p < 0,001$ ) generado por la prueba de Montecarlo, separándolas de igual manera por su grado de intervención.

**Figura 3-18:** Distribución de las localidades en los ejes 1 y 2 del ACP, según el análisis de las variables químicas registradas para cada una de ellas.



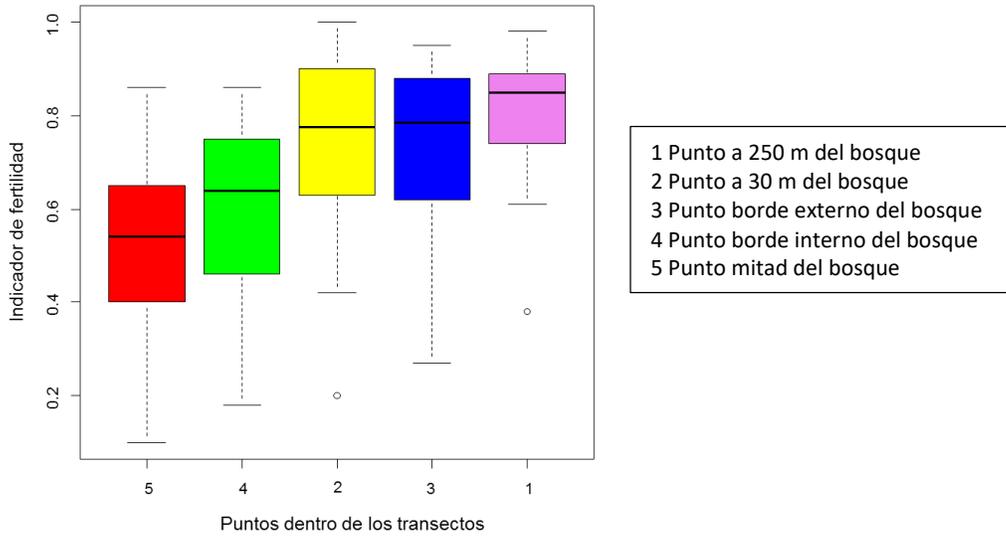
Los parámetros químicos que más aportaron a la variación del componente uno fueron: Los contenidos de  $MO_{(1,2)}$ ,  $C_{(1,2)}$ ,  $CICe_{(1,2)}$ ,  $N_{(1,2)}$ ,  $Al_{(1,2)}$ ,  $K_{(2)}$ ,  $pH_{(1,2)}$  y  $Cu_{(1,2)}$ , y en el segundo componente se ubicaron los contenidos de  $P_{(1,2)}$ ,  $B_{(2)}$ ,  $Ca_{(2)}$  y  $S_{(2)}$ . Los subíndices corresponden a las profundidades evaluadas (0-10 cm y 10-20 cm).

### 3.1.2. Indicador de fertilidad química de suelo

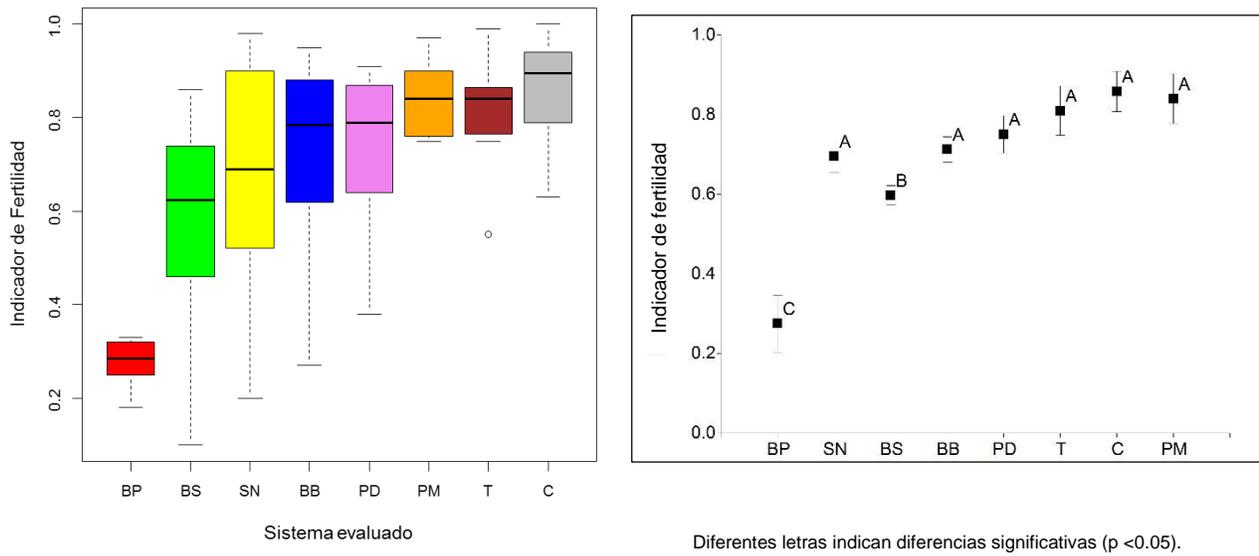
Siguiendo con el protocolo estadístico, se desarrolló el indicador de fertilidad química tomando todos los datos obtenidos de las dos profundidades, analizando los cambios a tres escalas, de los puntos y los usos, a las fincas y a gran paisaje en las dos localidades. Los puntos 1 y 2 ubicados en sistemas con alguna intervención agrícola,

presentaron valores más altos en el indicador de fertilidad de suelo con respecto a los puntos ubicados en bosque correspondientes a 4 y 5 (Figura 3-19), esta diferencia está basada principalmente en la intervención de los sistemas a campo abierto entre los usos de caucho, transitorios y pastura mejorada con respecto al bosque primario, bosque secundario y sabana nativa (Figura 3-20).

**Figura 3-19:** Indicador de fertilidad química generado en los puntos dentro de los transectos evaluados.



**Figura 3-20:** Indicador de fertilidad química generado en los diferentes usos de suelo evaluados.



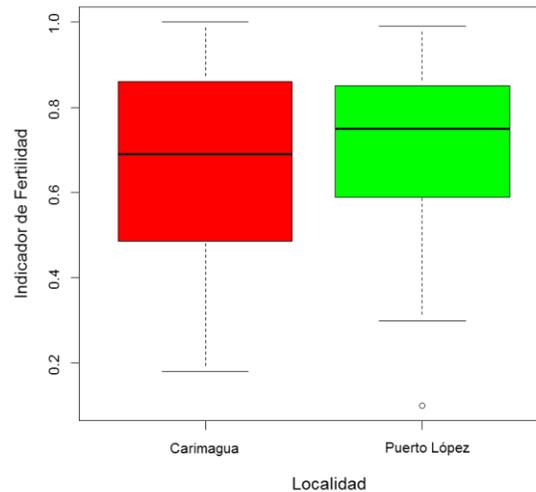
Diferentes letras indican diferencias significativas (p < 0.05).

Bosque primario, BP (n=30); bosque secundario, BS (n=6); sabana nativa, SN (n=18); borde de bosque, BB (n=30); pastura degradada, PD (n=14); pastura mejorada, PM (n=8); transitorios, T (n=8) y caucho, C (n=12).

Los sistemas de uso en bosque presentaron diferencias significativas con respecto a los demás usos evaluados según el análisis de modelos mixtos.

El indicador de fertilidad mostró diferencias a nivel de paisaje entre las localidades donde se encontraban establecidos los sistemas evaluados (Figura 3-21). El valor más bajo del indicador, se obtuvo en Carimagua la cual presentaba una menor intervención agrícola y Puerto López con un valor de indicador más alto debido a una mayor intensificación en el uso del suelo. Aunque se observan diferencias entre los valores del indicador entre las localidades, el análisis de varianza no mostró diferencias significativas (Anexo H).

**Figura 3-21:** Indicador de fertilidad química generado a nivel de paisaje, en las dos localidades donde se encontraban establecidos los sistemas evaluados.



### 3.2. Variables físicas

Las variables físicas seleccionadas, fueron aquellas relacionadas con la capacidad del suelo para absolver, almacenar y proveer agua a las plantas. Se determinaron los parámetros de densidad aparente (DA), densidad real (DR), resistencia tangencial horizontal (TOR), resistencia a la penetración (RES), saturación (SAT), capacidad de

campo (CC), 1 bar (1 BAR), punto de marchitez permanente (PMP), macroporos (MACRO), mesoporos (MESO), microporos (MICRO), humedad gravimétrica (H), porosidad total (PT), agua disponible (ADISP), arenas (SAND), limos (SILT), arcillas (CLAY). Las medias de las variables evaluadas, así como los rangos mínimos y máximos y la desviación estándar se presentan en las Tablas 3-6, 3-6a y 3-6b.

**Tabla 3-6:** Descripción estadística de las variables físicas evaluadas en los sistemas de borde de bosque, bosque primario y bosque secundario.

|                             | BORDE DE BOSQUE |                 |       | BOSQUE PRIMARIO |                 |       | BOSQUE SECUNDARIO |                  |       |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|------------------|-------|
|                             | Med             | Ran             | Des   | Med             | Ran             | Des   | Med               | Ran              | Des   |
| Da (g/cm <sup>3</sup> )     | 1.13            | (0.58 - 1.59)   | 0.31  | 0.61            | (0.54 - 0.66)   | 0.05  | 1.00              | (0.51 - 1.52)    | 0.24  |
| Dr (g/cm <sup>3</sup> )     | 2.60            | (2.32 - 2.69)   | 0.10  | 2.51            | (2.46 - 2.54)   | 0.03  | 2.55              | (2.24 - 2.69)    | 0.12  |
| Hg (%)                      | 37.62           | (12.16 - 77.62) | 20.03 | 81.22           | (65.47 - 94.37) | 10.71 | 44.00             | (18.85 - 98.67)  | 21.33 |
| C.C. (%)                    | 43.73           | (20.15 - 80.19) | 14.93 | 62.66           | (57.78 - 66.32) | 3.29  | 44.67             | (25.58 - 148.46) | 17.89 |
| P.M.P (%)                   | 30.27           | (9.46 - 61.72)  | 12.68 | 49.11           | (44.30 - 58.84) | 5.19  | 30.85             | (14.09 - 104.19) | 13.05 |
| A. Disp. (%)                | 13.45           | (7.64 - 19.84)  | 3.27  | 13.55           | (7.26 - 17.70)  | 3.47  | 13.82             | (6.69 - 44.26)   | 5.63  |
| Macroporos (%)              | 29.32           | (9.46 - 47.39)  | 9.99  | 39.98           | (28.50 - 52.40) | 8.42  | 28.88             | (14.09 - 44.79)  | 6.89  |
| Mesoporos (%)               | 14.29           | (5.78 - 27.90)  | 6.06  | 20.20           | (13.71 - 32.97) | 6.61  | 18.75             | (8.05 - 30.68)   | 6.32  |
| Microporos (%)              | 13.35           | (6.12 - 26.90)  | 4.64  | 15.62           | (12.14 - 22.49) | 4.03  | 13.62             | (6.31 - 26.26)   | 4.47  |
| PT (%)                      | 56.96           | (39.81 - 75.90) | 10.85 | 75.80           | (73.82 - 78.26) | 1.96  | 61.25             | (43.36 - 78.77)  | 8.31  |
| Arenas (%)                  | 45.02           | (15.40 - 69.68) | 13.50 | 46.88           | (38.89 - 56.59) | 7.62  | 43.02             | (14.19 - 75.93)  | 13.40 |
| Arcillas (%)                | 25.14           | (14.44 - 49.92) | 8.73  | 21.35           | (18.58 - 25.16) | 2.39  | 27.84             | (12.56 - 48.61)  | 8.38  |
| R.P. (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 7.63            | (3.16 - 12.99)  | 2.78  | 8.64            | (6.59 - 10.06)  | 1.20  | 7.48              | (2.72 - 13.06)   | 2.56  |
| Torcometría                 | 39.47           | (7.33 - 66.33)  | 15.19 | 32.00           | (23.33 - 36.66) | 5.83  | 39.12             | (12 - 77.66)     | 13.97 |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

Da: Densidad aparente, Dr: Densidad real, Hg: Humedad gravimétrica, C.C: Capacidad de campo, P.M.P: Punto de marchitez permanente, A. Disp: Agua disponible, PT: Porosidad total, R.P: Resistencia a la penetración.

Los suelos mostraron rangos considerables en la fracción de arena, con contenidos que iban del 2.17% en pasturas mejoradas hasta el 75.93% en bosques secundarios, las arcillas presentaron un rango menor entre 12.57% en bosques secundarios y 49.92% en el borde del bosque (Tabla 6). Se presentaron tres tipos de texturas, predominando la clasificación franco arcilloso en cuatro de los ocho sistemas evaluados (cultivos transitorios, bosque secundario, pastura degradada y mejorada), franco en segundo lugar en tres sistemas (sabana nativa, borde de bosque y bosque primario) y por último franco arenosa en un solo sistema (caucho).

**Tabla 3-6a:** Descripción estadística de las variables físicas evaluadas en cultivos transitorios, sabana nativa y pastura degradada seleccionados.

|                             | CULTIVOS TRANSITORIOS |                 |       | SABANA NATIVA |                 |       | PASTURA DEGRADADA |                 |       |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
|                             | Med                   | Ran             | Des   | Med           | Ran             | Des   | Med               | Ran             | Des   |
| Da (g/cm <sup>-3</sup> )    | 1.28                  | (0.71 - 1.47)   | 0.25  | 1.17          | (0.61 - 1.47)   | 0.29  | 1.22              | (0.61 - 1.52)   | 0.22  |
| Dr (g/cm <sup>-3</sup> )    | 2.62                  | (2.48 - 2.69)   | 0.08  | 2.58          | (2.41 - 2.68)   | 0.11  | 2.54              | (2.32 - 2.67)   | 0.11  |
| Hg (%)                      | 32.51                 | (20.76 - 78.30) | 19.06 | 40.13         | (14.71 - 86.08) | 22.24 | 30.95             | (18.54 - 41.20) | 6.94  |
| C.C. (%)                    | 39.57                 | (33.65 - 55.58) | 7.15  | 41.36         | (23.93 - 61.61) | 11.06 | 39.83             | (31.52 - 46.24) | 4.95  |
| P.M.P (%)                   | 27.53                 | (14.31 - 36.31) | 6.84  | 27.13         | (10.78 - 42.68) | 9.49  | 29.36             | (21.39 - 35.27) | 4.12  |
| A. Disp. (%)                | 12.04                 | (7.17 - 20.27)  | 5.17  | 14.23         | (7.30 - 22.36)  | 4.16  | 10.47             | (8.49 - 15.08)  | 2.39  |
| Macroporos (%)              | 28.81                 | (19.51 - 36.31) | 5.33  | 26.46         | (10.78 - 41.13) | 9.20  | 28.03             | (17.43 - 44.19) | 6.05  |
| Mesoporos (%)               | 12.20                 | (7.57 - 16.85)  | 3.62  | 13.85         | (3.50 - 22.98)  | 5.13  | 14.38             | (7.55 - 18.29)  | 3.50  |
| Microporos (%)              | 10.24                 | (6.94 - 19.26)  | 5.21  | 14.65         | (5.05 - 22.36)  | 5.16  | 9.76              | (4.89 - 13.93)  | 2.74  |
| PT (%)                      | 51.25                 | (44.53 - 71.02) | 8.72  | 54.97         | (44.61 - 75.62) | 10.08 | 52.16             | (36.84 - 75.02) | 8.61  |
| Arenas (%)                  | 29.43                 | (22.68 - 37.97) | 6.29  | 41.57         | (11.92 - 69.61) | 20.08 | 30.77             | (19.44 - 40.08) | 5.88  |
| Arcillas (%)                | 35.30                 | (20.25 - 42.71) | 6.83  | 24.98         | (14.56 - 40.02) | 7.63  | 33.46             | (14.73 - 44.05) | 8.21  |
| R.P. (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 8.72                  | (5.31 - 9.80)   | 1.48  | 6.81          | (3.33 - 9.65)   | 1.91  | 9.67              | (3.74 - 12.78)  | 2.47  |
| Torcometría                 | 45.29                 | (29.33 - 53.33) | 0.24  | 37.80         | (10.66 - 58.66) | 16.12 | 55.43             | (14 - 106)      | 24.96 |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

Da: Densidad aparente, Dr: Densidad real, Hg: Humedad gravimétrica, C.C: Capacidad de campo, P.M.P: Punto de marchitez permanente, A. Disp: Agua disponible, PT: Porosidad total, R.P: Resistencia a la penetración

La densidad aparente varió considerablemente en la primera profundidad (0-10 cm), pasando de 0.52 g/cm<sup>-3</sup> en suelos de bosque a 1.52 g/cm<sup>-3</sup> en suelos con pasturas degradadas. En la segunda profundidad (10-20 cm) el comportamiento de la densidad aparente fue similar al encontrado en la primera profundidad, el valor más bajo se encontró en el suelo con uso de bosque secundario de 0.51 g/cm<sup>-3</sup> y el valor más alto se encontró en el uso de suelo establecido con caucho con un valor de 1.81 g/cm<sup>-3</sup>. La humedad gravimétrica en la primera profundidad, fue la propiedad que presentó la mayor variación, debido a la saturación presentada en algunos de los sistemas de bosques que por su naturaleza de bosques riparios, permanecen inundados por largos periodos de tiempo; los valores iban de 9.02% hasta el 98.6% y un valor promedio de 39.5%. En términos generales la porosidad total fue satisfactoria, con valores promedio entre el 50 y el 55% con prevalencia de los macroporos, los valores de resistencia a la penetración fueron bajos en todos los sistemas evaluados y no excedieron los 15 kgf/cm<sup>2</sup>. Los valores de resistencia tangencial horizontal (Torcómetro) estuvieron generalmente entre 40 y 75 kPa.

**Tabla 3-6b:** Descripción estadística de las variables físicas evaluadas en las pasturas mejoradas y plantaciones de cauchos seleccionados.

|                             | PASTURA MEJORADA |                  |       | PLANTACIONES DE CAUCHO |                 |       |
|-----------------------------|------------------|------------------|-------|------------------------|-----------------|-------|
|                             | Med              | Ran              | Des   | Med                    | Ran             | Des   |
| Da (g/cm <sup>3</sup> )     | 1.38             | (1.19 - 1.64)    | 0.16  | 1.35                   | (0.93 - 1.50)   | 0.17  |
| Dr (g/cm <sup>3</sup> )     | 2.66             | (2.64 - 2.69)    | 0.02  | 2.65                   | (2.54 - 2.69)   | 0.05  |
| Hg (%)                      | 28.98            | (17.28 - 42.74)  | 8.34  | 24.21                  | (9.02 - 52.46)  | 12.94 |
| C.C. (%)                    | 37.09            | (29.28 - 43.65)  | 6.22  | 30.79                  | (15.71 - 48.43) | 9.99  |
| P.M.P (%)                   | 27.39            | (20.14 - 36.19)  | 5.70  | 16.18                  | (5.94 - 32.93)  | 7.17  |
| A. Disp. (%)                | 9.71             | (7.45 - 12.11)   | 1.79  | 14.61                  | (8.46 - 22.93)  | 4.44  |
| Macroporos (%)              | 27.92            | (20.14 - 33.40)  | 4.58  | 16.18                  | (5.94 - 32.93)  | 7.17  |
| Mesoporos (%)               | 10.28            | (8.42 - 14.23)   | 1.90  | 18.53                  | (7.78 - 32.04)  | 6.44  |
| Microporos (%)              | 10.11            | (7.72 - 12.11)   | 1.58  | 14.61                  | (8.46 - 22.93)  | 4.44  |
| PT (%)                      | 48.31            | (38.20 - 55.32)  | 5.83  | 49.33                  | (43.32 - 63.30) | 5.75  |
| Arenas (%)                  | 27.92            | (2.17 - 51.77)   | 16.29 | 54.62                  | (21.77 - 67.08) | 16.17 |
| Arcillas (%)                | 37.51            | (26.91 - 47.47)  | 7.12  | 19.99                  | (13.11 - 32.42) | 5.86  |
| R.P. (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 10.41            | (9.11 - 12.24)   | 1.02  | 5.00                   | (2.17 - 7.04)   | 1.56  |
| Tor (KPa)                   | 66.00            | (49.33 - 113.66) | 22.45 | 31.75                  | (13.33 - 56)    | 13.11 |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

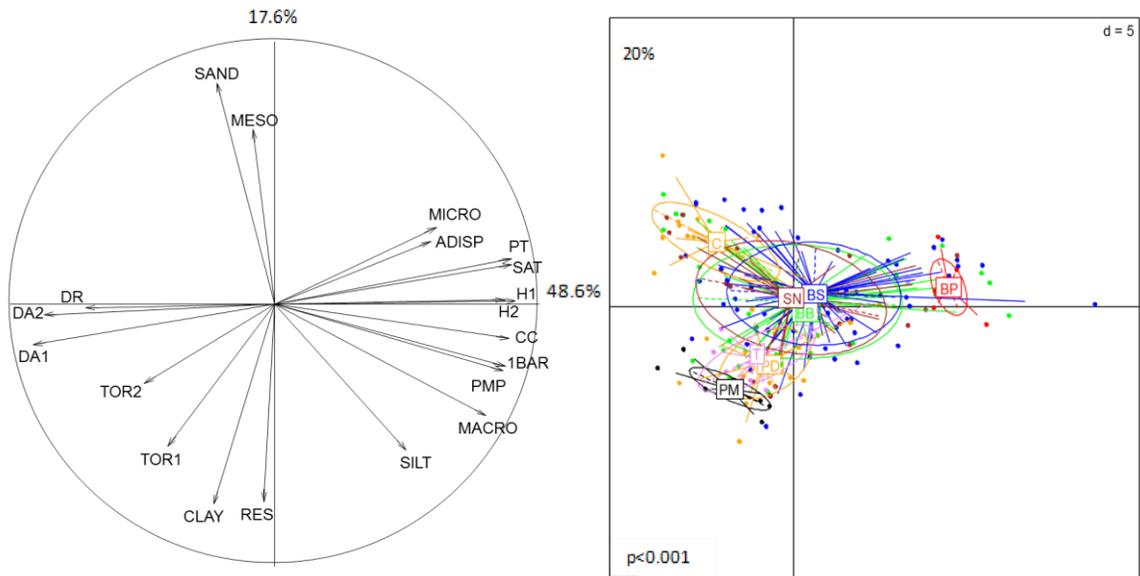
Da: Densidad aparente, Dr: Densidad real, Hg: Humedad gravimétrica, C.C: Capacidad de campo, P.M.P: Punto de marchitez permanente, A. Disp: Agua disponible, PT: Porosidad total, R.P: Resistencia a la penetración.

### 3.2.1. Indicador de funciones hídricas

Para producir éste indicador, se incorporaron las variables físicas relacionadas anteriormente y posteriormente se produjo el círculo de correlación, el cual, en su primer componente, explicó la variabilidad de todas las muestras en un 48.6%, y el componente 2, en un 17.6%, para un total de 66.2% de la variabilidad explicada debida al comportamiento de los parámetros físicos (Figura 3-22).

En el primer factor (F1), se observa la relación positiva entre los microporos y el agua disponible. Lo contrario se encontró con las variables relacionadas con la compactación del suelo (densidad aparente y torcometría) y las variables de retención de agua (porosidad total y agua disponible). En el factor 2 (F2), se pudo observar una relación opuesta de las arenas y los mesoporos con las arcillas y la resistencia a la penetración.

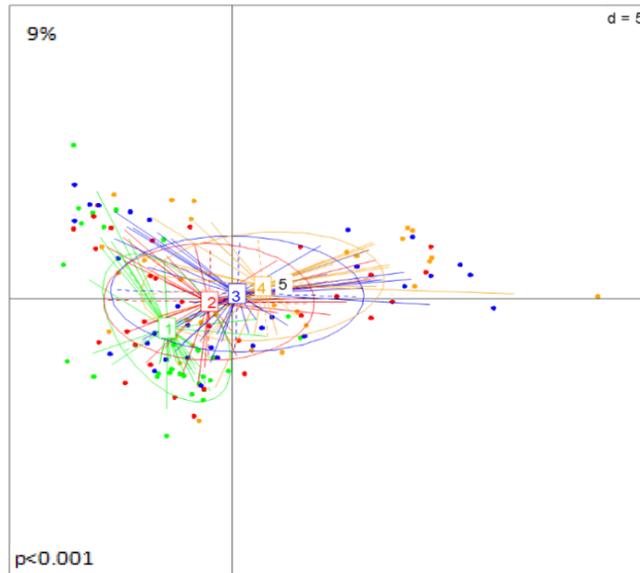
**Figura 3-22:** Posición de las propiedades físicas evaluadas y distribución de los usos de suelo en el espacio del ACP.



Los usos se separan significativamente ( $p < 0.001$ ) y son explicadas en un 20% por las variables físicas del suelo a través de la prueba de Montecarlo en cuatro grupo según su grado de intervención, bosque primario (BP) como el sistema menos intervenido, un segundo grupo con algún grado de intervención compuesto por los bosques secundarios, borde del bosque y sabana nativa, un tercer grupo con los sistemas más intervenidos que comprenden los cultivos transitorios, las pasturas mejoradas y degradadas y un cuarto grupo con el cultivo de caucho separado de los demás.

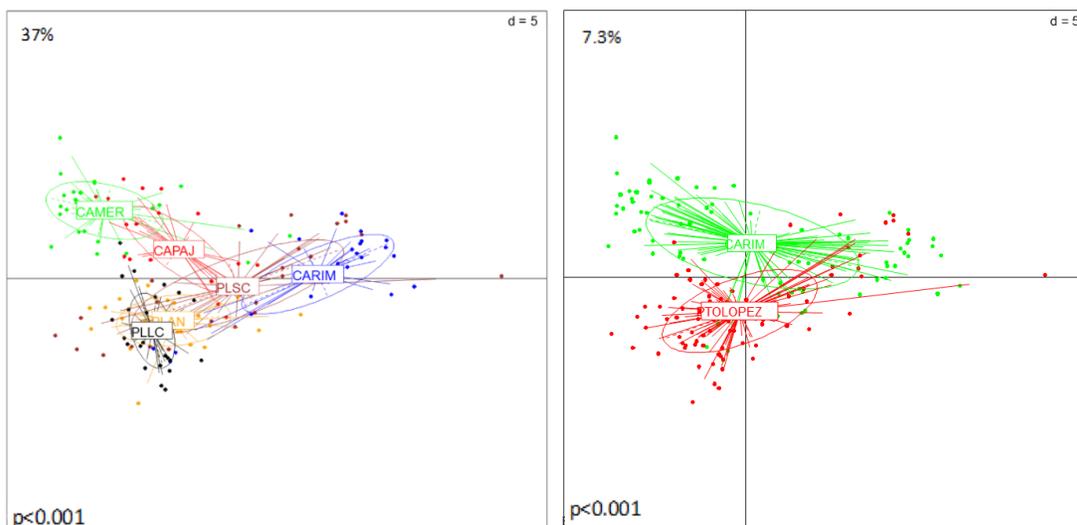
Una vez realizada la prueba de Montecarlo, se separaron los puntos los cuales se ubicaron de manera secuencial, en un extremo los sistemas más intervenidos y en el otro los sistemas con poca intervención (Figura 3-23) explicando el 9% de la variabilidad debida a las propiedades físicas.

**Figura 3-23:** Distribución de los puntos muestreados dentro del transecto en los ejes 1 y 2 del ACP.



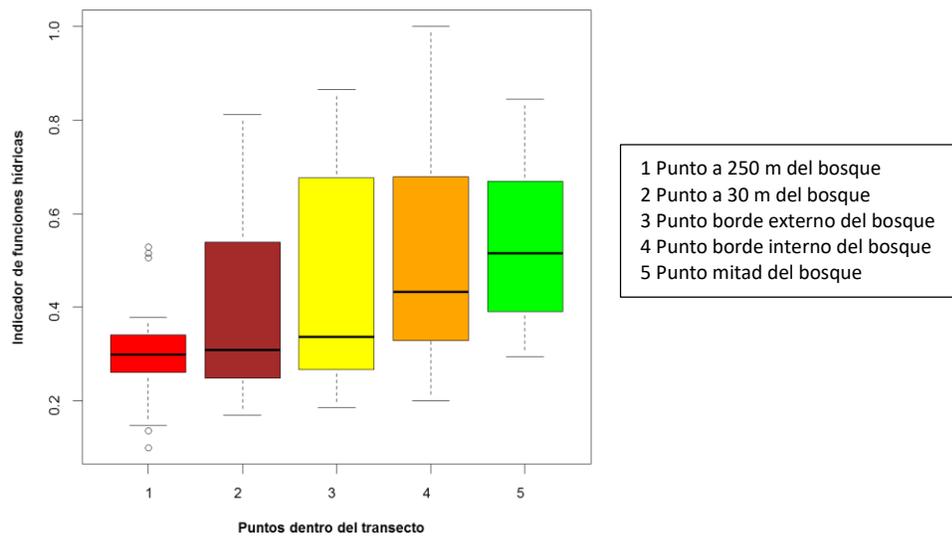
De igual manera se separaron las fincas (Figura 3-24) y las localidades (Figura 3-24a), la explicación de la variabilidad debida a las propiedades físicas analizadas correspondió al 37% ( $p < 0.001$ ) y 7.3% ( $p < 0.001$ ) respectivamente. Ambas se separan por su nivel de intervención.

**Figura 3-24 y 3-24a:** Ubicación de las fincas y localidades en el plano factorial del ACP con respecto al indicador de funciones hídricas.



En general el comportamiento del indicador de función hídrica fue inverso al indicador de fertilidad de suelo. Los puntos 1 y 2 ubicados a campo abierto con sistemas de producción, fueron los que presentaron el valor más bajo del indicador; por el contrario, los puntos 4 y 5 ubicados en bosque presentaron el valor del indicador de función hídrica más alto (Figura 3-25).

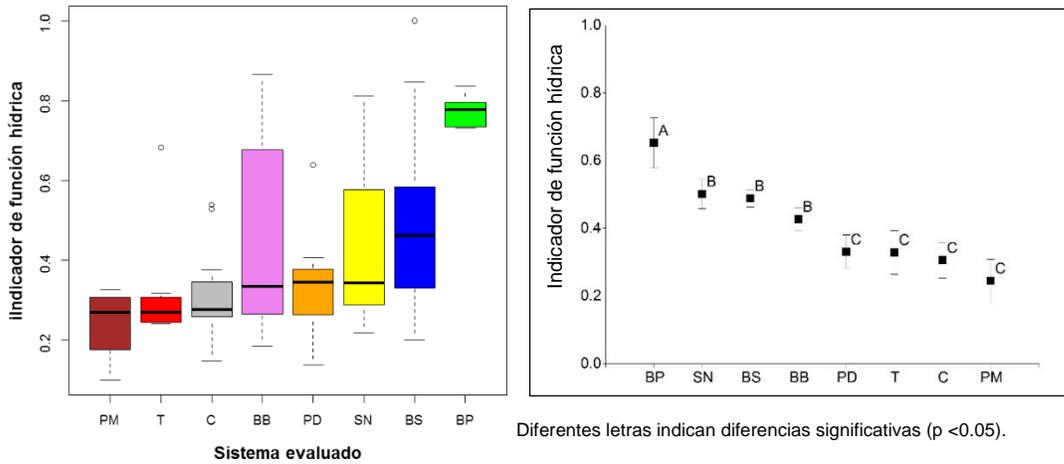
**Figura 3-25:** Valores del indicador de funciones hídricas en los diferentes puntos evaluados.



El comportamiento para los sistemas evaluados fue igual al mostrado por los puntos, discriminando claramente los sistemas intervenidos de los poco intervenidos, los valores del indicador de función hídrica más alto (Figura 3-26), lo presentaron los bosques primarios y secundarios. Los sistemas con el valor del indicador más bajo correspondieron a la pastura mejorada, los cultivos transitorios y el caucho.

El sistema de uso en bosque primario presentó diferencias significativas con todos los otros sistemas evaluados. Los demás usos con poca intervención correspondientes a sabana nativa, bosque secundario y borde de bosque, presentaron diferencias significativas con los sistemas intervenidos.

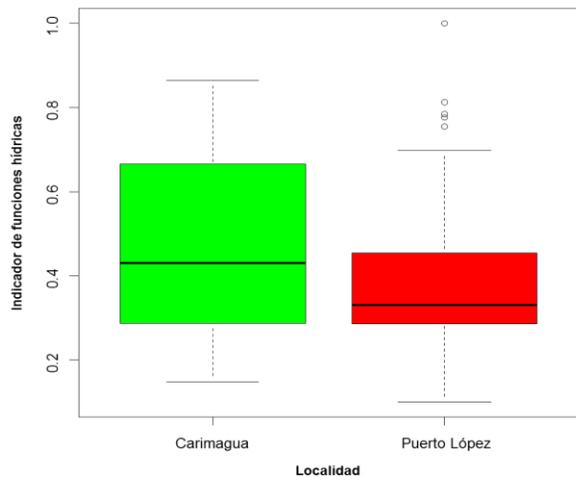
**Figura 3-26:** Indicador de función hídrica generado en los sistemas de uso evaluados.



Bosque primario, BP (n=30); bosque secundario, BS (n=6); sabana nativa, SN (n=18); borde de bosque, BB (n=30); pastura degradada, PD (n=14); pastura mejorada, PM (n=8); transitorios, T (n=8) y caucho, C (n=12).

La comparación del indicador de función hídrica entre las dos localidades fue significativa (Figura 3-27) según el análisis de varianza y la prueba de Tukey realizadas (Tabla 3-7), el valor más alto del indicador se presentó en la zona con menos intervención, Carimagua.

**Figura 3-27:** Indicador de función hídrica generado en las dos localidades estudiadas.



**Tabla 3-7:** Prueba de Tukey entre localidades

|                                     |          |
|-------------------------------------|----------|
| Alpha                               | 0.05     |
| Error Degrees of Freedom            | 28       |
| Error Mean Square                   | 0.016924 |
| Critical Value of Studentized Range | 2.89687  |
| Minimum Significant Difference      | 0.0973   |

| Means with the same letter are not significantly different. |         |    |              |
|---|---------|----|--------------|
| Tukey Grouping  | Mean    | N  | LOCALIDAD    |
| A   | 0.66533 | 15 | CARIMAGUA    |
| B   | 0.43933 | 15 | PUERTO LOPEZ |

### 3.3. Variables biológicas (macrofauna)

Se colectaron invertebrados de 16 órdenes, los cuales se disminuyeron a ocho agrupando invertebrados con abundancia mínima y funciones cercanas. El borde de bosque presentó la mayor diversidad con presencia de individuos de todos los órdenes encontrados, seguido por el borde secundario con 14.

Las comunidades de macro invertebrados variaron ampliamente con el uso del suelo, desde el valor promedio más bajo de 72 individuos por m<sup>2</sup> en cultivos transitorios a 230 individuos por m<sup>2</sup> en borde de bosque, con un promedio general de 176. Las termitas fueron el grupo más abundante (70%), seguido de las hormigas (18.8%), lombrices de tierra (3.33%) y los coleópteros (2.96%).

La abundancia de termitas fue más alta en borde de bosque con un valor promedio de 174 individuos por m<sup>2</sup> y más baja en cultivos transitorios con 14.75 individuos por m<sup>2</sup>. La abundancia de coleópteros y otros invertebrados fue mayor en bosque primario con 9.67 y 19.66 individuos por m<sup>2</sup> respectivamente y el más bajo en cultivos transitorios con 1.25 y 3.25 por m<sup>2</sup> respectivamente (Tabla 3-8).

**Tabla 3-8:** Descripción estadística de las comunidades de macroinvertebrados en el suelo (0-20 cm) en cultivos transitorios, borde de bosque y bosque primario.

|   | CULTIVOS TRANSITORIOS |           |        | BORDE DE BOSQUE |           |        | BOSQUE PRIMARIO |           |       |
|---|-----------------------|-----------|--------|-----------------|-----------|--------|-----------------|-----------|-------|
|   | Med                   | Ran       | Des    | Med             | Ran       | Des    | Med             | Ran       | Des   |
| Lombrices anecicas (ind m <sup>-2</sup> ) | 0.13                  | (0 - 1)   | 0.35   | 0.03            | (0 - 1)   | 0.18   | 0.33            | (0 - 1)   | 0.52  |
| Lombrices endogeas (ind m <sup>-2</sup> ) | 6.13                  | (0 - 37)  | 12.59  | 4.57            | (0 - 43)  | 8.71   | 1.00            | (0 - 5)   | 2.00  |
| Lombrices epigeas (ind m <sup>-2</sup> )  | 0.13                  | (0 - 1)   | 0.35   | 0.20            | (0 - 3)   | 0.61   | 0.00            | (0 - 0)   | 0.00  |
| Coleopteros (ind m <sup>-2</sup> )        | 1.25                  | (0 - 5)   | 1.58   | 5.43            | (0 - 15)  | 4.06   | 9.67            | (2 - 22)  | 8.98  |
| Hormigas (ind m <sup>-2</sup> )           | 47.50                 | (0 - 371) | 130.72 | 36.07           | (0 - 258) | 64.30  | 13.83           | (2 - 33)  | 14.19 |
| Termitas (ind m <sup>-2</sup> )           | 14.75                 | (0 - 70)  | 25.81  | 174.40          | (0 - 589) | 163.59 | 97.67           | (0 - 181) | 67.92 |
| Miriapodos (ind m <sup>-2</sup> )         | 0.13                  | (0 - 1)   | 0.35   | 4.20            | (0 - 19)  | 4.49   | 2.00            | (0 - 7)   | 2.89  |
| Otros (ind m <sup>-2</sup> )              | 3.25                  | (0 - 18)  | 6.04   | 11.10           | (0 - 39)  | 8.89   | 19.66           | (3 - 37)  | 14.30 |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

La sabana nativa presentó la mayor abundancia de hormigas con un valor promedio de 71 individuos por m<sup>2</sup>, y más baja en pasturas degradadas con 8 individuos por m<sup>2</sup> (Tabla 3-8a).

**Tabla 3-8a:** Descripción estadística de las comunidades de macroinvertebrados en el suelo (0-20 cm) ensabana nativa, pastura degradada y pastura mejorada.

|   | SABANA NATIVA |           |        | PASTURA DEGRADADA |           |        | PASTURA MEJORADA |           |        |
|---|---------------|-----------|--------|-------------------|-----------|--------|------------------|-----------|--------|
|   | Med           | Ran       | Des    | Med               | Ran       | Des    | Med              | Ran       | Des    |
| Lombrices anecicas (ind m <sup>-2</sup> ) | 0.00          | (0 - 0)   | 0.00   | 0.0               | (0 - 0)   | 0.00   | 0.00             | (0 - 0)   | 0.00   |
| Lombrices endogeas (ind m <sup>-2</sup> ) | 12.67         | (0 - 68)  | 17.11  | 3.5               | (0 - 13)  | 4.36   | 6.13             | (0 - 24)  | 7.83   |
| Lombrices epigeas (ind m <sup>-2</sup> )  | 0.78          | (0 - 4)   | 1.52   | 0.1               | (0 - 2)   | 0.53   | 0.00             | (0 - 0)   | 0.00   |
| Coleopteros (ind m <sup>-2</sup> )        | 5.94          | (0 - 26)  | 6.66   | 6.1               | (0 - 16)  | 5.34   | 4.38             | (0 - 11)  | 3.38   |
| Hormigas (ind m <sup>-2</sup> )           | 71.06         | (0 - 704) | 169.03 | 8.1               | (0 - 26)  | 9.75   | 12.63            | (0 - 63)  | 21.74  |
| Termitas (ind m <sup>-2</sup> )           | 96.39         | (0 - 455) | 146.20 | 76.7              | (0 - 368) | 119.43 | 111.75           | (2 - 544) | 182.41 |
| Miriapodos (ind m <sup>-2</sup> )         | 1.94          | (0 - 11)  | 2.91   | 0.9               | (0 - 6)   | 1.61   | 0.87             | (0 - 4)   | 1.64   |
| Otros (ind m <sup>-2</sup> )              | 12.11         | (0 - 48)  | 11.86  | 8.6               | (1 - 25)  | 6.97   | 7.62             | (0 - 19)  | 6.34   |

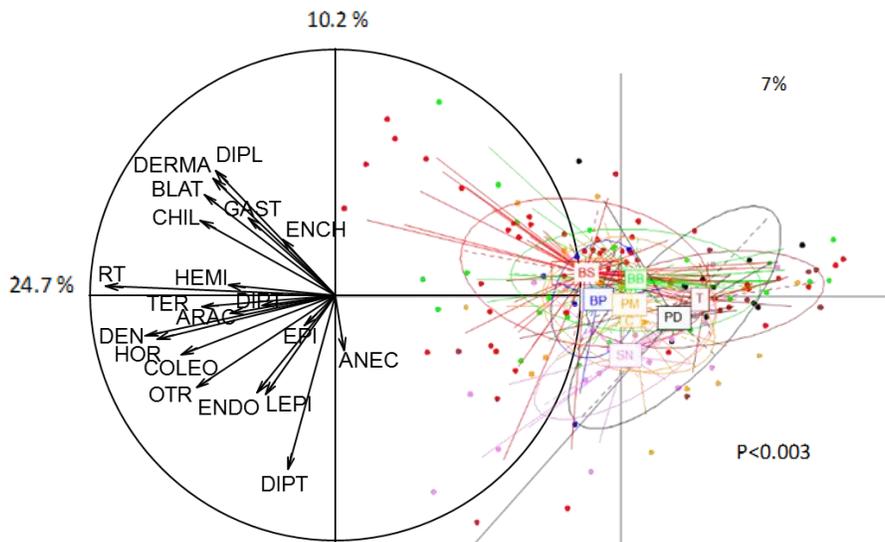
Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

En términos generales, la abundancia de macroinvertebrados fue 50% mayor en sistemas no intervenidos con referencia a los sistemas intervenidos

### 3.3.1. Indicador biológico

Continuando con el mismo análisis realizado anteriormente, se desarrolló inicialmente el círculo de correlación, el cual explicó la variabilidad total de los datos en un 34.9% distribuidos en un 24.7% para el componente 1 y un 10.2% para el componente 2 de la variabilidad explicada causada por el comportamiento de los parámetros biológicos (Figura 3-28).

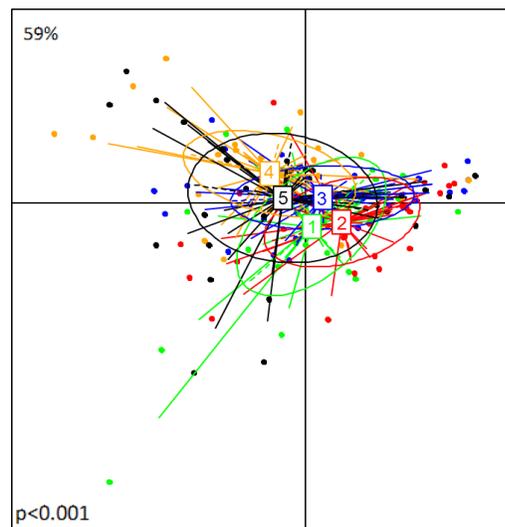
**Figura 3-28:** Dispersión de los diferentes usos de suelo evaluados en el plano factorial del ACP, con relación a los diferentes grupos de macrofauna encontrados.



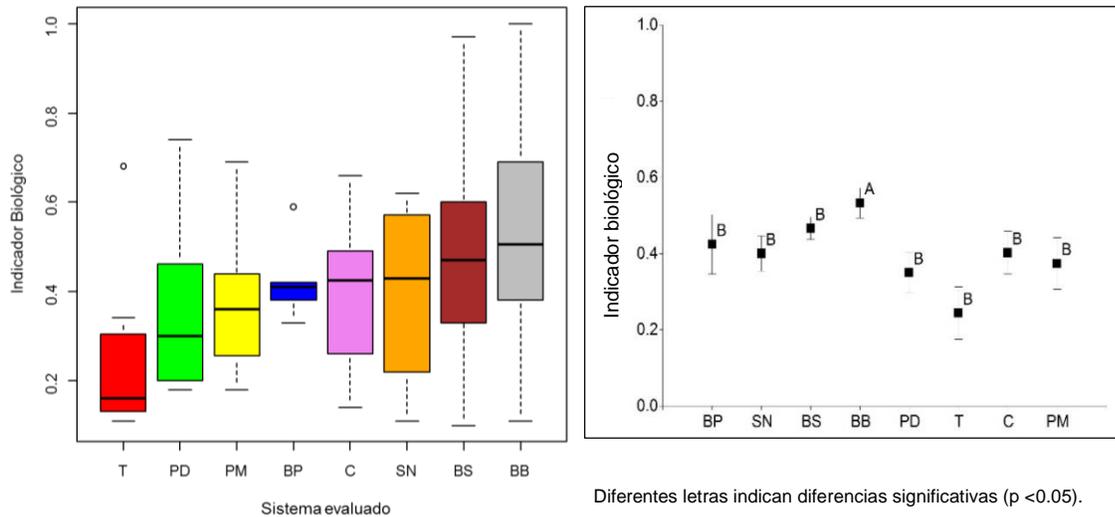
Se puede observar un gradiente de la diversidad y la abundancia de los bosques a bordes de bosque, pasturas mejoradas, caucho y sabana nativa a las más intervenidas pasturas degradadas y cultivos transitorios.

Una vez realizada la prueba de Montecarlo, se observó una separación significativa ( $p < 0.001$ ) de los puntos de muestreo ubicados en bosques (4 y 5) los demás puntos evaluados (1, 2 y 3) explicando el 59% de la variabilidad debida a las comunidades de macrofauna encontrada (Figura 3-29).

**Figura 3-29:** Dispersión de los puntos de muestreo dentro de los transectos en los ejes 1 y 2 del ACP.



Siguiendo el mismo análisis referido anteriormente, se desarrolló el indicador biológico para los sistemas de producción evaluados. Los sistemas intervenidos transitorios, pasturas degradadas y mejoradas presentaron los valores más bajos del indicador biológico, los sistemas con poca intervención sabana nativa, bosque secundario y borde de bosque los valores más altos, éste último sistema presentó diferencias significativas con respecto a los demás usos evaluados (Figura 3-30).

**Figura 3-30:** Indicador biológico generado en los sistemas de uso evaluados.

Bosque primario, BP (n=30); bosque secundario, BS (n=6); sabana nativa, SN (n=18); borde de bosque, BB (n=30); pastura degradada, PD (n=14); pastura mejorada, PM (n=8); transitorios, T (n=8) y caucho, C (n=12).

El análisis de varianza del indicador biológico no mostró diferencias significativas entre los puntos (Anexo I), ni entre las fincas independientemente de su ubicación (Anexo J) las fincas y entre las localidades evaluadas.

### 3.4. Variables morfológicas (Macroagregación)

En promedio, el 82.6% del volumen del suelo no estaba macro agregado. De la masa total del suelo los agregados biogénicos contribuyeron al 80.8% mientras los agregados físicos aportaron el 17.2%. Las pasturas mejoradas en promedio, obtuvieron el porcentaje más alto de agregados biogénicos asociados a la macrofauna con un 22.7%. El porcentaje más alto de agregados físicos se obtuvo en plantaciones de caucho con el 45.6%, los sistemas de pastura mejorada y bosque primario no presentaron éste tipo de agregados (Tabla 3-9). La pastura degradada presentó el porcentaje más alto de suelo sin agregar con el 18.5% mientras que el bosque primario presentó el valor más bajo con el 5.9%

**Tabla 3-9:** Descripción estadística de la macroagregación del suelo discriminada en agregados biofísicos (AB), agregados de raíces (AR), agregados físicos (AF) y suelo sin agregar (SSA).

|            | PASTURA MEJORADA |          |       | PASTURA DEGRADADA |          |       | CAUCHO |          |       | TRANSITORIOS |          |       |
|------------|------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|--------|----------|-------|--------------|----------|-------|
|            | Med              | Ran      | Des   | Med               | Ran      | Des   | Med    | Ran      | Des   | Med          | Ran      | Des   |
| <b>AB</b>  | 892.6            | (0-1428) | 506.8 | 531.4             | (0-1094) | 454.2 | 435.5  | (0-1461) | 564.4 | 661.8        | (0-1265) | 489.4 |
| <b>AR</b>  | 0.00             | (0-0)    | 0.0   | 0.0               | (0-0)    | 0.0   | 85.4   | (0-1025) | 295.8 | 0.0          | (0-0)    | 0.0   |
| <b>AF</b>  | 0.00             | (0-0)    | 0.0   | 50.0              | (0-700)  | 187.0 | 358.5  | (0-1383) | 582.5 | 143.2        | (0-1146) | 405.1 |
| <b>SSA</b> | 292.5            | (0-981)  | 357.3 | 539.2             | (0-1544) | 550.4 | 267.6  | (0-1169) | 433.3 | 357.3        | (0-1207) | 417.3 |

Med\*: Media, R\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

|            | BOSQUE PRIMARIO |         |       | BOSQUE SECUNDARIO |          |       | BORDE DE BOSQUE |          |       | SABANA NATIVA |          |       |
|------------|-----------------|---------|-------|-------------------|----------|-------|-----------------|----------|-------|---------------|----------|-------|
|            | Med             | Ran     | Des   | Med               | Ran      | Des   | Med             | Ran      | Des   | Med           | Ran      | Des   |
| <b>AB</b>  | 276.3           | (0-513) | 239.7 | 251.5             | (0-1277) | 364.6 | 411.2           | (0-1429) | 508.0 | 470.5         | (0-1180) | 484.1 |
| <b>AR</b>  | 2.8             | (0-17)  | 6.9   | 2.0               | (0-72)   | 10.6  | 9.1             | (0-117)  | 28.3  | 1.6           | (0-30)   | 7.0   |
| <b>AF</b>  | 0.0             | (0-0)   | 0.0   | 51.1              | (0-831)  | 173.6 | 71.9            | (0-1085) | 253.2 | 110.0         | (0-655)  | 224.3 |
| <b>SSA</b> | 171.6           | (0-468) | 201.0 | 469.6             | (0-1386) | 406.7 | 476.1           | (0-1324) | 469.2 | 327.2         | (1394)   | 477.3 |

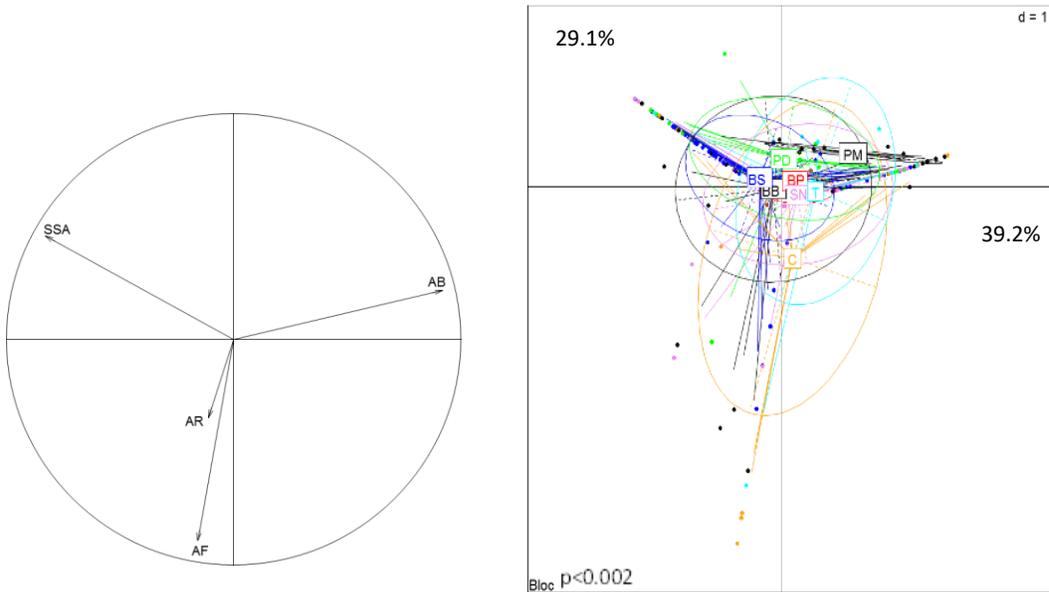
Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

### 3.4.1. Indicador morfológico

En el ACP (Figura 3-31), se puede observar la separación de dos sistemas, en el primer componente (F1, 39.2%) se encuentran las pasturas mejoradas los cuales se relacionan con los agregados biogénicos y en el segundo componente (F2, 29.1%) opone las plantaciones de caucho los cuales favorecen agregados físicos. Igualmente se mostró un agrupamiento entre los transitorios (T), sabana nativa (SN), bosque primario (BP), bosque secundario (BS), borde de bosque (BB) y pastura degradada (PD) con una tendencia hacia el suelo sin agregar, pero, debido a una variabilidad relativamente alta en cada grupo, no mostró diferencias significativas.

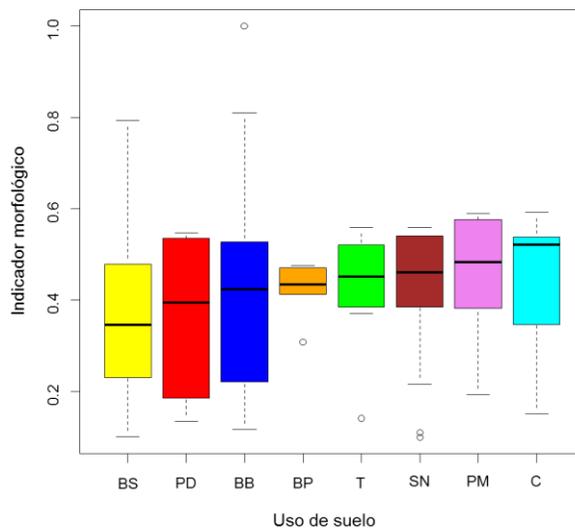
Luego de realizar la prueba de Montecarlo para puntos de muestreo y fincas, se encontró una explicación muy baja de la variabilidad debida a las características morfológicas de tan solo 5% y 8% respectivamente.

**Figura 3-31:** Circulo de correlación de las variables asociadas con la morfología del suelo: Agregados biogénicos (AB), agregados de raíz (AR), agregados físicos (AF) y suelos sin agregar (SSA) y su comportamiento en los diferentes usos evaluados.



Las plantaciones de caucho y las pasturas mejoradas mostraron los valores promedio más altos para el indicador morfológico, los valores más bajos se observaron en los bosques secundarios y pasturas degradadas (Figura 3-32) sin diferencias significativas entre ellos.

**Figura 3-32:** Valores promedios del indicador morfológico en los diferentes sistemas evaluados.



Se realizó un análisis de varianza entre los puntos de muestreo, entre las fincas y entre las localidades evaluadas sin encontrar diferencias significativas.

### 3.5. Variables de calidad de agua

Las concentraciones promedio más altas de nitratos, nitritos y fosfatos se presentaron en las fincas con menos intervención (CARIM, CAMER y CAPAJ), pero con concentraciones muy por debajo de las permitidas por los reglamentos del sector de agua potable. Lo contrario ocurre con los microorganismos evaluados (coliformes totales y Escherichia Coli), en donde los valores más elevados se encontraron en las fincas con mayor intervención (PLSC, PLLC y PLAN) por encima del 100% con respecto a las fincas ubicadas en la zona con menor intervención. La finca que presentó el valor más alto de oxígeno disuelto fue CAMER ubicada en la zona con menor intervención, con un valor promedio de 6.78 mg/l, y el valor más bajo lo presentó la finca PLLC ubicada en la zona con mayor intervención (Tabla 3-10).

**Tabla 3-10:** Descripción estadística de las variables fisicoquímicas y microbiológicas relacionadas con la calidad del agua en fincas seleccionadas.

|                                    | PLSC  |               |       | PLLC   |               |        | PLAN   |               |        |
|------------------------------------|-------|---------------|-------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|
|                                    | Med   | Ran           | Des   | Med    | Ran           | Des    | Med    | Ran           | Des    |
| <b>Nitratos (ppm)</b>              | 1.74  | (1.60-2.14)   | 0.23  | 1.58   | (1.35-1.70)   | 0.13   | 1.64   | (1.50-1.86)   | 0.15   |
| <b>Nitritos (ppm)</b>              | 0.15  | (0.06-0.26)   | 0.09  | 0.27   | (0.07-0.62)   | 0.22   | 0.10   | (0.03-0.26)   | 0.10   |
| <b>Amonio (ppm)</b>                | 0.65  | (0.49-0.83)   | 0.15  | 0.72   | (0.27-0.98)   | 0.30   | 0.54   | (0.14-1.09)   | 0.41   |
| <b>Fosfatos (ppm)</b>              | 0.11  | (0.01-0.35)   | 0.14  | 0.03   | (0.003-0.084) | 0.03   | 0.03   | (0.013-0.036) | 0.01   |
| <b>Coliformes totales (100 ml)</b> | 2967  | (1450-4106)   | 985.7 | 3074.8 | (1789-5172)   | 1406.6 | 4181.8 | (2613-6131)   | 1321.8 |
| <b>Escherichia</b>                 | 142.4 | (75-238)      | 61.95 | 132.40 | (10-199)      | 76.72  | 149.60 | (51-213)      | 71.07  |
| <b>DO (mg/l)</b>                   | 5.01  | (4.37-5.81)   | 0.59  | 4.05   | (1.54-5.78)   | 1.88   | 5.62   | (4.27-6.93)   | 1.00   |
| <b>Temperatura (°C)</b>            | 24.56 | (24.36-24.96) | 0.24  | 26.15  | (26.00-26.53) | 0.24   | 25.48  | (24.53-26.33) | 0.67   |
| <b>pH</b>                          | 5.79  | (5.23-6.12)   | 0.34  | 5.86   | (4.94-6.36)   | 0.55   | 6.23   | (5.91-6.40)   | 0.20   |
| <b>CE</b>                          | 0.73  | (0.00-2.00)   | 0.76  | 0.67   | (0.00-3.33)   | 1.49   | 0.27   | (0.00-1.00)   | 0.43   |

Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

DO: Oxígeno disuelto, CE: Conductividad eléctrica.

Tabla 3-10: (Continuación)

|                                | CARIM  |               |       | CAMER  |               |       | CAPAJ  |               |        |
|--------------------------------|--------|---------------|-------|--------|---------------|-------|--------|---------------|--------|
|                                | Med    | Ran           | Des   | Med    | Ran           | Des   | Med    | Ran           | Des    |
| Nitratos (ppm)                 | 1.82   | (1.57-2.21)   | 0.26  | 1.75   | (1.44-2.20)   | 0.30  | 2.84   | (1.43-7.14)   | 2.44   |
| Nitritos (ppm)                 | 0.31   | (0.21-0.37)   | 0.06  | 0.18   | (0.06-0.30)   | 0.12  | 0.32   | (0.09-0.51)   | 0.19   |
| Amonio (ppm)                   | 0.65   | (0.45-0.83)   | 0.14  | 0.74   | (0.44-1.31)   | 0.35  | 0.48   | (0.16-1.12)   | 0.38   |
| Fosfatos (ppm)                 | 0.05   | (0.01-0.07)   | 0.03  | 0.13   | (0.03-0.28)   | 0.10  | 0.04   | (0.003-0.11)  | 0.05   |
| Coliformes<br>totales (100 ml) | 1232.4 | (203-2224)    | 782.6 | 1088.6 | (959-1374)    | 163.8 | 2080.4 | (512-3873)    | 1675.7 |
| Escherichia                    | 49.60  | (1-122)       | 48.37 | 130.0  | (52-213)      | 77.03 | 77.60  | (1-146)       | 70.44  |
| DO (mg/l)                      | 4.64   | (4.37-5.05)   | 0.29  | 6.78   | (6.36-7.17)   | 0.36  | 4.15   | (3.47-4.62)   | 0.45   |
| Temperatura<br>(°C)            | 25.51  | (25.26-26.03) | 0.31  | 26.25  | (25.80-26.46) | 0.30  | 26.25  | (25.80-26.46) | 0.30   |
| pH                             | 5.61   | (4.07-6.02)   | 0.56  | 5.74   | (5.24-5.95)   | 0.29  | 5.02   | (4.11-5.31)   | 0.51   |
| CE                             | 0.00   | (0.00-2.00)   | 0.00  | 0.33   | (0.00-1.33)   | 0.58  | 3.93   | (0.00-17.33)  | 7.50   |

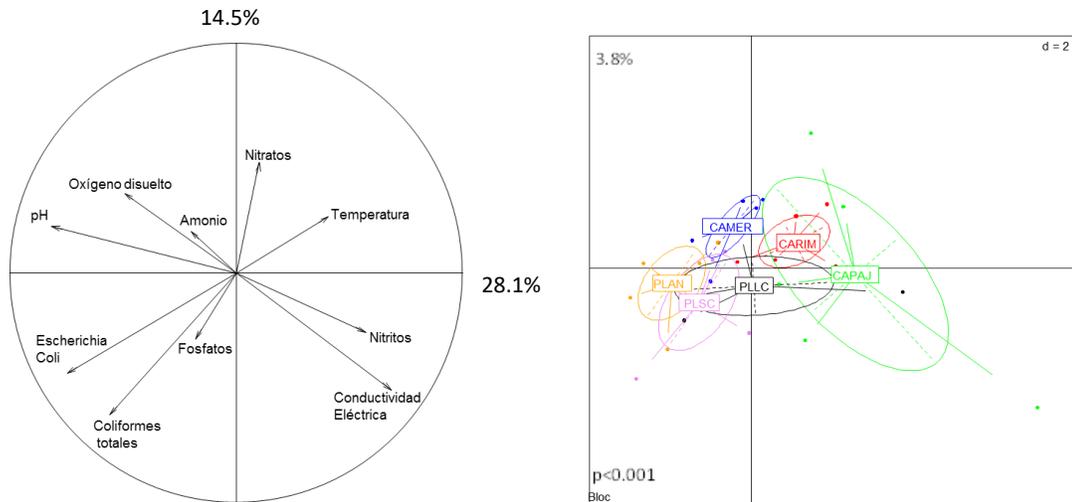
Med\*: Media, Ran\*\*: Rangos, Des\*\*\*: Desviación estándar

DO: Oxígeno disuelto, CE: Conductividad eléctrica.

### 3.5.1. Indicador de calidad de agua

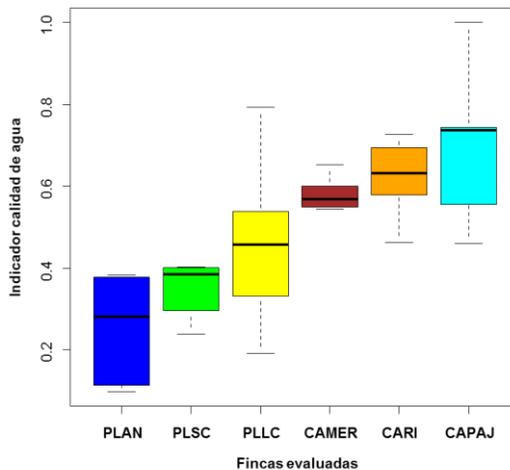
Para desarrollar éste indicador, se integraron diez de las doce variables fisicoquímicas y microbiológicas seleccionadas, se eliminaron la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) ya que, para este caso en específico, los valores se encuentran sobre el límite de detección 2 y 10 mg /l., lo que indica que son aguas poco contaminadas y mostraron poca relevancia en el ACP. Al igual que los indicadores anteriores, se desarrolló primero el círculo de correlaciones; el primer componente explicó la variabilidad en un 28.1% y el segundo componente, en un 14.5%, sumando entre los dos un 42.6%, explicando la variabilidad debida al comportamiento de los datos correspondientes a la calidad de agua. El círculo de correlaciones separa las fincas significativamente ( $p < 0.001$ ) por las variables más importantes, por una parte el oxígeno disuelto asociado al predio CAMER y los microorganismos asociados a los predios PLAN y PLSC. El componente 2, opone a los coliformes totales y los fosfatos con los nitratos (Figura 3-33).

**Figura 3-33:** Proyección de las fincas seleccionadas en el plano factorial F1 y F2 del ACP.



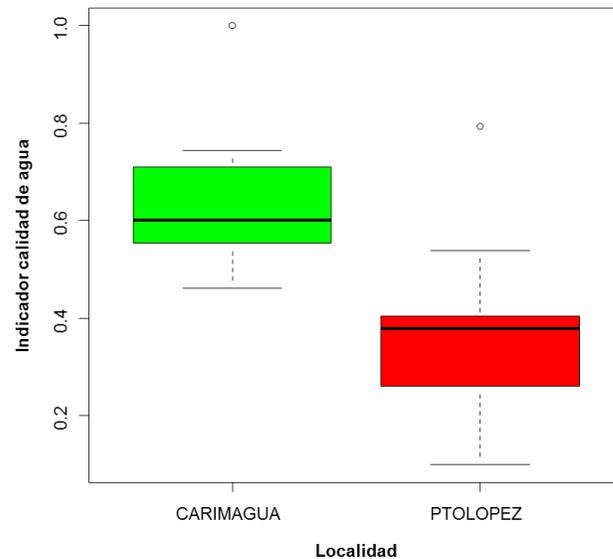
Posteriormente se se generó el indicador de calidad de agua para las fincas y localidades evaluadas. Las fincas CAMER, CARI y CAPAJ ubicadas en la zona de menos intervención, presentaron los valores del indicador más alto, por el contrario las fincas PLAN, PLSC y PLLC ubicadas en la zona de mayor intervención presentaron los valores mas bajos del indicador (Figura 3-34). Después de realizar un análisis de varianza, se encontraron diferencias significativas entre el predio CAPAJ ubicado en la zona más intervenida y el predio PLAN en la zona con mayor intervención (Anexo K).

**Figura 3-34:** Valores promedios del indicador de calidad de agua en las diferentes fincas evaluadas.



El indicador de calidad de agua para las localidades presentó diferencias significativas entre ellas según el análisis de varianza (Anexo L), con los valores más altos del indicador en la zona menos intervenida (Figura 3-35).

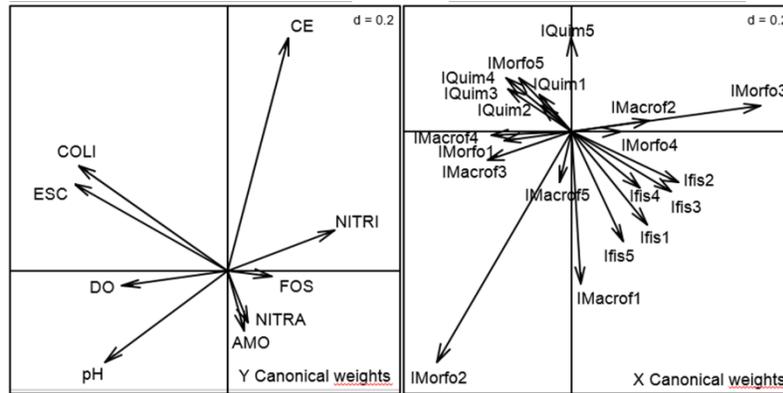
**Figura 3-35:** Valores promedios del indicador de calidad de agua en las dos localidades evaluadas.



### 3.6. Relación entre los indicadores generados y las variables de calidad de agua

El test de Montecarlo del análisis de Colnercia no fue significativo ( $p = 0.09$ ). Los dos primeros ejes del análisis de Colnercia explicaron el 37.6% y 12.6% de la estructura común compartida por las matrices de los indicadores y los parámetros de calidad del agua. En el primer eje (F1), las variables que mostraron una significativa contribución fue el indicador morfológico en el punto tres (borde de bosque) el cual se relaciona con los contenidos de nitritos y se opone a los contenidos de oxígeno disuelto (DO). En el segundo eje (F2) sorprende que el indicador químico se relacione más con la contaminación biológica causada por E. Coli y coliformes totales que con los parámetros químicos evaluados en agua (nitratos, nitritos y fosfatos) los cuales están mas relacionados con los indicadores físicos calculados (Figura 3-36).

**Figura 3-36:** Gráfica de Colnercia entre los parámetros de calidad de agua y los indicadores generados.



Se realizaron Colnercias individuales entre cada indicador y las variables de calidad de agua con el fin de encontrar tendencias entre ellos. De los cuatro indicadores generados, sólo el de morfología presentó diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) (Tabla 3-11), el componente F1 explicó la variabilidad en un 21.9% y el componente F2, en un 5.8%, para un total de 27.7% de la estructura común compartida por las matrices del indicador morfológico y los parámetros de calidad del agua.

**Tabla 3-11:** Relaciones de Colnercia entre cada indicador y las variables de calidad de agua.

| Relación de Colnercia                   | Valor observado | P. Value | Significancia |
|---|-----------------|----------|---------------|
| Indicador de fertilidad vs agua         | 0.24 (24%)      | 0.099    | ns            |
| Indicador de funciones hídricas vs agua | 0.07 (7%)       | 0.778    | ns            |
| Indicador biológico vs agua             | 0.23 (23%)      | 0.097    | ns            |
| Indicador morfológico vs agua           | 0.33 (33%)      | < 0.001  | **            |

### 3.7 Discusión

#### 3.7.1. Indicador de fertilidad de suelos

El indicador de fertilidad generado se relaciona con las variables químicas necesarias para evaluar y comparar la modificación de dichos componentes presentes originalmente en el material parental, a través de su uso y manejo las cuales repercuten en la

capacidad de retención y disponibilidad de agua en el suelo, así como la disponibilidad de nutrientes para las plantas (SQI, 1996).

En general los suelos mostraron una fuerte acidez y alta saturación de aluminio mayor del 70% en suelos con sistemas no intervenidos que puede limitar la disponibilidad de nutrientes para las plantas, esta condición es característica para éste tipo de suelos generalmente Oxisoles, causado por procesos avanzados de meteorización y lixiviación, como resultado de las altas precipitaciones y permeabilidad lo cual puede causar pérdidas de bases, favoreciendo la acumulación de Al y Fe. Amézquita et al. (2004), cita como principal limitante del suelo para la producción agrícola y de pastos en la altillanura plana, la alta concentración de aluminio y la poca disponibilidad de nutrientes.

El porcentaje de saturación de aluminio se redujo en un 41% en los sistemas intervenidos con relación a los poco intervenidos, pero con valores altos que superaban el 50%.

El almacenamiento de carbono en los cultivos transitorios y pasturas mejoradas fue un 53.6% y 58.3% menor respectivamente con relación a los valores encontrados en bosque primario, corroborando la capacidad de los bosques para almacenar carbono en el suelo lo cual los convierte en una opción para reducir la contaminación por CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Estudios realizados en tres países, mostraron que las pasturas degradadas fueron el uso de la tierra que almacenó menos carbono total en suelo. En contraste, los bosques secundarios medidos en Costa Rica y Nicaragua y los bosques riparios en Colombia fueron los usos de la tierra con el mayor contenido de carbono total (Ibrahim M, et al. 2007).

Este comportamiento mostrado por los bosques se repitió con los contenidos de materia orgánica, los cuales descendieron drásticamente en un 77% en suelos con mayor uso como los sistemas transitorios en comparación con los bosques primarios y un 63% con respecto a los bosques secundarios, posiblemente por efecto de la mecanización excesiva la cual acelera el proceso de oxidación y mineralización de la materia orgánica. La prueba de permutación en el conjunto de datos químicos que compara los puntos de muestreo según los usos, separa significativamente a lo largo del eje uno, los sistemas de bosques (primario y secundario) de los demás. Los puntos muestreados presentaron un claro gradiente de fertilización que disminuye al acercarse a los sistemas de bosque, sin embargo, puede existir transporte de elementos químicos desde los sistemas donde se utilizan más fertilizantes como los transitorios hacia las fuentes de agua favorecida principalmente por la pendiente, la compactación y procesos de escorrentía.

En el análisis estadístico realizado entre las fincas, se observa la separación de CARIM en un extremo y PLLC en el otro, dado principalmente por la intensificación agrícola. CARIM presenta los sistemas menos intervenidos correspondientes al bosque primario y secundario bordeados de sabana nativa, por el contrario, PLLC presentaba los sistemas más intervenidos con pasturas mejoradas (Humidicola CIAT 679 y Humidicola cv Llanero CIAT 6133) y cultivos transitorios de maíz (ICA V 156) y soya (Panorama 29). Las diferencias encontradas en los valores del indicador de fertilidad son dadas principalmente por la adición de enmiendas químicas, generalmente cal dolomita y fertilizantes necesarios para el establecimiento de un sistema productivo, debido a la baja disponibilidad de nutrientes causado por un lavado continuo del perfil a través del tiempo. Los transitorios no presentaron diferencias significativas en el indicador de fertilidad comparado con los demás sistemas intervenidos, ya que eran cultivos establecidos recientemente y aún no presentaban las fertilizaciones posteriores para su producción. En la finca PLAN realizaron la primera fertilización el mismo día que terminamos el muestreo, sin embargo, el valor del indicador superó los sistemas no intervenidos muy seguramente por la presencia de residuos de las siembras anteriores que igualmente correspondieron a cultivos de soya y maíz.

### **3.7.2. Indicador de funciones hídricas**

Este estudio corroboró la importancia de evaluar las características físicas del suelo para determinar la calidad de éste recurso. La calidad física del suelo se relaciona con el almacenamiento y disponibilidad del agua y nutrientes (Navarro et al., 2008). La vocación del suelo y las prácticas de manejo necesarias se pueden inferir con la ayuda de los indicadores y de la medición de los atributos fundamentales en el suelo (Carter, 2002).

Los datos más altos de densidad aparente se encontraron en los usos de suelo en pastoreo (pastura mejorada) y uso de maquinaria (caucho y transitorios). Valores de densidad aparente superiores a  $1,0 \text{ g/cm}^3$  fueron encontrados en suelos con pisoteo excesivo de animales en pastoreo y la utilización de maquinaria pesada disminuyendo el espacio poroso, aumentando la compactación y los procesos de escorrentía, siendo mayor en estos suelos que presentan bajo contenido de materia orgánica. Los valores de resistencia a la penetración corroboran éstos resultados, los datos más altos se presentaron en las pasturas ( $>9 \text{ Kg.f/cm}^2$ ) y los cultivos transitorios ( $8.7 \text{ Kg.f/cm}^2$ ). Noguera et al (2011) menciona que actividades como pisoteo por ganado y uso excesivo

de maquinaria, pueden causar efectos negativos como el aumento en la densidad aparente y la disminución de la porosidad, lo cual dificulta la difusión de aire y agua por tal razón no le permite a las raíces la exploración en el suelo, disminuyendo considerablemente su productividad. Los lotes destinados para la instalación de pasturas mejoradas en los predios evaluados, iniciaron con el establecimiento previo de arroz línea 30 tolerante a la acidez, para posteriormente realizar una rotación con soya, este uso constante puede incrementar los valores de densidad aparente a medida que aumenta el tiempo de uso de los lotes.

El bosque primario presentó diferencias significativas en el indicador de función hídrica con respecto a los demás sistemas evaluados, debido a su alta capacidad de almacenamiento de agua generada por una baja densidad aparente y mayor cantidad de macro y mesoporos que dan como resultado una alta porosidad total (>70%). La mayor parte de la actividad biológica del suelo, como el crecimiento de las raíces se da en los macroporos, los cuales son también responsables del flujo de agua y aire estando relacionados con la infiltración, la conductividad y drenaje del agua. Por otro lado, los mesoporos están relacionados con la retención del agua, la difusión de nutrientes en el suelo, comportamiento de las bacterias y los hongos, pelos absorbentes y pequeñas raíces laterales (Freitas y Blancaneaux, 1994, citado por Aristizabal et al., 1999).

Al respecto Amezcuita et al. (1998), en un estudio realizados sobre el efecto del bosque sobre las propiedades físicas del suelo, encontró valores de porosidad total altas (>70%), así como la reducción de las pérdidas de suelo y agua, en comparación con las originadas en suelos desnudos que presentaron pérdidas de suelo, agua y disminución de la porosidad. Otros estudios han relacionado la pérdida de porosidad hasta un 30% cuando se cambia el sistema de bosque a cultivos transitorios o pasturas debido a la reducción de los aportes orgánicos al suelo.

Si bien es indiscutible la necesidad de enmiendas y fertilizantes que permitan mejorar la nutrición de estos suelos para la producción agrícola, es necesario implementar una labranza profunda que favorezca el movimiento descendente de éstos elementos, disminuyendo la saturación de aluminio, favoreciendo la infiltración y evitando la escorrentía la cual sirve de transporte de sustancias contaminantes a las corrientes de agua.

### 3.7.3. Indicador biológico

Este indicador es de vital importancia dada su sensibilidad a los cambios en las funciones del suelo, dadas principalmente a las actividades del hombre y a prácticas agronómicas. Se considera importante monitorearlos porque estos indicadores biológicos responden más rápidamente a cambios en el manejo o en las condiciones ambientales que los indicadores físicos y químicos.

Los cultivos transitorios presentaron un contundente descenso en la densidad de población de macroinvertebrados con respecto a los demás sistemas evaluados, este comportamiento favoreció que presentara el valor más bajo del indicador biológico. Al respecto Rivera et al. (2013) describe como elementos responsables, la aplicación de productos químicos y la inadecuada labranza, lo cual repercute en la producción de raíces y la modificación de microclimas, lo cual ocurren después de quitar la vegetación nativa. Este detrimento de la abundancia de las comunidades de macrofauna del suelo bajo cultivos anuales resulta inevitablemente en la pérdida de algunas funciones importantes en el suelo (Lavelle, 1996, Giller et al., 1997 citado por Rivera et al., 2013). Estudios realizados en Cuba por Grisel de la C (2014) sobre cultivos anuales, mostraron que:

“El deterioro progresivo de algunas propiedades del suelo como la materia orgánica por una entrada menor e irregular de hojarasca al sistema y retiro de los rastrojos de la superficie. Incremento de la erosión debido al aumento de la compactación y a una baja capacidad de retención de agua en el suelo, así como a la contaminación por productos químicos. Estos ambientes simplificados, que no incluyen diversidad en la vegetación, disminuyen las fuentes de alimentos, hábitat y reproducción para la macrofauna benéfica y aumenta la probabilidad de colonización de organismos herbívoros-plagas”.

Los bosques tanto primarios como secundarios no presentaron diferencias significativas en el indicador de biológico con la mayoría de sistemas intervenidos probablemente por los altos niveles de humedad que presentaba el suelo al momento de tomar las muestras, ante los cual las comunidades edáficas disminuyen ya que salen a la superficie o migran a estratos profundos del suelo, en busca de micro-ambientes más apropiados para su establecimiento (Grisel de la C. et al. 2018). Por otro lado, los bosques presentaron la

mayor abundancia de termitas ya que se reconocen por su acción de agentes biológicos que atacan la madera e intervienen en la descomposición de la materia orgánica, ambos elementos presentes en éstos tipos de sistemas. Estudios realizados por T. Decaëns et al. (2001), en bosques de galería en la zona de Carimagua, atribuye en gran parte la diversidad taxonómica alta de las comunidades de macroinvertebrados en estos sistemas a la variedad de microhábitats, de hojarasca, troncos descompuestos y corteza de los árboles. La sabana nativa presentó el valor más alto para la población de lombrices, corroborando así los resultados encontrados por T. Decaëns et al. (2001) en las sabanas nativas o manejadas de Carimagua en donde las lombrices fueron el componente predominante de la macrofauna del suelo. Las termitas, las hormigas y las lombrices son, generalmente, los integrantes dominantes de las comunidades de macrofauna en los bosques y las sabanas nativas.

### **3.7.4. Indicador morfológico**

Los constituyentes elementales del suelo no se encuentran aislados, sino que se encuentran unidos entre sí formando agregaciones. Dentro de este grupo de agregaciones, se encuentran los agregados biogénicos los cuales son estructuras generadas por organismos que manifiestan la capacidad de estructurar físicamente el medio en el cual viven, a estos organismos se les conoce como “ingenieros del ecosistema”. De las innumerables formas de vida que habitan los suelos, sólo una pequeña población de macroinvertebrados (hormigas, lombrices y termitas) tienen la capacidad de formar estos tipos de agregados a través de sus deyecciones, nidos, montículos, galerías y cámaras, las cuales influyen en la agregación, las propiedades hidráulicas y la dinámica de la materia orgánica del suelo. Si bien la sabana nativa presentó mayor número de lombrices, la pastura mejorada tuvo una relación más alta entre lombrices y termitas lo que permitió que tuviera el porcentaje más alto de agregados biogénicos comparado con los demás usos evaluados, pero sin diferencias significativas. Estudios realizados por Six, J. et al (2004) mostraron que los suelos que tienen vegetación nativa como pastizales presentan, por lo general, una mayor diversidad biológica beneficiando características del suelo como la estructura, en comparación con los suelos con plantas cultivadas. Cabe resaltar la ausencia de agregados de raíces en los sistemas transitorios, reafirmando la estrecha relación entre el manejo agronómico dado a los suelos especialmente cuando se realiza una labranza inadecuada y el

crecimiento de las raíces y afectando su relación con la formación de agregados del suelo (Ramírez et al., 2006). Sin importar la especie de macroinvertebrados y su tamaño, cada uno de ellos conservan en equilibrio la agregación del suelo, esta estrecha relación entre macrofauna y agregación se corrobora en los resultados obtenidos ya que los sistemas que presentan mayor suelo sin agregar correspondientes a pasturas degradadas y cultivos transitorios, fueron dos de los sistemas que presentaron menor abundancia de macroinvertebrados.

### **3.7.5. Calidad del agua**

Antes de realizar el análisis de las respectivas variables de calidad de agua, se retiraron del juego de datos las variables de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) ya que, para este caso en específico, los valores se encuentran sobre el límite de detección 2 y 10 mg /l., lo que indica que son aguas poco contaminadas y mostraron poca relevancia en el ACP. Las condiciones de la calidad del agua están dadas por sus características físicas, químicas y biológicas, las cuales se ven afectadas por los procesos de alteración relacionados con actividades antrópicas o naturales en las que se ven involucrados agentes contaminantes que son aportados al recurso hídrico (IDEAM, 2019). Se encontraron diferencias significativas en la calidad del agua entre las dos localidades estudiadas, estas están dadas principalmente por los valores encontrados de oxígeno disuelto (OD) y contaminantes biológicos, estos factores son dos de los indicadores más empleados para medir la calidad del agua. Concentraciones de OD menores a 5 mg/l afectan la diversidad biológica de los cuerpos de agua y valores menores a 2 mg/l causan la muerte de la mayoría de los peces, afectando además indicadores estéticos como el olor, la claridad del agua y el sabor. En uno de los predios PLLC ubicado en la zona de mayor intervención, se encontraron en uno de los cinco puntos de muestreo valores de OD de 1.54 mg/l, esta disminución específica para este tramo posiblemente puede estar relacionada con la disminución de la velocidad promedio del caudal en la época de realizado el muestreo, aspectos que limitan la capacidad de dilución, reaireación y autodepuración del afluente. Otra causa posible para la reducción en el oxígeno pudo ser por la sobrefertilización o adición de fertilizantes especialmente nitratos y fosfatos, desde los sistemas productivos por escorrentía a las corrientes de agua. Bajo estas condiciones, el número y el tamaño de las plantas acuáticas aumentan en gran cantidad. Entonces, si el agua llega a estar turbia

por algunos días, la respiración de las plantas utilizará mucho del oxígeno disuelto disponible. Cuando estas plantas mueran, llegarán a ser comida por bacterias, las cuales tendrán alta multiplicación y usaran grandes cantidades de oxígeno (Lenntech, 2020). Aunque los rangos de nitratos y fosfatos no superan los límites permisibles (10 mg/l y 0.5 mg/l respectivamente), según la resolución 2115 en su capítulo 2, artículo 6 del Ministerio de Protección Social (2007), si son considerados valores significativos para contaminación de aguas, estudios realizados por Huang, et al (2013), en la cuenca del lago Chaohu, encontraron relaciones negativas entre el fósforo total y el nitrógeno total con respecto a la calidad del agua, los cuales por procesos de escorrentía, fluirán hasta las corrientes de agua alterando su calidad.

Por otro lado, los nitritos son un ion inestable cuya oxidación a nitrato en el agua se produce fácilmente, considerándose un estado intermedio de oxidación de los compuestos del nitrógeno. Generalmente las concentraciones de éste en el agua son mínimas. Debido a que posee una carga negativa es repelido por las partículas del suelo, las cuáles también se encuentran cargadas negativamente, generándose una situación que permite su introducción al agua subterránea (Díaz, F. 1985). Según la resolución 2115 de 2007 del ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial en su artículo 6 “Características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana” relaciona para nitritos un valor aceptable de 0.1 ppm, todos los predios evaluados superan por poco este valor. Como se mencionó anteriormente, otro factor que marcó la diferencia en los resultados de calidad de agua entre las localidades fueron los microorganismos: Coliformes totales y *Escherichia Coli*, están íntimamente relacionados con contaminación fecal tanto por animales como por humanos debido a la cercanía a las fuentes de agua y mal manejo de los desechos procedentes de las viviendas. La diferencia observada entre las regiones, está dada principalmente por el sistema de ganadería implementado, mientras en Carimagua predominan las pasturas de sabana nativa, bajo una ganadería extensiva causada por la baja calidad del forraje nativo con una carga animal que por lo general no supera los dos animales por hectárea, por el contrario, Puerto López presenta pasturas introducidas con un manejo más tecnificado que permite mayor carga animal. Lo anterior lo corroboran estudios realizados por Dorian y Linn (1979) donde encontraron que la escorrentía proveniente de suelos bajo pasturas contiene concentraciones de bacterias fecales que normalmente superan el límite permitido tan solo para aguas de riego. Al respecto Lowrance et al (2002), atribuye al pastoreo intensivo serios problemas de degradación de

suelos afectando considerablemente la vegetación riparia, reduciendo la infiltración incrementando la escorrentía y por ende la cantidad de sedimentos que se arrastran hacia los cauces. Sin embargo estudios realizados por Huang, et al (2013) en China mostraron una relación positiva entre el uso de suelo de pastizales y la calidad del agua en la cuenca del lago Chaohu, este uso redujo efectivamente las sales nutritivas que el escurrimiento superficial trae al río, ya que juegan un papel importante en la reducción del escurrimiento superficial, conservando el agua y el suelo, y absorbiendo los contaminantes, pero éste estudio no menciona el estado de las pasturas ni el manejo dado que permita obtener dicha condición. En términos generales, los resultados obtenidos reflejan una contaminación actual con excretas, ya que los coliformes se localizan principalmente en animales de sangre caliente y tienen la capacidad de sobrevivir solo por periodos breves de tiempo en los afluentes (Sardiñas et al., 2006).

Aunque se pudo evidenciar un descenso promedio en las concentración de coliformes totales del 39% entre los puntos evaluados en la zona menos intervenida con respecto a la más intervenida, estos valores se encuentran por debajo de los rangos permitidos por las leyes colombianas según el decreto 1594 de 1984, capítulo IV, en su artículo 38, donde hace referencia a “los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y doméstico, e indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional” un número más probable (NMP) de 20.000 microorganismos en 100 ml, el valor más alto encontrado correspondió a 6131 microorganismos en 100 ml ubicado en el último punto de la finca PLAN.

Lo contrario ocurrió con los valores encontrados de *Escherichia coli*, las diferencias encontradas fueron del 56% en las aguas superficiales de la zona menos intervenida comparada con los datos encontrados en aguas de Puerto López, esta disminución no cumple con lo estipulado en la resolución 2115 de 2007 del ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, en su artículo 11, parágrafo 2, donde menciona “Ninguna muestra de agua para consumo humano debe contener *E.coli* en 100 cm<sup>3</sup> de agua, independientemente del método de análisis utilizado”, el valor máximo encontrado de unidades formadoras de colonias (UFC) de *E. coli* encontrado en éste estudio fue de 238 UFC en el predio PLSC en su primer punto. En términos generales, el sistema de ganadería extensivo y su cercanía a los afluentes representando generan impactos fisicoquímicos crecientes en la calidad del agua de la zona y las

diferencias encontradas entre las localidades están dadas por su grado de intensificación.

Para determinar la calidad de agua superficial, es necesario conocer la dinámica del recurso hídrico para establecer el comportamiento de su cauce y de ésta manera cuantificar las concentraciones de los nutrientes en condiciones de temporalidad y espacio, ya que los resultados presentados corresponden a muestras puntuales, que representan la condición de ese cuerpo de agua en el momento de la toma de la muestra. Estos resultados nos indican el posible efecto de los usos de suelo sobre el cauce.

### **3.7.6. Relación de los indicadores con respecto a las variables de calidad del agua**

La pendiente del terreno es un aspecto importante en la transferencia de elementos hacia las corrientes de agua, cuando el indicador de fertilidad fue bueno, que para estos suelos está dada por la adición de fertilizantes, existieron mejores condiciones para tener una contaminación del agua más por variables biológicas y no por nitratos como se esperaba. Por otro lado, cuando se tiene un buen indicador de funciones hídricas se reduce la probabilidad de tener contaminación biológica pero su relación no es tan significativa, el punto uno ubicado en sistemas con más intervención, se encontró relación con los contenidos de nitratos y posible contaminación de las corrientes de agua, recordemos que el exceso de labranza o la utilización inadecuada de implementos para la preparación de los suelos conlleva al sellamiento y encostramiento superficial, afectando el ingreso de agua al suelo por infiltración, aumentando los procesos de escorrentía y por ende el desplazamiento de materiales e insumos a las fuentes de agua. Algo similar mostraron estudios en Australia donde sistemas productivos agrícolas y pecuarios mal manejados generaron la degradación de las zonas ribereñas, sumado el aporte de materia fecal e insumos, contribuyeron al deterioro de la calidad del agua (Chará et al., 2006 citado por Guerrero C et al, 2016). El indicador biológico presentó una relación con el amonio en los puntos uno y dos correspondientes a los intervenidos y una relación con los puntos en bosque con la contaminación biológica (no son efectos directos y las diferencias no son significativas). La agregación es considerada como un indicador que suministra información acerca de la capacidad del suelo para funcionar en su condición

de componente básico del ecosistema. Una buena morfología la componen principalmente los agregados biogénicos y físicos, estos agregados integran distintas propiedades del suelo que son de fácil medición, perceptibles a variaciones climáticas y a prácticas de manejo (Seybold y Herrick, 2001, citado por S. Martinez et al, 2008). Los resultados de Colnercia mostraron que el borde de bosque presentó la mejor condición de morfología relacionándose con los bajos niveles de contaminación, comportándose como una barrera que, debido a su buena agregación, juega un papel importante en la regulación del flujo de agua y solutos reduciendo el escurrimiento superficial, conservando el agua y el suelo, y absorbiendo los contaminantes principalmente nitritos y fosfatos aumentando el oxígeno disuelto y en consecuencia, mejorará la calidad del agua. Esta aptitud que tiene el suelo de servir como amortiguador y su disposición de absorber y filtrar elementos tóxicos producen que los efectos negativos a la calidad del agua no se perciban de forma inmediata, en algunas ocasiones después de varios años de uso inadecuado de maquinaria agrícola y excesivas aplicaciones de fertilizantes y agroquímicos al suelo, aparecen el impacto negativo causado en el pasado.

Aunque en términos generales los bosques presentaron una buena condición, este no cumplirá la función de filtro natural si no presenta una buena morfología.

## Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

Los resultados físico químicos y biológicos obtenidos, están relacionados a descripciones e interpretaciones para la región de la Altillanura plana colombiana y están estrechamente vinculados con el manejo al cual han sido sometidos.

Al existir una degradación de suelos progresiva en los diferentes sistemas evaluados, existe también la posibilidad de contaminar las fuentes de agua cercanas a estos. Sistemas productivos con cultivos transitorios con aplicaciones de fertilizantes y una inadecuada mecanización que favorece la compactación, pueden ser fuente de contaminación con productos químicos que por escorrentía llegan a influir en la calidad del agua con presencia de nitratos y fosfatos entre otros.

Se observaron diferencias significativas entre la calidad de agua de las diferentes fincas y por consiguiente entre las dos localidades. Los tres predios situados en Puerto López mostraron niveles significativamente más elevados de bacterias (Coliformes y Escherichia). Aunque las densidades están por debajo de los límites admitidos, se observan índices de una contaminación incipiente. La contaminación química con nitratos o fosfatos está muy reducida, aunque con variaciones sensibles entre las fincas lo cual sugiere un monitoreo continuo.

Aunque las concentraciones E.coli fueron más bajas en la zona menos intervenida, en todas excedieron los rangos límites de la norma establecida para evaluar la calidad de agua. Por lo tanto, las aguas de superficiales de los afluentes evaluados pueden ser clasificadas como no aptas para el consumo humano, debido al peligro de contraer infecciones gastrointestinales, por la presencia de diversos agentes patógenos.

La degradación de los bosques de galería (aunque muy limitada todavía) puede permitir que el estiércol vacuno y los fertilizantes químicos lavados por las lluvias lleguen a contaminar las aguas. El análisis preliminar de 30 puntos diferentes dentro de los caños evaluados da una primera idea de su estado.

Las condiciones de la calidad del agua de los afluentes estudiados en la altillanura metense de los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán se encuentran afectada por los procesos de alteración de las características, físicas, químicas y biológicas del suelo y están relacionados con su uso en actividades agrarias y pecuarias, en las que se ven involucrados agentes contaminantes que son aportados al recurso hídrico de los afluentes estudiados.

## **4.2. Recomendaciones**

Si bien es indiscutible la necesidad de enmiendas y fertilizantes que permitan mejorar la nutrición de estos suelos, es necesario implementar el uso de residuos vegetales, abonos verdes y una adecuada labranza profunda que favorezca el movimiento descendente de éstos elementos, disminuyendo la saturación de aluminio, favoreciendo la infiltración y evitando la escorrentía la cual sirve de transporte de sustancias contaminantes a las corrientes de agua; estas acciones permitirán posteriormente la adopción de labranzas de tipo conservacionista, que permita sostener la productividad alcanzada.

Es indispensable incluir la conservación de los bosques de galería dentro de los planes de desarrollo de la región, considerándolos como zonas prioritarias que sirven de albergue a gran cantidad de especies, absorben el calor del verano, enfrían las aguas y las enriquecen. Son fundamentales en la calidad del agua y generación de hábitats para peces y macroinvertebrados en los caños gracias a sus aportes de restos vegetales como troncos, raíces y hojarasca.

Evitar el ingreso del ganado a los afluentes, si es necesario con cercos, que reduzcan la contaminación de los mismos y ubicar bebederos en sitios de fácil acceso para los animales, esto puede implicar un gasto económico inmediato pero un beneficio incalculable al tener agua de calidad.

Resembrar las franjas de bosques con especies maderables nativas que permitan conservarlos, mejorando las condiciones de suelo y agua. Establecer sistemas silvopastoriles que mejoren tanto las condiciones de infiltración de agua y captura de contaminantes evitando que lleguen a los afluentes como el confort de los animales suministrándoles sombra y alimento.

Es necesario analizar el comportamiento de las variables estudiadas durante un periodo de tiempo que comprenda tanto las épocas de lluvias como la seca y así comprender sus funciones dentro del sistema.

En trabajos futuros, sería ideal incluir dentro de los tratamientos, un sistema de uso intensivo al borde del afluente, donde no se tenga una barrera de bosque, que permita observar directamente los efectos de su manejo en la calidad del agua.

## A. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca PLAN

| ID   | Transecto | Punto | Latitud  | Longitud   | Uso                | Altura (msnm) |
|------|-----------|-------|----------|------------|--------------------|---------------|
| PLAN | 1         | 1     | 4.202389 | -72.599722 | Pastura degradada  | 164           |
| PLAN | 1         | 2     | 4.204444 | -72.599528 | Pastura degradada  | 160           |
| PLAN | 1         | 3     | 4.204639 | -72.599472 | Borde de bosque    | 160           |
| PLAN | 1         | 4     | 4.204722 | -72.599417 | Bosque secundario  | 158           |
| PLAN | 1         | 5     | 4.204806 | -72.599361 | Bosque secundario  | 158           |
| PLAN | 1         | 6     | 4.205167 | -72.598944 | Cuerpo de agua     | 155           |
| PLAN | 2         | 1     | 4.200806 | -72.597250 | Pastura degradada  | 163           |
| PLAN | 2         | 2     | 4.202806 | -72.597472 | Pastura degradada  | 157           |
| PLAN | 2         | 3     | 4.202972 | -72.597500 | Borde de bosque    | 156           |
| PLAN | 2         | 4     | 4.203139 | -72.597472 | Bosque secundario  | 155           |
| PLAN | 2         | 5     | 4.203500 | -72.597278 | Bosque secundario  | 155           |
| PLAN | 2         | 6     | 4.203667 | -72.597250 | Cuerpo de agua     | 155           |
| PLAN | 3         | 1     | 4.200139 | -72.594472 | Pastura degradada  | 164           |
| PLAN | 3         | 2     | 4.202139 | -72.594944 | Pastura degradada  | 160           |
| PLAN | 3         | 3     | 4.202417 | -72.595083 | Borde de bosque    | 163           |
| PLAN | 3         | 4     | 4.202556 | -72.595083 | Bosque secundario  | 161           |
| PLAN | 3         | 5     | 4.203056 | -72.595139 | Bosque secundario  | 161           |
| PLAN | 3         | 6     | 4.203417 | -72.595278 | Cuerpo de agua     | 158           |
| PLAN | 4         | 1     | 4.199583 | -72.593444 | Pastura degradada  | 163           |
| PLAN | 4         | 2     | 4.201389 | -72.592611 | Pastura degradada  | 156           |
| PLAN | 4         | 3     | 4.201639 | -72.592500 | Borde de bosque    | 155           |
| PLAN | 4         | 4     | 4.201778 | -72.592472 | Bosque secundario  | 154           |
| PLAN | 4         | 5     | 4.202250 | -72.592444 | Bosque secundario  | 154           |
| PLAN | 4         | 6     | 4.202750 | -72.592361 | Cuerpo de agua     | 153           |
| PLAN | 5         | 1     | 4.201479 | -72.592479 | Transitorio (Maíz) | 164           |
| PLAN | 5         | 2     | 4.200278 | -72.590833 | Transitorio (Maíz) | 158           |
| PLAN | 5         | 3     | 4.200139 | -72.590667 | Borde de bosque    | 158           |
| PLAN | 5         | 4     | 4.200083 | -72.590556 | Bosque secundario  | 157           |
| PLAN | 5         | 5     | 4.199917 | -72.590250 | Bosque secundario  | 157           |
| PLAN | 5         | 6     | 4.199667 | -72.589750 | Cuerpo de agua     | 156           |

## B. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca PLSC

| ID   | Transecto | Punto | Latitud  | Longitud   | Uso                 | Altura (msnm) |
|------|-----------|-------|----------|------------|---------------------|---------------|
| PLSC | 1         | 1     | 4.193056 | -72.649944 | Transitorio (Arroz) | 200           |
| PLSC | 1         | 2     | 4.194889 | -72.650750 | Transitorio (Arroz) | 195           |
| PLSC | 1         | 3     | 4.195111 | -72.650833 | Borde de bosque     | 194           |
| PLSC | 1         | 4     | 4.195250 | -72.650861 | Bosque secundario   | 194           |
| PLSC | 1         | 5     | 4.195889 | -72.651250 | Bosque secundario   | 193           |
| PLSC | 1         | 6     | 4.196611 | -72.651639 | Cuerpo de agua      | 193           |
| PLSC | 2         | 1     | 4.195583 | -72.646500 | Pastura degradada   | 196           |
| PLSC | 2         | 2     | 4.196722 | -72.647778 | Pastura degradada   | 200           |
| PLSC | 2         | 3     | 4.196694 | -72.648028 | Borde de bosque     | 201           |
| PLSC | 2         | 4     | 4.197167 | -72.648222 | Bosque secundario   | 201           |
| PLSC | 2         | 5     | 4.198139 | -72.648750 | Bosque secundario   | 201           |
| PLSC | 2         | 6     | 4.198917 | -72.649222 | Cuerpo de agua      | 201           |
| PLSC | 3         | 1     | 4.201750 | -72.644056 | Pastura degradada   | 200           |
| PLSC | 3         | 2     | 4.202861 | -72.644056 | Pastura degradada   | 195           |
| PLSC | 3         | 3     | 4.203056 | -72.644083 | Borde de bosque     | 197           |
| PLSC | 3         | 4     | 4.203444 | -72.644083 | Bosque secundario   | 197           |
| PLSC | 3         | 5     | 4.203667 | -72.644111 | Bosque secundario   | 196           |
| PLSC | 3         | 6     | 4.204639 | -72.644083 | Cuerpo de agua      | 195           |
| PLSC | 4         | 1     | 4.202917 | -72.638944 | Pastura mejorada    | 205           |
| PLSC | 4         | 2     | 4.204861 | -72.639194 | Pastura mejorada    | 198           |
| PLSC | 4         | 3     | 4.205167 | -72.639250 | Borde de bosque     | 198           |
| PLSC | 4         | 4     | 4.205417 | -72.639333 | Bosque secundario   | 198           |
| PLSC | 4         | 5     | 4.205889 | -72.639444 | Bosque secundario   | 197           |
| PLSC | 4         | 6     | 4.206278 | -72.639611 | Cuerpo de agua      | 195           |
| PLSC | 5         | 1     | 4.206111 | -72.635667 | Pastura mejorada    | 198           |
| PLSC | 5         | 2     | 4.208000 | -72.636139 | Pastura mejorada    | 198           |
| PLSC | 5         | 3     | 4.208250 | -72.636250 | Borde de bosque     | 197           |
| PLSC | 5         | 4     | 4.208361 | -72.636306 | Bosque secundario   | 196           |
| PLSC | 5         | 5     | 4.208472 | -72.636361 | Bosque secundario   | 196           |
| PLSC | 5         | 6     | 4.208826 | -72.636551 | Cuerpo de agua      | 195           |

## C. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca PLLC

| ID   | Transecto | Punto | Latitud  | Longitud   | Uso                | Altura (msnm) |
|------|-----------|-------|----------|------------|--------------------|---------------|
| PLLC | 1         | 1     | 4.190694 | -72.581722 | Pastura mejorada   | 212           |
| PLLC | 1         | 2     | 4.191000 | -72.579389 | Pastura mejorada   | 208           |
| PLLC | 1         | 3     | 4.190972 | -72.579083 | Borde de bosque    | 207           |
| PLLC | 1         | 4     | 4.190972 | -72.579028 | Bosque secundario  | 207           |
| PLLC | 1         | 5     | 4.191000 | -72.578861 | Bosque secundario  | 206           |
| PLLC | 1         | 6     | 4.191028 | -72.578694 | Cuerpo de agua     | 205           |
| PLLC | 2         | 1     | 4.192556 | -72.579361 | Pastura mejorada   | 209           |
| PLLC | 2         | 2     | 4.192500 | -72.577028 | Pastura mejorada   | 204           |
| PLLC | 2         | 3     | 4.192556 | -72.576806 | Borde de bosque    | 204           |
| PLLC | 2         | 4     | 4.192611 | -72.576694 | Bosque secundario  | 204           |
| PLLC | 2         | 5     | 4.192639 | -72.576361 | Bosque secundario  | 204           |
| PLLC | 2         | 6     | 4.192667 | -72.575944 | Cuerpo de agua     | 205           |
| PLLC | 3         | 1     | 4.194472 | -72.579361 | Pastura degradada  | 209           |
| PLLC | 3         | 2     | 4.195139 | -72.577472 | Pastura degradada  | 206           |
| PLLC | 3         | 3     | 4.195194 | -72.577222 | Borde de bosque    | 206           |
| PLLC | 3         | 4     | 4.195222 | -72.577139 | Bosque secundario  | 206           |
| PLLC | 3         | 5     | 4.195333 | -72.576500 | Bosque secundario  | 205           |
| PLLC | 3         | 6     | 4.195417 | -72.576000 | Cuerpo de agua     | 205           |
| PLLC | 4         | 1     | 4.197139 | -72.579972 | Transitorio (Maíz) | 206           |
| PLLC | 4         | 2     | 4.197694 | -72.578917 | Transitorio (Maíz) | 203           |
| PLLC | 4         | 3     | 4.197806 | -72.578667 | Borde de bosque    | 204           |
| PLLC | 4         | 4     | 4.198000 | -72.578472 | Bosque secundario  | 204           |
| PLLC | 4         | 5     | 4.198583 | -72.578000 | Bosque secundario  | 204           |
| PLLC | 4         | 6     | 4.199222 | -72.577361 | Cuerpo de agua     | 204           |
| PLLC | 5         | 1     | 4.198611 | -72.581333 | Transitorio (Soya) | 200           |
| PLLC | 5         | 2     | 4.199500 | -72.579639 | Transitorio (Soya) | 200           |
| PLLC | 5         | 3     | 4.199611 | -72.579389 | Borde de bosque    | 201           |
| PLLC | 5         | 4     | 4.199667 | -72.579333 | Bosque secundario  | 200           |
| PLLC | 5         | 5     | 4.200083 | -72.578806 | Bosque secundario  | 199           |
| PLLC | 5         | 6     | 4.200444 | -72.578389 | Cuerpo de agua     | 198           |

## D. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca CARIM

| ID    | Transecto | Punto | Latitud  | Longitud   | Uso               | Altura (msnm) |
|-------|-----------|-------|----------|------------|-------------------|---------------|
| CARIM | 1         | 1     | 4.576833 | -71.393833 | Sabana nativa     | 163           |
| CARIM | 1         | 2     | 4.575917 | -71.395722 | Sabana nativa     | 160           |
| CARIM | 1         | 3     | 4.575750 | -71.395917 | Borde de bosque   | 161           |
| CARIM | 1         | 4     | 4.575417 | -71.396278 | Bosque primario   | 161           |
| CARIM | 1         | 5     | 4.574778 | -71.396750 | Bosque primario   | 161           |
| CARIM | 1         | 6     | 4.573972 | -71.397333 | Cuerpo de Agua    | 161           |
| CARIM | 2         | 1     | 4.574806 | -71.392917 | Sabana nativa     | 159           |
| CARIM | 2         | 2     | 4.573278 | -71.394111 | Sabana nativa     | 157           |
| CARIM | 2         | 3     | 4.572972 | -71.394250 | Borde de bosque   | 157           |
| CARIM | 2         | 4     | 4.572861 | -71.394278 | Bosque primario   | 157           |
| CARIM | 2         | 5     | 4.572778 | -71.394333 | Bosque primario   | 156           |
| CARIM | 2         | 6     | 4.572667 | -71.394389 | Cuerpo de Agua    | 156           |
| CARIM | 3         | 1     | 4.573917 | -71.390278 | Sabana nativa     | 156           |
| CARIM | 3         | 2     | 4.572111 | -71.391028 | Sabana nativa     | 150           |
| CARIM | 3         | 3     | 4.571917 | -71.391139 | Borde de bosque   | 150           |
| CARIM | 3         | 4     | 4.571889 | -71.391167 | Bosque primario   | 149           |
| CARIM | 3         | 5     | 4.571806 | -71.391194 | Bosque primario   | 149           |
| CARIM | 3         | 6     | 4.571722 | -71.391250 | Cuerpo de Agua    | 149           |
| CARIM | 4         | 1     | 4.573472 | -71.385778 | Sabana nativa     | 155           |
| CARIM | 4         | 2     | 4.571889 | -71.387167 | Sabana nativa     | 156           |
| CARIM | 4         | 3     | 4.571639 | -71.387306 | Borde de bosque   | 156           |
| CARIM | 4         | 4     | 4.571639 | -71.387333 | Bosque secundario | 155           |
| CARIM | 4         | 5     | 4.571389 | -71.387361 | Bosque secundario | 155           |
| CARIM | 4         | 6     | 4.571111 | -71.387194 | Cuerpo de Agua    | 153           |
| CARIM | 5         | 1     | 4.572917 | -71.381889 | Sabana nativa     | 151           |
| CARIM | 5         | 2     | 4.571500 | -71.382750 | Sabana nativa     | 153           |
| CARIM | 5         | 3     | 4.571278 | -71.382889 | Borde de bosque   | 153           |
| CARIM | 5         | 4     | 4.571167 | -71.382917 | Bosque secundario | 152           |
| CARIM | 5         | 5     | 4.570750 | -71.383028 | Bosque secundario | 152           |
| CARIM | 5         | 6     | 4.570333 | -71.383111 | Cuerpo de Agua    | 151           |

## E. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca CAMER

| ID    | Transecto | Punto | Latitud  | Longitud   | Uso               | Altura (msnm) |
|-------|-----------|-------|----------|------------|-------------------|---------------|
| CAMER | 1         | 1     | 4.499139 | -71.081528 | Caucho            | 207           |
| CAMER | 1         | 2     | 4.497194 | -71.081194 | Caucho            | 202           |
| CAMER | 1         | 3     | 4.496917 | -71.081139 | Borde de bosque   | 202           |
| CAMER | 1         | 4     | 4.496889 | -71.081139 | Bosque secundario | 200           |
| CAMER | 1         | 5     | 4.496861 | -71.081111 | Bosque secundario | 200           |
| CAMER | 1         | 6     | 4.496833 | -71.081111 | Cuerpo de Agua    | 199           |
| CAMER | 2         | 1     | 4.495056 | -71.082361 | Caucho            | 205           |
| CAMER | 2         | 2     | 4.493306 | -71.081278 | Caucho            | 202           |
| CAMER | 2         | 3     | 4.493167 | -71.081111 | Borde de bosque   | 202           |
| CAMER | 2         | 4     | 4.493000 | -71.080861 | Bosque secundario | 200           |
| CAMER | 2         | 5     | 4.492722 | -71.080583 | Bosque secundario | 200           |
| CAMER | 2         | 6     | 4.492349 | -71.079812 | Cuerpo de Agua    | 199           |
| CAMER | 3         | 1     | 4.490833 | -71.081167 | Caucho abandonado | 200           |
| CAMER | 3         | 2     | 4.489139 | -71.079889 | Caucho abandonado | 200           |
| CAMER | 3         | 3     | 4.488944 | -71.079639 | Borde de bosque   | 200           |
| CAMER | 3         | 4     | 4.488861 | -71.079556 | Bosque secundario | 200           |
| CAMER | 3         | 5     | 4.488806 | -71.079556 | Bosque secundario | 199           |
| CAMER | 3         | 6     | 4.488722 | -71.079500 | Cuerpo de Agua    | 196           |
| CAMER | 4         | 1     | 4.487472 | -71.082778 | Sabana nativa     | 203           |
| CAMER | 4         | 2     | 4.485344 | -71.082325 | Sabana nativa     | 198           |
| CAMER | 4         | 3     | 4.485139 | -71.082250 | Borde de bosque   | 196           |
| CAMER | 4         | 4     | 4.485028 | -71.082222 | Bosque secundario | 198           |
| CAMER | 4         | 5     | 4.484972 | -71.082194 | Bosque secundario | 199           |
| CAMER | 4         | 6     | 4.484917 | -71.082194 | Cuerpo de agua    | 198           |
| CAMER | 5         | 1     | 4.484917 | -71.084722 | Sabana nativa     | 197           |
| CAMER | 5         | 2     | 4.483278 | -71.084000 | Sabana nativa     | 194           |
| CAMER | 5         | 3     | 4.483111 | -71.083833 | Borde de bosque   | 195           |
| CAMER | 5         | 4     | 4.483028 | -71.083722 | Bosque secundario | 195           |
| CAMER | 5         | 5     | 4.482861 | -71.083583 | Bosque secundario | 195           |
| CAMER | 5         | 6     | 4.482750 | -71.083472 | Cuerpo de agua    | 192           |

## F. Anexo: Coordenadas y alturas de los puntos evaluados. Finca CAPAJ

| ID    | Transecto | Punto | Latitud  | Longitud   | Uso               | Altura (msnm) |
|-------|-----------|-------|----------|------------|-------------------|---------------|
| CAPAJ | 1         | 1     | 4.479000 | -71.107194 | Sabana nativa     | 153           |
| CAPAJ | 1         | 2     | 4.481000 | -71.107639 | Sabana nativa     | 155           |
| CAPAJ | 1         | 3     | 4.481250 | -71.107667 | Borde de bosque   | 155           |
| CAPAJ | 1         | 4     | 4.481472 | -71.107722 | Bosque secundario | 153           |
| CAPAJ | 1         | 5     | 4.481917 | -71.107694 | Bosque secundario | 153           |
| CAPAJ | 1         | 6     | 4.482472 | -71.107750 | Cuerpo de agua    | 152           |
| CAPAJ | 2         | 1     | 4.479306 | -71.111528 | Caucho            | 148           |
| CAPAJ | 2         | 2     | 4.481444 | -71.111528 | Caucho            | 152           |
| CAPAJ | 2         | 3     | 4.481694 | -71.111556 | Borde de bosque   | 152           |
| CAPAJ | 2         | 4     | 4.481722 | -71.111583 | Bosque secundario | 152           |
| CAPAJ | 2         | 5     | 4.481778 | -71.111583 | Bosque secundario | 151           |
| CAPAJ | 2         | 6     | 4.481833 | -71.111583 | Cuerpo de agua    | 151           |
| CAPAJ | 3         | 1     | 4.479833 | -71.116333 | Caucho            | 146           |
| CAPAJ | 3         | 2     | 4.481833 | -71.116361 | Caucho            | 146           |
| CAPAJ | 3         | 3     | 4.482028 | -71.116417 | Borde de bosque   | 146           |
| CAPAJ | 3         | 4     | 4.482083 | -71.116444 | Bosque secundario | 146           |
| CAPAJ | 3         | 5     | 4.482139 | -71.116472 | Bosque secundario | 145           |
| CAPAJ | 3         | 6     | 4.482194 | -71.116444 | Cuerpo de agua    | 145           |
| CAPAJ | 4         | 1     | 4.477472 | -71.119611 | Sabana nativa     | 143           |
| CAPAJ | 4         | 2     | 4.479306 | -71.120361 | Sabana nativa     | 144           |
| CAPAJ | 4         | 3     | 4.479556 | -71.120417 | Borde de bosque   | 144           |
| CAPAJ | 4         | 4     | 4.479667 | -71.120417 | Bosque secundario | 143           |
| CAPAJ | 4         | 5     | 4.479806 | -71.120528 | Bosque secundario | 143           |
| CAPAJ | 4         | 6     | 4.479889 | -71.120611 | Cuerpo de agua    | 141           |
| CAPAJ | 5         | 1     | 4.473639 | -71.115889 | Caucho            | 148           |
| CAPAJ | 5         | 2     | 4.474944 | -71.117389 | Caucho            | 144           |
| CAPAJ | 5         | 3     | 4.475139 | -71.117528 | Borde de bosque   | 145           |
| CAPAJ | 5         | 4     | 4.475194 | -71.117583 | Bosque secundario | 145           |
| CAPAJ | 5         | 5     | 4.475222 | -71.117611 | Bosque secundario | 145           |
| CAPAJ | 5         | 6     | 4.475250 | -71.117639 | Cuerpo de agua    | 143           |

## G. Anexo: Datos de almacenamiento de carbono en los diferentes usos evaluados

| USO | Profundidad (cm) | %C   | Da   | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> | densidad-kg/m <sup>3</sup> | kg C/kg suelo | Stock C (kg c/m <sup>2</sup> ) | Stock C (tn C *ha) | Stock C (0-20 cm) |
|-----|------------------|------|------|--------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| T   | 0-10             | 0.16 | 1.27 | 0.1                            | 1270                       | 0.0016        | 0.2032                         | 2.032              | 2.0               |
|     | 10-20            | 0.14 | 1.38 | 0.1                            | 1380                       | 0.0014        | 0.1932                         | 1.932              |                   |
| BB  | 0-10             | 0.29 | 1.12 | 0.1                            | 1120                       | 0.0029        | 0.3248                         | 3.248              | 3.3               |
|     | 10-20            | 0.27 | 1.27 | 0.1                            | 1270                       | 0.0027        | 0.3429                         | 3.429              |                   |
| BP  | 0-10             | 0.67 | 0.6  | 0.1                            | 600                        | 0.0067        | 0.402                          | 4.02               | 4.6               |
|     | 10-20            | 0.73 | 0.7  | 0.1                            | 700                        | 0.0073        | 0.511                          | 5.11               |                   |
| BS  | 0-10             | 0.42 | 0.99 | 0.1                            | 990                        | 0.0042        | 0.4158                         | 4.158              | 4.0               |
|     | 10-20            | 0.32 | 1.17 | 0.1                            | 1170                       | 0.0032        | 0.3744                         | 3.744              |                   |
| C   | 0-10             | 0.18 | 1.34 | 0.1                            | 1340                       | 0.0018        | 0.2412                         | 2.412              | 2.4               |
|     | 10-20            | 0.15 | 1.53 | 0.1                            | 1530                       | 0.0015        | 0.2295                         | 2.295              |                   |
| PD  | 0-10             | 0.34 | 1.21 | 0.1                            | 1210                       | 0.0034        | 0.4114                         | 4.114              | 3.0               |
|     | 10-20            | 0.14 | 1.32 | 0.1                            | 1320                       | 0.0014        | 0.1848                         | 1.848              |                   |
| PM  | 0-10             | 0.15 | 1.37 | 0.1                            | 1370                       | 0.0015        | 0.2055                         | 2.055              | 1.9               |
|     | 10-20            | 0.12 | 1.43 | 0.1                            | 1430                       | 0.0012        | 0.1716                         | 1.716              |                   |
| SN  | 0-10             | 0.29 | 1.16 | 0.1                            | 1160                       | 0.0029        | 0.3364                         | 3.364              | 3.8               |
|     | 10-20            | 0.32 | 1.31 | 0.1                            | 1310                       | 0.0032        | 0.4192                         | 4.192              |                   |

Bosque primario, BP (n=30); bosque secundario, BS (n=6); sabana nativa, SN (n=18); borde de bosque, BB (n=30); pastura degradada, PD (n=14); pastura mejorada, PM (n=8); transitorios, T (n=8) y caucho, C (n=12).

## H. Anexo: ANOVA para el indicador de fertilidad entre las dos localidades evaluadas

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for IQUIMICO

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

|  |          |
|--|----------|
| <b>Alpha</b>                               | 0.05     |
| <b>Error Degrees of Freedom</b>            | 148      |
| <b>Error Mean Square</b>                   | 0.044295 |
| <b>Critical Value of Studentized Range</b> | 2.79466  |
| <b>Minimum Significant Difference</b>      | 0.0679   |

| <b>Means with the same letter are not significantly different.</b> |             |          |                  |
|--|-------------|----------|------------------|
| <b>Tukey Grouping</b>  | <b>Mean</b> | <b>N</b> | <b>LOCALIDAD</b> |
| A  | 0.69611     | 75       | PTO LOPEZ        |
| A  |             |          |                  |
| A  | 0.66094     | 75       | CARIMAGUA        |

# I. Anexo: ANOVA para el indicador biológico entre los puntos de muestreo

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for IBIOLOGICO

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

|  |          |
|--|----------|
| <b>Alpha</b>                               | 0.05     |
| <b>Error Degrees of Freedom</b>            | 145      |
| <b>Error Mean Square</b>                   | 0.033996 |
| <b>Critical Value of Studentized Range</b> | 3.90663  |
| <b>Minimum Significant Difference</b>      | 0.1315   |

| <b>Means with the same letter are not significantly different.</b> |             |          |              |
|--|-------------|----------|--------------|
| <b>Tukey Grouping</b>  | <b>Mean</b> | <b>N</b> | <b>PUNTO</b> |
| A  | 0.54179     | 30       | 4            |
| A  |             |          |              |
| A  | 0.53316     | 30       | 3            |
|  |             |          |              |
| B  | 0.38317     | 30       | 5            |
| B  |             |          |              |
| B  | 0.38108     | 30       | 2            |
| B  |             |          |              |
| B  | 0.34781     | 30       | 1            |

## J Anexo: ANOVA para el indicador biológico entre las fincas seleccionadas

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for IBIOLOGICO

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

|  |          |
|--|----------|
| <b>Alpha</b>                               | 0.05     |
| <b>Error Degrees of Freedom</b>            | 144      |
| <b>Error Mean Square</b>                   | 0.041185 |
| <b>Critical Value of Studentized Range</b> | 4.08492  |
| <b>Minimum Significant Difference</b>      | 0.1658   |

| Means with the same letter are not significantly different. |         |    |       |
|---|---------|----|-------|
| Tukey Grouping  | Mean    | N  | FINCA |
| A   | 0.45717 | 25 | PLAN  |
| A   |         |    |       |
| A   | 0.45349 | 25 | CARIM |
| A   |         |    |       |
| A   | 0.43222 | 25 | CAMER |
| A   |         |    |       |
| A   | 0.42876 | 25 | CAPAJ |
| A   |         |    |       |
| A   | 0.42728 | 25 | PLSC  |
| A   |         |    |       |
| A   | 0.42550 | 25 | PLLC  |

## K Anexo: ANOVA para el indicador de calidad de agua entre los diferentes predios evaluados

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for IAGUA

|  |          |
|--|----------|
| <b>Alpha</b>                               | 0.05     |
| <b>Error Degrees of Freedom</b>            | 24       |
| <b>Error Mean Square</b>                   | 0.017227 |
| <b>Critical Value of Studentized Range</b> | 4.37265  |
| <b>Minimum Significant Difference</b>      | 0.2567   |

| Means with the same letter are not significantly different. |   |         |         |       |      |
|---|---|---------|---------|-------|------|
| Tukey Grouping  |   | Mean    | N       | FINCA |      |
|   | A | 0.71400 | 5       | CAPAJ |      |
|   | A |         |         |       |      |
| B   | A | 0.64400 | 5       | CARIM |      |
| B   | A |         |         |       |      |
| B   | A | 0.63800 | 5       | CAMER |      |
| B   | A |         |         |       |      |
| B   | A | C       | 0.49600 | 5     | PLLC |
| B   |   | C       |         |       |      |
| B   |   | C       | 0.45400 | 5     | PLSC |
|   |   | C       |         |       |      |
|   |   | C       | 0.36800 | 5     | PLAN |

## L Anexo: ANOVA para el indicador de calidad de agua entre las dos localidades evaluadas

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for IAGUA

This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ

|  |          |
|--|----------|
| <b>Alpha</b>                               | 0.05     |
| <b>Error Degrees of Freedom</b>            | 28       |
| <b>Error Mean Square</b>                   | 0.016924 |
| <b>Critical Value of Studentized Range</b> | 2.89687  |
| <b>Minimum Significant Difference</b>      | 0.0973   |

| <b>Means with the same letter are not significantly different.</b> |             |          |                  |
|--|-------------|----------|------------------|
| <b>Tukey Grouping</b>  | <b>Mean</b> | <b>N</b> | <b>LOCALIDAD</b> |
| A  | 0.66533     | 15       | CARIMAGUA        |
|  |             |          |                  |
| B  | 0.43933     | 15       | PUERTO LOPEZ     |



## Bibliografía

Adriaanse, A. 1993. Environmental policy performance indicators. A study on the development of indicators for environmental policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach, The Netherlands.

Aguirre, DennysJ; Aguirre, Néstor y Caicedo Quintero, Orlando. 2008. Evaluación de la calidad del agua a través de los protistas en la quebrada La Ayurá en Envigado (Antioquia). En: Revista Producción más Limpia. Diciembre, 2008, vol 3, no. 1, p 50-60.

Amézquita, E., Sanz, J.I., Thomas, R.J., Vera, R.R., Hoyos, P., Molina, D.L., Chávez, L.F., 1997. Características estructurales de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. Revista Suelos Ecuatoriales 27,151-156.

Amézquita E, Preciado G, Arias DM, Friesen D, Sanz JI, Thomas R. 1998. Soil physical characteristics under different land use systems and duration on the Colombian savannas. Afiche presentado en: Word Congress of Soil Science Word "Congress of Soil"; Montpellier, France.

Anderson, J.M., Ingram, J.S.I. (Eds.), 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: a Handbook of Methods. CAB International, Wallingford, UK. 44-46.

Arshad, M.A. & Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. American J. of Alternative Agriculture. 7:25.

Astier, M. et al. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. 36 (5):6

Bünemanna, Else K. Bongiorno, Giulia. Baic, Zhanguo. E, Creamer, Rachel., De Deynb, Gerlinde. De Goedeb, Ron. Fleskens, Luuk. Geissen, Violette. Kuyper, Thom W. Mäder, Paul. Pulleman, Mirjam. Wijnand Sukkel, Jan Willem van Groenigen. Brussaard, Lijbert. Soil quality. A critical review. *ELSEVIER. Soil Biology and Biochemistry*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

Carter, R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. 94:38.

Castaño, E. y Moreno, H. (1994). Cuantificación de variables cualitativas y análisis de componentes principales. En: *Memorias del simposio de estadística. Análisis multivariado de datos*. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Matemáticas y Estadística. Bogotá, Colombia

Chaparro Naranjo, F. L., & Ovalles Vargas, C. F. (2017). Análisis del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para consumo humano IRCA y su relación con el clima y ubicación geográfica para el departamento del Meta en los años 2012 – 2013. Recuperado de: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/386](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/386). P. 25.

Diaz, F. M. 1985. “Contaminación de las Aguas Subterráneas por Nitratos – Situación existente en el Aglomerado Bonaerense”, *Anales del XII Congreso Nacional del Agua*, Tomo III (a), CONAGUA 85, Mendoza, República Argentina, 1985, 21

Dirección Nacional de Medio Ambiente. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Manual de procedimientos analíticos para aguas y afluentes. Recuperado de: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual\\_dinama.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf).

Dorian, J.E., Linn, D. M. 1979. Environmental microbiology bacteriological quality of runoff wáter from pastureland. P. 987.

Dumanski, J. et al. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank. Washington DC, USA. ECOFONDO (sf). El agua en la Orinoquía. El agua un bien público. Disponible en: <http://docplayer.es/17648957-Agua-el-en-la-orinoquia.html>.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2015. Impacto de la ganadería en la disponibilidad y la calidad del agua. Conferencia sobre Agua para Alimentos y Ecosistemas. ¡Para que sea una realidad!. P 1. Disponible en: [http://www.fao.org/ag/wfe2005/docs/LEADwater\\_es.pdf](http://www.fao.org/ag/wfe2005/docs/LEADwater_es.pdf)

Fundación Aqueae. Sf. Principales datos del agua en el mundo. Disponible en: <https://www.fundacionaqueae.org/principales-datos-del-agua-en-el-mundo/>

Gregorich, E.G. et al. 1994. Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian J. of Soil Science. 74:367.

Grisel de la C. Cabrera-Dávila. 2014. Manual práctico sobre la macrofauna edáfica como indicador biológico de la calidad del suelo, según resultados en Cuba. Pag. 22.

Grisel de la C. Cabrera-Dávila., López Iborra Germán M. 2018. Caracterización ecológica de la macrofauna edáfica en dos sitios de bosque siempreverde en El Salón, Sierra del Rosario, Cuba. Pág. 364

Gualdrón L. 2016. Evaluación de la calidad del agua de ríos de Colombia usando parámetros físicoquímicos y biológicos. Universidad Libre de Colombia. Línea de Investigación: Saneamiento ambiental. Revista Dinámica Ambiental N. 1, año 1. Pág. 85.

Guerrero C, Norma. Diaz P. Mariela. Díaz Ponce, A. Urdanigo Zambrano J. P. Tayhing Cajas, C. Guerrero Chuez, R., Yopez Rosado, A. Uso de suelo y su influencia en la

calidad del agua de la microcuenca El Sapanal, Ecuador. Revista Cubana de Ciencias Biológicas. P. 7.

Huang, J. Zhan, J. Yan, H. Wu, F. Deng, X. 2013. Evaluation of the Impacts of Land Use on Water Quality: A Case Study in The Chaohu Lake Basin. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/329187/>

Ibrahim, M.; Villanueva, C.; Casasola, F. 2007. Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y rehabilitación ecológica de paisajes ganaderos en centro américa. Universidad de Toronto. Disponible en: <https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/53069>.

INCODER, Corpoica. 2005. Zonificación agroecológica y evaluación económica de sistemas de producción prioritarios en el área de desarrollo rural altillanura. Pág. 17.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, marzo de 2019. 219.

Lal, R. 1991. Soil structure and sustainability. J. Sustainable Agric., 1: 67-92.

Lenntech, 2020. Recuperado el 29 de mayo de 2020 de <https://www.lenntech.es/por-que-es-importante-el-oxigeno-disuelto-en-el-agua.htm#ixzz6Ns2mJHdW>

López I. 1980. Respuesta al Encalado en Suelos Oxisoles y Ultisoles de Venezuela, (FONAIAP) Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Venezuela.

Lowrance B.; Dabney, S.; Schultz, R. 2002. Improving water and soil quality with conservation buffer. Journal of soil and water conservation. 57: P. 39.

Martin, N. & Adad, Idaybis. 2006. Generalidades más importantes de las ciencias del suelo. En: Disciplina Ciencias del Suelo. Tomo I. Pedología. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. Pag. 504.

Ministerio de Protección Social. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. Resolución 2115, junio de 2017. Características Físicas y Químicas del agua para consumo humano. Capítulo II, artículo 6. Características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana. P. 3. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislacion\\_del\\_agua/Resoluci%C3%B3n\\_2115.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislacion_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf)

Navarro, A. et al. 2008. Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México*. 34 (2):151

Ramírez, R., M. A. Taboada y R. Gil. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la Pampa ondulada argentina. *Rev. Fac. Nacio. Agron. Medellín*. 59: 3237-3256

Rivas L., Hoyos P., Amézquita E y Molina D. (2004) Manejo y uso de los suelos de la Altillanura Colombiana. Análisis económico de una estrategia para su conservación y mejoramiento: Construcción de la capa arable. Proyecto de Evaluación de Impacto. Proyecto de Suelos. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Convenio MADR – CIAT. Cali, Colombia, diciembre 2004. 3p.

Rivera M., Amézquita E., Bernal J. H., y Rao M. 2013. Sistemas Agropastoriles: Un enfoque Integrado para el Manejo Sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Capítulo I. Las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia: Caracterización Biofísica e Importancia para la Producción Agropecuaria. Pag 9.

S. Martínez-Trinidad, H. Cotler, J.D. Etchevers-Barra, Víctor M. Ordaz Chaparro, F. De León-González. 2008. Efecto del manejo en la agregación del suelo en un ecosistema tropical seco. *Terra Latinoamericana* 26: 299

Sardiñas, O; S. Chiroles; M. Fernández; Y. Hernández y A. Pérez. 2006. Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental [en línea]* 6: 202-206. [www.ugr.es/~dpto\\_prev/revista/2006.html](http://www.ugr.es/~dpto_prev/revista/2006.html)

Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79: 7-31.

SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

T. Decaëns, J. J. Jiménez, A. F. Rangel, A. Cepeda, A. G. Moreno y P. Lavelle. 2001. La Macrofauna del Suelo en la Sabana Bien Drenada de los Llanos Orientales. *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Capítulo 7. Pág. 113

Torres, P. Cruz, C. Patiño, P. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol 8, No. 15. Pág. 81.

Valencia, C. 2019. Variabilidad química en suelos del Meta, periodo 1982-2012. Tesis de maestría, Universidad de los Llanos. Pp. 16.

Velásquez, E.; Lavelle, P. & Andrade, M. (2007). GISQ, an Multifunctional Indicator of Soil Quality. En: *Soil Biology and Biochemistry*, 39 (12). Pp. 3066-3080.

Velasquez, E. ; Lavelle, P. ; Grimaldi, M. ; Martins, M. ; Didier Brunet ; Céline Pelosi ; Ana Carolina Rendeiro ; Edmundo Barrios. 2007. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiologia*, v. 51, p. 75-87.