

Convenio Interadministrativo entre CORPOURABÁ y Universidad de Antioquia:
Aunar esfuerzos técnicos, logísticos y financieros para, el diseño de la red de monitoreo y el análisis de la información primaria levantada durante dos campañas de monitoreo en la cuenca media y baja del río Atrato en la zona de Urabá

INFORME FINAL

ELABORADO POR
Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental-GAIA

AUTORES:

Jaime Alberto Palacio Baena
Álvaro Wills Toro
María Teresa Flórez Molina
Francisco José Molina Pérez
Michael Ezequiel Gómez Rodríguez
Diana Agudelo Echavarría

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Medellín, marzo 2020

CONTENIDO

1	PRESENTACION	8
2	ANTECEDENTES	8
3	GENERALIDADES DEL ÁREA DE INTERES.....	9
3.1	CLIMA	10
3.2	HIDROGRAFÍA.....	11
3.2.1	Ambientes lóticos	11
3.2.2	Ambientes lénticos.....	14
3.3	GEOLOGÍA.....	14
3.4	GEOMORFOLOGÍA	16
3.5	SUELOS.....	17
3.6	PROBLEMÁTICA AMBIENTAL CUENCA DEL RÍO ATRATO	20
4	OBJETIVOS	25
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	25
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
5	MARCO TEÓRICO	25
5.1	GEOQUÍMICA: AGUAS Y SEDIMENTOS	25
5.1.1	Sedimentos superficiales lacustres	25
5.1.2	Metales pesados objeto de estudio.....	26
5.1.3	Interacción metales pesados en ciénagas	29
6	METODOLOGÍA.....	31
6.1	DISEÑO RED DE MONITOREO.....	31
6.2	TRABAJO DE CAMPO	33
6.3	VARIABLES AMBIENTALES A MEDIR	34
6.4	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	36
6.4.1	Granulometría.....	36
6.4.2	Análisis estadísticos	37
6.4.3	Evaluación de la contaminación por metales pesados.....	38
6.4.4	Criterio de calidad de los sedimentos	39
7	RESULTADOS	39
7.1	RED DE MUESTREO.....	39
7.2	GRANULOMETRÍA	47
7.3	ANÁLISIS GEOESTADÍSTICOS.....	51

7.3.1	Matriz agua.....	51
7.3.2	Correlación entre las variables analizadas en la matriz agua.....	90
7.3.3	Matriz sedimento	91
7.4	EVALUACIÓN CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS	100
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
8.1	MATRIZ AGUA.....	102
8.2	SEDIMENTOS LACUSTRES.....	102
9	REFERENCIAS.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables ambientales medidas in situ según la matriz en cada una las estaciones de muestreo.....	34
Tabla 2. Variables ambientales medidas en el agua y en los sedimentos.....	35
Tabla 3. Características de los tamices utilizados en el análisis granulométrico.....	36
Tabla 4. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo en las principales ciénagas de la cuenca del río Atrato.....	41
Tabla 5. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo en los principales afluentes de la cuenca del río Atrato.....	43
Tabla 6. Distribución de tamaños y clasificación por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época seca.....	47
Tabla 7. Distribución de tamaños y clasificación por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época de lluvias.....	47
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de las variables en sedimento lacustre durante época seca.....	92
Tabla 9. Estadísticos descriptivos de las variables en sedimento lacustre durante época de lluvia.....	92
Tabla 10. Guía de calidad de sedimentos para metales pesados.....	92
Tabla 11. Pesos de las variables en el análisis de componentes principales.....	94
Tabla 12. Correlación de Spearman para metales y materia orgánica en sedimentos lacustres para la época seca.....	96
Tabla 13. Correlación de Spearman para metales y materia orgánica en sedimentos lacustres para la época seca.....	99
Tabla 14. Factores de enriquecimiento para Cd, Cr, Hg, Pb y Zn en los sedimentos lacustres recolectados en las épocas de muestreo seca y húmeda.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de la cuenca del río Atrato y jurisdicción de CORANTIOQUIA y CORPOURABÁ. Fuente: este estudio.	10
Figura 2. Cuenca del río Atrato. Fuente: Benitez (2019)	13
Figura 3. Complejo de ciénagas de la cuenca del río Atrato. Fuente: tomado de https://caracol.com.co/emisora/2017/10/17/quibdo/1508248094_513413.html	14
Figura 4. Geología de la zona de interés. Fuente: ANH (2010).....	15
Figura 5. Impacto ambiental sobre el río. Fuente: tomada de https://somospacifico.com.co/noticias/noticias-quibdo-salvar-rio-atrato-odin-sanchez/	22
Figura 6. Deterioro ambiental del río por explotaciones mineras y áreas entregadas para explotación por el Ministerio de Minas y Energía en la zona alrededor del río Atrato. Fuente: tomado de https://pacificocolombia.org/wp-content/gallery/Miner%C3%ADa/AREAMIN_OPT_15.jpg	24
Figura 7. Estructura vertical típica de la interfase agua-sedimento	31
Figura 8. Contraste épocas seca y de lluvias en la ciénaga El Burro. Fuente: este estudio	32
Figura 9. Contraste épocas seca y de lluvias en la ciénaga El Limón. Fuente: este estudio	32
Figura 10. Contraste épocas seca y de lluvias en la ciénaga Las Mujeres. Fuente: este estudio	33
Figura 11. Visita de reconocimiento cuerpos de agua principales de la cuenca media del río Atrato. Fuente: este estudio	34
Figura 12. Diagrama triangular de suelos y sedimentos. Fuente: Casanova (2005).....	37
Figura 13. Localización geográfica de las estaciones de muestreo en las principales ciénagas de la cuenca del río Atrato. Fuente: este estudio	45
Figura 14. Localización geográfica de las estaciones de muestreo en los principales afluentes de la cuenca del río Atrato. Fuente: este estudio	46
Figura 15. Distribución de tamaños por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época seca	49
Figura 16. Distribución de tamaños por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época lluvias	50
Figura 17. Temperatura del agua en seis sitios de la cuenca del río Atrato. La línea punteada establece el límite de ± 5 °C, asumiendo una temperatura de 27 °C.....	52
Figura 18. Temperatura del agua en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y Río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.	53
Figura 19. Conductividad en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.	56
Figura 20. Turbidez en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.	58
Figura 21. Sólidos suspendidos totales (SST) en sitios de la cuenca río Atrato, en época seca. La línea punteada señala el valor el indicativo objetivo de calidad límite superior (200 mg/L) y línea continua valor indicativo objetivo de calidad límite inferior (60 mg/L).....	59

Figura 22 Sólidos suspendidos totales (SST) en sitios de la cuenca río Atrato, en época de lluvia. La línea punteada señala el valor el indicativo objetivo de calidad límite superior (200 mg/L) y línea continua valor indicativo objetivo de calidad límite inferior (60 mg/L). 59

Figura 23. SST en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias..... 61

Figura 24. SD en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias..... 63

Figura 25. ST en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias..... 64

Figura 26. Oxígeno disuelto en la cuenca del Río Atrato en época seca. La línea punteada naranja señala la concentración mínima (5 mg/L) exigida para el río Atrato, línea punteada verde señala la concentración mínima (6 mg/L) exigida para el río Penderisco y río Urrao, y la línea continua señala la concentración mínima (7 mg/L) exigida para el río Curvaradó. 65

Figura 27. Oxígeno disuelto en la cuenca del Río Atrato en época de lluvias. La línea punteada naranja señala la concentración mínima (5 mg/L) exigida para el río Atrato, línea punteada verde señala la concentración mínima (6 mg/L) exigida para el río Penderisco y río Urrao, y la línea continua señala la concentración mínima (7 mg/L) exigida para el río Curvaradó..... 66

Figura 28. Oxígeno disuelto en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias. 67

Figura 29. Alcalinidad en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias. 69

Figura 30. Fósforo total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias. 71

Figura 31. Nitrógeno total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias. 73

Figura 32. Carbono total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias. 75

Figura 33. *E. coli* en la cuenca del Río Atrato en época seca. La línea punteada señala la concentración máxima (2000 NMP/100ml) exigida para estos sistemas. 77

Figura 34. *E. coli* en la cuenca del Río Atrato en época de lluvias. La línea punteada señala la concentración máxima (2000 NMP/100ml) exigida para estos sistemas. 77

Figura 35. Coliformes totales en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias..... 78

Figura 36. *E. coli* en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias..... 79

Figura 37. DQO en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias..... 81

Figura 38. Potencial de Hidrogeniones (pH) en la cuenca del río Atrato, época seca. Las líneas indican valor máximo (9,0) y mínimo (4,5) de pH según los objetivos de calidad... 82

Figura 39. Potencial de Hidrogeniones (pH) en la cuenca del río Atrato, época de lluvias. Las líneas indican valor máximo (9,0) y mínimo (4,5) de pH según los objetivos de calidad. 82

Figura 40. pH en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.....	84
Figura 41. Dureza total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.	86
Figura 42. Dureza cálcica en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.	87
Figura 43. Salinidad en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.	89
Figura 44. Análisis de componentes principales para la época seca en los sitios de muestreo.....	90
Figura 45. Análisis de componentes principales para la época de lluvias en los sitios de muestreo.....	90
Figura 46. Concentraciones medias de los metales pesados objeto de estudio en los sedimentos de los sistemas lénticos en la cuenca del río Atrato.....	93
Figura 47. Componentes principales para variables en sedimentos en época seca.....	94
Figura 48. Componentes principales para variables en sedimentos en época de lluvias.	97

1 PRESENTACION

Como parte del Convenio Interadministrativo 200-10-01-02-0223-2018 entre CORPOURABA y la Universidad de Antioquia, en este informe se presentan los resultados finales diseño de la red de monitoreo del recurso hídrico en la cuenca del río Atrato en el marco del Proyecto “Estudio de metales pesados en cuerpos de agua de la cuenca del río Atrato Antioquia-Chocó de la orden Quinta y Octava de la Sentencia T-622/16 de la Corte Constitucional”.

La situación que fue objeto de consideración de la Corte Constitucional surge a pesar de los instrumentos legales e institucionales que surgieron a raíz de la Constitución de 1991 y la ley 99 de 1993. Las CARs que comparten la jurisdicción de la cuenca del Atrato (CORPOURABÁ y CODECHOCÓ) han debido adelantar su gestión en un territorio de complejidad ambiental notable, y de difícil acceso y comunicación. Pero sobre todo inmerso en un enorme conflicto social y político, en el cual la gobernabilidad se ve menoscabada por la presencia de diversos grupos armados. A ello se le suma las limitaciones logísticas, de personal y recursos que afectan la efectividad de sus actuaciones.

Inicialmente se hace una descripción manera general de los aspectos más importantes de la visita de reconocimiento y se exponen los criterios para la selección y ubicación de las estaciones de muestreo. Finalmente, se presenta la localización de las estaciones de muestreo en los sistemas de tipo léntico y lótico en las cuatro zonas de la cuenca del río Atrato y se hace un análisis general de los resultados del muestreo exploratorio que cubrió un amplio conjunto de sectores del río y las ciénagas conectadas al mismo.

2 ANTECEDENTES

La Corte Constitucional, mediante Sentencia T-622 de 2016, le otorgó al río Atrato, principal afluente del departamento del Chocó, la categoría de sujeto de derecho. Dicha declaración se dio luego de la impugnación de una acción de tutela interpuesta por parte de las comunidades nativas de la región, las cuales buscaban la protección del río por parte del estado, ante el avance de la minería ilegal en el afluente (Cano, 2017). La Sentencia declara en sus resoluciones

“la existencia de una grave vulneración de los derechos fundamentales a la vida, a la salud, al agua, a la seguridad alimentaria, al medio ambiente sano, a la cultura y al territorio de las comunidades étnicas que habitan la cuenca del río Atrato y sus afluentes, imputable a las entidades del Estado colombiano accionadas por su conducta omisiva al no proveer una respuesta institucional idónea, articulada, coordinada y efectiva para enfrentar los múltiples problemas históricos, socioculturales, ambientales y humanitarios que aquejan a la región y que en los últimos años se han visto agravados por la realización de actividades intensivas de minería ilegal”. (Sentencia T-622/16 Resolución tercera)

Igualmente la Corte ordenó a los “ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de Hacienda y Crédito Público y de Defensa, a CODECHOCÓ, CORPOURABÁ, a las Gobernaciones del Chocó y de Antioquia y a los municipios demandados -con el apoyo del Instituto Humboldt, las Universidades de Antioquia y Cartagena, el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, WWF Colombia y las demás organizaciones nacionales e internacionales que determine la Procuraduría General de la Nación- y en conjunto con las comunidades étnicas accionantes, que dentro del año siguiente a la notificación de la sentencia, se diseñe y ponga en marcha un plan para descontaminar la cuenca del río Atrato y sus afluentes, los territorios ribereños, recuperar sus ecosistemas y evitar daños adicionales al ambiente en la región. Este plan incluirá medidas como: (i) el restablecimiento del cauce del río Atrato, (ii) la eliminación de los bancos de área formados por las actividades mineras y (iii) la reforestación de zonas afectadas por minería legal e ilegal” (Cano, 2017).

El presente proyecto se articula con el Plan de Acción liderado por MINAMBIENTE para dar cumplimiento a las órdenes Quinta y Octava de la sentencia T-622 emanada por la Corte Constitucional de Colombia. La red de monitoreo de la cuenca del río Atrato constituye un elemento base para la realización del diagnóstico de la contaminación por metales pesados en matrices ambientales (agua y sedimentos) en la cuenca del río Atrato en los departamentos de Antioquia y Chocó, para dar solución a las necesidades que se tienen en la cuenca desde la parte ambiental.

3 GENERALIDADES DEL ÁREA DE INTERES

El río Atrato, uno de los principales ríos de Colombia, nace en el Cerro del Plateado en el municipio de El Carmen de Atrato, cordillera Occidental de los Andes y desemboca en el Golfo de Urabá, en el mar Caribe, luego de un recorrido aproximado de 500 km. El Atrato es considerado el tercer río más navegable del país con una profundidad media de 11 m y un ancho promedio de 282 m. Recibe más de 150 ríos y 300 quebradas y es navegable durante todo el año en 508 Km por embarcaciones hasta de 200 toneladas.

El río Atrato se ubica en el Chocó Biogeográfico, zona en la cual se presenta una interacción con la cordillera Occidental, lo cual influye en la fisiografía del lugar. Por tanto, la región de la cuenca del río puede dividirse geomorfológicamente en serranías, colinas, terrazas y valles aluviales (Martinez, 2014).

La cuenca del río Atrato tiene una extensión de 37.700 km² y está delimitada al este por la cordillera Occidental y al oeste por las serranías del Baudó y del Darién, al sur se haya la divisoria de aguas con el río San Juan definida por el istmo de Istmina.

La cuenca está conformada por cuatro zonas: Alto Atrato, desde el nacimiento hasta la población de Yuto; Medio Atrato, desde la población de Yuto hasta el río Murindó; Bajo Atrato, entre el río Murindó y la población de Riosucio, con una llanura de inundación más amplia que la del medio Atrato y Darién y en el Golfo de Urabá, la fisiografía es típica de deltas controlados fluvialmente.

En la desembocadura del río en el golfo de Urabá, sobre el mar Caribe, se forma un complejo sistema deltaico. Las Autoridades Ambientales Competentes, CORPOURABÁ y CODECHOCÓ comparten la jurisdicción de la cuenca (ver Figura 1).

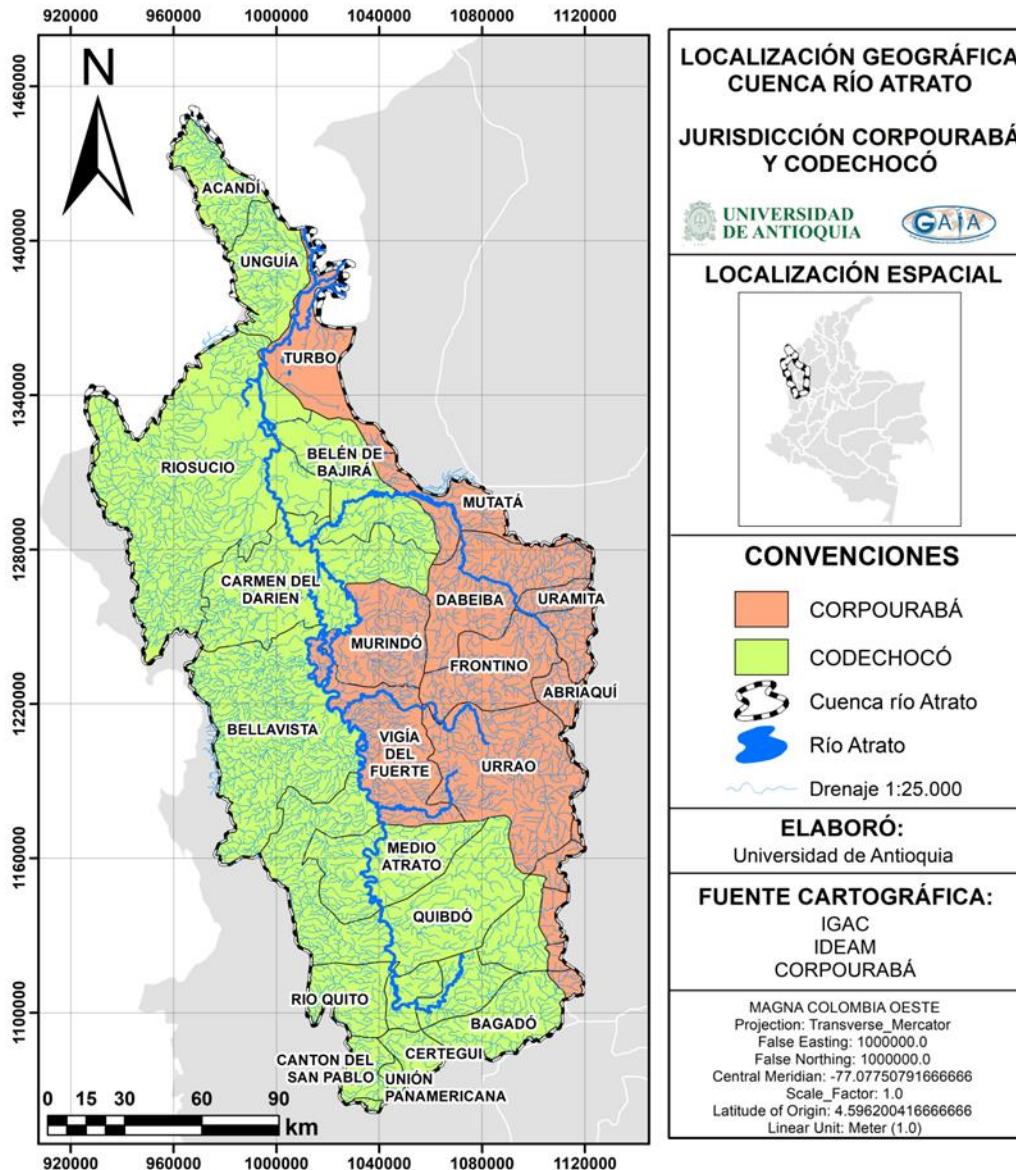


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca del río Atrato y jurisdicción de CORANTIOQUIA y CORPOURABÁ. Fuente: este estudio.

3.1 CLIMA

Según la clasificación de Köppen, la zona se caracteriza por un clima tropical lluvioso; corresponde, en la clasificación de zonas de vida de Holdridge a Bosque Húmedo Tropical (bh-T). El régimen de lluvias es monomodal, con un periodo seco de diciembre a marzo y un periodo más húmedo entre mayo a noviembre. Los valores mensuales de temperatura

presentan muy poca variación temporal y el promedio anual es de 26.4°C. La humedad relativa media anual de la región de 85.2%; los valores mensuales medios varían desde 87.2% para el mes de noviembre y 84.1% para el mes de abril. La región es muy húmeda la mayor parte del tiempo, los excesos anuales varían desde 522 a 1470 mm/año en la parte norte y entre los 2753 a los 3843 mm/año en la parte Sur. El déficit de agua es bajo en toda la región (INVIAS 1998).

El brillo solar medio anual es de 1310, 7 horas/año y los valores medios mensuales varían entre 91,4 horas/mes en junio y 140,3 horas/mes en enero. La distribución temporal del brillo solar muestra una alta relación con la precipitación en la región. En la parte sur, se presentan los valores más bajos de brillo solar, debido principalmente a la alta nubosidad que producen las elevadas precipitaciones. Se registra una variabilidad importante de evaporación en el tiempo, con un promedio de 1020,5 mm/año y un valor máximo de 155,4 mm/mes y un mínimo de 62,7 mm/mes para el mes de noviembre.

En los primeros meses del año se presentan los valores más altos de velocidad del viento (5 m/s) como consecuencia a la llegada de los vientos Alisios del norte, que corren con dirección noreste. Los vientos del sur, con menores velocidades, suaves y superficiales, tienen influencia en los meses restantes (Pintor, 1986).

3.2 HIDROGRAFÍA

Desde el punto de vista hidrológico, la zona está enmarcada por la gran cuenca hidrográfica del río Atrato, sus subcuencas como las de los ríos Cacarica, Riosucio, Peyé, Truandó, Salaquí, Domingó y el conjunto de ciénagas de Tumaradó y la cuenca del Río León. Una descripción general de estos sistemas es el siguiente:

3.2.1 Ambientes lóticos

▪ **Río Atrato**

El río Atrato nace en el Cerro Plateado, en la cordillera occidental, a 3200 metros sobre el nivel del mar, tiene una cuenca hidrográfica de 37700Km², una longitud aproximada de 500Km, pequeña pendiente y poca velocidad. Este río ha formado una serie de ciénagas y pantanos que hacen que su área de desbordamiento, en época de lluvias, sea apreciable y con un ancho variable entre los 150 a 500m. El río Atrato desemboca en el Golfo de Urabá por medio de 18 bocas que conforman el delta del río. Recibe a lo largo de su recorrido más de 50 ríos tributarios y alrededor de 300 quebradas, constituyéndose en una de los ríos más caudalosos del mundo con relación a su longitud. Los principales afluentes de la margen derecha son los ríos Juguamiandó, Riosucio y Tumaradó, y por la margen izquierda los ríos Domingodó, Truandó, Salaquí, y Cacarica (Peranchito). La superficie de la cuenca es muy plana, presentando una pendiente superficial de aproximadamente 6×10^{-6} m/m. La pendiente hidráulica del río es baja, alrededor de 3%.

En el tramo final del río se observan pendientes negativas en su cauce, que inciden directamente en la repuesta del río a la escorrentía, así como a la presentación de zonas

de inundación aguas abajo y a la gran sedimentación que presenta en su desembocadura al mar. Es conocido que los procesos de sedimentación disminuyen la capacidad del cauce al igual que ocurre con la presencia de pendientes negativas en el fondo del mismo. Por lo anterior, es que se presentan las mayores planicies de inundación precisamente en las partes más bajas de la cuenca (INVIAS, 1998).

En cercanías del Golfo de Urabá, el Atrato se ramifica en varios brazos o canales (delta del Atrato) y finalmente entrega sus aguas al mar Caribe. La profundidad del río en estos deltas se reduce, principalmente a causa de la sedimentación y por los menores caudales que transporta cada uno de los brazos. La cuenca del río Atrato se encuentra limitada por la cordillera Occidental al oriente y las Serranías del Baudó y del Darién al occidente. Desde el punto de vista geomorfológico, el río se puede dividir en tres sectores, el Atrato alto, el medio y el bajo.

El valle del río Atrato presenta una llanura aluvial muy plana cuyo ancho fluctúa entre los 60 y 70Km. El cauce principal puede considerarse como moderadamente sinuoso. La cuenca hidrográfica presenta una vegetación que permite una adecuada regulación de caudales de avenidas del río. Sin embargo, la gran proporción de suelos en condiciones casi que permanentes de saturación, convierten la zona en un sistema muy sensible a la escorrentía.

Las principales subcuencas dentro de la región de interés, por su extensión en la parte baja del río Atrato son: río Opogadó, con una cuenca de 1607,5 km²; río Truandó con 2025 km²; río Salaquí con 2210 km²; río Cacarica una cuenca de 1767,5 km²; río Murindó con 2495 km²; río Sucio con 5667,5 km² y, la zona del Tumaradó, con una cuenca aportante de 2487,5 km² (INVIAS, 1998) (ver Figura 2).



Figura 2. Cuenca del río Atrato. Fuente: Benitez (2019)

▪ **Río León**

El río León nace al norte de la población de Mutatá en las estribaciones suroccidentales de la Serranía de Abibe; su curso tiene una orientación predominante al noroeste y desemboca en la Bahía Colombia en el golfo de Urabá (INIVIAS, 1998). Sobre la cuenca hidrográfica del río León tienen asiento los principales núcleos de población de la zona de Urabá

(Mutatá, Chigorodó, Carepa, Apartadó Turbo) por lo cual es el área más densamente poblada y de mayor presión antrópica. Las tierras de piedemonte se están utilizando para cultivos de alto rendimiento. La superficie de la cuenca es de 2250Km² con una longitud del cauce principal de 83Km.

3.2.2 Ambientes lénticos

El conjunto de ciénagas y caños de la planicie interfluvial Atrato-León incluye numerosos cursos cuya superficie es difícil de precisar. Las principales ciénagas son Marriaga, Unguia (2000 ha); Tumaradó (2665 ha); Perancho (350 ha); La Honda (342 ha); El Encanto, Grande (615,87 ha); Pedeguita, La Rica (251 ha) y Palo de Agua; casi todas se incluyen en el área próxima de los ríos Atrato y León.

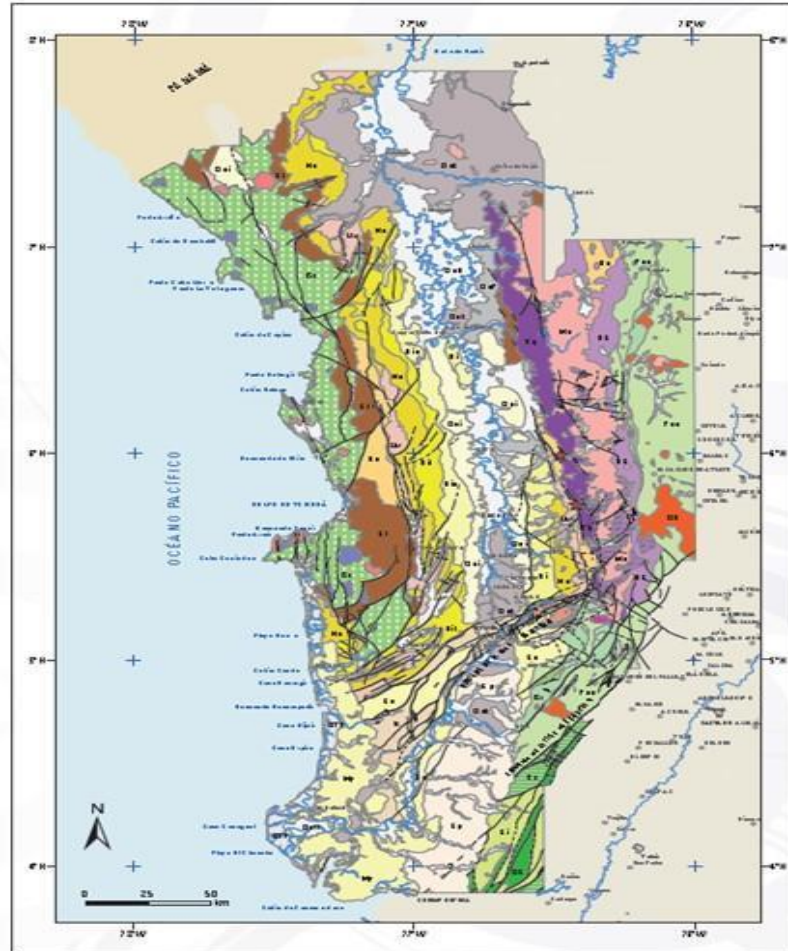
Estas ciénagas se comportan activamente como controladores o amortiguadores de caudal, siendo su función hidráulica extremadamente importante, por cuanto sus conexiones tanto en el río León como con el río Atrato, permiten controlar tanto las avenidas producidas por la precipitación como aquellos remansos que pueden presentarse cuando los niveles de las aguas del mar son más elevados que los del río Atrato (INVIAS, 1998), (ver Figura 3).



Figura 3. Complejo de ciénagas de la cuenca del río Atrato. Fuente: tomado de https://caracol.com.co/emisora/2017/10/17/quibdo/1508248094_513413.html

3.3 GEOLOGÍA

De acuerdo con Ingeominas (1976), en el área de interés, las rocas más antiguas son del Cretáceo Superior y son posiblemente el resultado de un largo volcanismo marino. Estas rocas están constituidas principalmente por derrames y flujos de diabasas, basaltos toleíticos, tobas máficas y otros materiales piroclásticos afines, que constituyen un componente importante de la cordillera Occidental. Estas rocas afloran principalmente en los relieves colinados y montañosos y están superpuestas por rocas ígneas intermedias (Td) y sedimentos (Ts1 y Ts3) del Terciario (ver Figura 4) e intercaladas con liditas, cherts negros, limonitas, calizas y otros materiales sedimentarios.



Mapa Geológico. (Modificado de IGAC- Ingeominas, 2006, Schmidt-Thome et al., 1992 y Utah Minerals, 1980).

Figura 4. Geología de la zona de interés. Fuente: ANH (2010)

Las rocas sedimentarias de edad comprendida entre el Eoceno Superior y el Plioceno constan esencialmente de conglomerados, calizas, areniscas lutáceas y lutitas esquistas, con frecuencia intercalados con bandas de fósiles marinos bien conservados y capas lenticulares delgadas de carbón (Gibson, 1923).

Los componentes de estos estratos son un testimonio parcial del proceso de sedimentación marina, ocurrido en la mayor parte del territorio del Darién desde el Jura-Triásico hasta el Mioceno (Wokittel, 1958). Estas sedimentitas marinas, ricas en materiales calcáreos y elementos alcalino-térreos, rellenaron total o parcialmente las planicies aluviales de los ríos Atrato, Riosucio y León y se intercalaron con los materiales del basamento de las colinas y montañas del Darién Occidental y del sector Nororiental de la Serranía de Abibe.

En la zona del PNN Los Katios, las rocas Terciarias están representadas por materiales que difieren ligeramente en su edad (Miocénicos), en general, más recientes, como andesitas, dacitas y materiales más antiguos del Paleo-Terciario que datan posiblemente del Paleoceno y del Eoceno Inferior, los cuales afloran en tramos aislados de las colinas y

montañas. Estas rocas están constituidas por batolitos y plutones de diorita, cuarzodiorita y diferentes rocas graníticas (tonalitas).

El Cuaternario ocupa principalmente las inmensas planicies aluviales del Atrato y Riosucio - León y sus afluentes, los abanicos aluviales y los pequeños valles y terrazas intramontanos labrados por las corrientes que cruzan los sistemas montañosos. Son una mezcla compleja de sedimentos marinos, aluviales, lacustres y deltáicos, relativamente recientes y generalmente sin consolidación en donde alternan gravas, arenas, limos, calizas, areniscas y, localmente, evaporitas. Las condiciones climáticas del área y la común ocurrencia de coluvios en los abanicos y paisajes bajos, permiten suponer que una gran parte de los sedimentos del Cuaternario, provienen de la erosión pasada y contemporánea de las colinas y montañas. En muchos abanicos aluviales del área, la cubierta vegetal está conformada por coluvios heterométricos angulosos, derivados de los cuerpos diabásicos.

3.4 GEOMORFOLOGÍA

Desde el punto de vista geomorfológico, en toda el área de la cuenca del río Atrato, existe una alternancia de paisajes o geofomas entre serranías, colinas, terrazas y planicies aluviales enmarcadas en el valle del Atrato, el cual está subdividido en el Valle Alto, Medio donde se encuentran numerosas ciénagas y lagunas y el Valle Bajo donde se encuentra el Golfo de Urabá.

La Serranía presenta una extensión apreciable de 201.610 ha, un relieve en su mayoría entre muy pendiente y escarpado y una vegetación de bosque mixto. Al Oeste del Darién y los cerros de Quía. Por el Oriente la Serranía de Abibe. Por el Sur y en dirección Noroeste partiendo aproximadamente de Mutatá se extiende el Cordón Chocoano de la cordillera Occidental que atraviesa la cuenca del río Atrato por Saetará.

Las colinas son elevaciones menores que la serranía, no alcanzan altitudes superiores a 100 m. Se encuentran a lo largo de la zona montañosa en forma casi continua y están formadas principalmente por depósitos del terciario superior, la topografía varía de ondulada a quebrada.

En la zona se encuentran pequeños restos de terrazas en forma aislada son formaciones aluviales antiguas, colindando con las colinas en su parte alta. La topografía es de inclinada a ligeramente ondulada. Adicionalmente, se observan subpaisajes aluviales muy diferentes como pequeños valles formados por los tributarios del Atrato y de León y la gran llanura aluvial formada por el Atrato. Por el Occidente los ríos que bajan de la Serranía del Darién forman pequeños valles transversales aislados unos a otros. Por el Oriente estos valles forman un verdadero plano aluvial que nace al pie de las colinas y desciende hacia el valle del Atrato. La diferencia de altura entre la parte alta de este plano aluvial y el nivel del mar puede ser unos 50 m. la parte baja de este plano aluvial permanece inundada durante gran parte del año.

En el bajo valle del Atrato se encuentran diques aluviales, ciénagas y pantanos. En la parte baja del Atrato no alcanzan a formarse diques aluviales altos y con pequeñas crecidas el río inunda las zonas de pantano aledañas (Goosen, 1960).

- Llanura aluvial y terrazas bajas inundadas o con influencia de inundación, conformadas por las vegas de los ríos Atrato y León y la parte baja de algunos de sus afluentes. Se localizan zonas cenagosas, áreas pantanosas recubiertas de vegetación herbácea, bosques de pantano de poca altura, comunidades homogéneas de palmas y bosques naturales con cierto grado de homogeneidad, caracterizados como arracachales (*Montrichardia arborescens*), panganales (*Raphia taedigera*), manglares y asociación de catival (*Prioria copaifera*).

- Terrazas planas disectadas o no, con suelos mejor drenados que en la unidad anterior, pero sujetas a inundaciones ocasionales. Se encuentra en el piedemonte de las colinas, donde se desarrolla un bosque heterogéneo con algún predominio del cativo (*Prioria copaifera*), pero con una alta participación de otras especies arbóreas.

- Sistemas de orillares, ciénagas y cuerpos de agua abierta, vegas bajas permanentemente inundadas, vegas altas y terrazas inundables y vegas altas o terrazas temporalmente inundables.

- Colinas altas y las zonas planas aledañas no inundables, que se encuentran en las laderas de las montañas y pueden variar de acuerdo con el grado de pendiente y la altura sobre el nivel del mar. La vegetación arbórea corresponde a un bosque heterogéneo, que varía en su composición de acuerdo con el nivel de aprovechamiento que haya soportado y con su recuperación posterior.

Como accidentes orográficos importantes se destacan el Alto El Limón, hacia la frontera con Panamá, donde nace el río Peye, el Alto de Guillermina, así como las Lomas de Cacarica y La Popa. Estas alturas permiten observar la gran belleza de las llanuras inundables del río Atrato. En esta zona también están los Saltos de Tilupo, de más de 100 metros de altura, El Tendal y La Tigra, de unos 25 metros majestuosas caídas de agua donde se puede disfrutar la belleza del paisaje.

3.5 SUELOS

La Serranía presenta una extensión apreciable de 201.610 ha, un relieve en su mayoría entre muy pendiente y escarpado y una vegetación de bosque mixto. Al oeste del Darién y los cerros de Quía. Por el oriente la serranía de Abibe. Por el sur y en dirección noroeste partiendo aproximadamente de Mutatá se extiende el cordón Chocoano de la cordillera occidental que atraviesa la cuenca del río Atrato por Saetará.

Las colinas son elevaciones menores que la serranía, no alcanzan altitudes superiores a 100 m. Se encuentran a lo largo de la zona montañosa en forma casi continua y están formadas principalmente por depósitos del terciario superior, la topografía varía de ondulada a quebrada.

En la zona se encuentran pequeños restos de terrazas en forma aislada son formaciones aluviales antiguas, colindando con las colinas en su parte alta. La topografía es de inclinada a ligeramente ondulada. Adicionalmente, se observan subpaisajes aluviales muy diferentes como pequeños valles formados por los tributarios del Atrato y de León y la gran llanura aluvial formada por el Atrato. Por el occidente los ríos que bajan de la serranía del Darién forman pequeños valles transversales aislados unos a otros. Por el oriente estos valles forman un verdadero plano aluvial que nace al pie de las colinas y desciende hacia el valle del Atrato. La diferencia de altura entre la parte alta de este plano aluvial y el nivel del mar puede ser unos 50 m. la parte baja de este plano aluvial permanece inundada durante gran parte del año.

En el bajo valle del Atrato se encuentran diques aluviales, ciénagas y pantanos. En la parte baja del Atrato no alcanzan a formarse diques aluviales altos y con pequeñas crecidas el río inunda las zonas de pantano aledañas (Goosen, 1960).

Dentro de la información encontrada en el IGAC, se utilizaron cinco documentos claves, los cuales sirvieron para determinar las características físicas y químicas de los suelos que recorre la cuenca del río Atrato: (1) Levantamiento general de suelos de la región de Urabá. Departamento de Antioquia y Chocó, (2) Estudio general de suelos de la región del Darién, (3) Exploración de algunos suelos del Departamento del Chocó, (4) Estudio general de suelos del municipio de Quibdó, y (5) Estudio de suelos de la parte alta del río Atrato. A continuación, se realiza la descripción en cada una de las partes de la cuenca:

▪ **Parte baja de la cuenca del río Atrato (zona norte):**

Los suelos de Urabá varían considerablemente el drenaje, la textura, el color, relieve, etc. En la zona norte, en la Serranía no se encontró registro sobre descripción de suelos. Las colinas, con una extensión de 124.960 ha, presentan suelos de textura media, drenaje ligeramente excesivo y relieve con pendientes de hasta el 100%. Los suelos presentan una capa superior delgada con buen contenido de materia orgánica, seguido por capas con espesores variables y texturas entre franco y franco arenoso fino en las capas inferiores. Tanto el drenaje externo como interno son buenos. Las arenas varían entre 41% y 52%, los de 29% a 33% y las arcillas de 16% - 26% con respecto a la profundidad.

En la terraza disectada, con una extensión de 6.760 ha, los suelos son de textura media y presentan gravillas y cascajos en todo el perfil; estructura granular y presencia de abundantes raíces hasta los 90cms de profundidad. Su drenaje externo es bueno y el interno varía de regular a muy bueno. El porcentaje de arenas varía de 74% a 42%, en limos varía de 14% - 26% y en arcillas varía de 12% - 32% con respecto a la profundidad.

El plano aluvial, con una extensión de 120.640 ha, presenta suelos medios a pesados drenaje bueno a imperfecto, relieve plano con pendiente 0-1%. Las arenas varían de 11% a 28%, los limos de 38% - 49% y las arcillas de 27% - 51% con respecto a la profundidad. El plano aluvial B. o encharcarle presenta la mayor extensión (312.940 ha) en el territorio estudiado. Los suelos son pesados, la textura es arcillosa a través de todo el perfil. En la primera capa hay abundante materia orgánica descompuesta. Presenta un mal drenaje con

poca capacidad de infiltración, provocando durante invierno que gran parte de este plano se encharque. Las arenas varían de 12% a 19%, los limos de 28% - 35% y las arcillas de 49% - 59% con respecto a la profundidad.

Los recortes de delta y diques naturales en formación se encuentran principalmente en las márgenes del río Atrato y de los cauces por los cuales el río desemboca al mar. Con una extensión de 15.250 ha son suelos de textura media y actualmente son suelos bastante húmedos con mal drenaje interno. Presentan en la superficie una textura entre franco limosa y franco, que en las capas inferiores varían entre franco arcilloso limoso y arcilloso. Las arenas varían entre 22% a 27%, los limos de 32% a 49% y las arcillas de 24% a 46% con respecto a la profundidad.

Los pantanos y marismas tienen una extensión bastante amplia de 308.470 ha sobre la zona norte de la cuenca del río Atrato. Presenta suelos pesados, con drenaje casi nulo, relieve plano o cóncavo, lo cual trae como consecuencia el encharcamiento de esta extensión durante gran parte del año. Los manglares, con una extensión de 6.720 ha que se encuentran en las partes bajas a lo largo de la costa, en las márgenes de los ríos y en general avanza en la tierra firme hasta sentir la influencia del agua salada. Los playones, con una extensión menor de 2.650 ha presentan arenas gruesas con tendencia de color grisáceo y en general un mal drenaje.

▪ ***Parte media de la cuenca del río Atrato (zona central):***

Para evaluar esta zona central de la cuenca del río Atrato, se utilizó el estudio de exploración de algunos suelos del Chocó. En esta exploración se visitó la parte central del departamento del Chocó. Haciendo énfasis en el valle del río San Juan, desde Tadó hasta el sitio denominado primavera, en el valle del Río Atrato, desde Lloro hasta Bellavista, entre el istmo de San Pablo, entre Yuto e Istmina y desde Quibdó hasta El Carmen (Benavides y Mojica, 1958).

Los suelos de esta zona se formaron por las deposiciones de materiales aluviales. Cada año se depositan nuevas capas, de modo que los perfiles están sometidos a variaciones más o menos profundas todos los años (Benavides, Sanchez, & Mojica, 1958). La topografía de los suelos aluviales nuevos es caracterizada por los siguientes elementos: Los diques naturales situados a cada lado del río Atrato y en general de todos los ríos, tienen la posición más elevada y por estas circunstancias es la parte más favorecida contra las inundaciones y son las más utilizadas en la agricultura. La otra parte son las llanuras laterales de inundación, las cuales sufren inundaciones más frecuentes y se convierten en pantanos y en zonas pantanosas. Estas tienen una posición más baja que los diques naturales.

▪ ***Parte alta de la cuenca del río Atrato:***

Apoyándose en el estudio realizado por el IGAC denominado estudio de suelos de la parte alta del río Atrato, es cual tiene un alcance que comprende los municipios del El Carmen,

Bagadó, Lloró, y parte del municipio de Quibdó; el cual tiene como finalidad principal el conocimiento y distribución de los suelos en los diferentes paisajes, y sus aptitudes y limitaciones para el desarrollo agropecuario.

En el estudio la descripción se realiza siguiendo el orden de la leyenda geomorfológica, con base a tres paisajes que tienen cada uno de ellos características diferentes en cuanto a clima, relieve y materiales geológicos. Dentro de estos paisajes se encuentran: Suelos de vertientes erosionales, suelos de vertientes estructurales, suelos de los vallecitos, suelos de las lomas residuales. suelos de los relieves de cuesta, suelos de colinas residuales, suelos de la llanura desbordada y suelos de terrazas aluviales.

Las características físicas de los suelos en los primeros horizontes han sido atribuidas, en gran parte, a la materia orgánica, la cual ejerce gran influencia sobre la estructura, la infiltración y retención de agua.

En el paisaje de montaña cubierto por mantos de ceniza volcánica, predominan las texturas franco arenosa y en ocasiones franco arcillo arenosas. En el paisaje lomero, la textura varía desde franco arcillosa hasta arenosa. En el paisaje de Valle las texturas ofrecen similares características a las observadas en el paisaje anterior (Paisaje lomero). Sin embargo, la fracción limo se encuentra en mayores proporciones (Martínez, 2014).

3.6 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL CUENCA DEL RÍO ATRATO

La región del Pacífico conocida por su abundancia de recursos naturales y su riqueza cultural, así como por el constante proceso de depredación que la ha afectado desde tiempos de la Colonia es víctima de este tipo de actividades. Las Comunidades Afrocolombianas forzosamente desplazadas de la Cuenca del Cacarica en el Chocó, provisionalmente asentadas en Turbo, Bocas del Atrato y Bahía Cupica, han denunciado la deforestación ilegal e indiscriminada de sus territorios por parte de las cooperativas madereras. La misma aparentemente está operando en conexión con la compañía maderera "Maderas de El Darién".

El florecimiento de las actividades madereras se da a finales de los años 50, como consecuencia de las políticas de fomento a la industria de la construcción- en las regiones del Atrato en las cuencas de los ríos Salaquí, Cacarica y Truandó (Pizano S.A.) y en el río San Juan, cuenca del río Calima (Cartones de Colombia Smurfit). Hasta finales de los años 60, en el Pacífico colombiano, hasta se explotaron 1'697.295 ha a través de 140 permisos y concesiones. Los bosques más afectados por esta industria han sido los guandales y los cativales, estos últimos localizados en la parte media y baja del Atrato. De las 363.000 hectáreas de cativales que existían en esa región, hacia finales de los ochentas sólo quedaban unas 90.000, como consecuencia de la destrucción de aproximadamente unas 8.200 hectáreas por año (Defensoría del Pueblo, 2012).

Según el Proyecto Biopacífico para 1992, se habían arrasado alrededor del 75 % de los bosques de cativales del área del Bajo Atrato (sector Guapa – Lomas Aisladas), como consecuencia del auge colonizador que extraía los recursos del bosque de manera

industrial, para dar paso a la implantación de ganaderías extensivas y/o bananeras. En las cuencas de los ríos Cacarica, Salaquí, Truandó y el municipio de Jurado, la intensidad de la explotación forestal ha sido de tal magnitud, que se ha producido una crisis ambiental que amenaza con el colapso de los ecosistemas y el incremento de la problemática social, de por sí crítica en la región del Chocó. Como consecuencia de la deforestación, se presenta un proceso de sedimentación y colmatación de los ríos y las ciénagas, que amenaza con la navegabilidad del Atrato (hecho evidente en el delta del río Atrato) y la seguridad alimentaria de sus pobladores, por los efectos directos en los recursos pesqueros e hidrobiológicos.

- ***Cambios hidrológicos***

Adicional a las coberturas, se caracterizaron cuantitativamente los cambios en el cauce del río Atrato y de otros ríos, como El Cacarica y El Peyé. Este comportamiento da información de la dinámica de estas corrientes, y del aporte frecuente de sedimentos a las ciénagas, el cual se acrecienta por la deforestación, la potrerización y el restablecimiento de actividades humanas como agricultura y ganadería. La misma extracción de madera ha ocasionado gravísimos daños a los drenajes y ha producido numerosos canales (observados como líneas rectas) que sirven actualmente como aliviaderos a la cantidad de sedimentos que van a las ciénagas.

- ***Vertimiento de residuos sólidos y orgánicos a los cuerpos de agua***

Los residuos, especialmente plástico, vidrio, latas, metales pesados (pilas), contaminan los cuerpos de agua y afectan directamente a la fauna asociada. Esto, junto con coliformes provenientes de desechos fecales y vertimiento de aguas servidas, afectan la salud humana. La explotación maderera ha generado, entre otros efectos, contaminación en las aguas (por el vertimiento de lubricantes e inmunizantes) y taponamiento de los ríos, cauces y canales (únicas vías de comunicación en la zona). Adicionalmente a la deforestación, y como consecuencia de ella, se presenta un proceso de sedimentación y colmatación de los ríos y las ciénagas, que amenaza con la navegabilidad del Atrato (hecho evidente en el delta del río Atrato) y la seguridad alimentaria de sus pobladores, por los efectos directos en los recursos pesqueros e hidrobiológicos, dado el desequilibrio ecológico manifiesto (ver Figura 5).



Figura 5. Impacto ambiental sobre el río. Fuente: tomada de <https://sospacifico.com.co/noticias/noticias-quibdo-salvar-rio-atrato-odin-sanchez/>

- ***Ampliación de la frontera agrícola***

En los sectores Cacarica, Peze y el Cuarenta se presenta esta actividad con fines de subsistencia y comercialización a pequeña escala, con cultivos principalmente de maíz, arroz y plátano, además de cultivos de pancoger como: hortalizas, banano, borjón, cacao y yuca. Estas prácticas ocasionan pérdida de la cobertura vegetal nativa, desplazamiento de especies de fauna silvestre por pérdida del hábitat. Esta amenaza también ocasiona ampliación de frontera agrícola e invasión de animales domésticos al mismo tiempo.

- ***Incendios forestales provocados***

Son de origen antrópico con fines de cacería de fauna (hicotea, babilla, entre otras). Estas prácticas afectan la cobertura vegetal y en general el hábitat de especies silvestres (mortalidad de reptiles, aves, mamíferos, destrucción de nidos y de hábitats de reproducción de especies), además de ocasionar erosión por arrastre y pérdida del suelo. Por otro lado, las quemadas incontroladas para acondicionamiento de tierras para agricultura han ocasionado incendios forestales. Los incendios se presentan principalmente en la vegetación que rodea las ciénagas. Una de las principales coberturas afectadas son los panganales, extensas consociaciones presentes en zonas inundables en el bajo Atrato, dominadas por la palma *Raphia taedigera*.

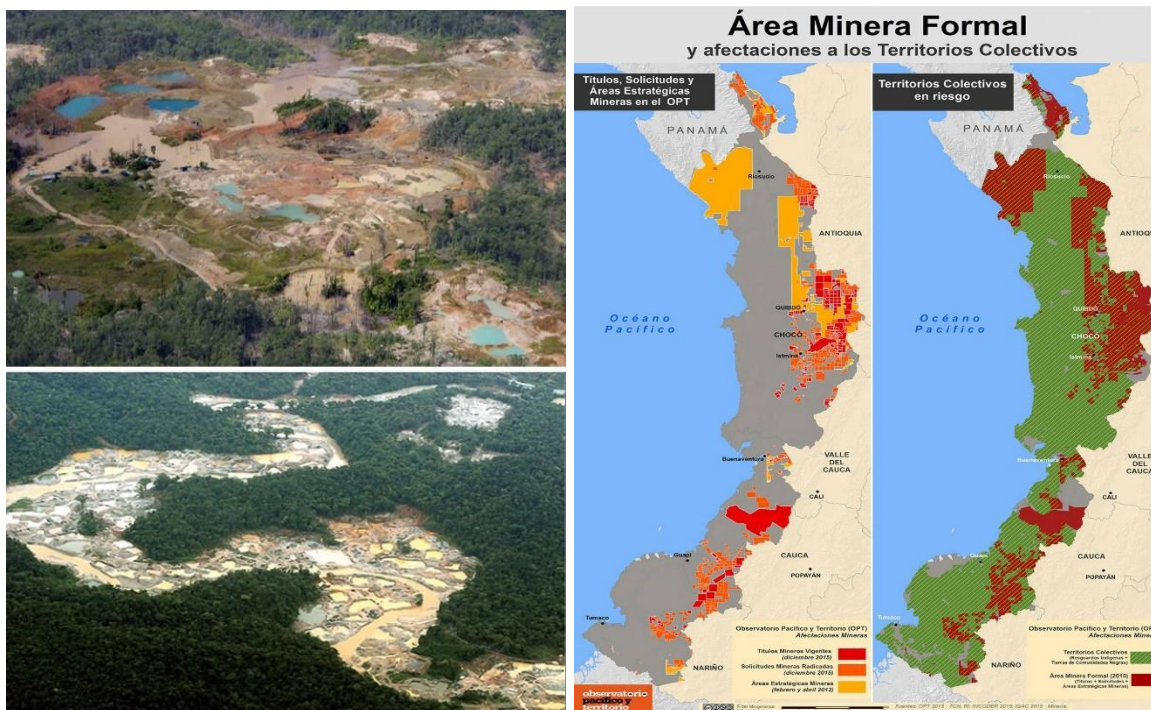
- ***Crecimiento demográfico***

Las altas tasas de natalidad actuales en la zona, implican una mayor demanda de recursos naturales, lo que trae consigo un deterioro de los mismos. Eventualmente se presenta oportunidad de extracción de ciertas especies o recursos marcados por la demanda de los mismos y que traen a la población un incremento monetario por encima de los ingresos normales. Estas prácticas no tienen ningún tipo de planificación ni contemplan acciones de mitigación o recuperación de los recursos. Normalmente la actividad cesa cuando se agota el recurso o deja de ser rentable. Algunos de los procesos más comunes debido a este crecimiento demográfico son los siguientes:

- i. Erosión de suelos por usos inadecuados asociados a la ganadería y la agricultura, al cultivo de plátano en terrenos bajos e inundables propensos a avalanchas cíclicas, y al asentamiento urbano en zonas de amenaza alta.
- ii. Transformación radical del paisaje y la topografía del territorio por la realización de macroproyecto y el desarrollo urbano extensivo con una fuerte demanda de recursos naturales y un impacto negativo por la disposición de residuos, con la alteración de ecosistemas acuáticos e ictiofauna.
- iii. Alteración de ecosistemas, alteración de caudales y de cursos de aguas y del mar caribe, por el aporte de materia orgánica, agroquímicos y sólidos suspendidos por la agricultura intensiva.
- iv. Deterioro del suelo, la flora, la fauna y el agua por la incorporación de tierras boscosas a la frontera ganadera y el aumento de la demanda del recurso forestal para actividades industriales.

▪ **Explotación minera**

Décadas de conflictos internos han alimentado una oleada sin precedentes de minería ilegal en la región colombiana del Chocó, lo que diezmoó la cuenca del Atrato y provocó una crisis ambiental y humanitaria (ver Figura 6)



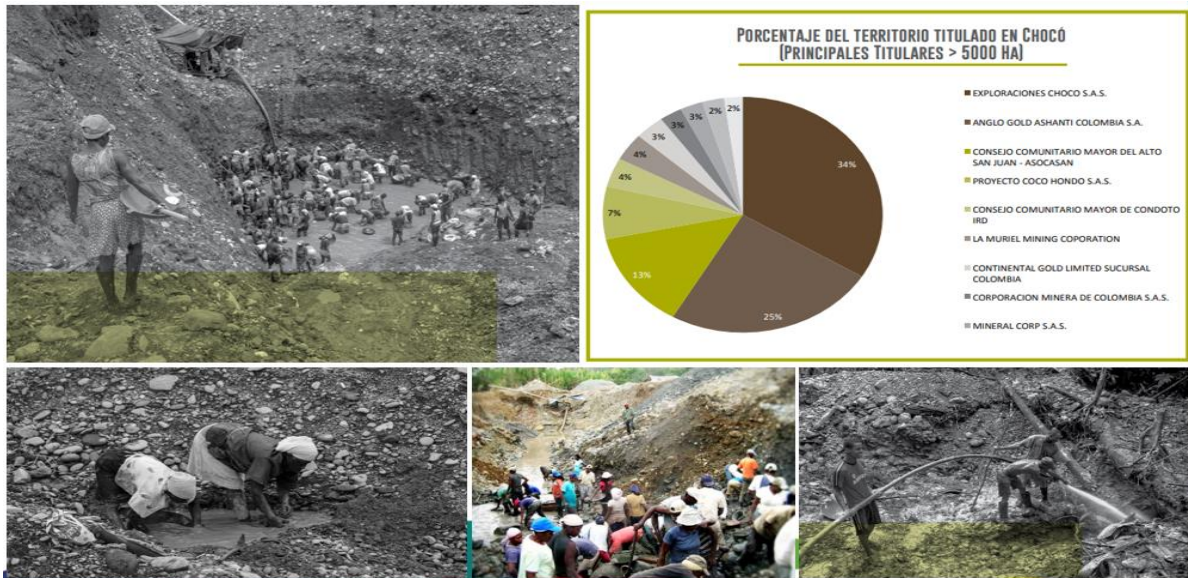


Figura 6. Deterioro ambiental del río por explotaciones mineras y áreas entregadas para explotación por el Ministerio de Minas y Energía en la zona alrededor del río Atrato. Fuente: tomado de https://pacificocolombia.org/wp-content/gallery/Miner%C3%ADa/AREAMIN_OPT_15.jpg

En una resolución histórica tomada en 2016, la Corte Constitucional de Colombia reconoció al río Atrato como una entidad sujeta de derechos ambientales justo cuando el país firmaba acuerdos de paz históricos, pero, luego de tres años, una nueva etapa de conflictos está afectando la región del Chocó. La contaminación por mercurio y cianuro provenientes de las actividades mineras industriales lo convierte en el río más contaminado de Colombia, y todavía falta materializar una operación de eliminación prometida en 2016.

Serpenteando por el departamento de Chocó, al Noroeste de Colombia, el río Atrato ha sido durante siglos el sustento de las comunidades originarias y afrocolombianas que viven en las riberas. Sin embargo, décadas de conflictos internos han alimentado una oleada sin precedentes de minería ilegal, lo que diezmo la cuenca del río y provocó una crisis ambiental y humanitaria en una de las regiones más biodiversas del planeta.

En una resolución histórica tomada en 2016, la Corte Constitucional de Colombia reconoció al río Atrato como una entidad sujeta de derechos ambientales, lo que obliga al Estado a implementar la “protección, conservación, mantenimiento y restauración” del río y de las comunidades vinculadas a él. La resolución llegó justo cuando el país firmaba acuerdos de paz históricos entre las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) y el Estado, lo que aparentemente terminó con más de medio siglo de guerra e insurgencia.

Sin embargo, tres años más tarde, una nueva etapa de conflictos está afectando a la región del Chocó. La violencia y el desplazamiento continúan azotando a las poblaciones ribereñas del Atrato, quienes siguen siendo las más pobres del país. Luchas esporádicas entre grupos paramilitares, como las Autodefensas Gaitanistas de Colombia (AGC) y el Ejército de

Liberación Nacional (ELN) —el grupo guerrillero más grande que queda en el país—, llenan el vacío dejado por las FARC. Los defensores ecologistas encargados de supervisar la implementación del fallo judicial se quejan de una falta total de acción y protección del Estado. Con la amenaza constante de la intimidación y el miedo a ser asesinados por llevar a cabo su trabajo, se desesperan por lograr incluso leves mejoras.

Chocó alberga uno de los ecosistemas más diversos del mundo. Se estima que unas 54.850 especies de animales viven en la densa jungla del Chocó. Sin embargo, las operaciones mineras a cielo abierto y la deforestación a gran escala están amenazando este único y preciado hábitat. La contaminación por mercurio y cianuro proveniente de las actividades mineras industriales lo convierten en el río más contaminado de Colombia, y todavía falta materializar una operación de eliminación prometida en 2016.

Río Tóxico nos ofrece una perspectiva excepcional del conflicto ambiental del Chocó, uno de los problemas de Latinoamérica menos tratados y, sin embargo, más urgentes, mediante la experiencia de tres testigos: un minero, un pescador y un cuidador del río. Las nuevas generaciones enfrentan ahora una amenaza existencial, ya que el Estado no cumple con sus obligaciones legales y las comunidades étnicas que están sobre la vía fluvial principal del Chocó pelean por un río que es crucial para la cultura, identidad y supervivencia de ellas (Mongabay Latam, 2019).

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una red de muestreo de calidad de los ambientes acuáticos en la cuenca del río Atrato con base en la Sentencia de la Corte Constitucional

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar e implementar la red de monitoreo del recurso hídrico en la cuenca del río Atrato.
- Determinar la concentración de los metales pesados presentes en el recurso hídrico de la cuenca del río Atrato.
- Realizar la evaluación de la concentración de los metales pesados en la cuenca del río Atrato.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 GEOQUÍMICA: AGUAS Y SEDIMENTOS

5.1.1 Sedimentos superficiales lacustres

El término sedimento se refiere a los depósitos al fondo de los ecosistemas acuáticos, que constituyen la acumulación de materiales arrastrados (alóctonos), o bien producidos en la

misma masa de agua (autóctonos), minerales (evaporitas, arcillas, fragmentos de rocas o materiales clásticos, minerales formados en la propia agua) y orgánicos (organismos enteros que mueren en el sedimento, organismos muertos y fragmentos de los mismos, excrementos, materia orgánica floculada, material detrítico autóctonos). La composición de los sedimentos y la velocidad con que se acumulan, expresan la actividad del lago como receptor de una cuenca y como centro de actividad biológica (Rojas, 2011; Planas, 2010). Los sedimentos se pueden considerar como una mezcla heterogénea de partículas con tamaños, composiciones y orígenes diversos. En relación al tamaño se suelen distinguir dos tipos de partículas: finas (con un diámetro menor o igual que $63\ \mu\text{m}$), que a su vez se subdividen en limo ($2\text{-}63\ \mu\text{m}$) y arcilla ($<2\ \mu\text{m}$), y gruesas (con un diámetro que supera las $63\ \mu\text{m}$), que se subdividen en arena fina ($>63\text{-}200\ \mu\text{m}$), arena media ($>200\text{-}630\ \mu\text{m}$) y arena gruesa ($>630\ \mu\text{m}$) (Martorell, 2010).

La composición de los sedimentos brinda información acerca de los diferentes ambientes de constitución y de sedimentación por lo que ha pasado. Realizar una caracterización geoquímica de éstos, permite conocer la historia de los mismos (Cupul-Magaña *et al.*, 2006). El contenido de algunas sustancias en los sedimentos, como carbono orgánico, metales pesados, nutrientes, entre otros, permite determinar el origen y el grado de afectación de un cuerpo de agua (Ablanado *et al.*, 1992). Dentro de los aspectos más relevantes de la caracterización geoquímica de los sedimentos se encuentra el análisis granulométrico; conocer el tamaño de partícula, relacionado a su vez con el tamaño en el área superficial debido a que las partículas de grano fino tienen mayor razón del área de superficie a su radio, tienden a formar láminas, con una mayor área y más compactas, propiciando la acumulación de materia orgánica y contaminantes (Ordoñez, 2013).

5.1.2 Metales pesados objeto de estudio

Los metales pesados se definen como todos aquellos elementos químicos cuya densidad es mayor a $5\ \text{g/ml}$, es decir cinco veces mayor que la densidad del agua; además, pueden formar aleaciones entre sí y es posible encontrarlos aislados o combinados formando minerales (Rojas, 2011). Se caracterizan por presentar conductividad eléctrica y térmicas altas, maleabilidad, ductilidad y brillo. De igual manera presentan características químicas semejantes como igual estado de oxidación, misma distribución electromagnética de las capas y pesos atómicos que oscilan entre los valores de $63,55$ a $200,59\ \text{g/mol}$ (Cabrera, 2010). Hay que mencionar además que dentro de esta categoría se encuentran todos los elementos metálicos de interés económicos, sobre todo, de interés minero (Oyarzun & Higuera, 2009). A estos elementos químicos se les conoce también como elementos traza en función de las concentraciones detectables presentes en una muestra, mediante técnicas de análisis clásicas. Conforme a lo anterior, son considerados elementos traza aquellos metales detectables en un rango de concentración entre 100 y $0,01\ \text{mg/kg}$ y elementos ultratrazas a los niveles comprendidos entre $0,01\ \text{mg/kg}$ y $10\ \mu\text{g/kg}$ (Marrugo & Paternina, 2011).

En el presente trabajo se han estudiado nueve metales pesados: Calcio, Hierro, Aluminio, Manganeso, Cadmio, Cromo, Plomo, Zinc y Mercurio. Estos elementos representan un gran

interés debido a que son liberados al ambiente como producto de los drenajes ácidos de las actividades mineras desarrolladas en la zona de estudio (Castro, 2011); además son nocivos para la salud humana y para la mayoría de formas de vida.

- **Cadmio-Cd**

El cadmio es un elemento metálico de transición que pertenece al grupo II-B de la tabla periódica, su número atómico es 48 y su masa atómica relativa 112,44 (Bradl, 2005). Se encuentra en la naturaleza en forma de sulfuro de cadmio, frecuentemente con impureza, en minerales de zinc y plomo, en estado elemental es insoluble al agua, así como sus carbonatos e hidróxidos, en tanto que sus cloruros, nitratos y sulfuros son bastante solubles (Espinosa, 2014). La solubilidad del Cadmio en agua aumenta en medios ácidos, mientras que la adsorción a suelos y sedimentos se incrementa al aumentar el pH (Jiménez, 2012). Las principales fuentes de Cd en ambientes acuáticos son debidas al lavado de los suelos agrícolas y a las descargas de la minería y la industria. Otro origen importante son los desechos municipales y los lodos de las plantas de tratamiento (Marrugo & Paternina, 2011). Además, Este metal es usado de manera intensiva en la fabricación de baterías, pinturas y plásticos (Pinzón, Ospina, & Chávez, 2009).

- **Cromo-Cr**

El cromo pertenece al grupo VI-B de la tabla periódica con número atómico de 24, peso atómico de 52,0, una densidad de 7,2 g/cm³ y punto de fusión de 1,857 °C (Bradl, 2005). Su abundancia en la corteza terrestre es de 200 ppm (Pinzón et al., 2009). El cromo no se encuentra solo en la naturaleza, sino distribuido ampliamente como cromita (FeOCr₂O₃) o piedra de cromo férrico. Puede presentarse en estados de oxidación de II a VI. Los estados de valencia que son de interés industrial son en primer lugar el cromo hexavalente, Cr (VI), y en menor grado el cromo trivalente Cr (III) (Téllez et al., 2004). A niveles de traza es otro elemento esencial; no obstante, puede actuar también como un potente agente cancerígeno. Sus propiedades cancerígenas están asociadas a su estado de oxidación superior, el Cr (VI) (Alcivar & Mosquera, 2011).

La toxicología acuática de cromo también depende según la especificación, siendo el cromo (III) mucho menos disponible biológicamente y tóxico que el cromo (VI) (Ref. 3^a). Esta última forma, Cr (VI), es de naturaleza aniónica y por consiguiente no es fuertemente absorbido por el sedimento o la materia particulada. Tiene tendencia a reaccionar fuertemente con sustancias oxidables, por lo general moléculas orgánicas, para formar así Cr (III). En aguas aeróbicas el Cr (VI) es estable, pero en condiciones anaeróbicas se reduce a Cr (III), que a en condiciones de pH neutro se deposita en forma de óxido (Rosas, 2001).

- **Plomo-Pb**

El plomo tiene un número atómico de 82 y es un metal de color gris azulado de lustre brillante. Se caracteriza por ser blando, maleable, dúctil, mal conductor eléctrico, pero es

muy resistente a la corrosión. Pb pertenece al grupo IV-A de la tabla periódica, con un peso atómico de 207,2, punto de fusión de 328°C y una densidad de 11,4 g/cm³. Presenta dos estados de oxidación, +2 y +4. En la mayoría de sus compuestos inorgánicos el plomo tiene estado de oxidación +2; de éstos, las sales de bromuro y cloruro son ligeramente solubles en agua mientras que las sales de carbonato y las sales básicas son completamente insolubles (Bradl, 2005).

Es un componente natural de la corteza terrestre, constituyente de suelos, plantas y agua a niveles traza. No se encuentra en estado puro sino combinado con otros elementos en forma de sales y aparece asociado al Zn, Fe, Cd y Hg (Marrugo & Paternina, 2011). En general, el plomo puede presentarse en forma de sulfuro de plomo PbS (galena), carbonato de plomo PbCO₃ (cerusita) y sulfato de plomo PbSO₄ (anglesita). Los minerales de silicatos, feldespatos y magnetitas son notables sumideros de plomo en los sedimentos (Rosas, 2005).

Las principales causas de origen natural que condicionan la movilización de Pb desde la corteza terrestre están dadas por las erupciones volcánicas y la meteorización de las rocas (Martorell, 2010). Por el contrario, las fuentes antropogénicas de contaminación por este metal son más variadas y provienen de varios ámbitos; se destacan como principal fuente de emisión y descarga de Pb las áreas urbanas en las cuales se desarrollen actividades como fundición de plomo, recuperación del metal y la combustión de combustibles fósiles, especialmente la gasolina de los automóviles (Alcivar & Mosquera, 2011). Cabe señalar que las actividades humanas liberan mucho más Pb a la atmósfera (449.000 toneladas/año) que las fuentes naturales (19.000 toneladas/año). Una vez en la atmósfera, pasa a formar óxidos o carbonatos adhiriéndose al material particulado debido a interacciones electrostáticas, los cuales son posteriormente depositados dependiendo el tamaño o densidad de la partícula. Para el caso de la fracción fina, éstas pueden permanecer en suspensión y ser transportados por el viento a distancias considerables de su punto de emisión (Jiménez, 2012). Finalmente, son depositadas en el suelo y a través de la acción de la lluvia son lavados y arrastrados hacia los cuerpos de agua y, teniendo en cuenta que el plomo es la sustancia química tóxica más persistente en el ambiente, esta contaminación iniciará un recorrido a mayores distancias emisión (Jiménez, 2012; Alcivar & Mosquera, 2011; Rosas, 2001). Por otro lado, es un metal muy usado en la industria, como puede ser en la fabricación de pigmentos, recubrimientos, recipientes, ungüentos, pilas y baterías eléctricas, incluso algunos licores. Además, el plomo tiene hoy en día numerosas aplicaciones en metalurgia (munición de armas, metal para cojinetes, cobertura de cables, compuestos de calafateo, plomo laminado, soldaduras, pigmentos, vidriado de cerámica y ciertos tipos de cristal) (Gutiérrez et al., 2004).

▪ **Zinc-Zn**

El zinc tiene número atómico 30, peso atómico de 65,38, punto de fusión de 420°C y una densidad de 7,13 g/cm³. Pertenece al grupo II-B de la tabla periódica. Zn es un metal de color blanco azulado que comprende cinco isótopos estables que presentan las siguientes abundancias relativas: 64Zn (48,89%), 66Zn (27,81%), 67Zn (4,11%), 68Zn (18,65%), and

70(0,62%) (Bradl, 2005). En el ambiente se presenta en la forma química Zn(II), aunque es posible encontrarlo en Zn (0) y Zn(I). Es un elemento abundante en la corteza terrestre, ocupando el puesto número 24. Su contenido en la litosfera está alrededor de 70mg/kg. Se encuentra formando parte de más de cincuenta minerales, de los cuales se destacan (ZnS), esmithsonita (ZnCO₃) y la cincita (ZnO) (Martorell, 2010). Sus compuestos poco solubles (hidróxidos y carbonatos) tienen la capacidad de absorberse fuertemente sobre los sedimentos béticos de los cursos de agua. Los niveles significativos de Zn en ambientes acuáticos pueden estar relacionados directamente con las excreciones de animales y seres humanos (Rosas, 2001). Junto con el Cd, es considerado como metal muy biodisponible. Dentro de los factores ambientales que afectan su movilidad y biodisponibilidad se destacan el pH, el contenido de materia orgánica, el contenido de minerales de arcilla y el potencial Redox (Martorell, 2010).

▪ **Mercurio-Hg**

Mercurio tiene un número atómico de 80, peso atómico de 200,6, punto de fusión de -38,8 °C, densidad de 13,55 g/cm³ y una presión de vapor de 1,22 x 10⁻³ mm a 20°C. Es un metal de color blanco plateado. Presenta tres estados de oxidación estables: +0 (Hg elemental), I (mercurioso) y II (mercurio). Sus propiedades y comportamiento químico dependen de los estados de oxidación. Existen siete isotopos estables con las siguientes abundancias relativas: 195Hg (0,15%), 198Hg (10,1%), 199Hg (17,0%), 200Hg (23,3%), 201Hg (13,2%), 202Hg (29,6%), y 204Hg (6,7%). La mayoría del Hg que se encuentra en la atmosfera es vapor de Hg elemental mientras que el Hg presente en suelo, agua, sedimentos o en organismos vivos, es en forma de sales inorgánicas y complejos de mercurio orgánico (Bradl, 2005).

Los sedimentos son el principal sumidero de Hg en los sistemas acuáticos, principalmente debido a su asociación con la materia orgánica y minerales de óxidos superficiales (Marrugo & Paternina, 2011). El metilmercurio, la forma más tóxica de Hg, en los ecosistemas es originado principalmente a partir de la metilación del mercurio inorgánico por bacterias aerobias y anaerobias. En general, todas las formas de mercurio que entran en los sistemas acuáticos pueden convertirse en metilmercurio, el cual puede ser directamente bioacumulado por organismos acuáticos y biomagnificado a través de la cadena alimenticia. Alrededor del 90 % de todo el metilmercurio presente en los alimentos es absorbido a través del sistema digestivo, tanto en el hombre como en los animales (Español Cano, 2012). Por esta razón, la evaluación de los niveles de Hg representa un factor importante no solo desde el punto de vista toxicológico, sino también para la evaluación de los impactos potenciales sobre la salud pública (Marrugo & Paternina, 2011).

5.1.3 Interacción metales pesados en ciénagas

El límite entre la columna agua y el sedimento es una frontera multiestrato altamente dinámica y compleja. En algún momento los flocos alcanzan profundidades donde pierden su flotabilidad y se empiezan a sedimentar, a medida que se aproximan al fondo su

densidad por unidad de volumen se incrementa y las fuerzas coloidales favorecen la formación de coágulos mayores y de una capa grumosa (capa floculosa) inestable y pastosa que se agita encima del sedimento. Muchas de las partículas siliciclásticas no arcillosas y sin cargas eléctricas significativas pasan directamente al sedimento inferior o contribuyen al arrastre de los grumos de floculos hasta el sedimento. Inmediatamente debajo de la capa floculosa se tiene una capa de sedimento bioactivo muy hidratada, la cual colecta todas las partículas y los grumos que han alcanzado un tamaño suficiente para ser llevadas hasta allí por la acción de la gravedad.

En las partes del sedimento, que subyacen a la capa bioactiva, predominan los procesos inorgánicos reductores y anaerobios de la diagénesis (sedimento no bioactivo) y, por tanto, se le trata del sedimento en sentido geológico. Estos materiales pueden llegar a medir decenas de metros y pierden agua a medida que maduran o son enterrados más profundamente y sus procesos normalmente son más lentos, excepto cuando estos sedimentos ocurren en la zona litoral de los lagos donde la edafogénesis subacuática y las raíces de las plantas están activas.

La interfase agua-sedimento consta de dos capas íntimamente acopladas, una capa floculosa superior y el sedimento bioactivo basal. La capa floculosa superior suele ser delgada, de pocos decímetros, y representa el material floculado recientemente y cuando no sufre resuspensión, es retenido durante un corto periodo de tiempo antes de ser transferido a la capa bioactiva subyacente. Por su parte la capa bioactiva es un estrato delgado (cm a pocos decímetros) que responde de acuerdo con el estado del redox del hipolimnio o con sus fluctuaciones estacionales, es de naturaleza muy porosa, permeable y pastosa, debido al exceso de agua que almacena. Prácticamente toda la actividad biológica de los bentos, los procesos de acumulación y descomposición de la materia orgánica y la mayor parte de los movimientos de los cationes ocurren en ella debido a los fuertes gradientes fisicoquímicos que allí se presentan (ver Figura 7).

En la interfase agua-sedimento tienen lugar los procesos responsables de la recirculación y transporte de los elementos entre el agua y los sedimentos (Berner 1980). Estos procesos son los que permiten reemplazar o reponer las concentraciones de especies químicas en la columna y controlan las tendencias de acumulación de iones a largo plazo, permitiendo comprender, de un modo más completo, la dinámica de los cuerpos de agua.

El desarrollo de estas reacciones en la interfaz agua-sedimento depende de procesos físicos, químicos y biológicos que se originen en el sistema acuático, y son propias de cada uno.

Si la interfase es anóxica, iones fosfatos pueden difundir a una tasa dependiente del gradiente de concentración entre el agua de poro y el agua de la columna. Si la interfase está oxigenada, los iones fosfatos precipitan y no difunden. Las reacciones más estudiadas de la interfase son aquellas que modifican el fósforo desde la fase sólida a fosfato soluble en las aguas intersticiales, desde donde puede ser liberado a la columna de agua.

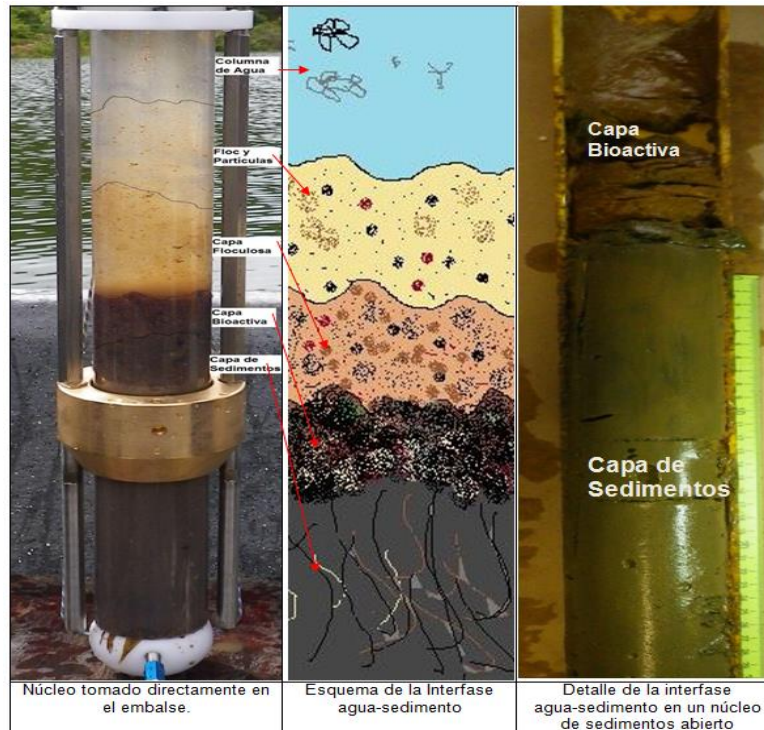


Figura 7. Estructura vertical típica de la interfase agua-sedimento

6 METODOLOGÍA

6.1 DISEÑO RED DE MONITOREO

Entre los criterios empleados para definir la ubicación de las estaciones de muestreo se consideraron las actividades de minería, diferenciando zonas ubicadas en áreas de influencia directa y sectores no afectados en las jurisdicciones de CORPOURABÁ y CODECHOCÓ.

Para el diseño de la red de muestreo también se tuvo en consideración la ubicación, morfometría y área de los humedales asociados al río Atrato y sus conexiones con el río.

En la Figura 8, Figura 9 y Figura 10 se presenta la dinámica de expansión y contracción del espejo de agua de las ciénagas El Burro, El Limón y Las Mujeres a partir de dos imágenes de satélite Landsat 7 (USGS, 2019) de dos periodos climáticos diferentes. Se observan diferencias en las áreas y perímetros entre las épocas secas y de lluvias, evidenciando la disminución del espejo de agua durante el periodo seco y la formación de islotes o meandros asociados a los sedimentos transportados por los afluentes.

Con base en estas dinámicas de expansión y contracción de las ciénagas conectadas al río Atrato se definieron los puntos de monitoreo en zonas de constante inundación garantizando el análisis y la correlación de las variables ambientales para las dos épocas de muestreo diferentes.

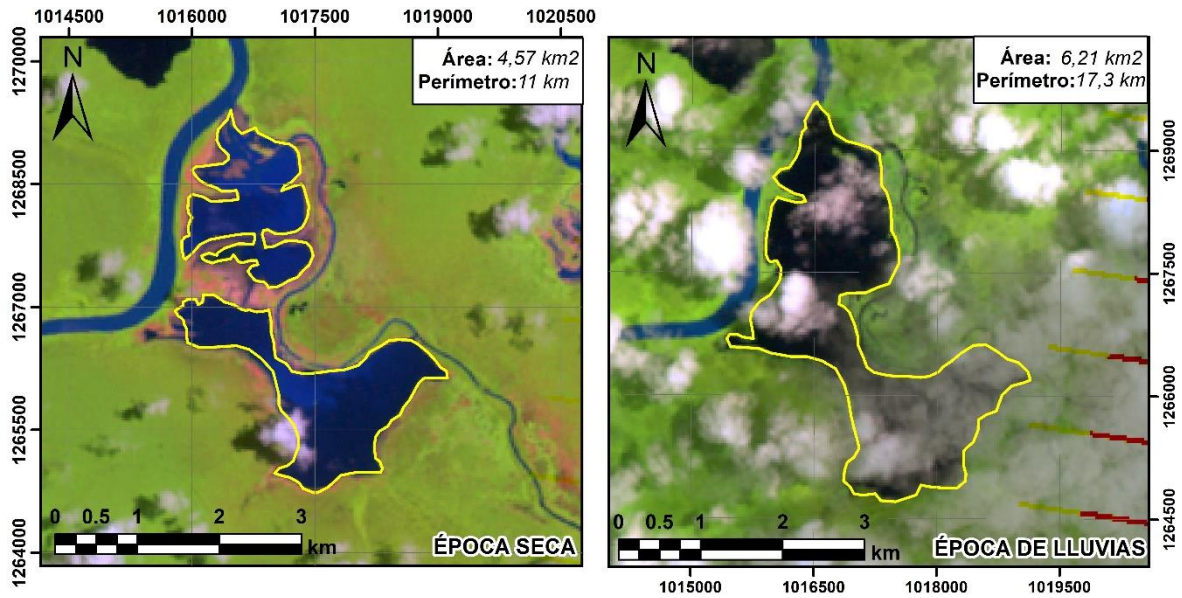


Figura 8. Contraste épocas seca y de lluvias en la ciénaga El Burro. Fuente: este estudio

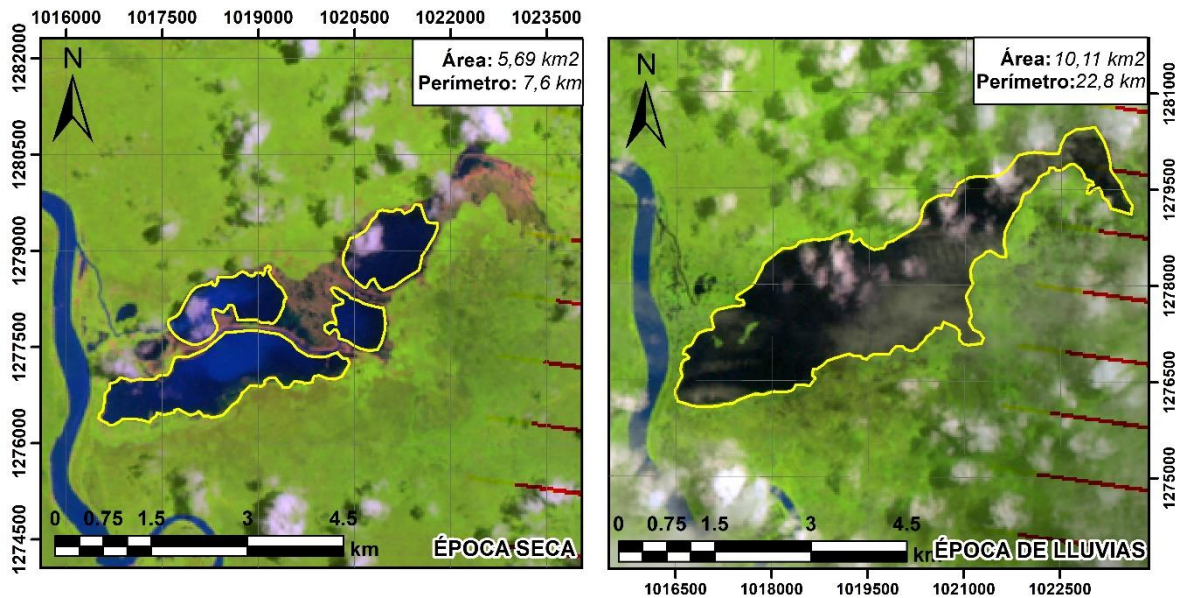


Figura 9. Contraste épocas seca y de lluvias en la ciénaga El Limón. Fuente: este estudio

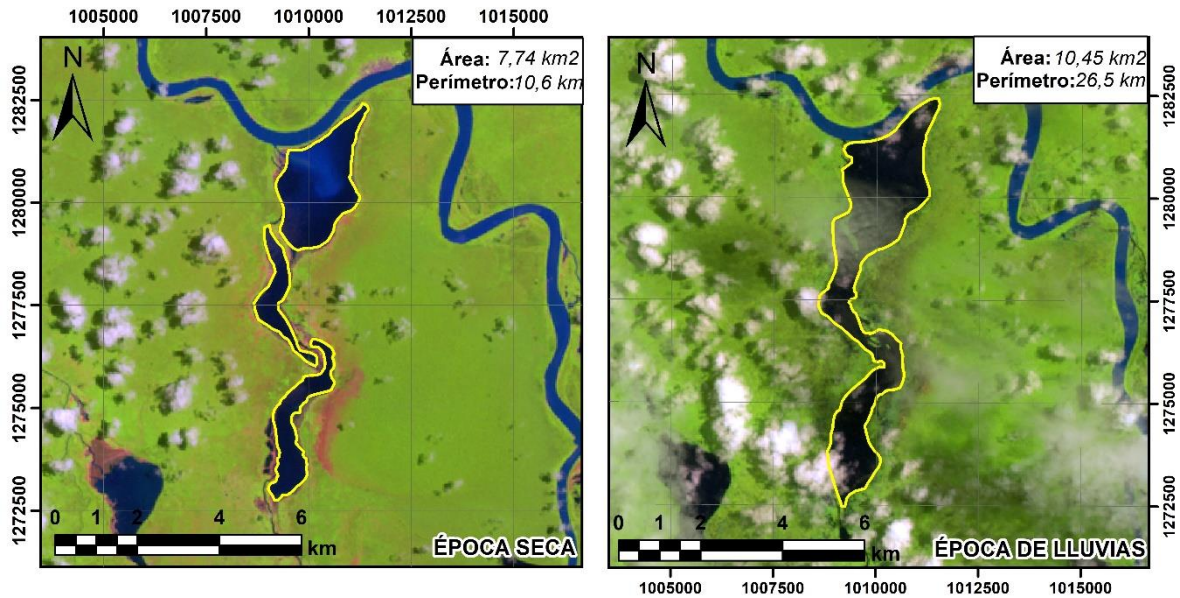


Figura 10. Contraste épocas seca y de lluvias en la ciénaga Las Mujeres. Fuente: este estudio

6.2 TRABAJO DE CAMPO

La visita de reconocimiento de la zona de estudio y para la definición de las estaciones a considerar dentro de la red de monitoreo en los sistemas acuáticos lénticos y lóxicos se efectuó entre el 5 al 8 de febrero. Inicialmente, el equipo de trabajo se desplazó hacia el municipio de Murindó (Antioquia) con el propósito fundamental de reconocer los principales afluentes y ciénagas ubicadas en la cuenca media del río Atrato para establecer la localización de las estaciones de muestreo en las ciénagas de Tadí, El Tigre y Quesada, así como en los ríos Atrato, Sucio y Curvaradó. Cabe destacar que en cada ciénaga se identificó el afluente de acceso y su conexión con el río Atrato (ver Figura 11).

Posteriormente se realizó un recorrido a lo largo del Cañón de la Llorona hasta el municipio de Dabeiba. Sobre el Cañón del río Sucio se evidenciaron varios entables de explotación minera activos de material de playa, así como maquinaria abandonada. Además, se visitó la estación hidrológica del IDEAM ubicada en el municipio de Dabeiba la cual se utilizó como punto de referencia para corroborar el régimen hidrológico de la cuenca del río Atrato y sus principales afluentes (ver Figura 11).



Figura 11. Visita de reconocimiento cuerpos de agua principales de la cuenca media del río Atrato. Fuente: este estudio

6.3 VARIABLES AMBIENTALES A MEDIR

Se realizó una reunión con el personal técnico del Laboratorio de análisis de aguas de CORPOURABÁ el día 7 de febrero, en donde se definieron las variables ambientales a monitorear teniendo en cuenta los métodos analíticos y los límites de cuantificación de los métodos analíticos. Además, se visitaron las instalaciones de las áreas de trabajo del Laboratorio y se conocieron los principales equipos que se utilizan para la determinación de algunos de los analitos en las muestras de agua y sedimento. En la Tabla 1 y la Tabla 2 se presentan las variables ambientales medidas in situ y en laboratorio.

Tabla 1. Variables ambientales medidas in situ según la matriz en cada una las estaciones de muestreo

VARIABLE	UNIDADES	MATRIZ
Temperatura	°C	Agua
pH	U. de pH	
Oxígeno disuelto	mg/L	
Conductividad eléctrica	μS/cm	
Profundidad Secchi	m	

VARIABLE	UNIDADES	MATRIZ
Turbidez	NTU	

Fuente: Laboratorio CORPOURBÁ (2019)

Tabla 2. Variables ambientales medidas en el agua y en los sedimentos.

VARIABLE	UNIDADES	MATRIZ	METODO ANALÍTICO	
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	Agua	Titulométrico, SM 2320 B	
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L		Secado a 103-105°C, SM 2540 D	
Sólidos Disueltos Totales	mg/L		Secado a 180°, SM 2540 C	
Sólidos Sedimentables	mL/L		SM 2540 F	
Carbono Orgánico Total	mg/L		Combustión alta temperatura, SM 5310 B	
Nitrógeno Total	mg/L		QUIMIOLUMINISCENCIA. UNE-EN 12260:2004	
Fósforo Total	mg/L		Ácido Ascórbico, SM 4500-P B,E	
Fósforo Reactivo Disuelto	mg/L		Método del Ácido Ascórbico, 4500-P E	
Clorofila α	µg/L		Colorimétrico, SM 10200 H	
Mercurio	µg/L		Descomposición térmica, US EPA 7473.	
Plomo	µg/L		Digestión - Espectrometría de Absorción Atómica Electrotérmica, SM 3030 K, SM 3113 B	
Cadmio	µg/L		Digestión - Espectrometría de Absorción Atómica Electrotérmica, SM 3030 K, SM 3113 B	
Granulometría	%		Sedimento	Hidrómetro
Materia orgánica	g C/kg			Oxidación sulfocrómica, ISO 14235
Calcio	mg/kg	Digestión - Llama Directa Óxido Nitroso - Acetileno, SM 3030 K - 3111 D ed. 23-2017.		
Hierro	mg/kg	Digestión Microondas - Llama Directa Aire - Acetileno, SM 3030 K - 3111 B		
Aluminio	mg/kg	Digestión Microondas - Llama Óxido Nitroso - Acetileno, SM 3030 K - 3111 D		
Manganeso	mg/kg	Digestión - llama Directa Aire - Acetileno, SM 3030 K - 3111 B		
Cromo	mg/kg	Digestión - Espectrometría de Absorción Atómica Electrotérmica, SM 3030 K - 3113 B ed. 23-2017.		
Mercurio	mg/kg	Descomposición térmica, US EPA 7473.		

VARIABLE	UNIDADES	MATRIZ	METODO ANALÍTICO
Cadmio	mg/kg		Digestión - Espectrometría de Absorción Atómica Electrotérmica, SM 3030 K 3113 B
Plomo	mg/kg		Digestión - Espectrometría de Absorción Atómica Electrotérmica, SM 3030 K- 3113 B
Zinc	mg/kg		Digestión - Llama Directa Aire - Acetileno, 3030 K- SM 3111 B

Fuente: Laboratorio CORPOURBÁ (2019)

6.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

6.4.1 Granulometría

Los análisis granulométricos de las muestras de sedimentos lacustres se realizaron mediante la técnica de tamizado con el fin de conocer la distribución de los tamaños de las partículas. Una cantidad representativa de la muestra seca de sedimentos es pasada a través de varios tamices dispuestos de mayor a menor abertura mediante agitación. Por último, se pesa el material retenido en cada tamiz, con lo que, conocido el peso inicial de la muestra, puede determinarse el porcentaje de material que queda retenido en cada tamiz. En la Tabla 3 se presentan los diferentes tamaños de tamices utilizados.

Tabla 3. Características de los tamices utilizados en el análisis granulométrico.

No. Tamiz	Abertura del Tamiz [µm]	Clasificación
16	1180	Arena gruesa
30	600	Arena media
50	300	Arena muy fina
100	150	Limos
200	75	Limos muy finos
Fondo	0	Arcillas

Posteriormente, los porcentajes de arenas, limos y arcillas fueron clasificados de acuerdo al triángulo textural, el cual relaciona las clases y familias texturales de sedimentos y suelos.

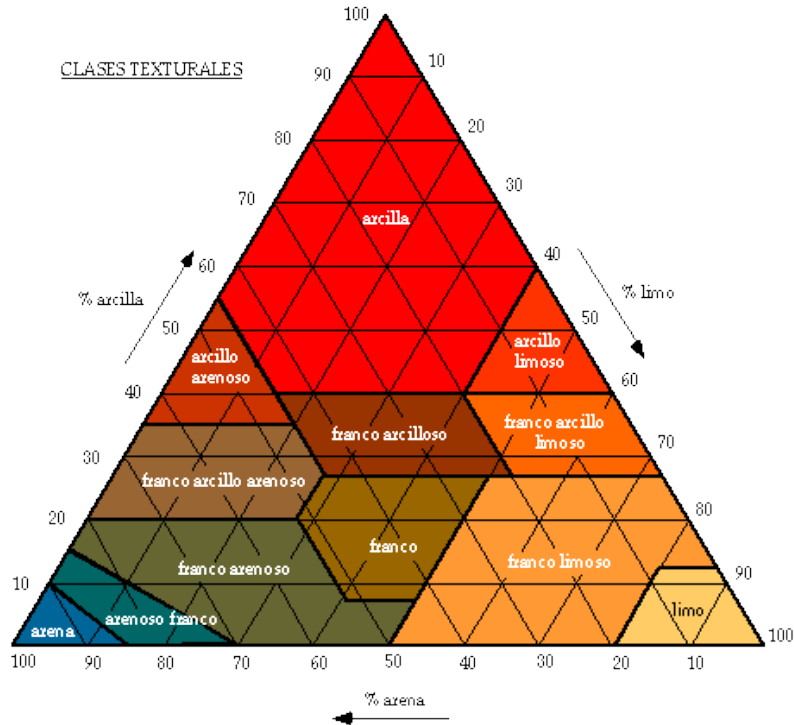


Figura 12. Diagrama triangular de suelos y sedimentos. Fuente: Casanova (2005)

6.4.2 Análisis estadísticos

Se consideró la información de las dos campañas de muestreo realizadas en época seca y época de lluvias en 2019. Esta información fue sectorizada en niveles tales como: ciénaga Matuntugo, ciénaga Marriaga, ciénaga Unguía, ciénaga Tumaradó, ciénaga Tadia, ciénaga Arrastradero, ciénaga Quezada, ciénaga Buchadó, ciénaga Bojayá, ciénaga Montaño, ciénaga El Burro, ciénaga Las Mujeres, ciénaga Yarumal, ciénaga La Larga, río Curvaradó, río Penderisco, río Urrao, río Carmen, Atrato bajo, Atrato medio y Atrato alto, de acuerdo con la localización geográfica de las estaciones de muestreo en los principales afluentes de la cuenca del río Atrato. La matriz de datos fue construida teniendo en cuenta como factores la época y el sector, con el objetivo de realizar un análisis numérico univariado y multivariado, que permitiera identificar tendencias espaciales y temporales, y comportamientos de variabilidad.

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las épocas y los sectores para los datos del 2019, se aplicaron pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis por cada variable, debido a la naturaleza no paramétrica de los datos. Para casos donde se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los efectos principales de los factores o las interacciones de éstos, se empleó una comparación post-hoc. Para determinar el grado de asociación entre las variables medidas se realizó un análisis de componentes principales basado en las correlaciones de las variables analizadas, que indican el grado de asociación lineal entre ellas. Para las variables que reportaron gran cantidad de datos inferiores a los límites de cuantificación de los métodos

de análisis se realizó un proceso de censura, donde las concentraciones bajas cuyos valores se sabe que se encuentran en algún punto entre cero y los límites de detección se reemplazaron por el valor del 50% del límite de cuantificación del método de análisis. De esta forma se buscó minimizar la pérdida de información y fortalecer los análisis estadísticos de la información. No se consideraron en el análisis estadístico aquellas variables que presentaron más del 20% de datos perdidos. Los análisis se realizaron el software Statgraphics Centurion XVI.

6.4.3 Evaluación de la contaminación por metales pesados

El Factor de Enriquecimiento (*EF*, por sus siglas en inglés) permite determinar si la fuente de metales pesados corresponde a eventos antrópicos o si es origen natural, es decir identificar y cuantificar la intervención humana en los ciclos naturales de los estos elementos, además de evaluar el grado de contaminación por los mismos (Bastami, 2014; Moore *et al.*, 2009). Teniendo en cuenta las propiedades de textura de los sedimentos y dado que los metales se acumulan generalmente en la fracción fina del sedimento es necesario realizar una compensación o normalización con un elemento de referencia (Bastami, 2014).

Se recomienda preferiblemente que dicho elemento cumpla con una serie de requisitos tales como (Planas, 2010):

- Su existencia en el sedimento a elevadas concentraciones.
- Encontrarse libre de contaminación de origen antropogénico.
- Ser fácilmente determinable con un número elevado de técnicas analíticas.
- No haber sido contaminado durante la recolección en campo ni en el tratamiento de las muestras.
- Tener la misma matriz que las muestras examinadas

Teniendo en cuenta lo anterior, la normalización del tamaño de partícula se realizó mediante el contenido de Fe, dada la abundancia de este elemento en la corteza terrestre (Delgado *et al.*, 2010). Los EF para cada metal objeto de estudio se calcularon mediante la Ecuación 1:

$$EF = \frac{(M/Fe)_{sed}}{(M/Fe)_{Back}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde MSed y MBack corresponden a las concentraciones de los metales pesados en las muestras de sedimento y los valores de fondo; estos últimos fueron tomados de los valores de referencia de la corteza terrestre propuesto por Turekian y Wedepohl (1961). Dependiendo de los valores de EF calculados para los metales estudiados en los sedimentos, se clasificaron en grupos de: Origen Natural, elementos empobrecidos ($EF < 1$) y Origen Antropogénico, elementos enriquecidos ($1 < EF < 2$) y elementos muy enriquecidos ($EF > 2$) (Marrugo & Paternina, 2011; Delgado *et al.*, 2010)

6.4.4 Criterio de calidad de los sedimentos

Los Valores Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CSQG, por sus siglas en inglés) fueron desarrollados por El Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME, por sus siglas en inglés) se derivan de la información científica disponible sobre los efectos biológicos asociados la presencia de sustancias químicas en sedimentos lacustres y marinos (CCME, 2007). CSQG determinar los valores ISQG (Valor guía Interino de la Calidad de Sedimento) interpretado como la concentración por debajo de la cual no se espera efectos biológicos adversos y PEL (Nivel de Efecto Probable) como la concentración sobre la cual se encuentran efectos biológicos adversos con frecuencia. ISQG y PEL se utilizan para identificar los tres rangos de concentraciones químicas con respecto a los efectos biológicos: debajo de la TEL: el rango de efecto mínimo en el que rara vez se producen efectos adversos, entre el TEL y PEL: el rango posible efecto en el que de vez en cuando se producen efectos adversos, por encima del PEL: el rango probable efecto en el que se producen con frecuencia efectos adversos (CCME, 2007).

La contaminación por metales pesados en los sedimentos fue evaluada mediante los Criterios de Calidad de los Sedimentos (SQG, por sus siglas en inglés) propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) (Banu *et al.*, 2013; Saha & Hossain, 2011). Para evaluar en un contexto ecotoxicológico los efectos de la presencia de los metales pesados en los sedimentos superficiales, se compararon las concentraciones obtenida en este estudio con los SQG propuestos por MacDonald *et al.* (2010) para ecosistemas de agua dulce teniendo en cuenta (i)Efecto de Rango Bajo (ERL) y Efecto de Rango Medio (ERM) y (ii) Nivel de Efecto Umbral (TEL) y el Nivel de Efecto Probable (PEL). ERL y TEL indica las concentraciones por debajo en las cuales rara vez se producen efectos adversos mientras que ERM y PEL representan las concentraciones por encima del cual los efectos adversos pueden suceder (MacDonald *et al.*, 2000).

7 RESULTADOS

7.1 RED DE MUESTREO

A las estaciones de muestreo se accedió con la ayuda de un GPS, en cada estación se tomaron muestras de agua y/o sedimento y se midieron variables in situ. Cada una de las muestras fueron rotuladas con un código de identificación único, sitio, fecha y hora de muestreo. Las muestras fueron preservadas y refrigeradas según los protocolos requeridos para evitar su contaminación cruzada durante el transporte, almacenamiento y procesamiento en el laboratorio de aguas de CORPOURABA y CODECHOCO.

La primera campaña de campo correspondiente a la época seca se realizó entre los días 26 y 28 de febrero (cuenca baja y media) y el primero de marzo, el segundo muestreo se ejecutó del 4 al 8 de marzo (cuenca media) y el tercero del 11 al 15 de marzo (cuenca alta). Debido a dificultades de acceso durante la época seca no se muestrearon tres estaciones, es decir en total se dispone de información en 74 estaciones para este periodo y en 77 estaciones para la época de lluvias

Después de la visita de reconocimiento en la cuenca media del río Atrato se revisó y modificó el diseño inicial de la red de monitoreo, debido a que la cuenca alta del río no contaba con suficientes estaciones de muestreo. Considerando la dinámica de expansión y contracción de los sistemas lenticos y del caudal de los principales afluentes, se definió la red de monitoreo en la cuenca del río Atrato con un total de 78 estaciones de muestreo, 32 en los sistemas lenticos (ver Tabla 4) y 45 estaciones en los sistemas lóticos (ver Tabla 5) , así como dos campañas de muestreos campo (época seca y época de lluvias). Una vez se analicen los resultados, esta red de muestreo será optimizada en términos de variables, número y localización de las estaciones en los sistemas lóticos y lénticos.

Tabla 4. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo en las principales ciénagas de la cuenca del río Atrato.

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	AUTORIDAD AMBIENTAL	LATITUD	LONGITUD	X (MAGNA OESTE)	Y (MAGNA OESTE)
2	Ciénaga Matuntugo 01	CORPOURABA	8° 5' 49.200" N	76° 53' 29.900" W	1020485.974	1387151.743
3	Ciénaga Matuntugo 02	CORPOURABA	8° 5' 37.400" N	76° 53' 16.100" W	1020908.644	1386789.426
8	Ciénaga Marriaga 1	CODECHOCO	8° 6' 55.900" N	76° 58' 27.200" W	1011383.332	1389197.616
9	Ciénaga Marriaga 2	CODECHOCO	8° 6' 9.000" N	76° 58' 8.400" W	1011959.269	1387756.939
10	Ciénaga Unguía 1	CODECHOCO	8° 0' 49.600" N	77° 2' 12.100" W	1004499.26	1377943.234
11	Ciénaga Unguía 2	CODECHOCO	8° 2' 55.300" N	77° 2' 35.300" W	1003788.504	1381804.812
12	Ciénaga Tumaradó 1	CORPOURABA	7° 50' 11.300" N	77° 2' 6.800" W	1004663.553	1358334.069
13	Ciénaga Tumaradó 2	CORPOURABA	7° 48' 21.400" N	77° 3' 12.000" W	1002666.331	1354957.696
14	Ciénaga Tumaradó 3	CORPOURABA	7° 46' 1.000" N	77° 3' 42.400" W	1001735.113	1350644.46
15	Ciénaga Tumaradó 4	CORPOURABA	7° 46' 12.600" N	77° 2' 34.200" W	1003824.751	1351000.944
16	Ciénaga Tumaradó 5	CORPOURABA	7° 46' 17.600" N	77° 1' 8.800" W	1006441.39	1351154.835
24	Ciénaga Tadíá 1	CORPOURABA	6° 48' 55.500" N	76° 48' 5.400" W	1030509.499	1245421.611
25	Ciénaga Tadíá 2	CORPOURABA	6° 48' 54.300" N	76° 48' 44.400" W	1029312.011	1245384.076
26	Ciénaga Tadíá 3	CORPOURABA	6° 48' 17.400" N	76° 49' 38.900" W	1027639.156	1244249.626
29	Ciénaga Arrastradero 1	CORPOURABA	6° 51' 9.500" N	76° 47' 31.000" W	1031563.323	1249538.681
30	Ciénaga Arrastradero 2	CORPOURABA	6° 51' 56.900" N	76° 47' 23.200" W	1031801.933	1250994.945
31	Ciénaga Quezada 1	CORPOURABA	6° 55' 39.400" N	76° 46' 28.900" W	1033464.725	1257831.159
32	Ciénaga Quezada 2	CORPOURABA	6° 55' 28.700" N	76° 46' 56.100" W	1032629.937	1257501.93
35	Ciénaga Buchadó	CORPOURABA	6° 23' 31.700" N	76° 44' 22.900" W	1037373.203	1198615.304
38	Ciénaga Buchadó boca	CORPOURABA	6° 26' 16.300" N	76° 44' 37.300" W	1036927.376	1203671.435
60	Ciénaga Bojayá1	CODECHOCO	6° 34' 9.200" N	76° 54' 36.800" W	1018500.729	1218189.494
61	Ciénaga Bojayá2	CODECHOCO	6° 34' 11.600" N	76° 53' 54.300" W	1019806.325	1218263.672
63	Ciénaga Montaña1	CODECHOCO	7° 1' 57.400" N	76° 55' 40.100" W	1016540.262	1269435.159
64	Ciénaga Montaña2	CODECHOCO	7° 1' 38.300" N	76° 55' 28.600" W	1016893.403	1268848.525
66	Ciénaga EL Burro 2	CODECHOCO	7° 1' 0.050" N	76° 52' 58.500" W	1021500.68	1267675.2
67	Ciénaga El Burro1	CODECHOCO	7° 1' 15.300" N	76° 53' 24.400" W	1020705.565	1268143.354
68	Ciénaga Montaña3	CODECHOCO	7° 1' 45.600" N	76° 55' 35.600" W	1016678.49	1269072.71

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	AUTORIDAD AMBIENTAL	LATITUD	LONGITUD	X (MAGNA OESTE)	Y (MAGNA OESTE)
69	Ciénaga Las Mujeres2	CODECHOCO	7° 8' 9.500" N	76° 59' 22.400" W	1009715.474	1280864.266
70	Ciénaga Las Mujeres1	CODECHOCO	7° 1' 9.400" N	76° 59' 35.600" W	1009312.788	1267958.806
71	Ciénaga Yarumal1	CODECHOCO	7° 34' 24.400" N	77° 6' 45.900" W	996110.8654	1329244.635
72	Ciénaga La Larga 2	CODECHOCO	7° 28' 39.900" N	77° 3' 55.000" W	1001349.951	1318661.329
73	Ciénaga La Larga 1	CODECHOCO	7° 28' 40.100" N	77° 3' 58.800" W	1001233.44	1318667.47

Fuente: este estudio

Tabla 5. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo en los principales afluentes de la cuenca del río Atrato.

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	AUTORIDAD AMBIENTAL	LATITUD	LONGITUD	X (MAGNA OESTE)	Y (MAGNA OESTE)
1	Boca Matuntugo	CORPOURABA	8° 7' 20.500" N	76° 51' 15.400" W	1024602.3	1389958.7
4	Brazo Coquitos antes de Bocas	CORPOURABA	8° 5' 10.300" N	76° 50' 45.700" W	1025513.8	1385959.3
5	Brazo Leoncito	CORPOURABA	8° 1' 27.000" N	76° 50' 40.700" W	1025670.8	1379099.3
6	Boca El Roto	CORPOURABA	8° 11' 6.600" N	76° 56' 0.600" W	1015868.7	1396900.8
7	Boca Tarena	CORPOURABA	8° 13' 25.800" N	76° 58' 33.600" W	1011184.4	1401175.8
18	Brazo León	CORPOURABA	7° 55' 22.700" N	77° 0' 56.800" W	1006806.6	1367900.8
19	Atrato-Unguía	CORPOURABA	8° 1' 35.000" N	76° 59' 35.000" W	1009309.7	1379338.7
20	Cañas Gordas AAU	CORPOURABA	6° 44' 24.900" N	76° 1' 1.500" W	1117242	1237227.6
21	Rubicón	CORPOURABA	6° 50' 7.300" N	76° 6' 37.900" W	1106888.7	1247725.9
22	Puente Blanco	CORPOURABA	7° 0' 38.500" N	76° 17' 17.200" W	1087225.3	1267082.1
23	Puente Pavarandó	CORPOURABA	7° 13' 48.100" N	76° 26' 17.900" W	1070595.1	1291314.7
24	Río Sucio Brisas	CORPOURABA	7° 18' 46.900" N	76° 46' 0.500" W	1034307.9	1300456.1
28	Antes de Tadia	CORPOURABA	6° 51' 32.300" N	76° 49' 51.100" W	1027261.5	1250236.7
29	Antes de Murindó	CORPOURABA	6° 58' 8.900" N	76° 49' 16.300" W	1028323.4	1262420.8
34	Río Atrato Antes de Río Sucio	CORPOURABA	7° 9' 19.600" N	76° 57' 20.600" W	1013452.2	1283018.6
35	Río Sucio Desembocadura	CORPOURABA	7° 9' 50.600" N	76° 57' 14.400" W	1013642.2	1283971
37	Vigía AAU	CORPOURABA	6° 34' 11.000" N	76° 53' 30.200" W	1020546.7	1218245.5
38	Vigía DAU	CORPOURABA	6° 36' 5.400" N	76° 53' 32.800" W	1020465.5	1221759.8
40	Buchadó Ario Atrato - desembocadura el salado	CORPOURABA	6° 25' 22.000" N	76° 45' 55.900" W	1034513.1	1202001.8
41	Río Atrato Antes de Murrí	CORPOURABA	6° 32' 40.700" N	76° 50' 50.000" W	1025469.4	1215473.6
42	Desembocadura Murrí	CORPOURABA	6° 33' 14.100" N	76° 50' 16.600" W	1026495	1216500.1
43	RA Antes de Brazo Murindó	CORPOURABA	6° 39' 42.700" N	76° 53' 42.300" W	1020171.2	1228435

ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN	AUTORIDAD AMBIENTAL	LATITUD	LONGITUD	X (MAGNA OESTE)	Y (MAGNA OESTE)
44	RA Brazo Murindó	CORPOURABA	6° 45' 7.400" N	76° 53' 17.000" W	1020944.5	1238409.9
45	Bocatoma MC Río Urrao	CORPOURABA	6° 20' 8.500" N	76° 7' 38.000" W	1105148.2	1192457.2
46	Desembocadura Río Urrao	CORPOURABA	6° 20' 4.100" N	76° 8' 40.200" W	1103236.6	1192318.5
47	Río Penderisco DAU	CORPOURABA	6° 19' 46.000" N	76° 8' 59.300" W	1102650.4	1191761.4
48	Río Penderisco Puente La Magdalena	CORPOURABA	6° 17' 51.700" N	76° 8' 5.700" W	1104304.4	1188252.8
49	Carmen antes	CODECHOCO	5° 55' 50.200" N	76° 8' 21.700" W	1103883.4	1147651.9
50	Carmen después	CODECHOCO	5° 53' 43.500" N	76° 8' 40.100" W	1103323.9	1143758.4
51	Después LLORO	CODECHOCO	5° 30' 9.800" N	76° 32' 50.700" W	1058740.2	1100271.9
52	Antes YUTO	CODECHOCO	5° 31' 44.400" N	76° 37' 33.000" W	1050048.3	1103170.7
53	Después YUTO	CODECHOCO	5° 31' 44.900" N	76° 38' 16.800" W	1048700.1	1103185.1
54	Antes SAMURINDÓ	CODECHOCO	5° 35' 9.200" N	76° 39' 13.300" W	1046956.6	1109459.7
55	Antes Quibdó	CODECHOCO	5° 40' 16.900" N	76° 40' 8.800" W	1045241.8	1118910.6
56	Desembocadura Cabí	CODECHOCO	5° 40' 28.000" N	76° 39' 45.300" W	1045964.8	1119252.1
57	Desembocadura Río Quito	CODECHOCO	5° 41' 10.500" N	76° 39' 54.000" W	1045696.1	1120557.5
58	Después Quibdó	CODECHOCO	5° 41' 45.600" N	76° 40' 34.000" W	1044464.5	1121634.9
59	Antes Beté	CODECHOCO	5° 59' 24.000" N	76° 46' 34.200" W	1033363.4	1154140.8
62	Bebaramá	CODECHOCO	6° 3' 18.500" N	76° 43' 30.800" W	1038999.2	1161347.8
65	Isla de los Palacios	CODECHOCO	6° 50' 13.000" N	76° 55' 25.000" W	1017010.7	1247796.4
71	Río Curvaradó	CODECHOCO	7° 9' 39.800" N	76° 57' 21.200" W	1013433.7	1283639.1
75	Ciénaga Yarumal2	CODECHOCO	7° 34' 24.400" N	77° 6' 30.080" W	996595.81	1329244.6
76	Después río Sucio	CODECHOCO	7° 26' 50.300" N	77° 6' 11.400" W	997167.62	1315294.4
77	Antes desembocadura río Sucio	CODECHOCO	7° 25' 42.900" N	77° 6' 22.800" W	996817.92	1313223.9
78	Después desembocadura río Sucio	CODECHOCO	7° 25' 9.100" N	77° 6' 31.500" W	996551.07	1312185.6

Fuente: este estudio

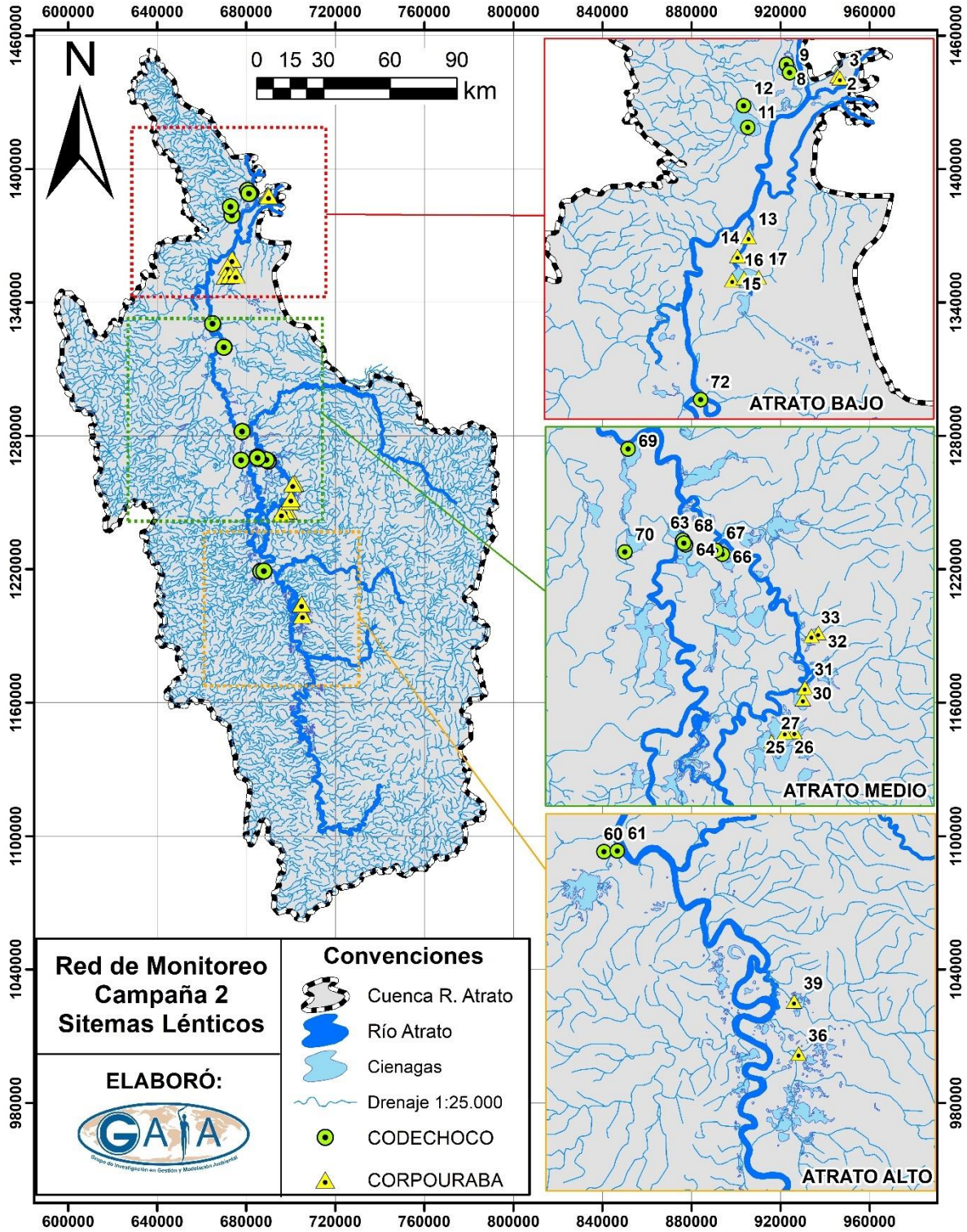


Figura 13. Localización geográfica de las estaciones de muestreo en las principales ciénagas de la cuenca del río Atrato. Fuente: este estudio

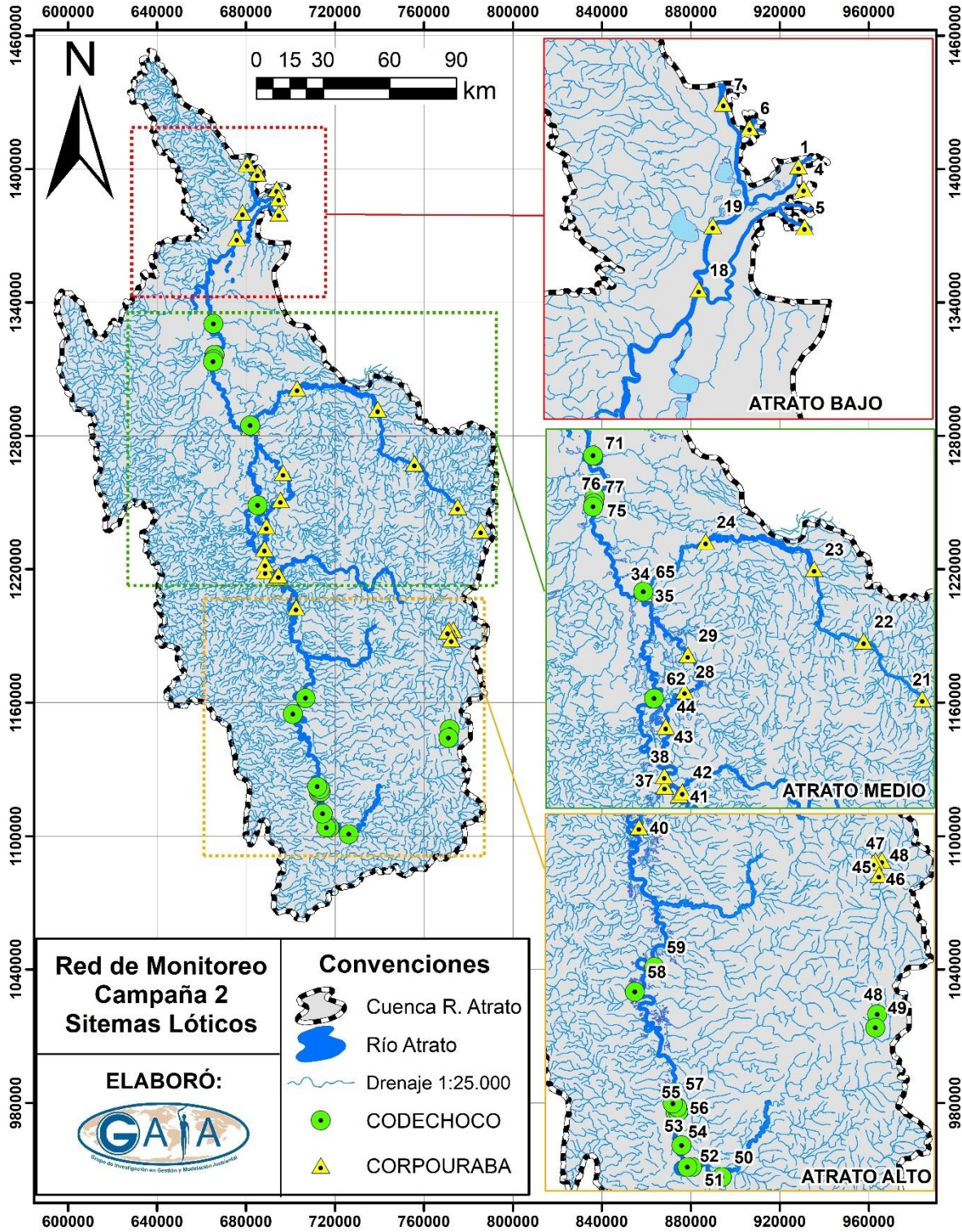


Figura 14. Localización geográfica de las estaciones de muestreo en los principales afluentes de la cuenca del río Atrato. Fuente: este estudio

7.2 GRANULOMETRÍA

En la Tabla 6 y la Tabla 7 se presenta la distribución de tamaños y la clasificación de las texturas para los sedimentos lacustres recolectados en las campañas de campo para las épocas seca y de lluvias, respectivamente.

Tabla 6. Distribución de tamaños y clasificación por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época seca.

Sistema léntico	ID Estación	Arenas [%]	Limos [%]	Arcillas [%]	Clasificación Textura
Matuntugo	E02	78	14	8	Arenoso franco
	E03	72	22	5	Franco arenoso
Unguía	E09	77	15	8	Arenoso franco
	E10	50	26	24	Franco arcillo arenoso
Tumaradó	E11	25	51	22	Franco limoso
	E13	47	37	15	Franco
	E14	63	23	14	Franco arenoso
	E15	55	33	12	Franco arenoso
Tadía	E23	66	29	5	Franco arenoso
	E24	42	32	26	Franco
Arrastradero	E27	42	36	22	Franco
	E28	19	32	48	Arcillo limoso
Quezada	E29	37	26	37	Franco arcilloso
	E30	50	30	20	Franco arcillo arenoso
Buchadó	E35	69	23	8	Franco arenoso
Marriaga	E07	46	32	22	Franco
	E08	34	29	36	Franco arcilloso

Tabla 7. Distribución de tamaños y clasificación por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época de lluvias.

Sistema léntico	ID Estación	Arenas [%]	Limos [%]	Arcillas [%]	Clasificación Textura
Matuntugo	E02	62	23	16	Franco arenoso
	E03	63	25	12	Franco arenoso
Tumaradó	E13	23	65	12	Franco limoso
	E14	63	24	12	Franco arenoso
	E15	63	23	14	Franco arenoso
Arrastradero	E29	18	38	44	Arcilla
	E30	44	37	18	Franco
Quezada	E31	17	37	43	Arcilla
	E32	37	36	27	Franco arcilloso

Sistema léntico	ID Estación	Arenas [%]	Limos [%]	Arcillas [%]	Clasificación Textura
Buchadó	E35	27	44	29	Franco arcilloso
	E38	42	37	21	Franco
Bojayá	E60	5	47	48	Arcillo limoso
	E61	12	39	50	Arcilla
Montaño	E63	37	32	30	Franco arcilloso
	E64	48	22	29	Franco arcillo arenoso
	E68	38	25	37	Franco arcilloso
El Burro	E67	3	67	30	Franco arcillo limoso
	E66	15	78	7	Franco limoso
Las Mujeres	E69	15	23	62	Arcilla
	E70	2	33	65	Arcilla
Yarumal	E72	2	86	12	Franco limoso
	E71	1	65	34	Franco arcillo limoso
La Larga	E73	2	83	16	Franco limoso
	E74	1	75	24	Franco limoso
Marriaga	E08	27	48	25	Franco
	E09	20	32	48	Arcilla

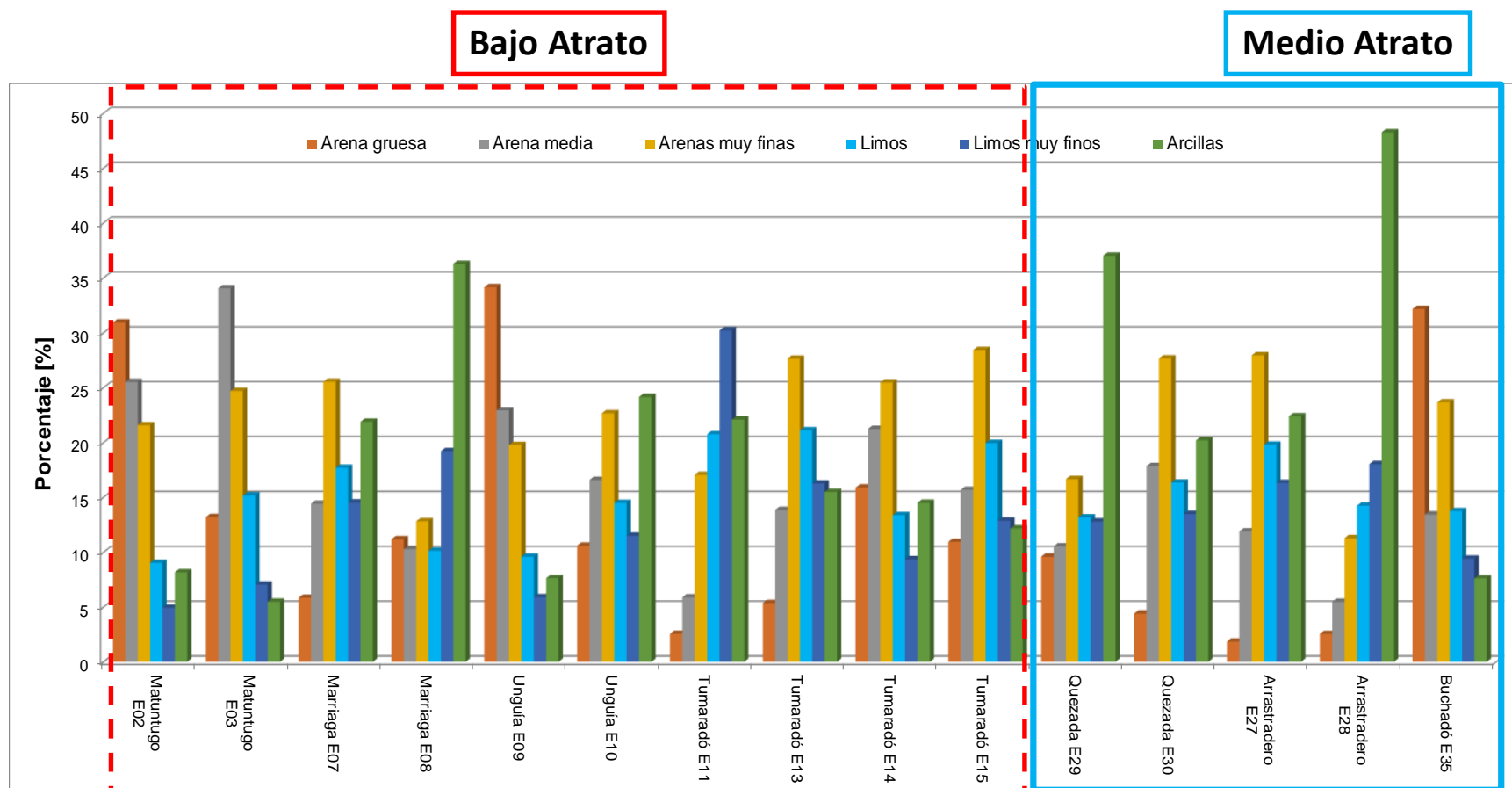


Figura 15. Distribución de tamaños por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época seca

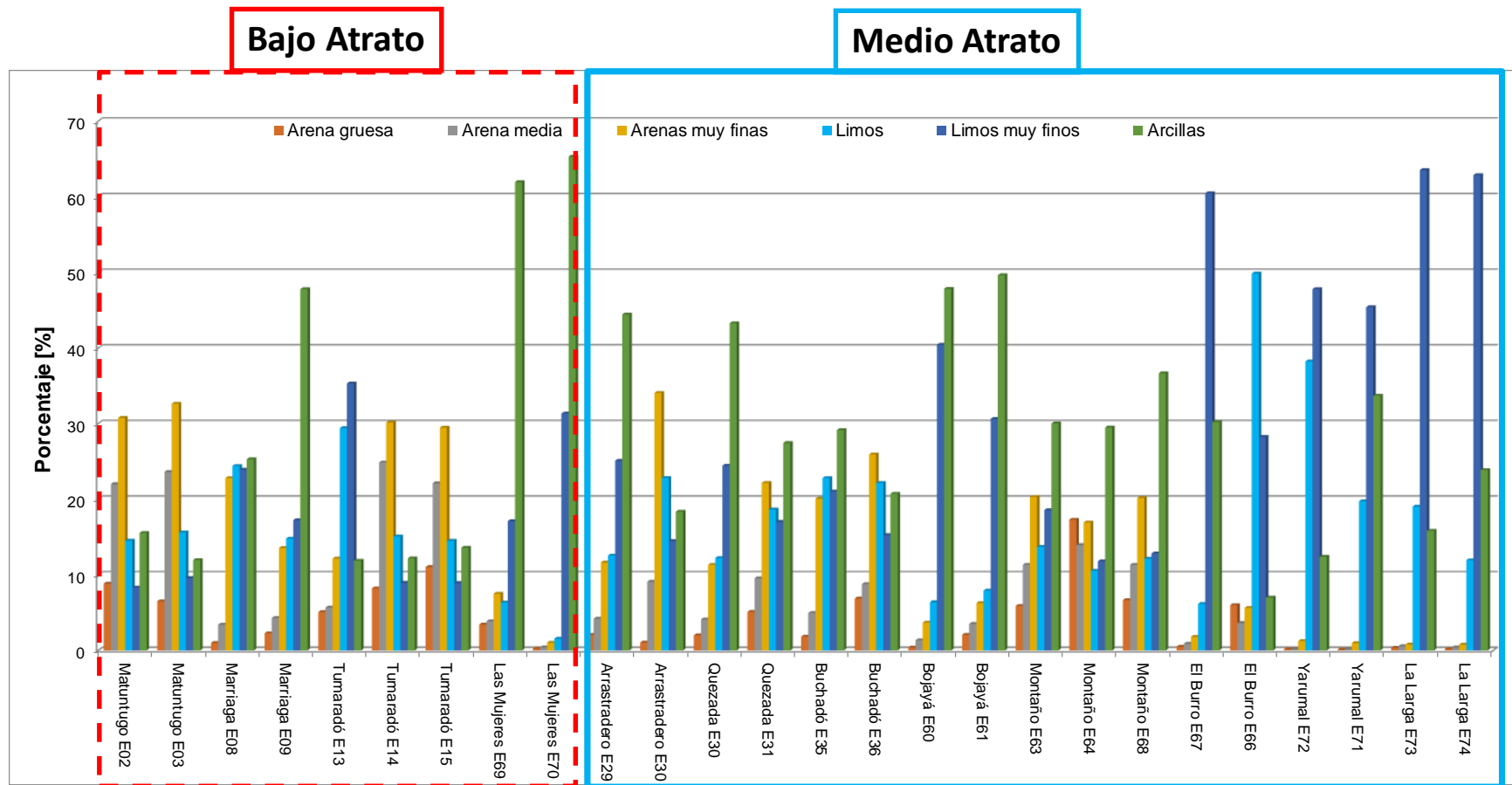


Figura 16. Distribución de tamaños por textura para los sedimentos lacustres recolectados en época lluvias

7.3 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICOS

Los valores de metales en agua arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) fueron en todos los casos inferiores al límite de cuantificación, por lo cual no fueron considerados en el análisis de la información. Variables con valores perdidos superiores al 20% tales como profundidad y clorofila A, tampoco fueron consideradas en el análisis debido a la alta incertidumbre en la imputación de datos.

Variabes como demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total y sólidos sedimentables presentaron más de un 70% de sus valores inferiores al límite de cuantificación, sin embargo, estos valores fueron censurados para minimizar la pérdida de variables en el análisis. De igual forma se censuraron aquellos valores reportados como inferiores al límite de cuantificación para las variables COT, fósforo total, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales.

7.3.1 Matriz agua

- **Temperatura del agua**

La temperatura es una propiedad física que está estrechamente relacionada con la densidad y la viscosidad del agua. La relación inversa entre la temperatura y la viscosidad tiene un significado ecológico importante para los organismos acuáticos, los cuales se pueden hundir o moverse más rápidamente en aguas cálidas que en frías. Además, la temperatura toma un papel fundamental en procesos como la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos; y por los cambios de viscosidad en los procesos de tratamiento, como desinfección por cloro, filtración, floculación, sedimentación y ablandamiento (Galvín 2003).

En la Figura 2 se ilustra el comportamiento de la temperatura tanto en época seca como en lluvias para las ciénagas, el río Atrato y sus afluentes. Se determinaron diferencias estadísticamente significativas tanto a nivel espacial (valor $p < 0,001$) como temporal (valor $p = 0,04$). Los valores cuantificados de temperatura no muestran diferencias relevantes entre los sitios muestreados de las ciénagas (promedio: 29,04 °C, CV: 6,27%, para época seca y promedio: 30,01°C, CV: 6,08% para época de lluvias). El mayor valor de temperatura para las ciénagas se registró en la ciénaga Montaña con 32,79 °C en época seca y ciénaga El Burro 33,45°C en época de lluvias (Figura 18, 1-a y 1-b).

De igual forma para el caso de los sitios ubicados en el río Atrato y sus afluentes, Los valores cuantificados de temperatura no muestran diferencias relevantes entre los sitios (promedio: 26,13°C, CV: 9,93%, para época seca y promedio: 25,75°C, CV: 13,02% para época de lluvias). En general, para ambos periodos analizados los mayores valores de temperatura se registraron en las zonas establecidas como alto, medio y bajo Atrato, mientras que se reportaron menores valores para los afluentes (Figura 18, 2-a y 2-b).

En la Figura 17 se observa como para el caso del río Atrato y sus afluentes, la temperatura del agua no superó el límite establecido por los objetivos de calidad en ninguno de los sitios analizados en el área del río Atrato y sus afluentes. ($\pm 5^{\circ}\text{C}$ T. ambiente).

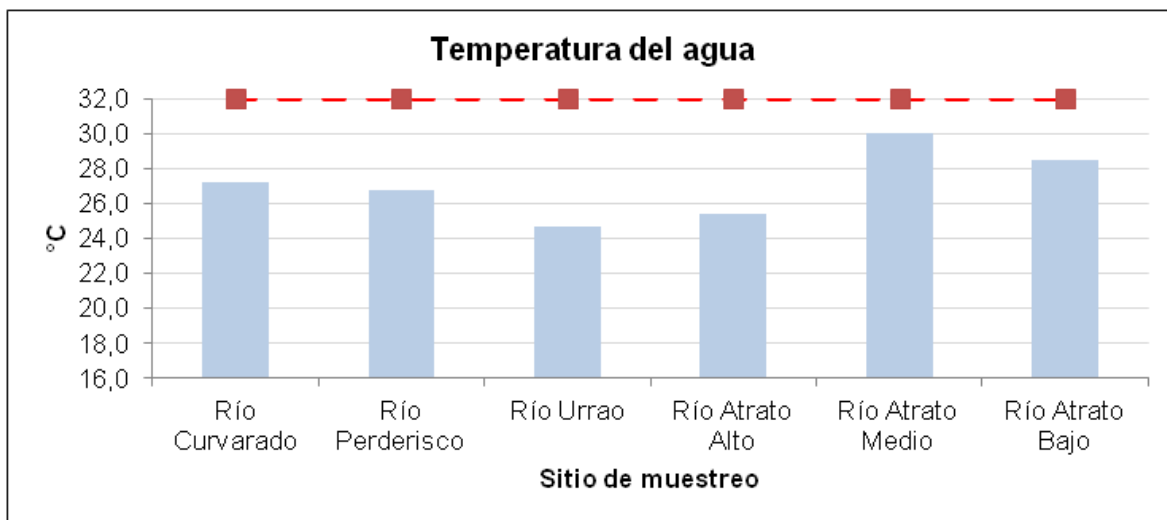
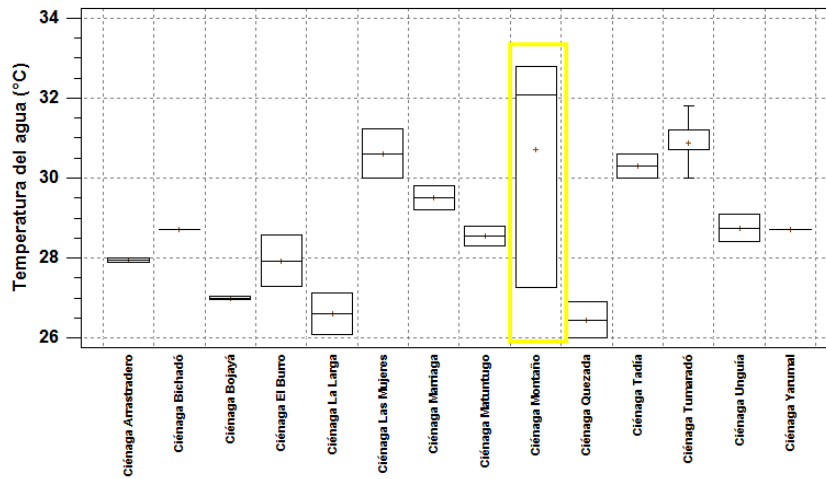
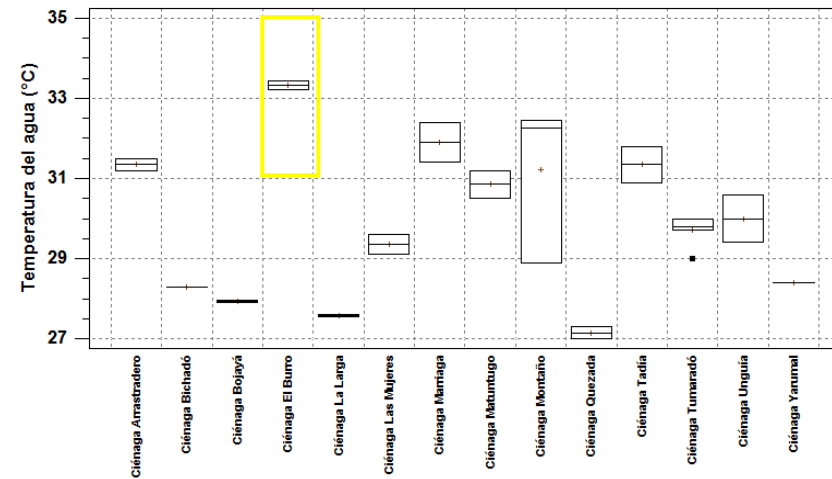


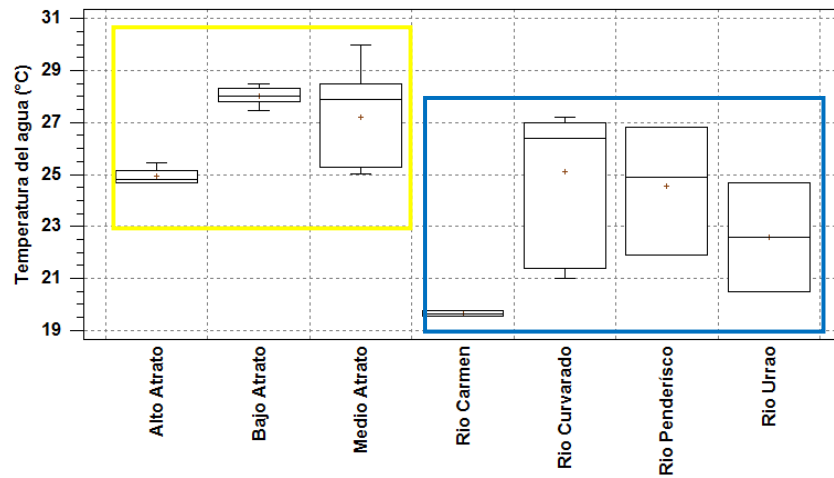
Figura 17. Temperatura del agua en seis sitios de la cuenca del río Atrato. La línea punteada establece el límite de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, asumiendo una temperatura de 27°C .



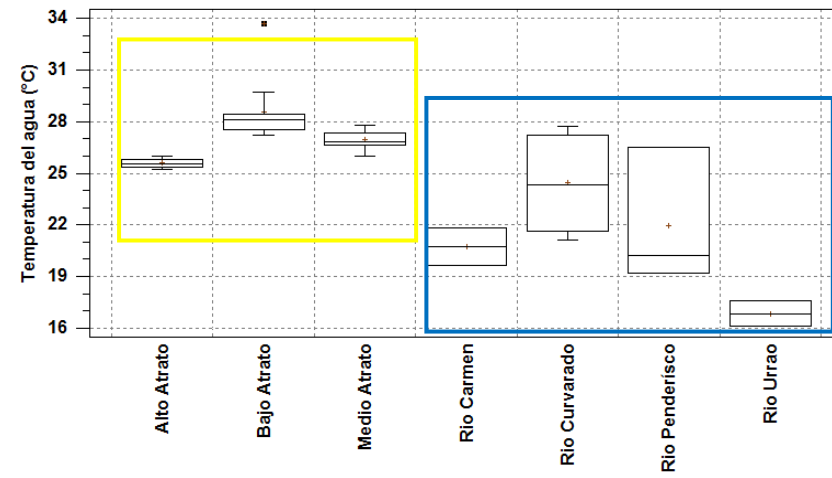
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 18. Temperatura del agua en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y Río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

▪ **Conductividad Eléctrica**

La conductividad eléctrica es una medida de la cantidad de sólidos disueltos en el agua, por lo que su medición es de suma utilidad cuando se evalúa la calidad de un ambiente acuático. Los valores normales de conductividad están entre 30 y 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cambios en la conductividad implica que se han originado cambios en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia. Altas conductividades pueden indicar la presencia de elevadas concentraciones de sólidos disueltos, lo cual puede ser un factor limitante para la vida de muchas especies por estar sometidas a alta presión osmótica. Por otra parte, la productividad primaria se puede ver afectada por bajas conductividades, donde los organismos consumidores (por ejemplo, macroinvertebrados bentónicos) dependen del material alóctono que cae de los árboles o que es arrastrado por las lluvias.

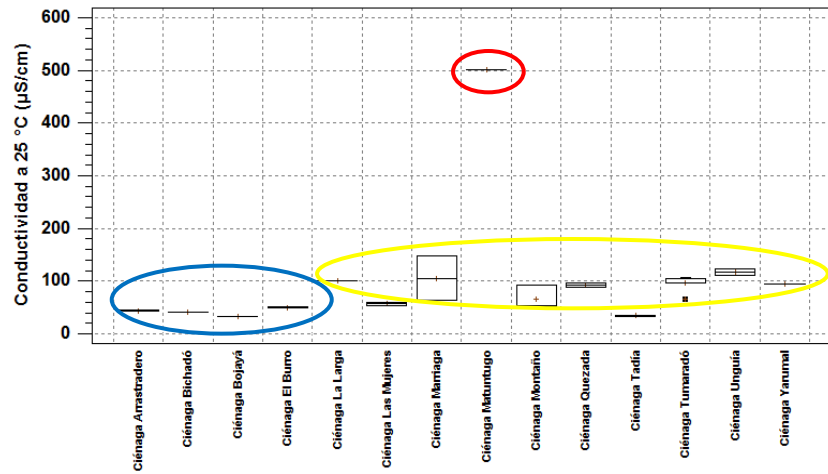
El promedio de valores de conductividad eléctrica (CE) para la época seca en las ciénagas fue de 102,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, observándose importantes variaciones entre los sitios evaluados (CV: 109,3%). El mayor valor fue registrado en la ciénaga Matuntugo (501,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$), seguido de las ciénagas Unguía, Marriaga, La Larga, Tumaradó y Quezada (117,1, 105,7, 100,15, 95,84 y 93,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Figura 19 1-a). Excepto la ciénaga Matuntugo, ninguno de los demás sitios de las ciénagas analizados presentó valores superiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto podría indicar para la ciénaga Matuntugo alta por mineralización (Ramírez y Viña 1998); mientras que para los demás sitios indicar baja contaminación por mineralización.

Para la época de lluvias, los valores de conductividad eléctrica (CE) disminuyeron considerablemente, registrando un valor promedio de en las ciénagas fue de 65,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y con una alta variación (CV: 65,3%). De igual forma que en la época seca, el mayor valor fue registrado en la ciénaga Matuntugo (174,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que las demás ciénagas presentaron gran variabilidad en esta época, registrando valores inferiores a 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las ciénagas de Buchadó y Tadia (ver Figura 19 1-b). Se establecieron diferencias estadísticamente significativas entre las épocas y los sitios (valor $p < 0,001$), evidenciándose claramente el aumento del valor medio de la conductividad en la época seca. Con respecto a los sitios, la Figura 4 1-a muestra en color amarillo los sitios que representan los valores más altos de conductividad, mientras que en azul está el conjunto de ciénagas que presenta menores valores, este comportamiento se replica en la época de lluvias, pero con menores valores de conductividad (Figura 19 1-b).

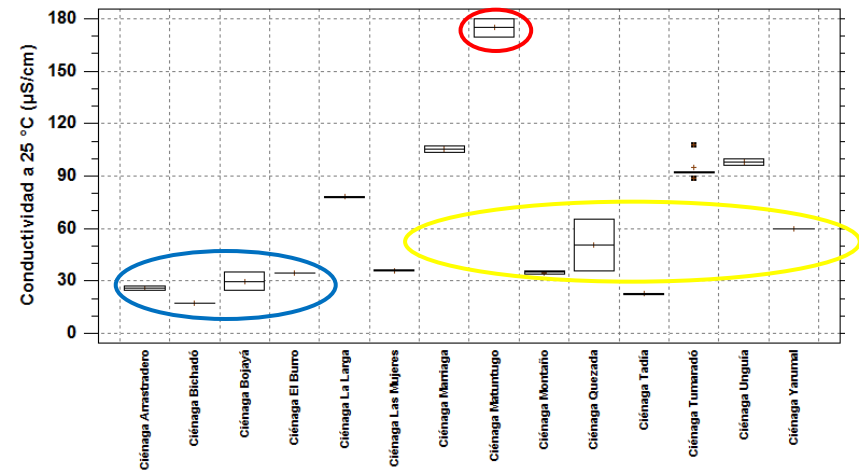
Para el caso del Río Atrato y sus afluentes, la conductividad promedio se vio fuertemente afectada por los valores registrados en el Bajo Atrato para ambas épocas. En promedio se registró una conductividad de 745,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CV: 495,8%) en época seca, mientras que en época de lluvias se registró un valor promedio de 166,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CV: 388,9%). Al no considerar los valores atípicos registrados en el Bajo Atrato, en promedio se registró una conductividad de 74,02 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CV: 75,8%) en época seca, mientras que en época de lluvias se registró un valor promedio de 68,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CV: 13,02%), lo que indica un comportamiento homogéneo en época de lluvias. Se evidenciaron diferencias

estadísticamente significativas entre la época y los sitios de muestreo, influenciadas considerablemente por los datos atípicos determinados en el Bajo Atrato, en caso en que no se consideraron en el análisis los datos atípicos, sólo se establecieron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios del río y sus afluentes (Figura 19, 2-a y 2-b).

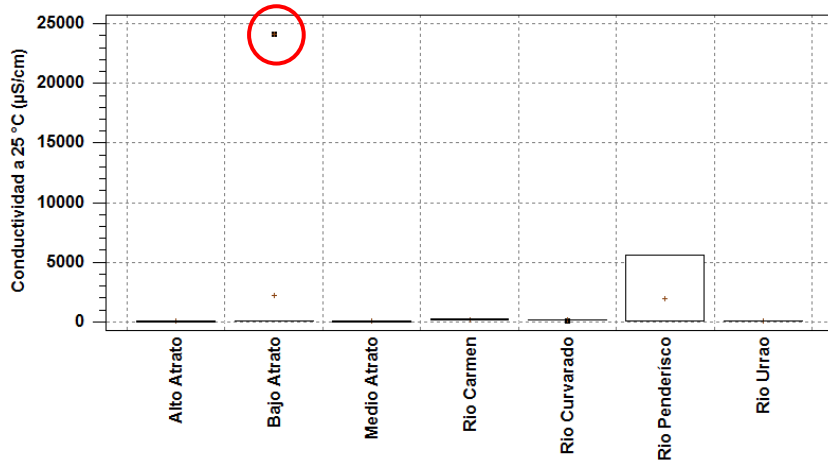
Los valores de conductividad registrados los sitios de muestreo, en general pueden estar fuertemente relacionados con la cantidad de sólidos disueltos; por ejemplo, los iones solubles en el agua [cuyos principales cationes y aniones son Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , sulfatos SO_4^{2-} , bicarbonatos (HCO_3^- y CO_3^{2-})], donde en los sitios con mayor concentración de SDT se observan las mayores conductividades y viceversa (Ramírez y Viña 1998).



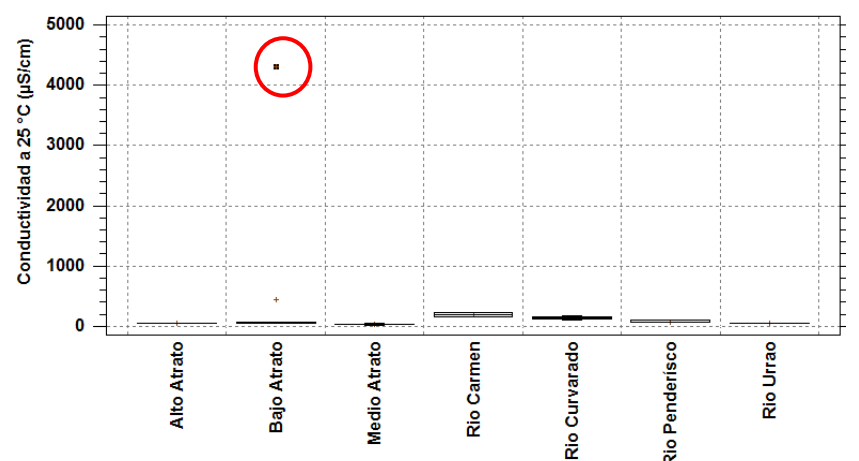
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 19. Conductividad en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

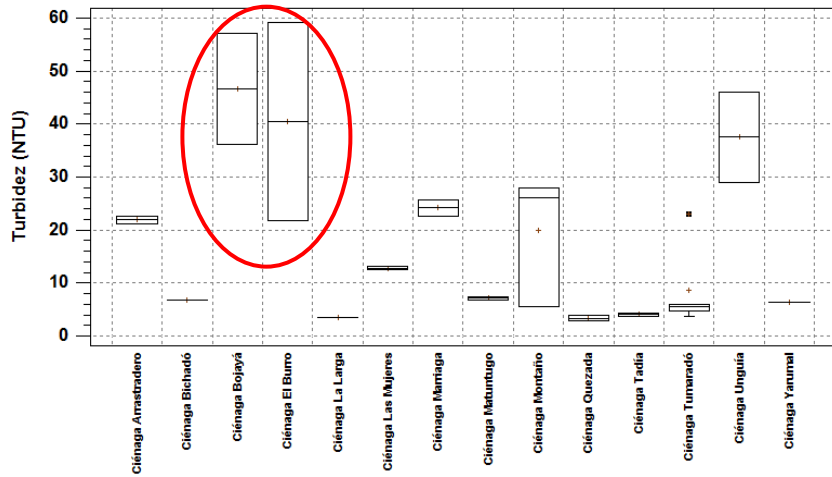
- **Turbidez**

La turbidez es el grado en que el agua interfiere con la transmisión de la luz a través de ella; por este motivo, la luz es reemitida a través de partículas en suspensión. El origen natural de la turbidez se debe a partículas de roca, arcilla y fango; algas y otros microorganismos; mientras que el antropogénico se da a partir de desechos domésticos e industriales, microorganismos, erosión, entre otros. Los valores de turbidez van desde cero, en agua pura, hasta varios miles de unidades en ríos muy turbios. Altos niveles de turbiedad, dificultan la desinfección y los procesos de tratamiento de potabilización; además, desde el punto de vista ecológico impiden la fotosíntesis (Galvin 2003).

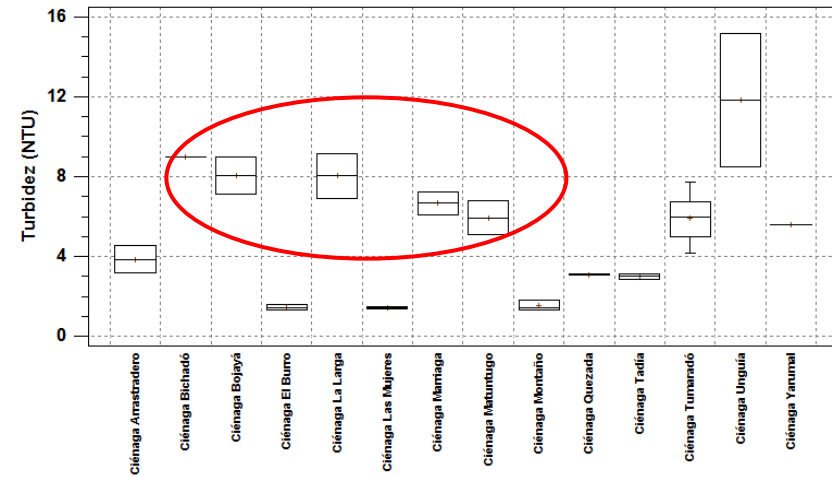
La turbidez en las ciénagas presentó un valor promedio de 17,3 NTU y una fuerte variación espacial (CV: 92,1 %) para la época seca, mientras que un valor promedio de 5,17 NTU (CV: 62,1 %) para la época de lluvias. Los sitios correspondientes a las ciénagas de Bojayá y El Burro fueron las que presentaron los mayores valores en época seca (46,6 y 40,4 NTU, respectivamente) (Figura 20 1-a). Para la época de lluvias, aunque los valores de turbidez fueron claramente inferiores a los registrados en época seca, las ciénagas que registraron los mayores valores promedio fueron Bichadó, Bojayá, La Larga, Marriaga y Matuntugo (Figura 20 1-b). De igual forma se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas tanto entre las épocas de muestreo como entre los sitios (valor $p < 0,001$).

En el caso de Río Atrato y sus afluentes se determinaron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios de muestreo (valor $p = 0,03$), pero no con respecto a las épocas (valor $p = 0,83$). Se registraron valores atípicos en el Medio Atrato para ambas épocas. En general se registran bajo valores de turbidez en ambas épocas con alta variabilidad dada por los sitios de muestreo, en promedio se registraron valores de 52,85 NTU (CV: 119,2 %) y 71,51 NTU (CV: 160,6 %) para época seca y de lluvias, respectivamente (Figura 20, 2-a y 2-b).

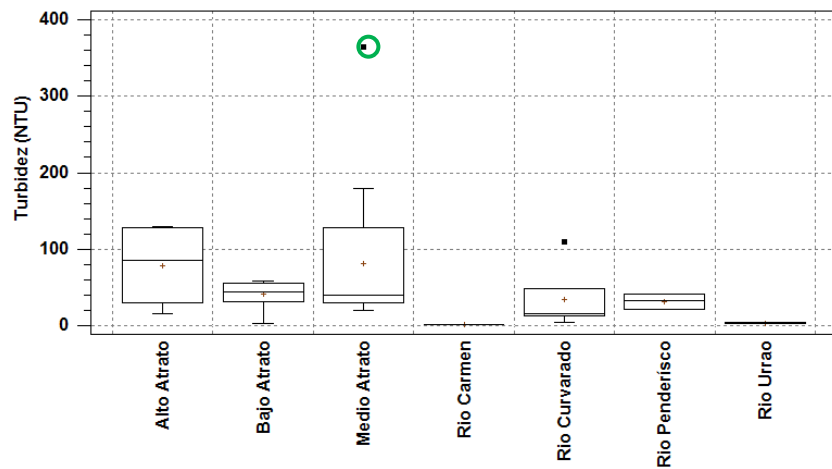
La turbiedad ha sido una característica ampliamente aplicada como criterio de calidad de agua, tanto en las fuentes de abastecimiento como en los procesos de potabilización y sistemas de distribución (Montoya et al., 2011). Es por esto que un incremento considerable en esta variable representa una alerta frente a los cambios ambientales que ha sufrido el sitio donde se ha analizado.



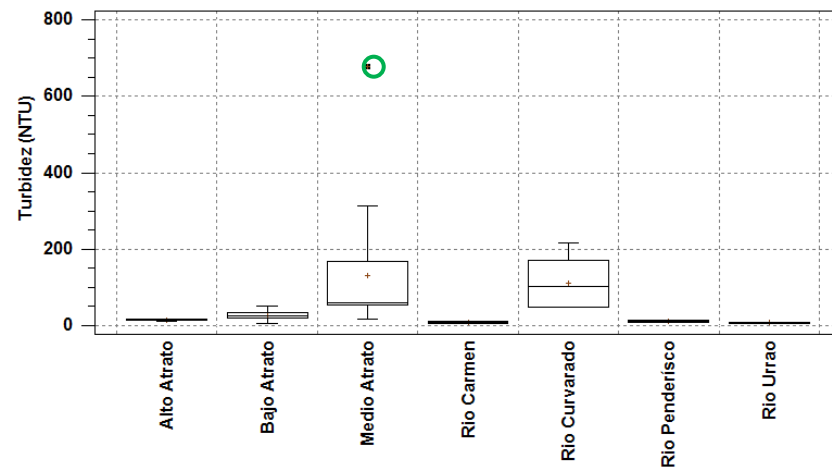
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 20. Turbidez en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

▪ **Sólidos suspendidos totales (SST)**

Los SST se refieren a la materia orgánica como detritus, o de origen aluvial, restos de roca, arcilla, arena y similares. Los sólidos suspendidos pueden verse a simple vista como pequeñas partículas y son los que dan turbiedad al agua (Galvin, 2003). Desde el punto de vista ecológico, un alto contenido de sólidos en suspensión o alta turbiedad, también es limitante para el ecosistema acuático, ya que impide el paso de los rayos solares, daña y tapona el sistema de intercambio gaseoso (branquias, agallas) en los animales acuáticos y modifica sus hábitats naturales. Es necesario medir la cantidad de materia sólida contenida debido a que son indicadores en gran cantidad de procesos físicos, químicos y biológicos de tratamiento de aguas (Galvin 2003). En la Figura 21 y la Figura 22 se puede observar que el Medio Atrato superó en ambas épocas el criterio del objetivo de calidad, mientras que los demás sitios se mantienen en el rango establecido.

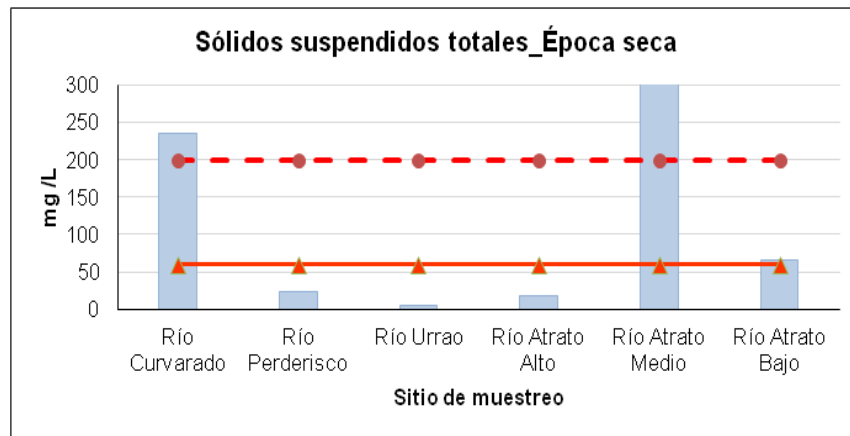


Figura 21. Sólidos suspendidos totales (SST) en sitios de la cuenca río Atrato, en época seca. La línea punteada señala el valor el indicativo objetivo de calidad límite superior (200 mg/L) y línea continua valor indicativo objetivo de calidad límite inferior (60 mg/L).

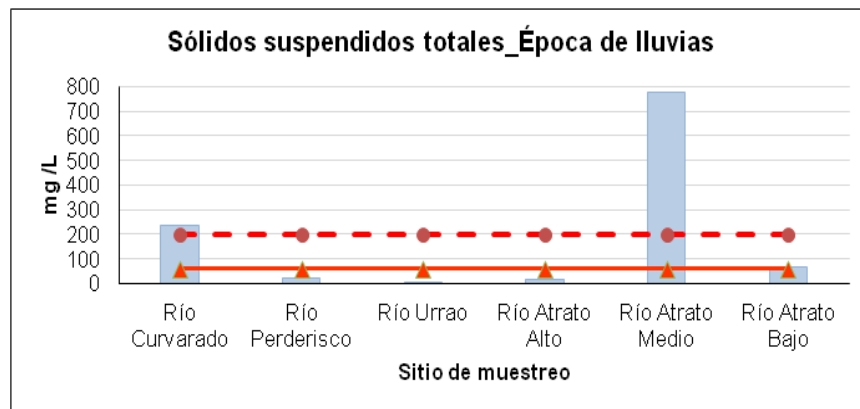
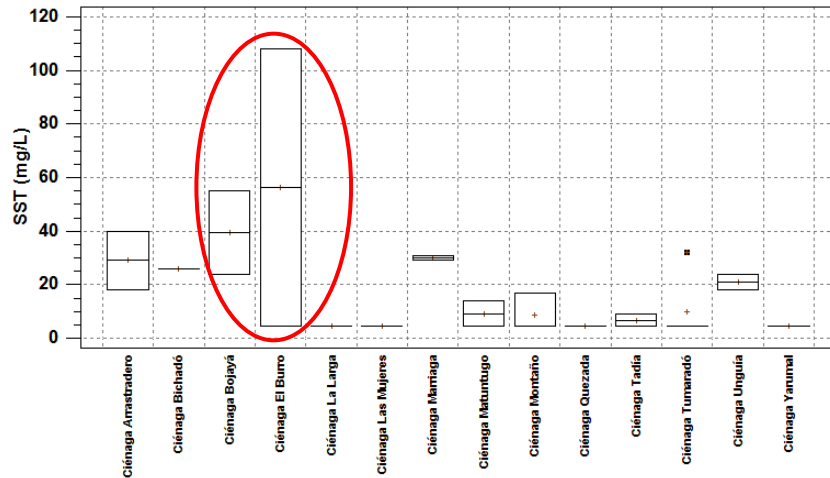


Figura 22 Sólidos suspendidos totales (SST) en sitios de la cuenca río Atrato, en época de lluvia. La línea punteada señala el valor el indicativo objetivo de calidad límite superior (200 mg/L) y línea continua valor indicativo objetivo de calidad límite inferior (60 mg/L).

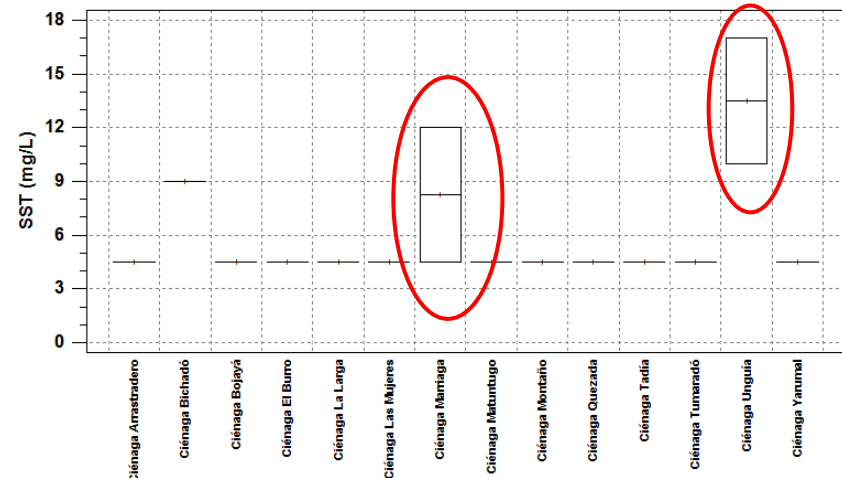
En época seca (Figura 23 1-a), el mayor valor de SST se registró en la ciénaga El Burro (108,0 mg/L) seguido por la ciénaga Bojayá (55,0 mg/L) y ciénaga Arrastradero (40,0 mg/L). Los valores de SST estimados en las ciénagas se encontraron en el rango de buena calidad sanitaria (<75 y <150 mg/L; Ramírez y Viña 1998).

En época de lluvias los valores de SST disminuyeron considerablemente con respecto a los reportados en la época seca, manteniendo un valor promedio de 5,5 mg/L y un coeficiente de varios de 51,5%. Se presentaron diferencias estadísticamente significativas para la época (valor $p = 0,004$), mientras que los sitios no registraron diferencias estadísticamente significativas con respecto a los sitios, esto puede ser atribuido a que gran parte de los valores reportados fueron inferiores al límite de cuantificación (Figura 231-b).

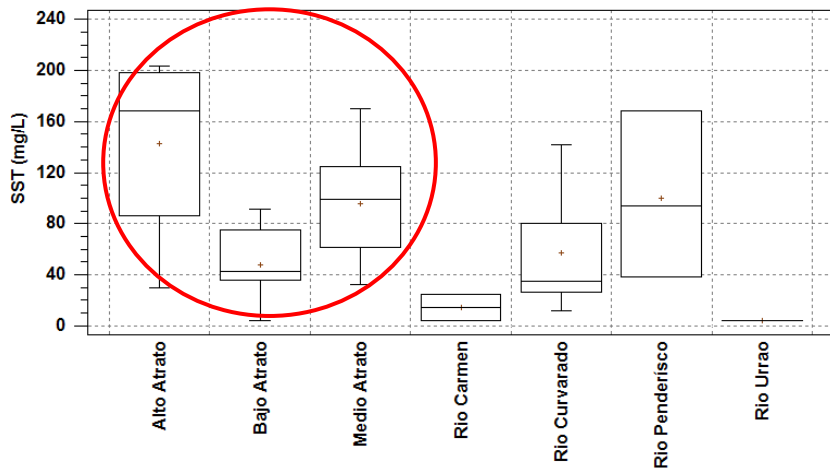
Los sitios muestreados sobre el Río Atrato y sus afluentes si mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios con respecto a los SST (valor $p = 0,02$), pero no entre las épocas. En promedio para la época seca se reportaron valores de 74,3 mg/L (CV = 72,6%), donde los mayores valores fueron registrados por el Alto Atrato y el Río Penderisco (203 mg/L y 168 mg/L, respectivamente). En época de lluvias se presentó un cambio considerable con respecto a la carga de sólidos suspendidos totales en el Alto Atrato, ya que pasó a presentar en promedio 17,5 mg/L, junto con el Río Urrao (4,5 mg/L) presentaron los menores valores promedio (Figura 23, 2-a y 2-b).



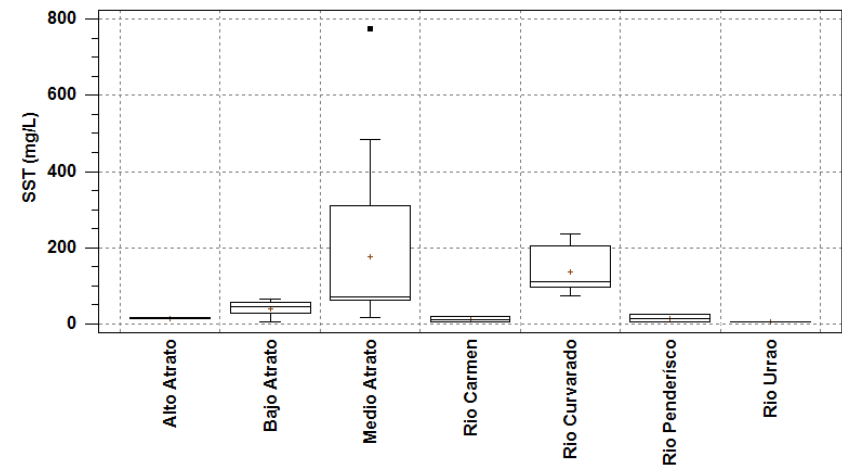
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 23. SST en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- **Sólidos disueltos y sólidos totales**

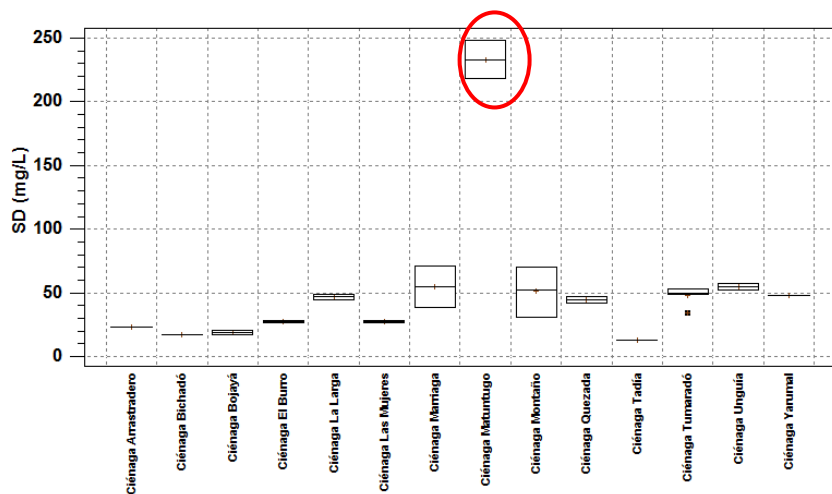
Todos los contaminantes del agua, con excepción de los gases disueltos, contribuyen a la carga de sólidos. Estos pueden clasificarse de acuerdo con su tamaño en sólidos en suspensión y sólidos disueltos. Los primeros se refieren a la materia inorgánica en forma iónica. La división en cuanto al tamaño es un fraccionamiento convencional basado en el paso a través de un filtro con poros de un tamaño definido (generalmente 0,45 μm); los que pasen serán los sólidos disueltos, los que el filtro retenga son los sólidos suspendidos; la suma de ambos sería los sólidos totales. Al igual que para los sólidos suspendidos, es necesario medir la cantidad de materia sólida contenida, debido a que son indicadores en gran cantidad de procesos físicos, químicos y biológicos de tratamiento de aguas (Galvin 2003).

En época seca para las ciénagas (Figura 24 1-a) los sólidos disueltos totales (SDT) presentaron un valor promedio de 51,5 mg/L, con una considerable variación entre los sitios (CV: 100,9%). El mayor valor se registró en la ciénaga Matuntugo (248 mg/L), seguido por las ciénagas Marriaga y Montaña (71 y 70 mg/L). Este mismo comportamiento se observa en la época de lluvias (Figura 24 1-b), peor con una considerable disminución en las concentraciones de sólidos (promedio 29,45 mg/L y C = 73,1%). Éstos contrastes se verifican con las diferencias estadísticamente significativas encontradas tanto a nivel espacial como temporal (valor $p < 0,001$).

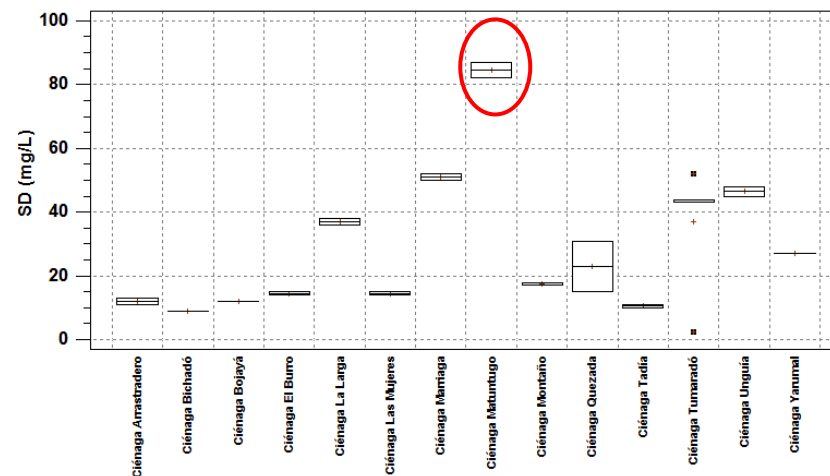
Para el caso del Río Atrato (Figura 24, 2-a y 2-b), se determinaron valores considerablemente mayores en el Bajo Atrato, con respecto a los demás sitios muestreados. Con un valor promedio de 278,98 mg/L (CV = 581%) para época seca, el cual está altamente influenciado por los valores atípicos del Bajo Atrato, y un valor promedio de 78,89 mg/L (CV = 406) para época de lluvias, se determinaron diferencias estadísticamente significativas (valor $p < 0,001$).

Los ST están representados tanto en las ciénagas como en el Río y los afluentes fundamentalmente por los SD, dado que sus concentraciones promedio son mayores. De igual forma que en comportamiento de las demás formas de sólidos, los ST presentan gran variabilidad tanto a nivel espacial como temporal. Para la época seca en las ciénagas se determinó un coeficiente de variación de 107,7%, mientras que para época de lluvias disminuyó esta variabilidad a 49% (Figura 25, 1-a y 1-b).

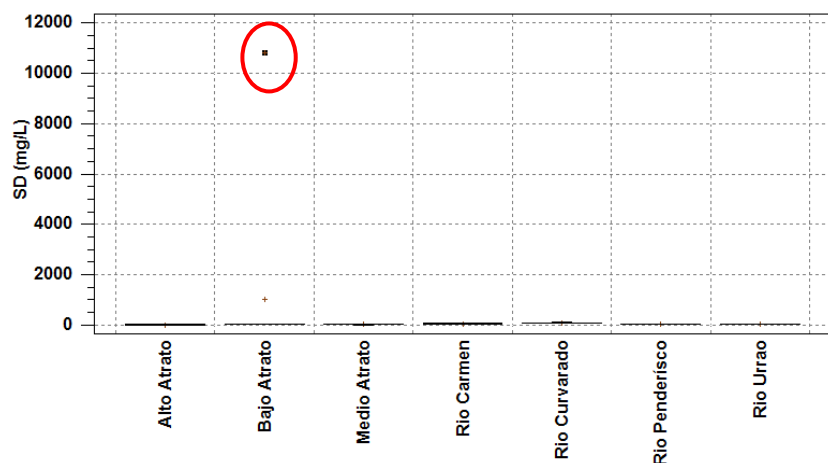
Para el Río Atrato y sus afluentes se presentaron variabilidades aún mayores, 507% en época seca y 201% en época de lluvias, esta variabilidad está determinada por el comportamiento fundamentalmente del Bajo Atrato (Figura 25, 1-a y 1-b).



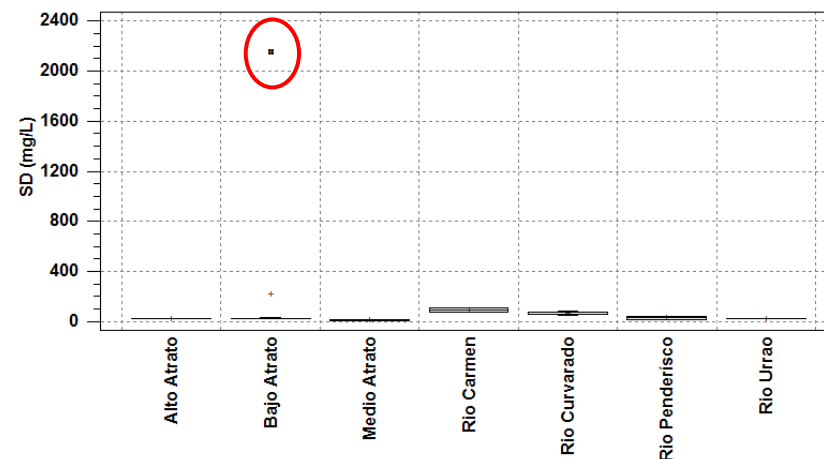
1-a



1-b

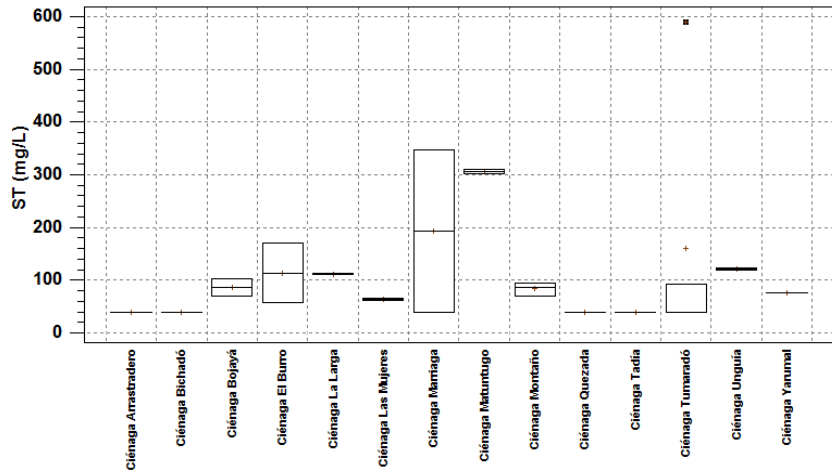


2-a

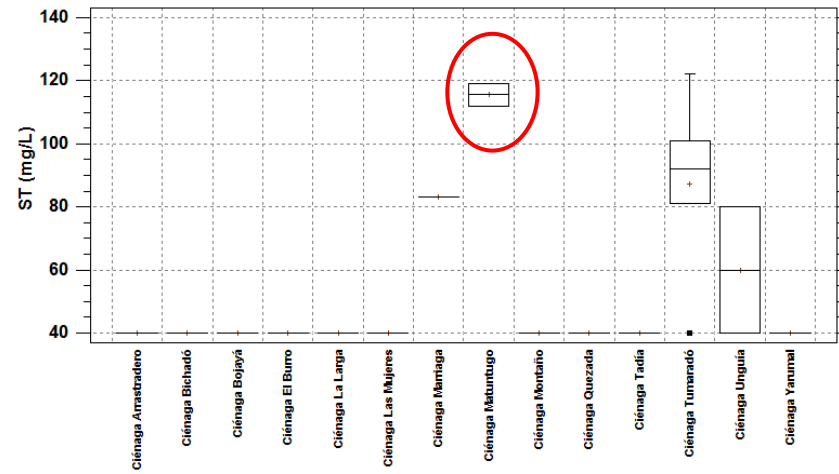


2-b

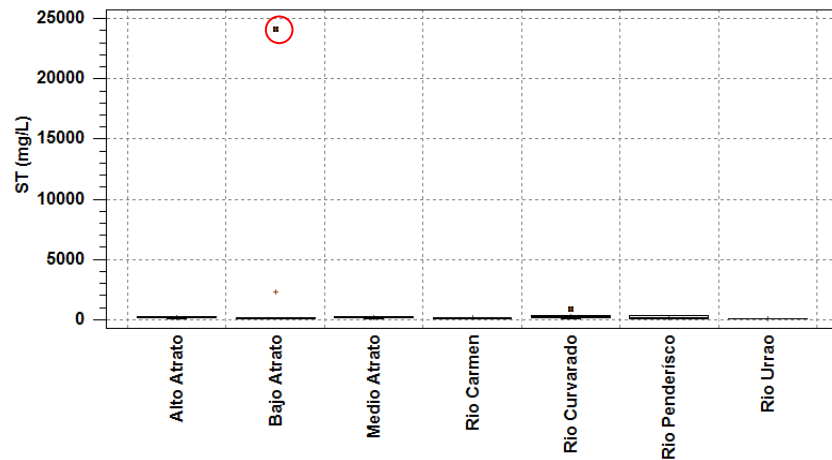
Figura 24. SD en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.



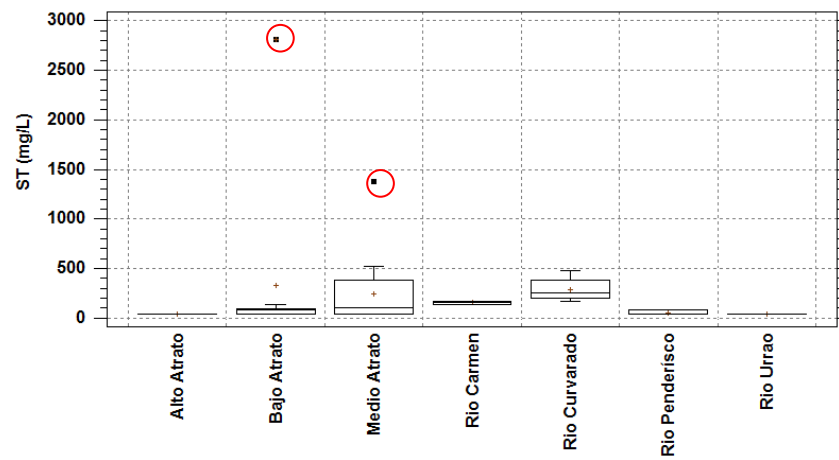
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 25. ST en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

▪ **Oxígeno Disuelto**

El oxígeno es uno de los factores más importantes que debe ser medido en el agua. Es un indicador de que tan contaminada está el agua o de lo bien que puede dar soporte esta fuente a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (Galvin 2003).

Las fuentes de oxígeno son la precipitación pluvial, la difusión del aire en el agua, la fotosíntesis, los afluentes y la agitación moderada. En general, el principal factor de consumo de oxígeno libre es la oxidación de materia orgánica por respiración a causa de microorganismos descomponedores (Galvin 2003).

De acuerdo con las gráficas comparativas con los objetivos de calidad (ver Figura 26 y Figura 27), se puede observar que los sitios de muestreo cumplen con el mínimo criterio de calidad para el oxígeno disuelto (5 mg/L). Sin embargo, para ambas épocas el Río Curvaradó y Atrato Bajo se encuentran en el límite de esta condición.

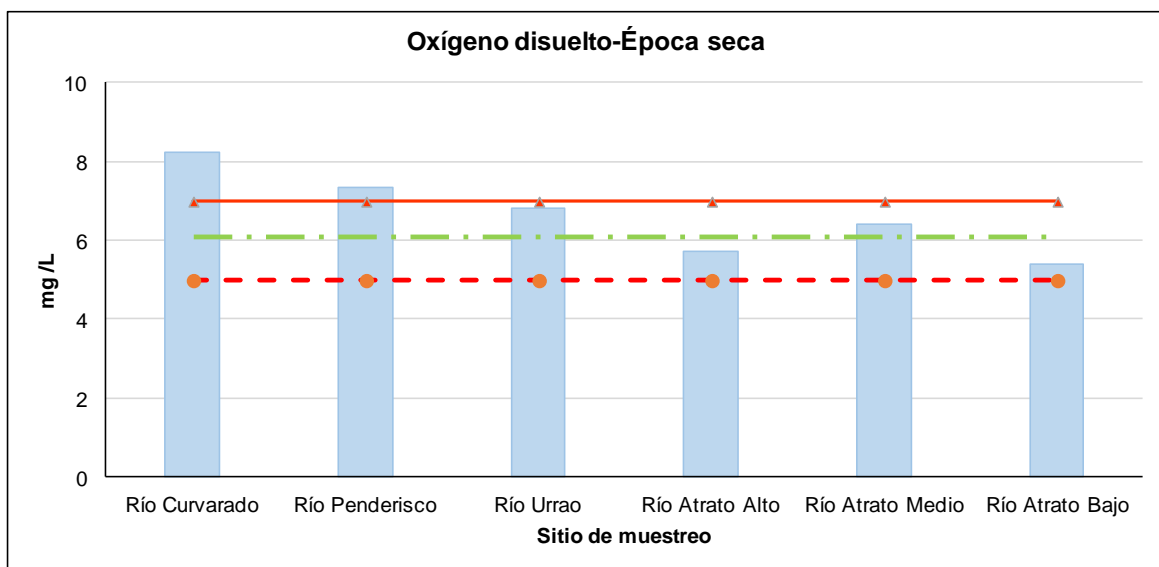


Figura 26. Oxígeno disuelto en la cuenca del Río Atrato en época seca. La línea punteada naranja señala la concentración mínima (5 mg/L) exigida para el río Atrato, línea punteada verde señala la concentración mínima (6 mg/L) exigida para el río Penderisco y río Urrao, y la línea continua señala la concentración mínima (7 mg/L) exigida para el río Curvaradó.

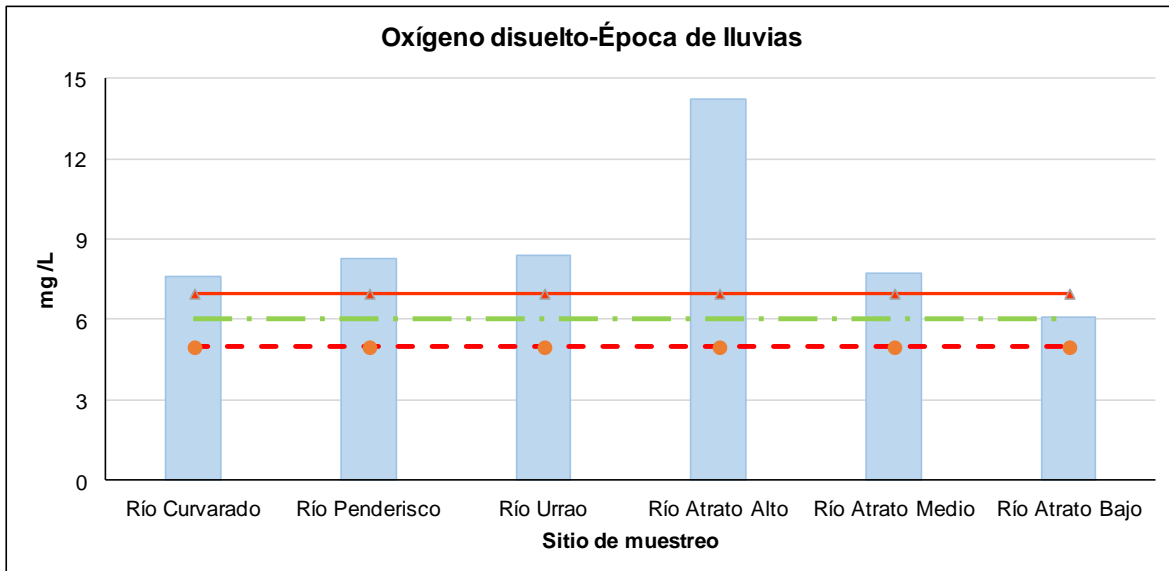
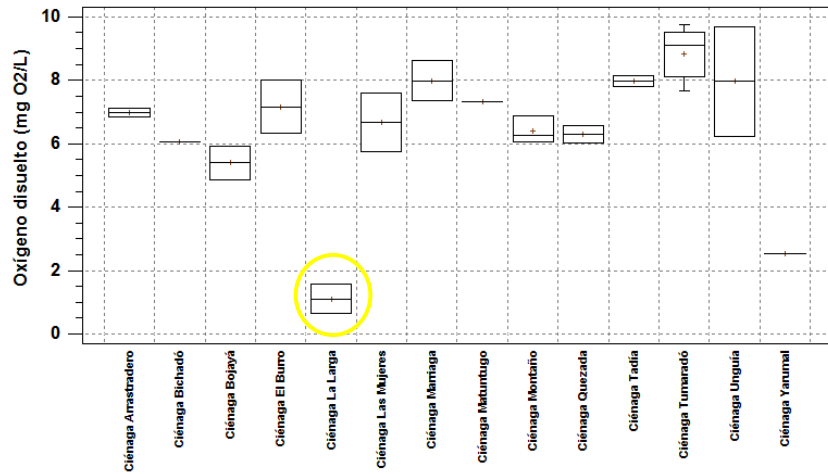


Figura 27. Oxígeno disuelto en la cuenca del Río Atrato en época de lluvias. La línea punteada naranja señala la concentración mínima (5 mg/L) exigida para el río Atrato, línea punteada verde señala la concentración mínima (6 mg/L) exigida para el río Penderisco y río Urrao, y la línea continua señala la concentración mínima (7 mg/L) exigida para el río Curvaradó.

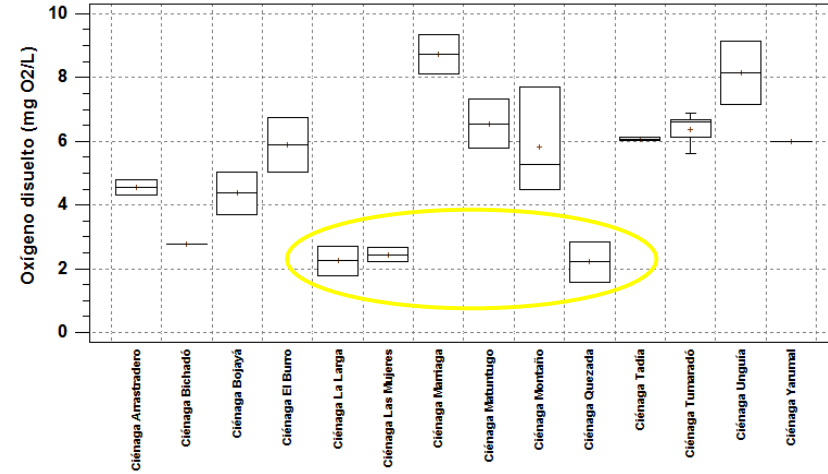
Los valores de oxígeno disuelto (OD) en época seca presentaron un valor promedio de 6,72 mg/L (CV = 31,8%). El mayor valor se registró en la ciénaga Tumaradó (9,76 mg O₂/L), mientras que el menor valores fue registrado en la ciénaga La Larga 0,65 mgO₂/L, en lluvias se presentó un valor promedio de 5,35 mg/L (CV = 39,4%). En la Figura 28 1-a y 1-b se muestran que ambos periodos la ciénaga La Larga presenta valores inferiores a 4 mg/L, lo cual puede indicar mala calidad del agua, lo que representa una misma condición para las ciénagas Las Mujeres y Quezada en época de lluvias. Esto incide en la variabilidad estadísticamente significativa del sistema (valor $p < 0,001$).

Para el río Atrato y sus afluentes, se observa un aumento en las concentraciones de oxígeno con respecto a los reportados en las ciénagas, en promedio se tiene 6,33 mg/L (CV= 25,2%) en época seca y 7,89 mg/L (CV= 38,5%) en época de lluvia. De igual forma se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las épocas y los sitios (valor $p < 0,001$). En época seca el sitio que presentó el mayor valor fue el río Curvaradó (8,73 mg/L),

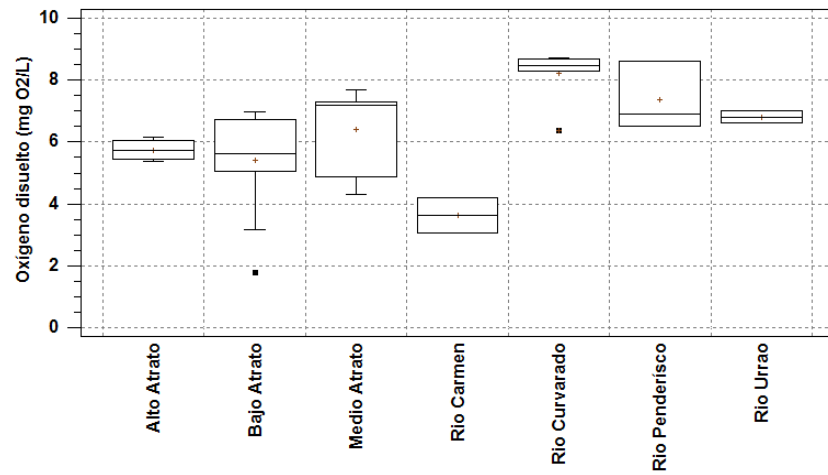
En general hay una buena calidad del agua de acuerdo con los valores de oxígeno disuelto, en los sitios de la cuenca del río Atrato. Todos los valores de OD, excepto el río Carmen, superaron el valor mínimo exigido por el objetivo de calidad (5 mg O₂/L). Por lo anterior, sabiendo que el OD está entre las variables ambientales más importantes para la calidad del agua, sino la más, se puede concluir que el agua de todos los sitios muestreados presentó buena calidad sanitaria.



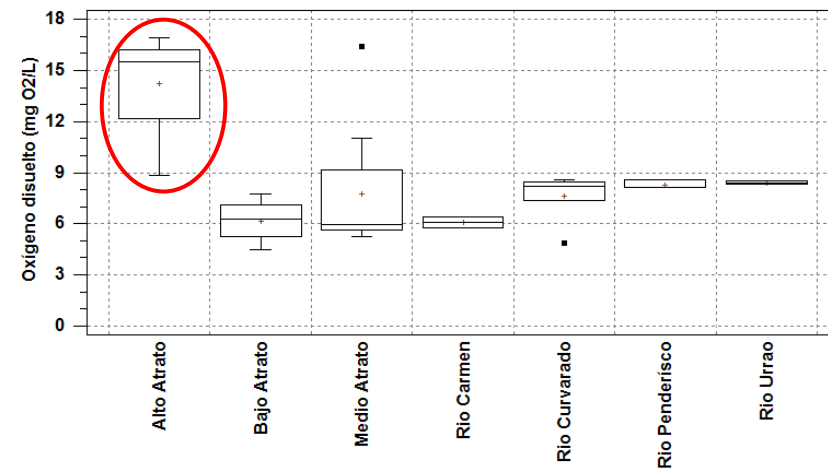
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 28. Oxígeno disuelto en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

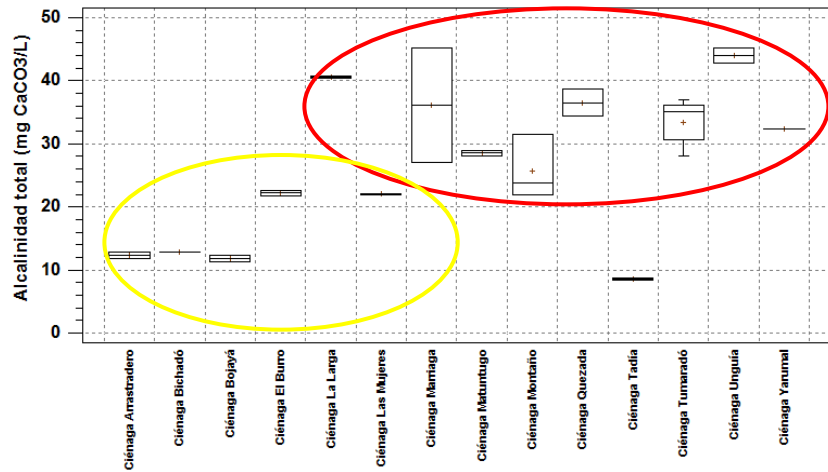
- **Alcalinidad total**

La alcalinidad está asociada, generalmente, con las formas de carbono inorgánico disuelto presentes en el agua (dióxido de carbono, bicarbonatos y carbonatos). No tiene que ver con la terminología del pH, pues aguas con pH ácido pueden tener alcalinidad alta. Es un índice de la naturaleza de las rocas dentro de una cuenca de drenaje y del grado en que han sido sometidas a la acción del tiempo. La alcalinidad también se define como la medida para neutralizar ácidos, la cual le confiere propiedades buffer, es decir, dificulta sus cambios en el pH. No se considera que la alcalinidad cause daño al hombre, pero se encuentra asociada al pH (Galvin 2003).

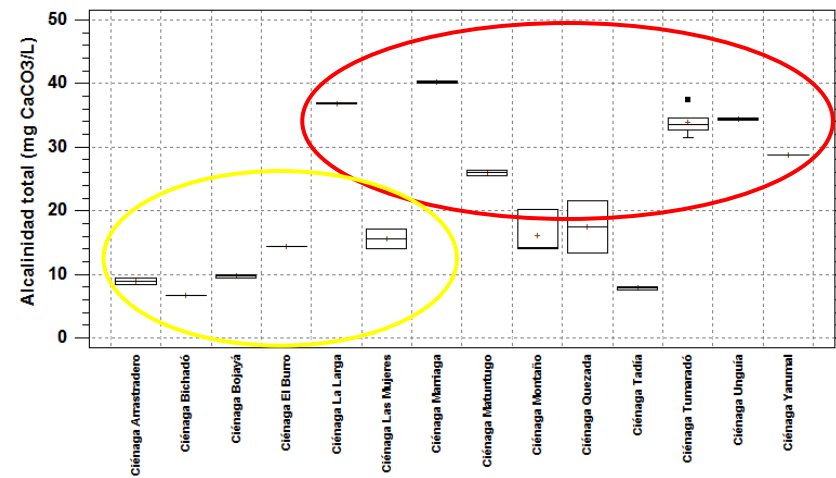
La concentración de alcalinidad presentó un valor promedio de 27,2 mg CaCO₃/L y alta variabilidad entre las ciénagas para la época seca (CV = 41,5%), este comportamiento se replicó en la época de lluvias, con un promedio de 22,5 mg CaCO₃/L y un coeficiente de variación de 51,6%. En general, las concentraciones de estas dos variables fueron muy bajas ya que fueron mucho menores a las de los valores de referencia para alta contaminación mineral. A pesar de lo anterior, se lograron establecer diferencias estadísticamente significativas entre las épocas y los sitios (valor $p < 0,001$), donde los mayores valores para ambas épocas fueron registrados en la ciénaga Marriaga (45,2 y 40,5 mg CaCO₃/L, respectivamente) y Unguía (45,2 y 34,5 mg CaCO₃/L, respectivamente), mientras que las ciénagas Arrastradero, Buchadó, Bojayá, El Burro, Las Mujeres y Tadíá mostraron en ambos casos valores inferiores a 30 mg CaCO₃/L (Figura 29, 1-a y 1-b).

En el río Atrato se presentó en promedio para la época seca 31,3 mg CaCO₃/L, con alta variabilidad espacial (CV = 71,1%), mientras que para la época de lluvias el valor promedio de alcalinidad disminuyó, 27,4 mg CaCO₃/L (CV = 68%). Los menores valores se registraron en ambas épocas en los tramos comprendidos entre el Alto, Medio y Bajo Atrato, siendo los valores de la época seca 3 veces mayores a los de la época de lluvias (Figura 29, 2-a y 2-b).

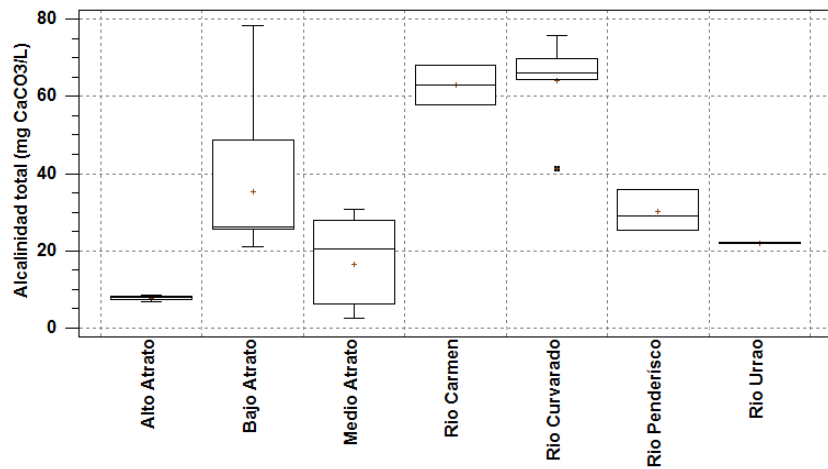
La normativa ambiental vigente no establece ningún valor límite para las concentraciones de alcalinidad para ninguno de los usos, pero la Resolución 2115 de 2007 (MPS-MAVDT), en las características para aguas de consumo humano, establece que la alcalinidad total debe ser inferior a 200 mg/L. Se considera entonces, que en términos de alcalinidad total el agua de los sitios presentó condiciones sanitarias de muy buena calidad, aunque este no sea el uso del recurso.



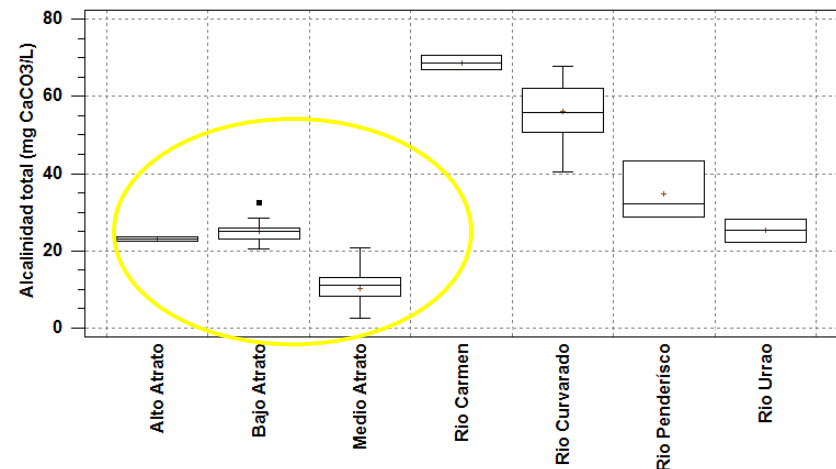
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 29. Alcalinidad en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

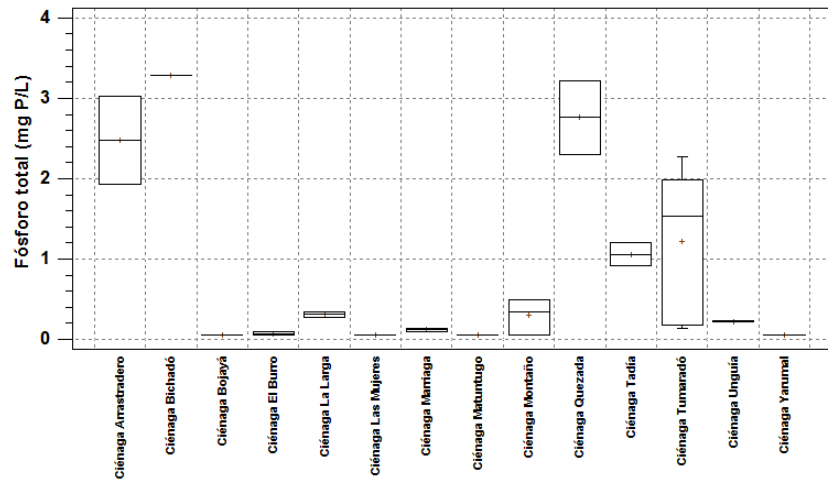
- **Fosforo total**

El fósforo, al igual que el nitrógeno, constituyen los dos elementos más importantes para la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos. El fósforo proviene de la disolución de las rocas fosfatadas y de la mineralización de la materia orgánica que retorna al medio el fósforo inorgánico por los procesos de descomposición microbiana. El nitrógeno es un elemento mucho más abundante en el agua que el fósforo y de una disponibilidad más inmediata. Por tanto, se considera al fósforo un factor más limitante que el nitrógeno.

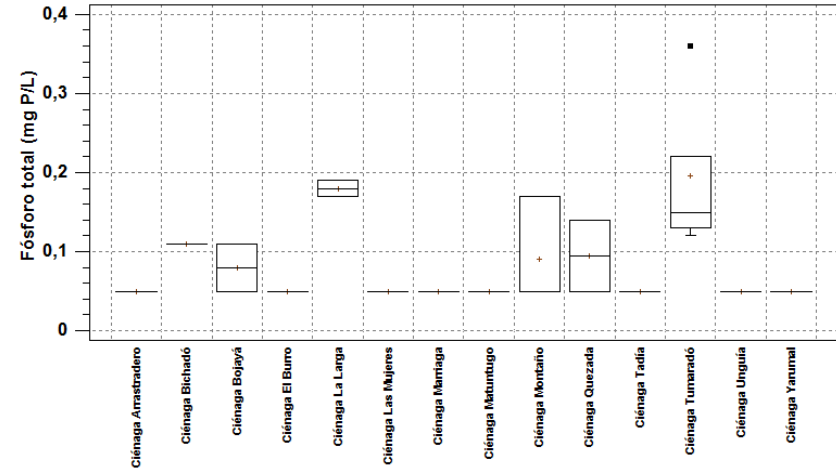
En términos generales, la proporción de fósforo a nitrógeno en el agua es de 1:10. Su exceso en el agua provoca eutrofización, que es el proceso que se produce en ecosistemas acuáticos, caracterizado por el incremento de la concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno) que produce cambios en la composición de la comunidad biológica. Las aguas eutróficas son más productivas, y el exceso de nutrientes produce un incremento de la biomasa vegetal productora (algas y macrófitas acuáticas); proceso que reviste características negativas al aparecer grandes cantidades de materia orgánica cuya descomposición microbiana ocasiona descenso en los niveles de oxígeno disuelto en el agua, con lo cual se condiciona la vida de muchos organismos del ecosistema (Galvin 2003).

Las concentraciones de fósforo total (PT) presentaron valores por encima del límite sobre el cual se considera eutrofía para las ciénagas Arrastradero, Quezada y Tumaradó en época seca, mostrando en general un valor promedio de 0,82 mg P/L, con una amplia variabilidad espacial (CV = 130,6%) en época seca y 0,09 mg P/L (CV = 77%) en época de lluvias. Ciénagas como Matuntugo, Marriaga, Unguía, Tadia y Las Mujeres presentaron en su mayoría valores inferiores al límite de cuantificación del método analítico. La época de lluvias limita la cuantificación de la concentración de fósforo posiblemente a efectos de dilución (Figura 30, 1-a y 1-b).

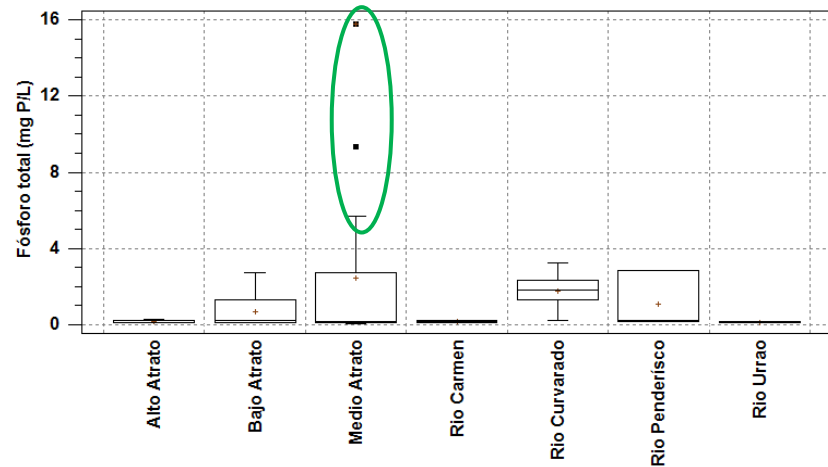
Al igual que en las ciénagas, el aumento en la concentración de fósforo se ve favorecido en época seca, con un valor promedio de 1,38 mg P/L (CV = 204%), mientras que en la época de lluvias ocurre una importante reducción en el valor promedio de este nutriente, 0,19 mg P/L (CV = 167%). En ambas épocas se pueden identificar valores atípicos para el Medio Atrato, lo cual condiciona los valores promedio del nutriente (Figura 30, 2-a y 2-b).



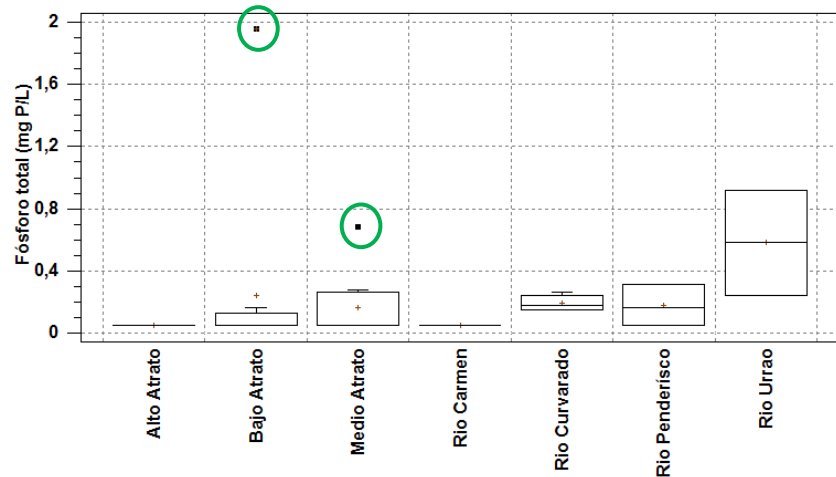
1-a



1-b



2-a



2-b

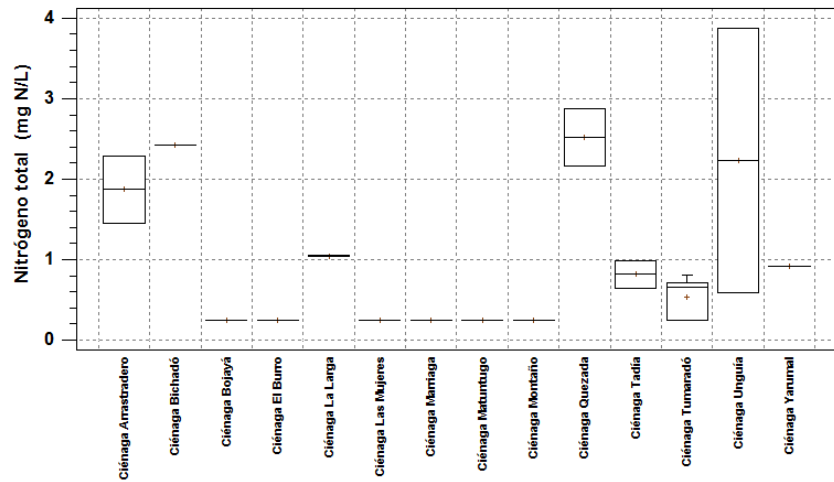
Figura 30. Fósforo total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- **Nitrógeno total**

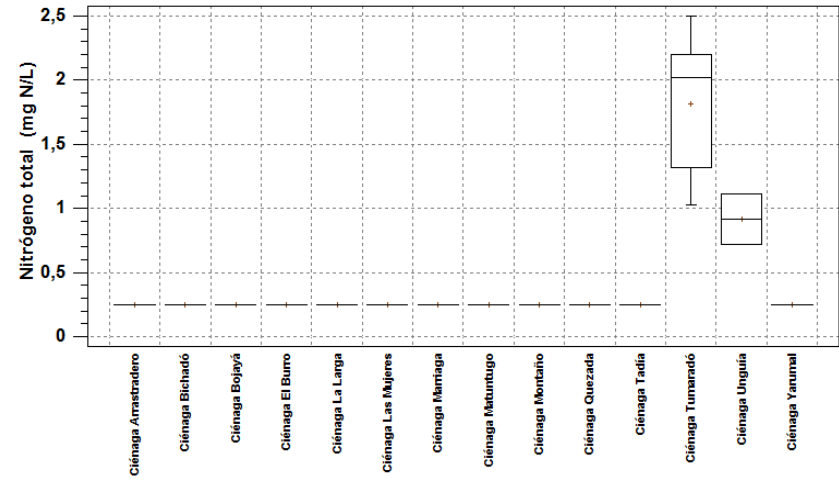
Las variaciones de nitrógeno total (NT) en las ciénagas se evidencian fundamentalmente en la época seca (Figura 16 1-a), donde el valor promedio de la concentración de NT es de 0,87 mg N/L con una importante variación espacial (CV = 107%). Aunque en época de lluvias (Figura 16 1-b) se presentan en promedio valores en la concentración de NT de 0,55 mg N/L, este valor está asociado al límite de cuantificación, el cual fue censurado y por tanto subestima la concentración de este nutriente. Las ciénagas que presentaron los mayores valores de nitrógeno total fueron Arrastradero (2,29 mg N/L), Quezada (2,88 mg N/L), Tumaradó (0,81 mg N/L), Unguía (3,87 mg N/L) y Yarumal (0,92 mg N/L) en época seca, mientras que en época de lluvias fueron Tumaradó (2,5 mg N/L) y Unguía (1,1 mg N/L).

Para el río Atrato y sus afluentes en época seca se establece un valor promedio en la concentración de NT de 1,02 mg N/L con una amplia variabilidad (CV = 185%), mientras que para la época de lluvias la concentración promedio 0,29 mg N/L (CV = 52,4%). Los mayores valores se reportaron para el Medio Atrato de 11,39 mg N/L (Figura 31, 2-a y 2-b).

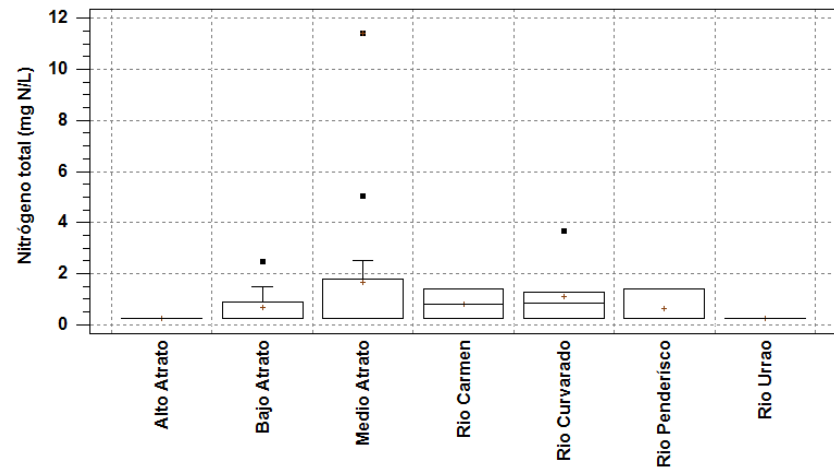
La normativa ambiental vigente no establece ningún valor límite para las concentraciones de fósforo (P) y nitrógeno (N). Sin embargo, establece que las concentraciones de estos dos elementos no deben estar en proporción para generar eutrofización.



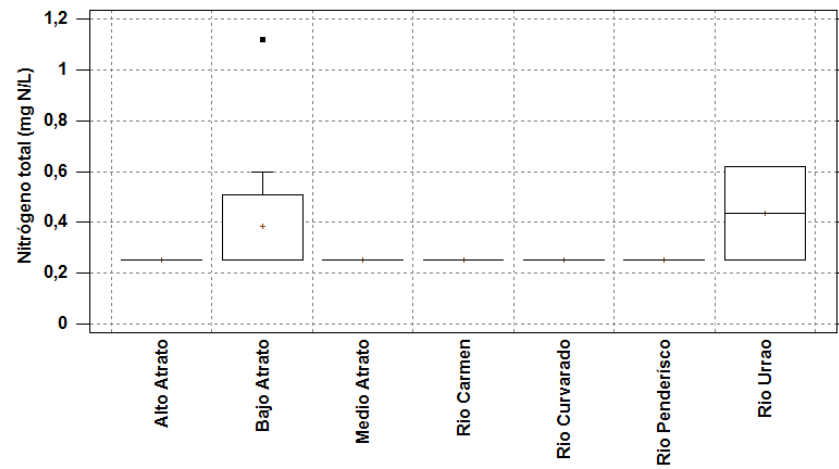
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 31. Nitrógeno total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

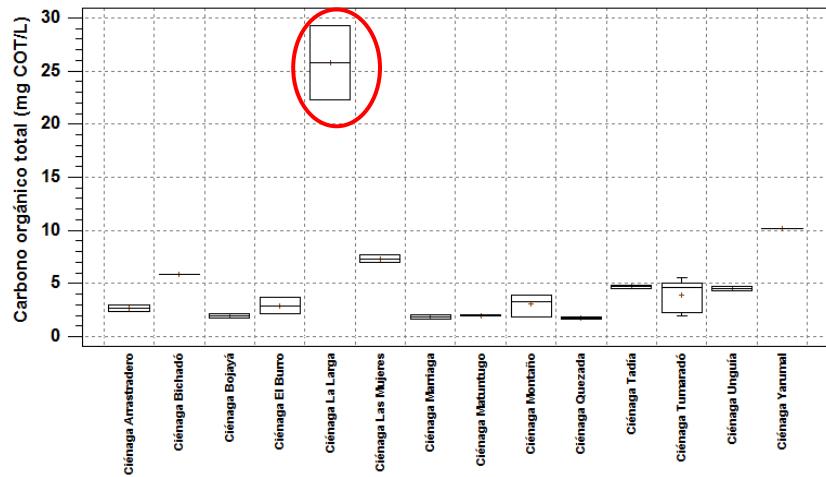
▪ **Carbono Orgánico Total**

El carbono orgánico puede agruparse en dos categorías, detrítico y carbono orgánico particulado de la biota. El primero, forma una gran parte del carbono orgánico total y muchas veces proviene de la entrada alóctona de materia orgánica o resuspensión del sedimento, que generalmente se relaciona con el crecimiento de bacterias. Los compuestos orgánicos, son de gran importancia en el tratamiento y depuración de aguas (Galvin 2003).

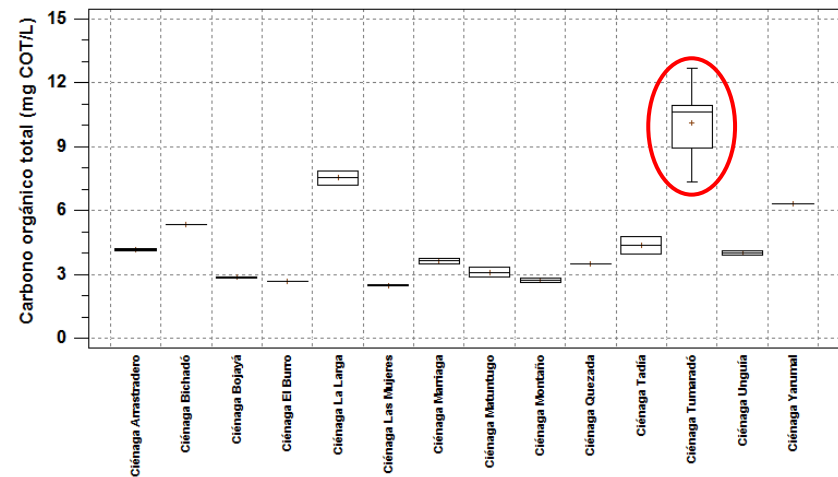
La concentración de COT presentó un valor promedio de 5,19 mg C/L para las ciénagas en época seca, con fuerte variación espacial (CV: 116%). Las mayores concentraciones fueron registradas en las ciénagas de La Larga, Yarumal y Las Mujeres (29,32, 10,15 y 7,68 mg C/L). Para la época de lluvias el valor promedio de 4,9 mg C/L (CV: 57,5%), en este caso el mayor valor fue registrado por la ciénaga Tumaradó (10,96 mg C/L) (Figura 32, 1-a y 1-b).

En el caso del río Atrato y sus afluentes, en época seca se presentan concentraciones en promedio bajas, 2,59 mg C/L, con una variabilidad del 147%, mientras que en época de lluvias se ven disminuidas estas concentraciones promedio a 1,98 mg C/L (CV = 74,45%). Las mayores concentraciones en el río se dan en época de lluvias donde los máximos valores para el Alto Atrato, Medio Atrato y Bajo Atrato fueron 8,34, 2,76 y 4,49 mg C/L, respectivamente (Figura 32, 2-a y 2-b).

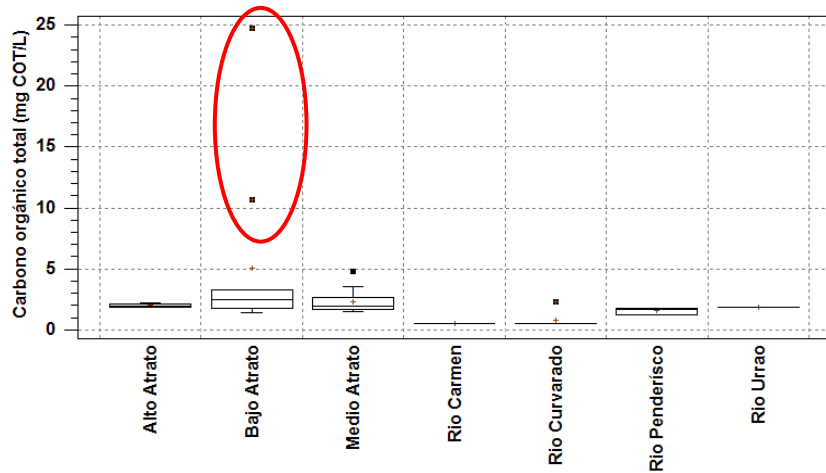
El carbono orgánico total es uno de los parámetros en el estudio de la contaminación por compuestos orgánicos, dado que incluye todos los compuestos de C en una sola masa. La resolución 2115 de 2007 señala como valor máximo aceptable de carbono orgánico total 5,0 mgC/L, para calidad de agua para consumo humano, aunque este no sea el uso del recurso establecido.



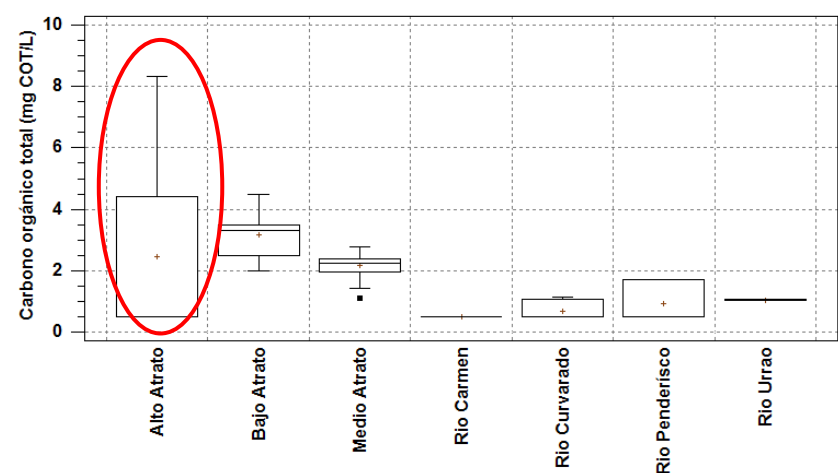
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 32. Carbono total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- **Coliformes totales**

Estas bacterias son más resistentes que las bacterias patógenas; por ello, su ausencia en el agua es un índice de que el agua es bacteriológicamente segura para la salud humana. La denominación genérica coliformes designa un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua. Siendo *Escherichia coli*, una de estas especies. En las ciénagas evaluadas se estimó un valor promedio de coliformes totales de 7.750,6 UFC/100mL, con fuerte variación espacial (CV: 98,19%). Los mayores valores se registraron en la ciénaga Las Mujeres (41.600 NMP/100mL), mientras que las demás ciénagas presentaron valores inferiores a 20.000 NMP/100mL (Figura 35 1-a y 1-b)

En general se presentaron altas concentraciones de coliformes totales en ambas épocas, con alta variabilidad entre los sitios. Para el caso del río Atrato se encontró en promedio para la época seca 181.334 (NMP/100ml) con una variación del 451,7%. El valor más alto se reportó en el Medio Atrato (5.475.000 NMP/100ml). En época de lluvias disminuye la concentración de coliformes totales, para un promedio de 52.195 NMP/100ml, donde los mayores valores se repostaron en el Medio Atrato (298.100 NMP/100ml) y Río Penderisco (198.630 NMP/100ml) (Figura 35, 2-a y 2-b).

- **Coliformes fecales (*E. coli*)**

El organismo indicador que se utiliza más frecuentemente para la contaminación fecal es normalmente el no patógeno *Escherichia coli*. Su presencia es una medida indirecta de presencia de organismos patógenos; por tanto, estos análisis tienen un factor de seguridad intrínseco para detectar la contaminación fecal potencialmente peligrosa. A pesar que el origen de su significado proviene de la bacteria principal *Escherichia Coli*, no todos los coliformes son de origen fecal. Con el fin de emplearlos correctamente como indicadores de contaminación se clasifican en coliformes totales, que comprenden la totalidad del grupo, y los coliformes fecales forman parte del grupo de origen fecal de donde proviene la mayor especie en el grupo llamada *Escherichia Coli* (Galvin 2003).

La presencia *E. coli* en todos los sitios indica contaminación reciente de procedencia humana (generalmente aguas residuales). Para todos los sitios evaluados en las ciénagas se registró una concentración variable de coliformes fecales (promedio: 169,51 NMP/100mL, CV= 142,9%) en época seca, donde la ciénaga Marriaga presentó el mayor valor (1.187 NMP/100ml), mientras que las demás ciénagas presentaron valores inferiores a los 600 NMP/100ml (ver Figura 36 1-a).

En contraste, los valores determinados para el Río Atrato y sus afluentes las concentraciones de *E. coli* son considerablemente mayores, presentando valores promedio de 9.260,2 NMP/100ml (CV = 407,8%) en época seca y 2.923,5 NMP/100ml (CV = 215,8%) en época de lluvias. Se determinaron diferencias estadísticamente significativas tanto en época como entre los sitios (valor $p < 0,001$). Los mayores valores son registrados por el Medio Atrato en época seca y por el Río Penderisco en época de lluvias (246.000 y 36.540 NMP/100ml, respectivamente) (ver Figura 36, 2-a y 2-b).

La Figura 33 y la Figura 34 muestran los límites objetivo de calidad para *E. coli*, donde se señala que esta variable debe ser inferior a 2000 NMP/100ml. Para ambas épocas claramente este límite fue superado en los ríos Curvaradó, Penderisco y Atrato Medio.

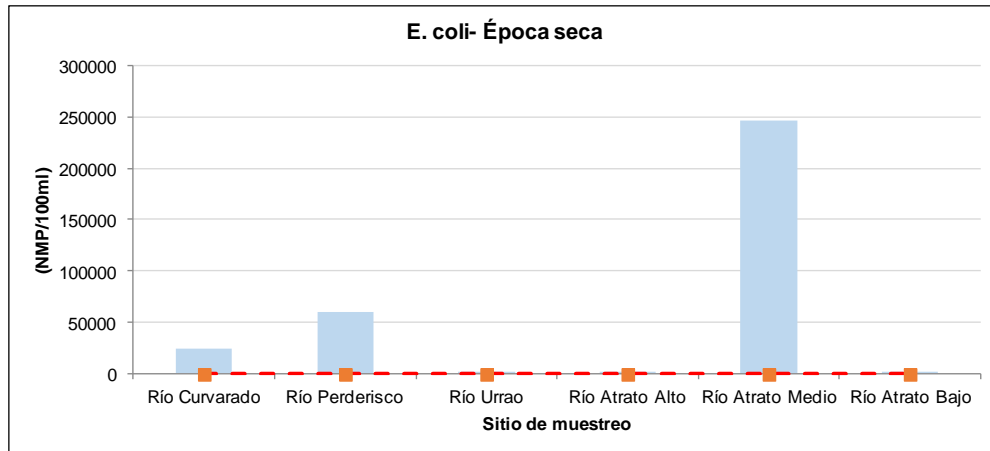


Figura 33. *E. coli* en la cuenca del Río Atrato en época seca. La línea punteada señala la concentración máxima (2000 NMP/100ml) exigida para estos sistemas.

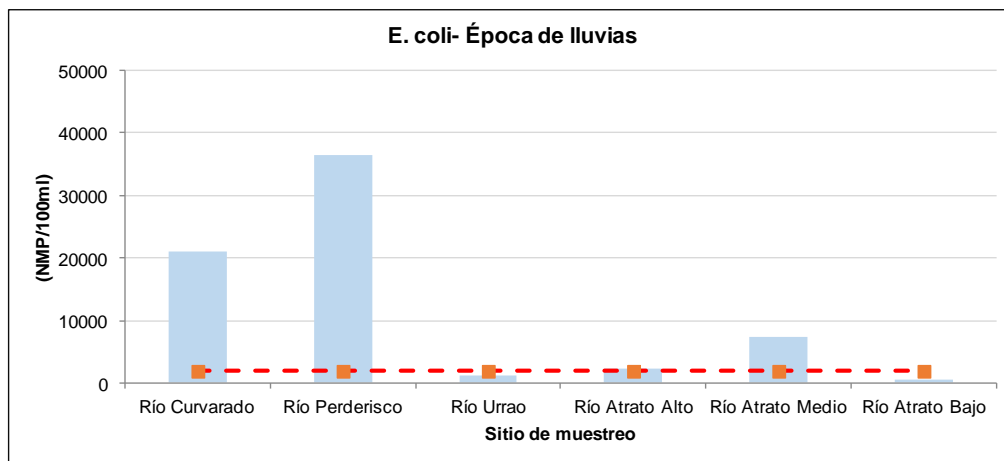
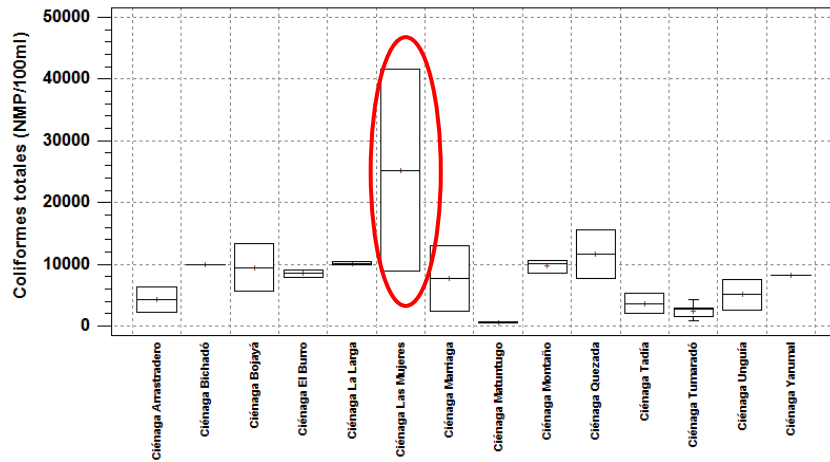
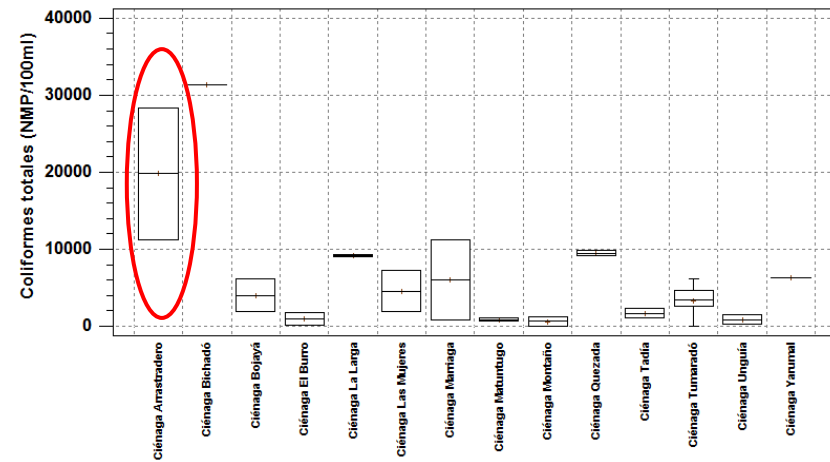


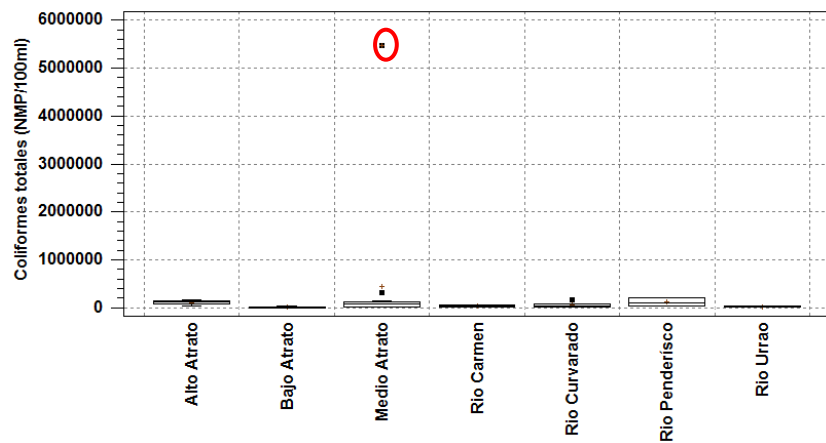
Figura 34. *E. coli* en la cuenca del Río Atrato en época de lluvias. La línea punteada señala la concentración máxima (2000 NMP/100ml) exigida para estos sistemas.



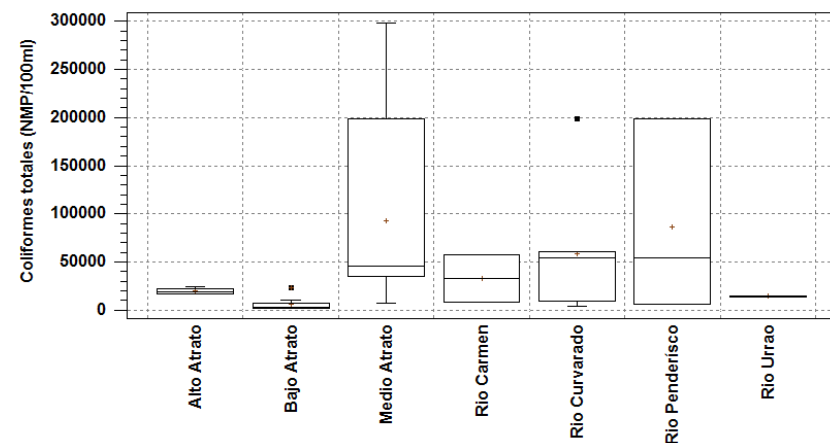
1-a



1-b

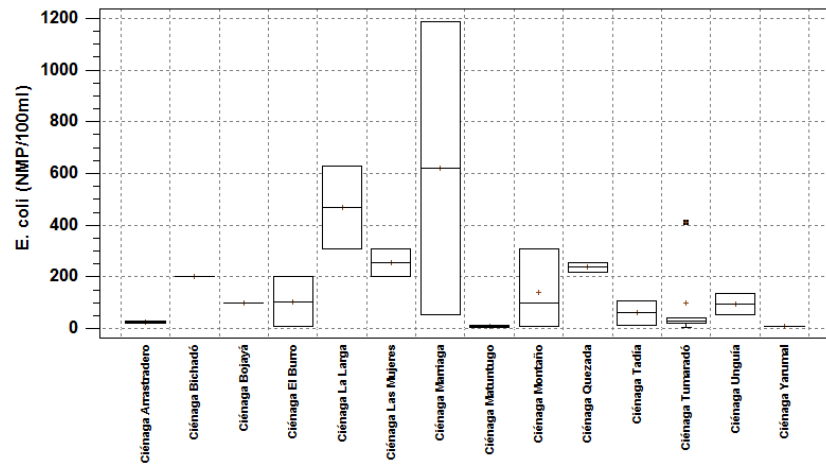


2-a

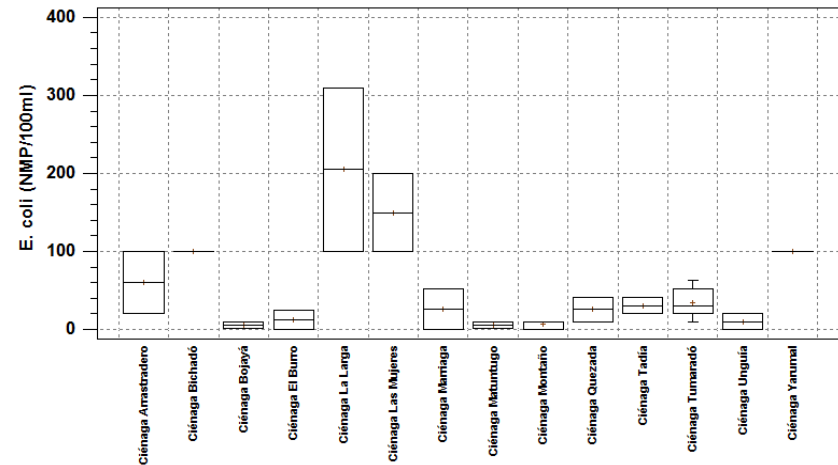


2-b

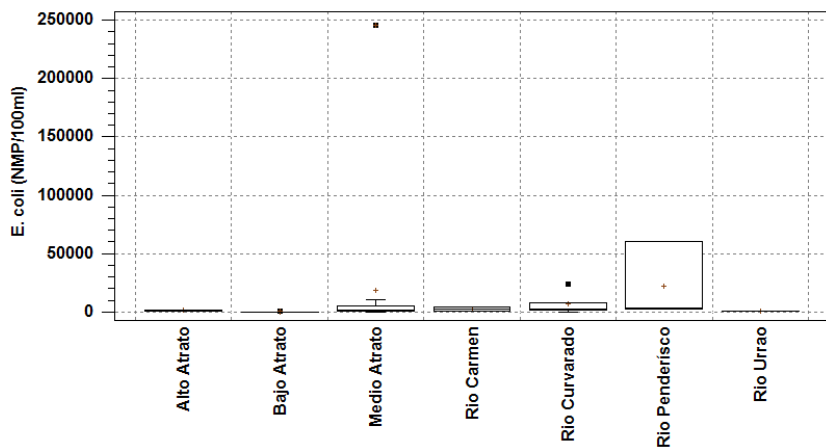
Figura 35. Coliformes totales en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.



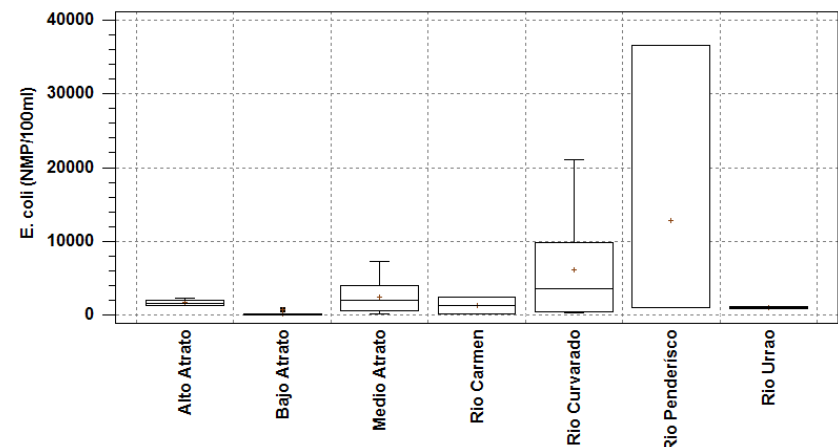
1-a



1-b



2-a



2-b

Figura 36. *E. coli* en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- ***Demanda química de oxígeno (DQO)***

La demanda química de oxígeno (DQO) se define como la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica bajo condiciones específicas del agente oxidante, temperatura y tiempo; el cual permite determinar las condiciones de biodegradabilidad y el contenido de sustancias tóxicas, así como la eficiencia de las unidades de tratamiento (Faña, 2002). La determinación de la DQO permite además calcular las descargas de los efectos de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Figura 37 muestra la variación espacio temporal de las concentraciones de DQO en ciénagas, río Atrato y afluentes. La DQO presentó diferencias estadísticamente significativas con respecto a los sitios, pero no a la época para las ciénagas (Figura 22 1-a y 1-b), con valores p iguales 0,017 y 0,663, respectivamente. En promedio para época seca se presentó una DQO de 31,6 mg O₂/L (CV = 47,7%) y en época de lluvias de 32,66 mg O₂/L (CV = 49,7%). Los mayores valores en época seca fueron registrados en las ciénagas La Larga (68 mg O₂/L), Yarumal (65 mg O₂/L), Las Mujeres y el Burro (64 mg O₂/L, respectivamente), mientras que en época de lluvias se presentaron nuevamente en las ciénagas La Larga (78 mg O₂/L) y El Burro (53 mg O₂/L), además de Bojayá (70 mg O₂/L) y Montaña (51 mg O₂/L). Para el río Atrato y sus afluentes (Figura 37 2-a y 2-b) se identificaron valores atípicos en el Bajo Atrato, el cual en ambas épocas presentó los mayores valores (594 mg O₂/L y 67 mg O₂/L para época seca y época de lluvias respectivamente). En promedio se registraron valores de 41,90 mg O₂/L en época seca (CV = 205,5%), mientras que para época de lluvias un promedio de 32,65 mg O₂/L (CV = 44,5%), lo cual indica una alta heterogeneidad de los sitios de muestreo en época seca. Para la época de lluvias el medio Atrato también reportó un alto valor en comparación con los demás sitios para ese periodo (67 mg O₂/L).

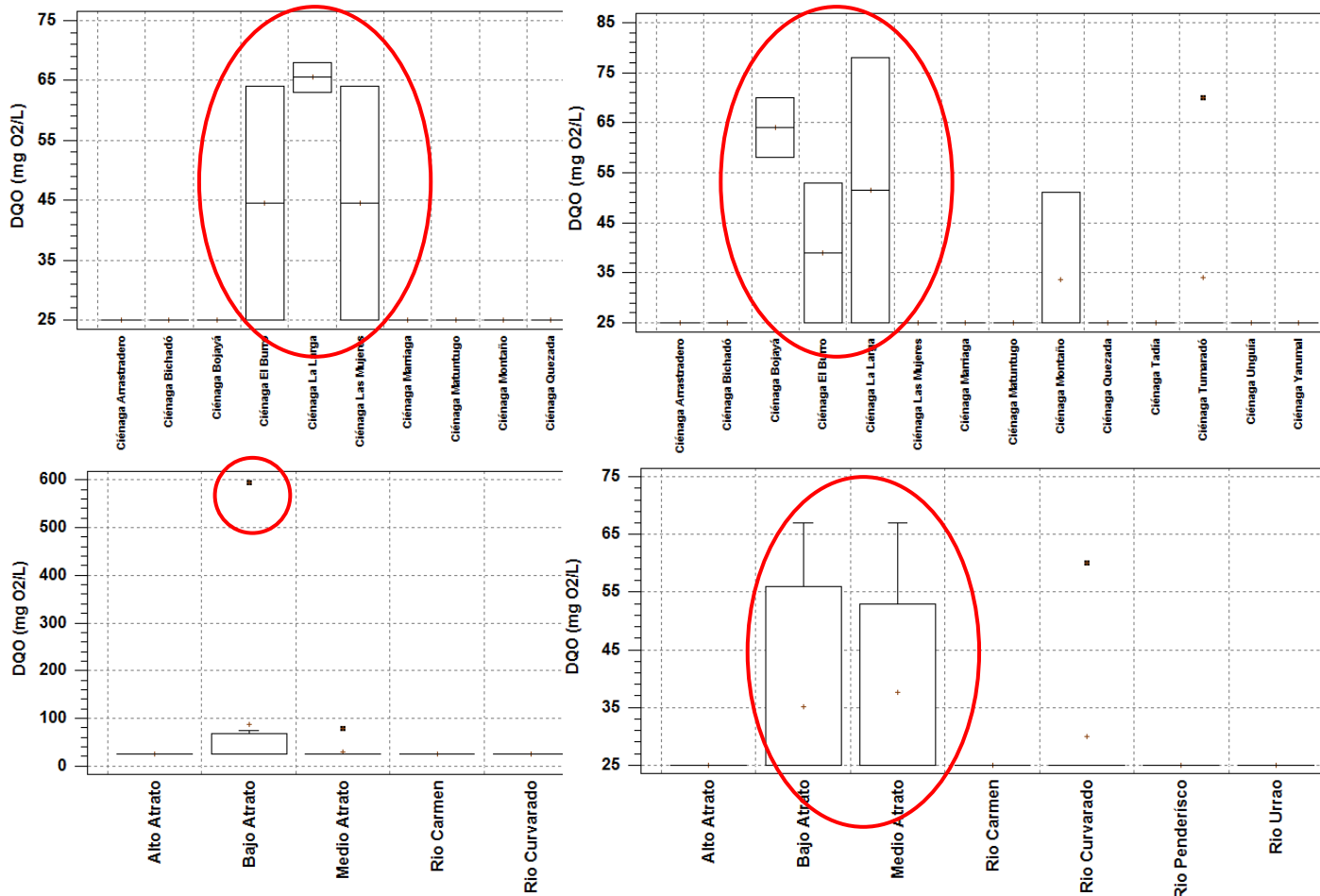


Figura 37. DQO en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- **Potencial de Hidrogeniones (pH)**

El pH expresa la intensidad de la condición ácida o básica de una solución. Expresa, además, la actividad del ion hidrógeno (H⁺) y se relaciona ampliamente con la acidez y la alcalinidad. Concentraciones excesivas de H⁺ afectan el agua en algunos de sus usos, sobre todo en el proceso de potabilización y por esta razón es una medida de polución en potencia. Los valores de pH en aguas naturales varían entre 6,0 y 9,0 unidades (Galvin 2003).

En general no los sitios analizados para el Río Atrato y sus afluentes no presentaron valores fuera de los límites establecidos (Figura 38 y Figura 39).

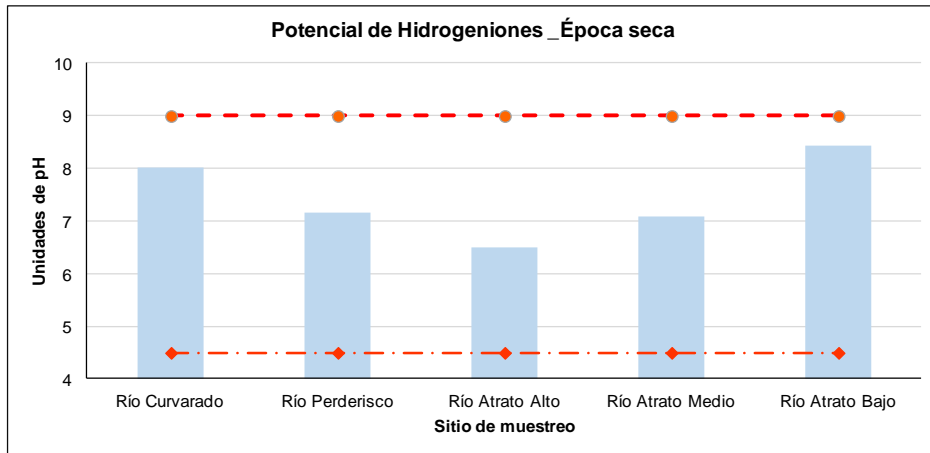


Figura 38. Potencial de Hidrogeniones (pH) en la cuenca del río Atrato, época seca. Las líneas indican valor máximo (9,0) y mínimo (4,5) de pH según los objetivos de calidad.

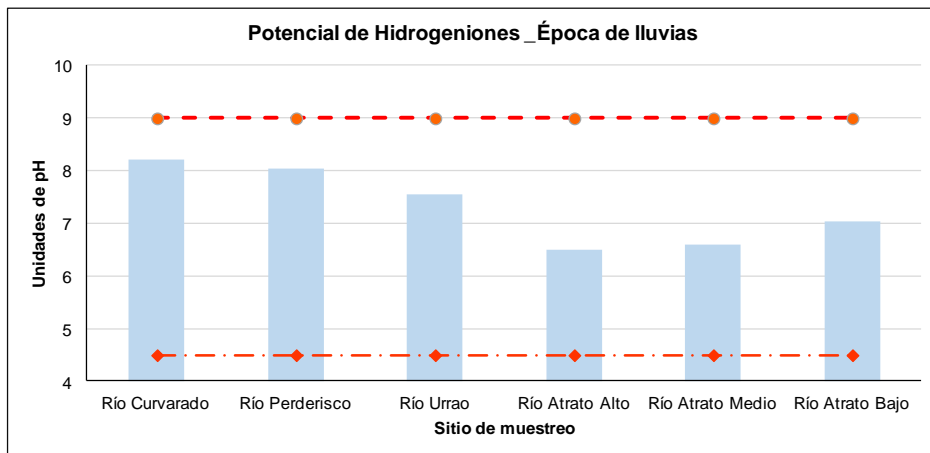


Figura 39. Potencial de Hidrogeniones (pH) en la cuenca del río Atrato, época de lluvias. Las líneas indican valor máximo (9,0) y mínimo (4,5) de pH según los objetivos de calidad.

Los valores de pH presentaron un valor promedio de 7,48 unidades, con poca variación (CV = 9,69%) para la época seca en los sitios comprendidos como ciénagas, mientras que en época de lluvias estos sitios mostraron en promedio 6,45 unidades y una variación del 12,3%, en general no se observaron cambios relevantes entre los sitios evaluados (Figura 40, 1-a y 1-b).

Los sitios evaluados en el río Atrato y sus afluentes mostraron un menor valor promedio para la época seca con respecto al registrado para las ciénagas (6,86 unidades), con una baja variabilidad entre los sitios (CV = 10,91), comportamiento que se replicó en época de lluvias, con un valor promedio de 6,64 unidades y una variación del 13,46% (Figura 40, 2-a y 2-b)

En general, la mejor condición ambiental en términos de pH es la neutralidad o valores ligeramente por encima de esa condición, este resultado indica que hubo buena calidad sanitaria del segmento fluvial evaluado.

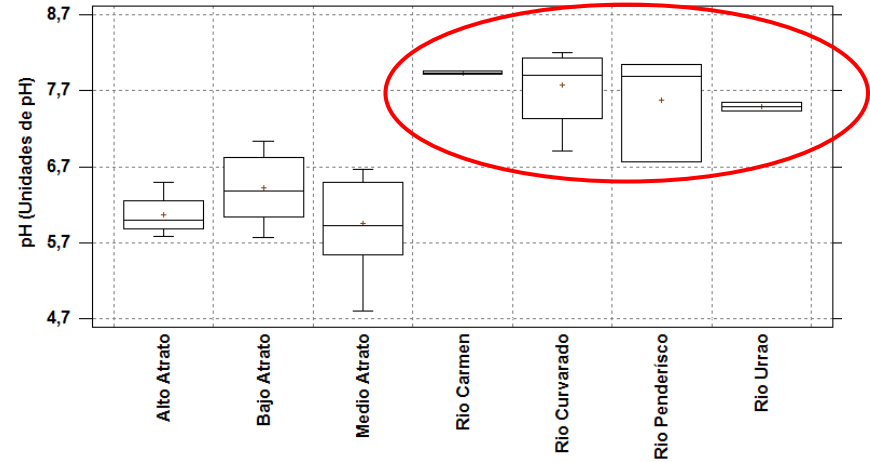
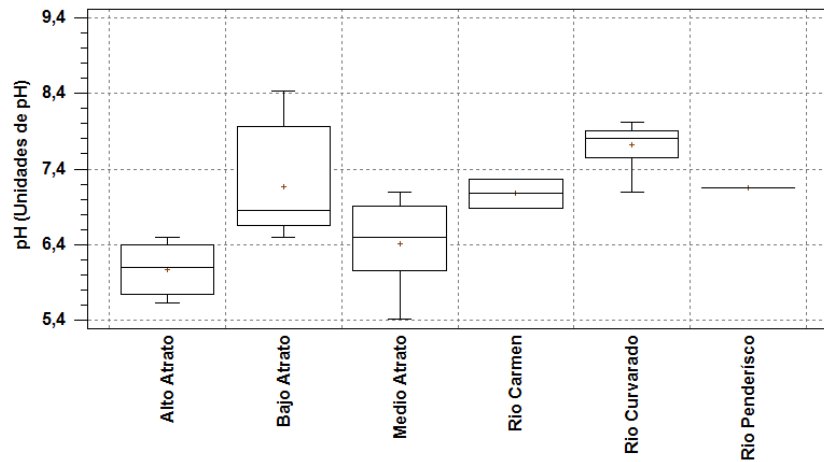
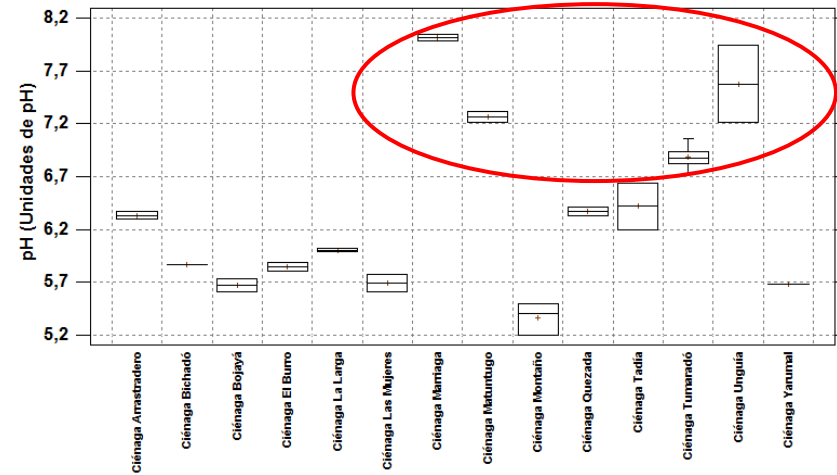
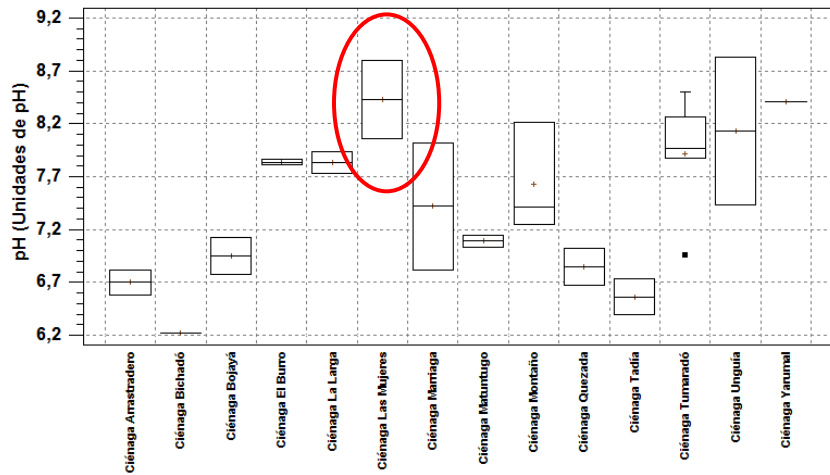


Figura 40. pH en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- **Dureza total y dureza cálcica**

El grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales de metales alcalinotérreos. el calcio y el magnesio son los cationes más abundantes en aguas dulces. La actividad química de estos dos elementos es similar, en particular, en la formación de sales de carbonato, y ambos pueden ser factores limitantes de los procesos biológicos en los ecosistemas acuáticos. De estos dos iones, el calcio es, por lo regular, el más abundante. En aguas que poseen menos de 50mg/L de sólidos disueltos, el calcio representa cerca del 48% de todos los cationes presentes. En aguas con valores superiores a 50 mg/L de sólidos disueltos, esta proporción puede aumentar hasta llegar aproximadamente al 53% para el calcio. El calcio en el agua es importante para el metabolismo y para la formación de huevos y dientes en los organismos acuáticos. El calcio, al igual que el magnesio, es otro de los elementos causantes de la dureza del agua

Tanto para las ciénagas como para el río Atrato y sus afluentes se presentaron diferencias estadísticamente significativas a nivel espacial y temporal. La concentración de dureza total en las ciénagas durante época seca presentó un valor promedio de 30,23 mg CaCO₃/L, con fuerte variación espacial (CV: 58,1%). La mayor concentración fue estimada en la ciénaga Matuntugo (100,53 mg CaCO₃/L), seguida de ciénaga Marriaga (43,21 mg Mg/L) y ciénaga La Larga (43,05 mg CaCO₃/L) (Figura 41 1-a). En época de lluvias (Figura 41 1-b) la Dureza total disminuyó, presentando un valor promedio de 22,89 mg CaCO₃/L, con fuerte variación espacial (CV: 49,0%). El mayor valor de dureza total se presentó en la ciénaga Marriaga (42,88 mg Mg/L), mientras que otras ciénagas como La Larga, Matuntugo, Tumaradó y Unguía presentaron valores entre 30 y 40 mg CaCO₃/L (Figura 41-b). En el caso del Río Atrato y sus afluentes (Figura 41, 2-a y 2-b) se presentaron valores atípicos en el Bajo Atrato en ambas épocas. El valor promedio en época seca fue de 100,81 mg CaCO₃/L (CV = 436,6%), mientras que en época de lluvias fue de 35,34 mg CaCO₃/L (CV = 172,9%).

Por otro lado, la concentración de dureza cálcica en las ciénagas durante época seca presentó un valor promedio de 18,16 mg CaCO₃/L, con fuerte variación espacial (CV: 41,5%). La mayor concentración fue estimada en las ciénagas Marriaga (32,74 mg CaCO₃/L), seguida de ciénaga Matuntugo (30,19 mg Mg/L) (Figura 421-a). En época de lluvias la dureza cálcica disminuyó, presentando un valor promedio de 13,97 mg CaCO₃/L, con fuerte variación espacial (CV: 56,7%). El mayor valor de dureza total se presentó en la ciénaga Tumaradó (28,48 mg CaCO₃/L), mientras que otras ciénagas como La Larga, Matuntugo, Tumaradó y Unguía presentaron valores inferiores a 25 mg CaCO₃/L (Figura 27 1-b). De igual forma que para la dureza total, la dureza cálcica, presentó para el río Atrato y sus afluentes valores atípico en el Bajo Atrato en ambas épocas. El valor promedio en época seca fue de 70,91 mg CaCO₃/L (CV = 359,4%), mientras que en época de lluvias fue de 17,86 mg CaCO₃/L (CV = 92,2%) (Figura 42, 2-a y 2-b).

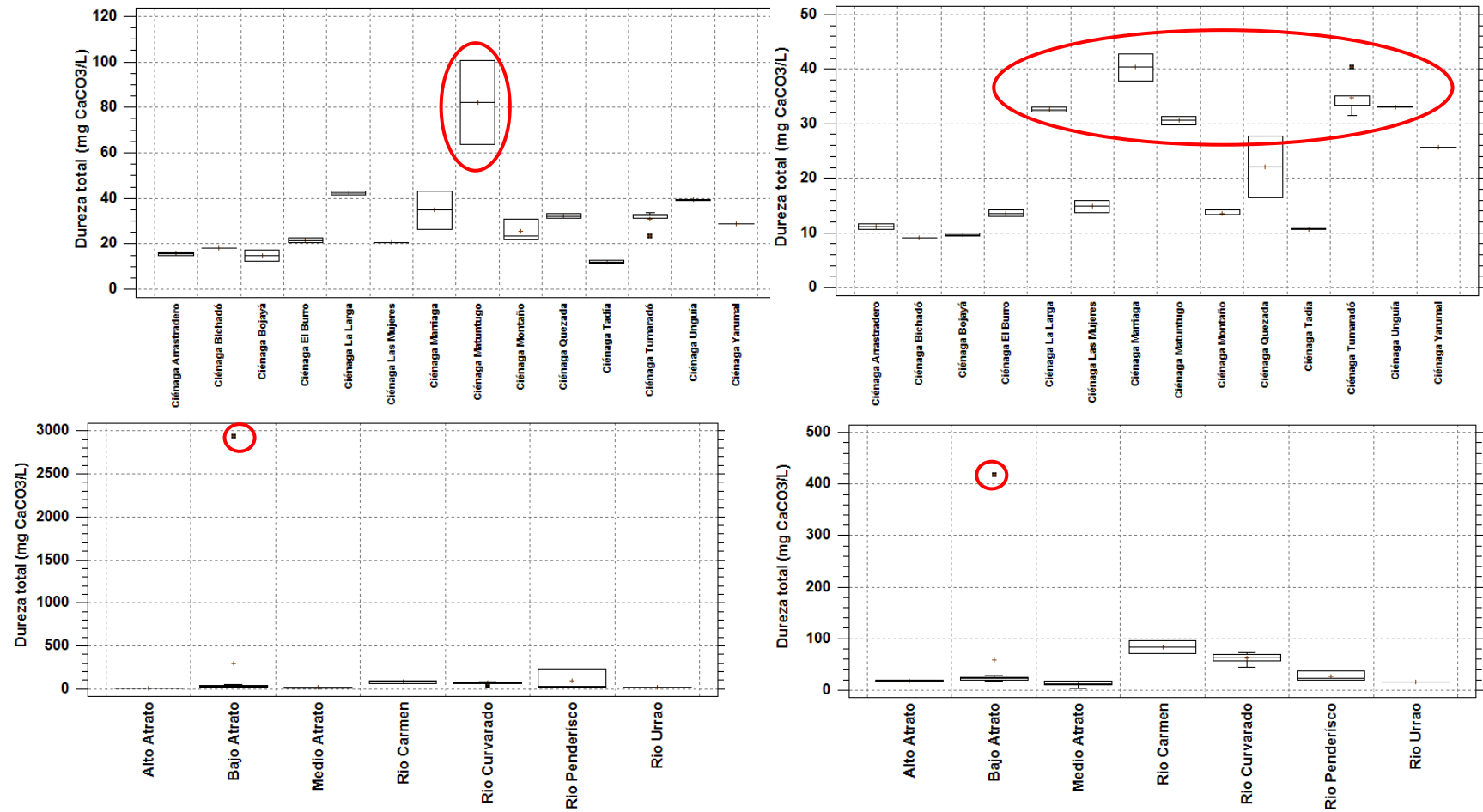


Figura 41. Dureza total en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

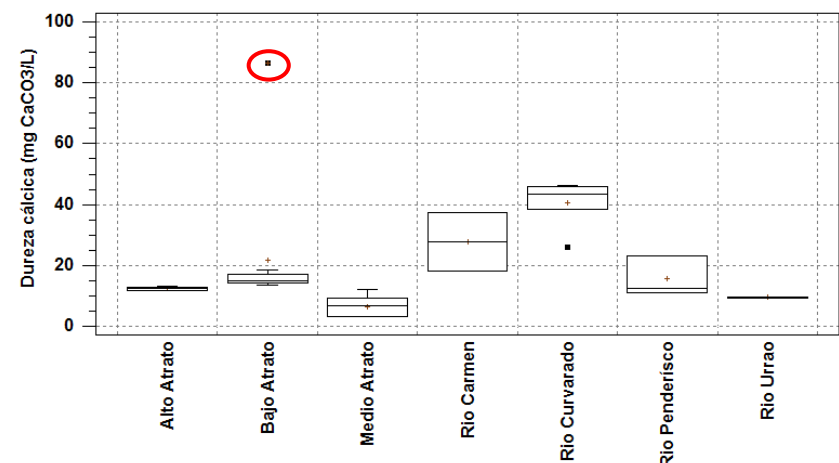
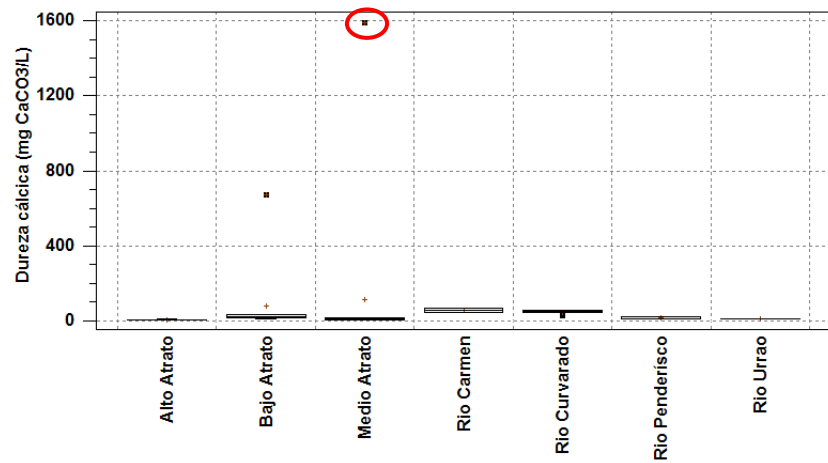
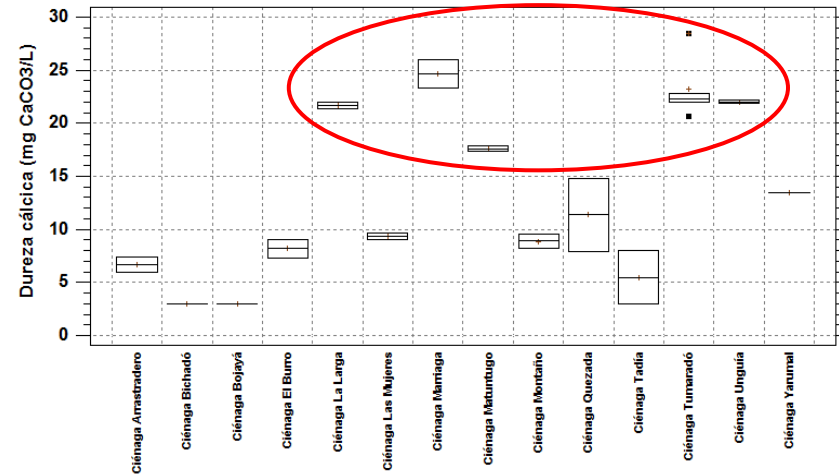
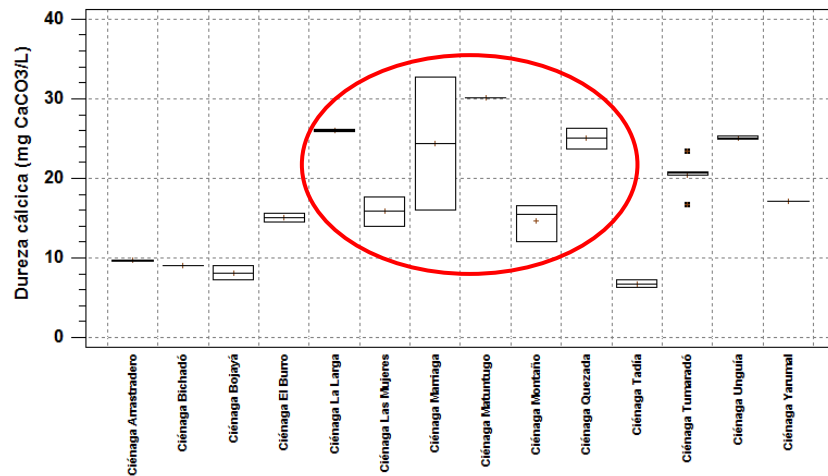


Figura 42. Dureza cálcica en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

- **Salinidad**

La salinidad, tanto para las ciénagas como para el río Atrato y sus afluentes presentaron diferencias estadísticamente significativas a nivel espacial y temporal. La concentración de salinidad en las ciénagas durante época seca presentó un valor promedio de 0,06 ppt, con fuerte variación espacial (CV: 112,2%). La mayor concentración fue estimada en la ciénaga Matuntugo (0,24 ppt), mientras que las demás ciénagas presentaron valores inferiores a 0,08 ppt (Figura 28 1-a). En época de lluvias la salinidad disminuyó, presentando un valor promedio de 0,03 mg CaCO₃/L, con fuerte variación espacial (CV: 64,9%), en este caso el mayor valor de salinidad se presentó en la ciénaga Matuntugo (0,08 ppt), mientras que las demás ciénagas presentaron valores inferiores a 0,06 ppt (Figura 43 1-b).

En el caso del Río Atrato y sus afluentes (Figura 43, 2-a y 2-b) se presentó un valor atípico en el Bajo Atrato para la época seca la cual afecta considerablemente el valor promedio de esta época, la cual fue de 0,62 ppt (CV = 478,8%), mientras que en época de lluvias disminuyó la variabilidad de la salinidad, con un valor promedio de 0,03 ppt (CV = 67,5%).

- **Metales pesados**

En la matriz agua no se detectaron metales pesados por encima de los límites de cuantificación del laboratorio de Corpourabá. Se resalta que el Límite de Cuantificación para el mercurio en dicho laboratorio es de 0,5 µg/L, mientras que la norma para agua potable de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007, es de 1 µg/L. Por lo tanto se puede afirmar que la presencia de mercurio en el agua para todas las estaciones está por debajo de la norma para agua potable.

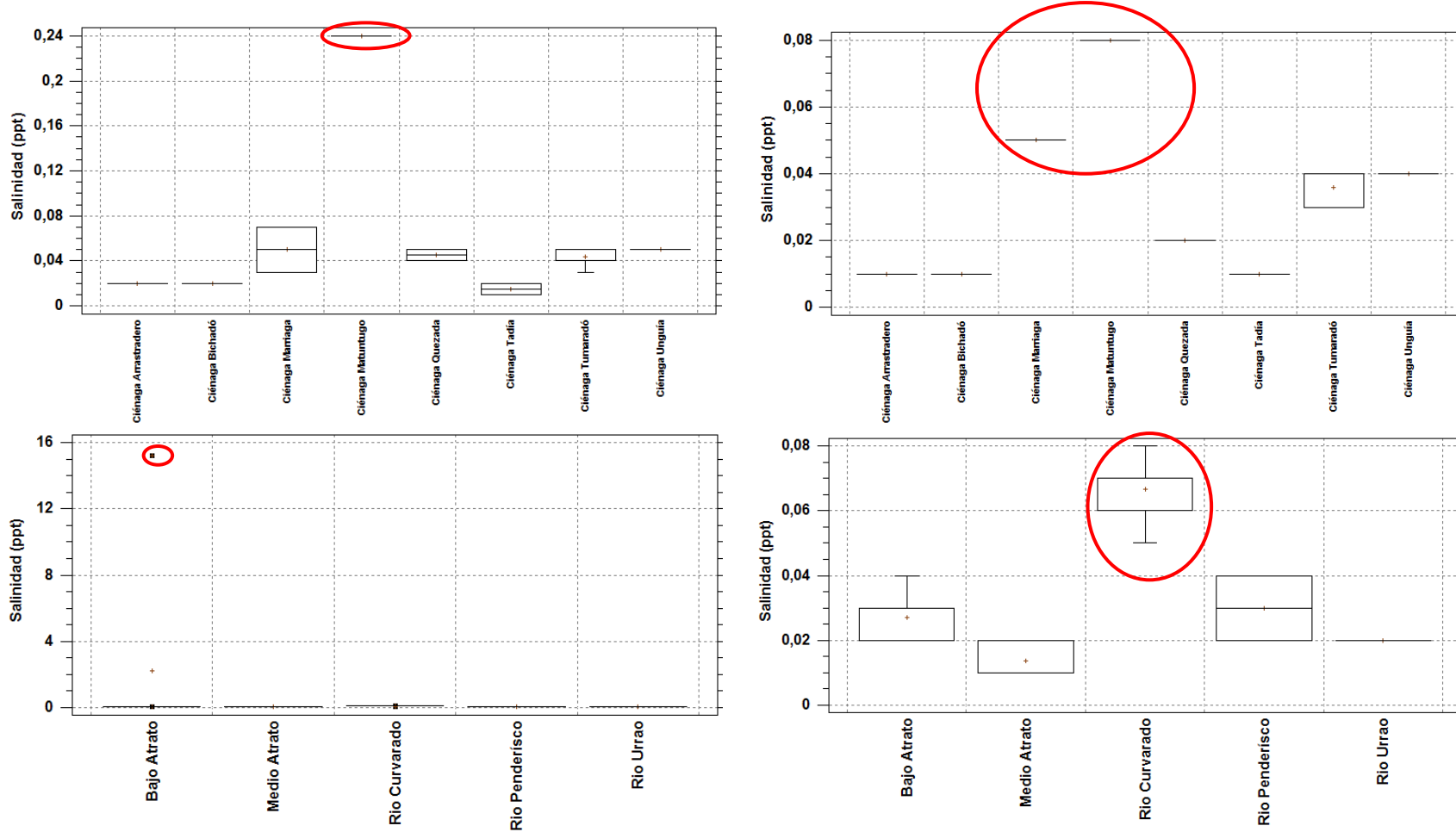


Figura 43. Salinidad en los sitios de muestreo. Ciénagas 1-a época seca y 1-b época de lluvias, y río Atrato y afluentes 2-a época seca y 2-b época de lluvias.

7.3.2 Correlación entre las variables analizadas en la matriz agua

En la Figura 44 se muestra el análisis de componente principales para la época seca, el cual explica en dos componentes el 57,3% de la variabilidad total de los datos. La dureza total y cálcica se relacionan de forma directa con la salinidad, la conductividad, sólidos totales, sólidos disueltos y DQO, a estas variables se relacionan altos valores de ella en el Bajo Atrato, lo que hace que este sitio se comporte de forma diferente frente a los demás sitios analizados. La relación entre la temperatura del agua y el COT es directa, pero estas se relacionan inversamente con las concentraciones de coliformes totales y E. Coli.

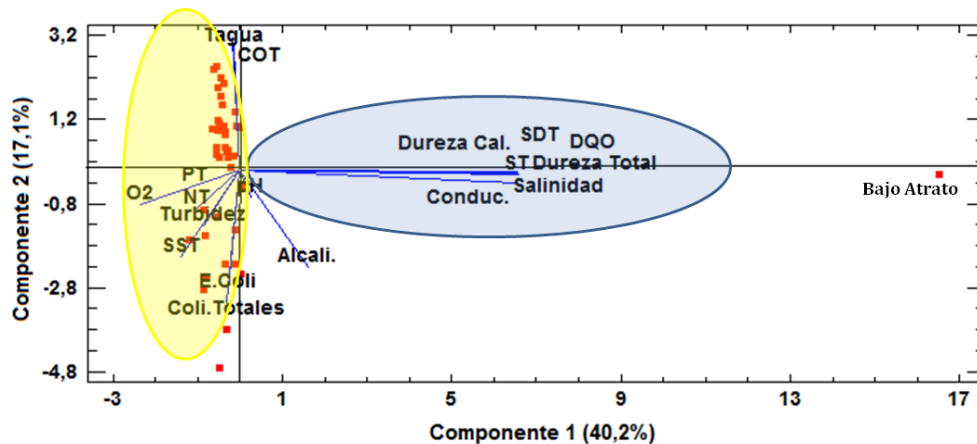


Figura 44. Análisis de componentes principales para la época seca en los sitios de muestreo.

En la Figura 45 se muestra el análisis de componente principales para la época de lluvias, el cual explica en dos componentes el 53,1% de la variabilidad total de los datos. Las relaciones entre las variables se mantienen y los sitios se asocian principalmente a bajos valores en las concentraciones de las variables.

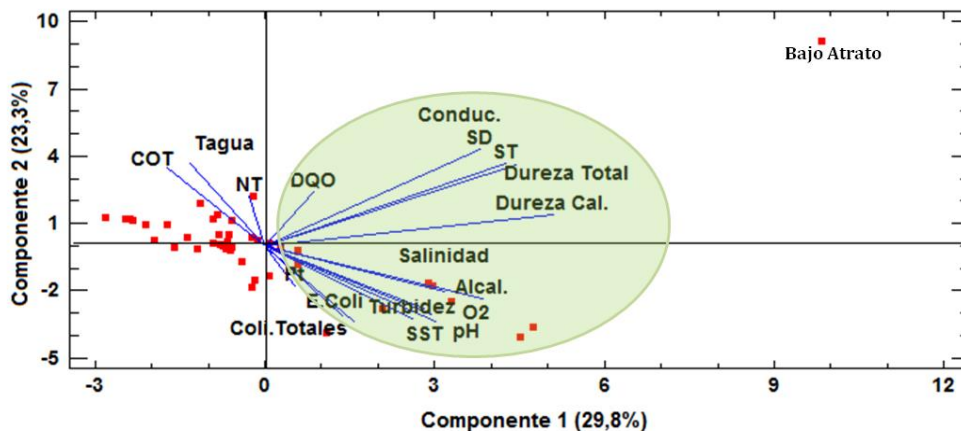


Figura 45. Análisis de componentes principales para la época de lluvias en los sitios de muestreo

7.3.3 Matriz sedimento

Las variables analizadas en la matriz sedimentos fueron aluminio (Al), arsénico (As), cadmio (Cd), calcio (Ca), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), materia orgánica (MO), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Los valores que se reportaron como inferiores al límite de cuantificación fueron censurados. Debido a que no se presentaron réplicas suficientes para establecer comparaciones entre los sitios de muestreo por épocas para cada una de las variables analizadas en la matriz sedimentos, se realizó un análisis descriptivo general de cada variable por época, y posteriormente se realizó un análisis de componentes principales con el objetivo de establecer las posibles relaciones entre las variables.

La Tabla 8 y la Tabla 9 muestran los estadísticos descriptivos para los metales y la materia orgánica. Se observa que en época seca las concentraciones de los metales en sedimento presentan una alta variabilidad, fundamentalmente en cadmio, manganeso, mercurio y plomo, además de la materia orgánica, superando un coeficiente de variación del 70%. Mientras que para la época de lluvias este comportamiento fue completamente distinto, ya que se establece homogeneidad en las concentraciones de todas las variables analizadas. De igual, en la Figura 46 se observa que los metales Al y Fe presentaron las mayores concentraciones, considerando su origen litológico y presencia dominante en la geología de la zona.

Según la Tabla 10, la guía de calidad para sedimentos (SQG), la cual establece los límites de las concentraciones de algunos metales que pueden tener algún efecto potencial sobre el ambiente, se tiene que para la época seca, el valor promedio del Cr (186,83 mg/kg) supera todos los niveles de posible efecto sobre el ambiente, incluyendo efectos adversos en el ámbito eco toxicológico hacia las comunidades bénticas, ya que supera el valor de ERM (145 mg/kg). Este mismo comportamiento lo exhibe el mercurio. El zinc no supera el nivel de efectos adversos para las comunidades bentónicas, pero si supera el nivel de umbral de efecto (TEL) y el efecto de rango bajo (ERL).

Para la época de lluvias, las concentraciones de metales en sedimentos disminuyeron considerablemente, originando que éstos no representaran posibles efectos en los ecosistemas, según la SQG.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos de las variables en sedimento lacustre durante época seca.

	Al	As	Cd	Ca	Cr	Fe	Mn	MO	Hg	Pb	Zn
Media	64373,40	17,65	0,18	5653,72	185,83	55647,00	787,14	206,76	0,21	332,19	209,48
Mediana	59162,00	15,54	0,15	6269,00	123,20	59850,00	732,00	137,80	0,18	6,39	139,00
DE	17711,90	5,83	0,20	3257,39	113,72	32185,90	564,37	190,40	0,11	1754,37	106,55
CV (%)	27,51	33,01	107,01	57,62	61,19	57,84	71,70	92,09	52,24	528,12	50,86
Mínimo	35834,00	8,56	0,03	797,00	21,10	21583,00	173,00	42,46	0,09	4,86	90,00
Máximo	115212,00	30,68	0,91	12727,00	383,10	139368,00	2402,00	795,31	0,44	9454,00	374,00

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de las variables en sedimento lacustre durante época de lluvia.

	Al	As	Cd	Ca	Cr	Fe	Mn	MO	Hg	Pb	Zn
Media	62070,70	15,05	9,57	6206,24	109,68	59113,40	889,82	85,30	0,17	6,24	111,90
Mediana	61452,50	14,89	0,20	5067,00	106,50	56172,50	747,00	63,62	0,14	5,00	110,00
DE	21835,70	5,28	54,67	5288,10	33,67	10968,80	414,46	75,43	0,11	4,46	38,64
CV (%)	0,35	0,35	5,71	0,85	0,31	0,19	0,47	88,42	0,61	0,71	0,35
Mínimo	15670,00	5,00	0,07	2967,00	33,00	34835,00	382,00	6,43	0,08	5,00	25,70
Máximo	115112,00	30,50	319,00	35114,00	181,00	80116,00	1879,00	338,26	0,51	25,53	259,00

Tabla 10. Guía de calidad de sedimentos para metales pesados

Metal (mg.kg ⁻¹)	Guía de Calidad de Sedimentos SQG)			
	TEL	PEL	ERL	ERM
Cr	52,3	90	80	145
Zn	124	315	120	270
Hg	0,174	0,486	0,15	1,3

Niveles del umbral de efecto (TEL- Threshold effect level), Efecto de rango bajo (ERL-Effect range low), nivel de probables efectos (PEL-probable effects level) y nivel de efectos adversos en el ámbito ecotoxicológico hacia las comunidades bénticas (ERM).

Fuente: CCME (2007).

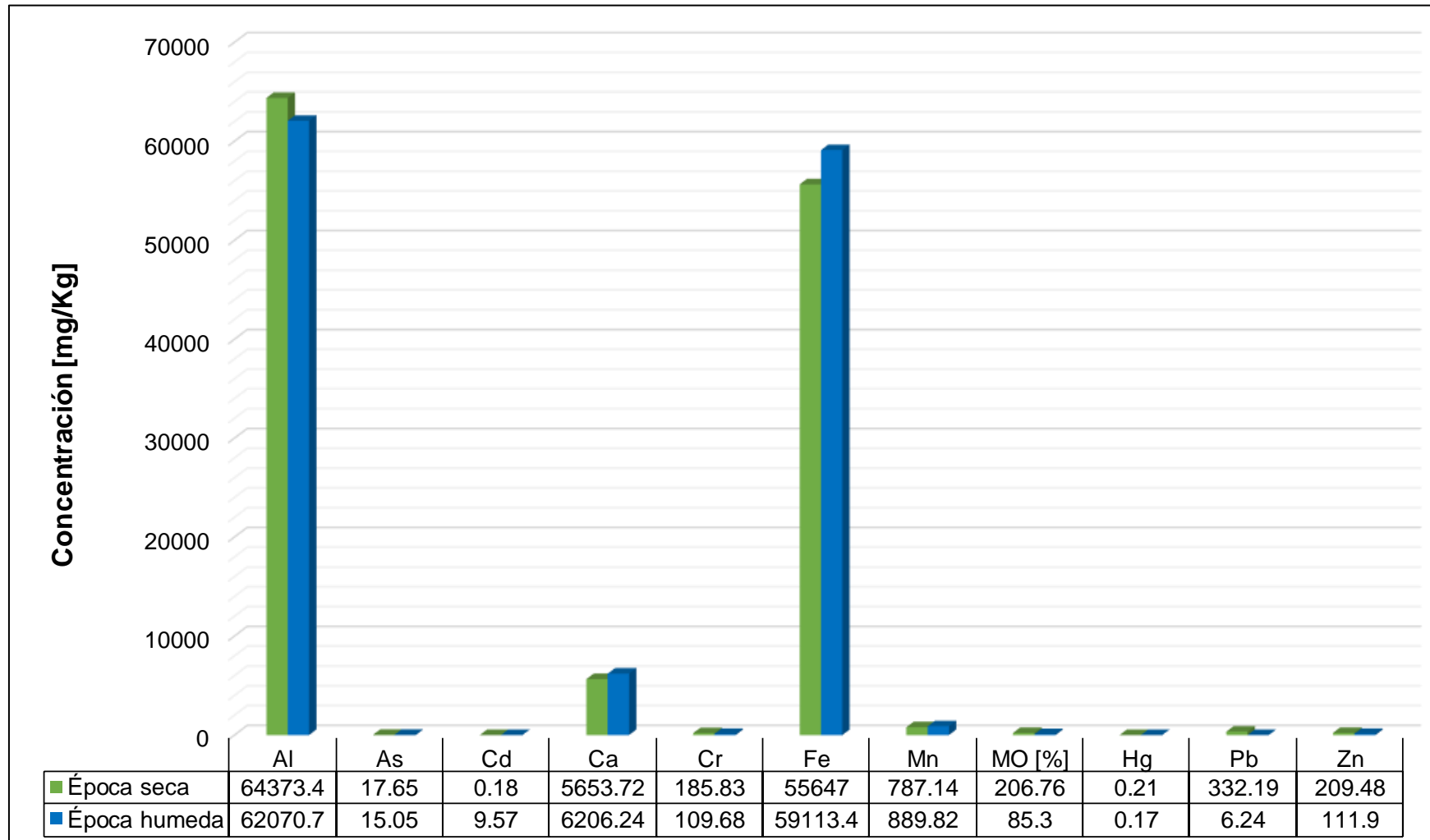


Figura 46. Concentraciones medias de los metales pesados objeto de estudio en los sedimentos de los sistemas lénticos en la cuenca del río Atrato

La Figura 47 muestra gráficamente las correlaciones establecidas en la Tabla 8. El análisis de componentes principales explica 70,6% de la variabilidad total a través de dos componentes, en él se refleja una asociación entre el mercurio, el cromo y el zinc, aunque no fueron estadísticamente significativas entre ellas.

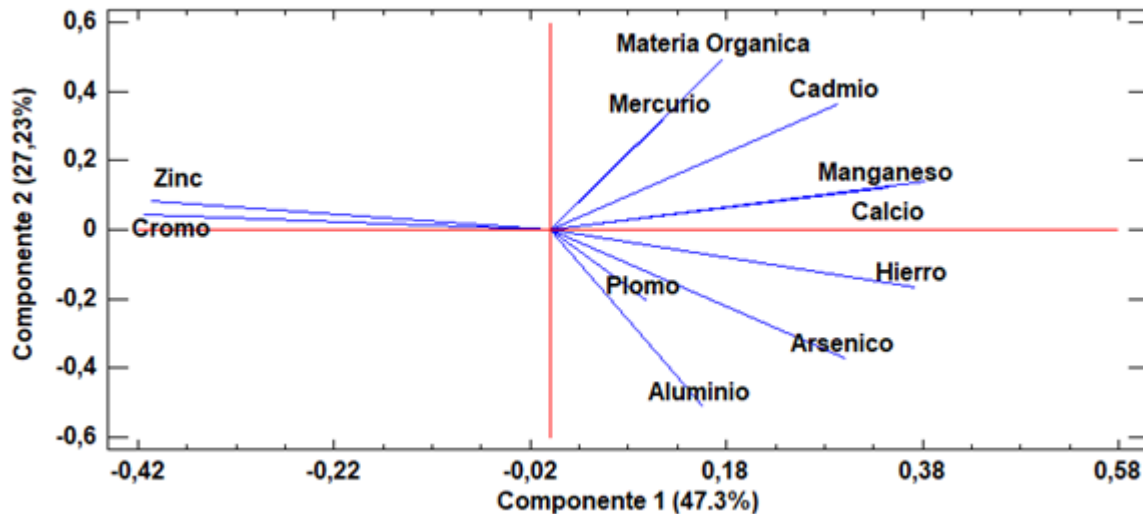


Figura 47. Componentes principales para variables en sedimentos en época seca.

Las variables que presentan una mayor importancia en el primer componente (ver Tabla 11) son el calcio, hierro y manganeso, quienes se ubican en el eje positivo y mantienen una relación inversa con el cromo, cinc y mercurio. Este comportamiento puede estar asociado a las condiciones de óxido-reducción de las ciénagas, indicando que a mayores concentraciones de hierro y manganeso, disminuyen las concentraciones de metales traza como el mercurio, cromo y cinc. El manganeso (Mn) al igual que el cromo (Cr) es un elemento litófilo que, bajo condiciones anóxicas, puede adsorberse sobre los sulfuros, ácidos volátiles o incorporarse dentro de los sulfuros en alto grado de piritización, pero generalmente no se asocia con la materia orgánica (Koretsky et al., 2006), como se puede observar en la Figura 47. En los sitios analizados se podría establecer que el cinc (Zn) tienen potencial de movilización y biodisponibilidad por la ocurrencia de cambios en las condiciones de oxido-reducción

Tabla 11. Pesos de las variables en el análisis de componentes principales

Variable	Componente 1	Componente 2
Aluminio (Al)	0,155907	-0,51482
Arsenico (As)	0,301464	-0,373593
Cadmio (Cd)	0,293753	0,365274
Calcio (Ca)	0,384124	0,139832
Cromo (Cr)	-0,415136	0,0458762
Hierro (Fe)	0,372031	-0,167568
Manganeso (Mn)	0,346363	0,122617

Variable	Componente 1	Componente 2
Materia Orgánica (C)	0,176530	0,494369
Mercurio (Hg)	0,117052	0,320399
Plomo (Pb)	0,0997696	-0,208526
Zinc (Zn)	-0,406744	0,0815705

En el segundo componente el mercurio (Hg), la materia orgánica (MO) y cadmio (Cd) presentan una correlación positiva, mientras que el plomo (Pb), aluminio (Al) y arsénico (As) presentaron relaciones inversas con la MO y Cd. Lo anterior podría indicar que el aporte de estos elementos a los sedimentos es producto de las descargas orgánicas a los sistemas y no de las condiciones litológicas como fue el caso del primer componente.

Los análisis de correlación mostraron que las concentraciones totales de los metales As, Cd, Ca, Mn, Hg, Pb y Fe están directamente relacionadas con la materia orgánica, mientras que el Al y Zn presentan una correlación inversa.

Tabla 12. Correlación de Spearman para metales y materia orgánica en sedimentos lacustres para la época seca.

	Arsénico	Cadmio	Calcio	Cromo	Hierro	Manganeso	MO	Mercurio	Plomo	Zinc
Aluminio	0,7803	0,1499	0,0931	-0,2394	0,4547	0,1914	-0,1005	-0,2264	0,1320	-0,3263
	0	0,4276	0,6223	0,2052	0,0161	0,3112	0,5948	0,2310	0,4848	0,0842
Arsénico		0,4646	0,4887	-0,5759	0,7133	0,4986	0,1596	-0,1380	0,2379	-0,5662
		0,0139	0,0097	0,0023	0,0002	0,0083	0,3983	0,4653	0,208	0,0027
Cadmio			0,807	-0,7217	0,782	0,8068	0,4985	0,2048	0,2338	-0,605
			0	0,0001	0	0	0,0083	0,2785	0,216	0,0014
Calcio				-0,7995	0,7034	0,7942	0,457	0,0126	0,0719	-0,7806
				0	0,0002	0	0,0156	0,9469	0,7035	0
Cromo					-0,6404	-0,7425	-0,3062	-0,0496	0,1074	0,8588
					0,0007	0,0001	0,1052	0,7929	0,5699	0
Hierro						0,8422	0,4496	0,1397	0,3828	-0,598
						0	0,0174	0,4597	0,0428	0,0016
Manganeso							0,5726	0,1578	0,2316	-0,6684
							0,0024	0,4038	0,2205	0,0004
MO								0,4132	0,5097	-0,1972
								0,0288	0,007	0,2967
Mercurio									0,4690	0,1966
									0,0131	0,2983
Plomo										0,0610
										0,7468

Por otra parte, la Figura 48 muestra una configuración diferente de la asociación de las variables, donde el hierro y manganeso se asocian fuertemente con la materia orgánica, mientras que el cromo, mercurio, zinc, calcio y plomo se relacionan en el primer componente de forma directa.

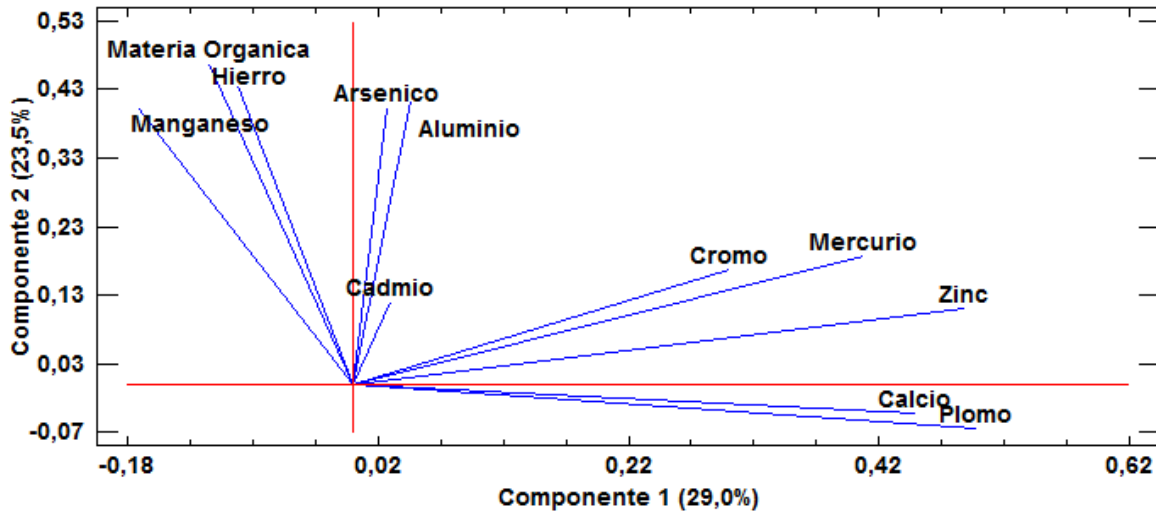


Figura 48. Componentes principales para variables en sedimentos en época de lluvias.

El análisis de componentes principales para la época de lluvias explicó un 52,5% de la variabilidad total del conjunto de datos. Las variables más significativas para el primer eje fueron el Pb, Zn, Ca, Hg y Cr, mientras que para el segundo eje las variables más representativas fueron las concentraciones de Al, As, Fe, Mn y MO. Este comportamiento es completamente diferente al establecido por este conjunto de variables en época seca, lo cual determina que los aportes de metales cambian de procedencia, litológica o asociada a la materia orgánica, dependiendo de la época hidrológica (Tabla 6).

Tabla 6. Pesos de las variables en el análisis de componentes principales

	Componente 1	Componente 2
Aluminio (Al)	0,0459789	0,412442
Arsénico (As)	0,0274666	0,403588
Cadmio (Cd)	0,030213	0,120353
Calcio (Ca)	0,449503	-0,0420963
Cromo (Cr)	0,300354	0,16736
Hierro (Fe)	-0,0915121	0,43487
Manganeso (Mn)	-0,17169	0,40389
Materia Orgánica (MO)	-0,114251	0,468544
Mercurio (Hg)	0,407422	0,186508
Plomo (Pb)	0,498204	-0,0642481
Zinc (Zn)	0,488722	0,109802

La Tabla 13 muestra que la máxima correlación del aluminio se presenta con el arsénico y es de carácter directo y estadísticamente significativo (valor $p < 0,001$). El arsénico presenta numerosas correlaciones estadísticamente significativas y fuertes con otros metales: de forma directa con el cadmio, calcio, hierro y manganeso, mientras que de forma inversa con el cromo y el zinc.

La materia orgánica por su parte, muestra correlaciones significativas con el cadmio, calcio, hierro y manganeso ($r = 0,50$, $r = 0,46$, $r = 0,45$ y $r = 0,57$, respectivamente).

Para la época de lluvias, se reflejan pocas correlaciones estadísticamente significativas y en general bajas. Las mayores correlaciones se presentan entre los metales zinc, plomo, mercurio, calcio y cromo, mientras que el arsénico se relaciona fundamentalmente con el aluminio y arsénico.

Tabla 13. Correlación de Spearman para metales y materia orgánica en sedimentos lacustres para la época seca.

	Aluminio	Arsénico	Cadmio	Calcio	Cromo	Hierro	Manganeso	MO	Mercurio	Plomo
Arsenico	0,9086									
	0									
Cadmio	0,2619	0,265								
	0,1324	0,1279								
Calcio	-0,3329	-0,3366	0,1917							
	0,0558	0,0532	0,2709							
Cromo	0,21	0,2198	0,5312	-0,1284						
	0,2277	0,2068	0,0023	0,4607						
Hierro	0,2419	0,2504	0,3419	0,1187	0,3353					
	0,1647	0,1503	0,0496	0,4953	0,0541					
Manganeso	0,1722	0,2361	0,2561	0,318	0,0161	0,6684				
	0,3226	0,1751	0,1412	0,0678	0,9264	0,0001				
MO	0,4512	0,4631	0,3396	-0,0836	0,0528	0,3934	0,5468			
	0,0095	0,0078	0,0511	0,6312	0,7616	0,0238	0,0017			
Mercurio	0,3515	0,4149	0,6217	0,0311	0,521	0,2345	0,174	0,1061		
	0,0435	0,0171	0,0004	0,8581	0,0028	0,1779	0,3176	0,5423		
Plomo	0,0543	0,0531	0,3935	0,1518	0,4065	-0,2574	-0,2884	-0,1667	0,4202	
	0,7549	0,7604	0,0238	0,3831	0,0195	0,1393	0,0975	0,3382	0,0158	
Zinc	0,1262	0,089	0,7975	0,1758	0,7596	0,3969	0,2248	0,1836	0,6065	0,4475
	0,4683	0,6094	0	0,3127	0	0,0226	0,1965	0,2917	0,0005	0,0101

7.4 EVALUACIÓN CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

De acuerdo con los valores de EF calculados para cada uno de los metales objeto de estudio (ver Tabla 14) se observa las concentraciones de Cd y Pb determinadas en los sedimentos superficiales se encuentra en niveles de bajos para ambas épocas de muestreo, asociados a un origen litológico. Adicionalmente, los sistemas lénticos ubicados en el Atrato Bajo, Matuntugo, Marriaga, Unguía y Tumaradó, presentan valores bajo de Cr y Zn, indicando que estos metales presentes en los sedimentos superficiales evidencian un enriquecimiento pobre.

Para los sistemas lénticos del Atrato Medio, Arrastradero, Quezada, Buchadó, Montaña, El Burro, Las Mujeres, Yarumal y La Larga, las concentraciones de Cr y Zn determinadas en los sedimentos superficiales recolectados en época seca evidencian un alto enriquecimiento, indicando un origen antropogénico.

Con respecto al Hg, las ciénagas de Tumaradó, Bojayá y Las Mujeres evidenciaron un enriquecimiento para la época seca, mientras que en Matuntugo y Quezada fue en época húmeda. Las concentraciones de Hg para ciénaga de Montaña presentaron un enriquecimiento alto.

Tabla 14. Factores de enriquecimiento para Cd, Cr, Hg, Pb y Zn en los sedimentos lacustres recolectados en las épocas de muestreo seca y húmeda.

METAL	Cd		Cr		Pb		Zn		Hg	
	<i>E. Seca</i>	<i>E. Húmeda</i>	<i>E. Seca</i>	<i>E. Húmeda</i>	<i>E. Seca</i>	<i>E. Húmeda</i>	<i>E. Seca</i>	<i>E. Húmeda</i>	<i>E. Seca</i>	<i>E. Húmeda</i>
SISTEMA										
MATUNTUGO	0.1	0.4	0.3	0.4	0.1	0.2	0.4	0.4	0.6	1.1
MARRIAGA	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.8	0.3
UNGUÍA	0.2	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	0.8	0.4
TUMARADÓ	0.5	0.4	0.5	0.2	0.2	0.2	0.9	0.3	1.0	0.4
TADÍA	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.5	0.3
ARRASTRADERO	0.2	0.3	10.0	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3
QUEZADA	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.4	1.1
BUCHADÓ	0.3	0.4	20.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.5	0.3	0.5
BOJAYÁ	0.3	0.4	12.1	0.3	0.3	0.2	2.5	0.4	1.0	0.3
MONTAÑO	0.2	0.2	12.0	0.3	0.3	0.2	2.6	0.4	2.0	0.5
EL BURRO	0.1	0.2	15.0	0.3	0.2	0.2	2.9	0.4	0.9	0.4
LAS MUJERES	0.0	0.5	11.6	0.2	0.3	0.2	3.0	0.4	1.3	0.5
YARUMAL	0.3	0.4	14.7	0.3	0.2	0.2	2.7	0.4	0.8	0.4
LA LARGA	0.3	0.2	14.7	0.2	0.3	0.2	2.5	0.3	0.2	0.2

Los valores en naranja indican elementos enriquecidos. Los valores en rojo indican elementos muy enriquecidos.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En análisis de la información se basó en los datos levantados durante dos campañas de muestreo (una en época seca y una época de lluvias), por lo cual los resultados obtenidos son una aproximación al comportamiento de las variables en los sistemas acuáticos analizados dado que se requiere mayor robustez en la información y en el número de datos para establecer el comportamiento real y general de éstos.

La metodología empleada en el análisis de la información es adecuada dada la naturaleza de los datos, sin embargo, por el momento sólo se puede establecer un comportamiento descriptivo de cada una de las variables analizadas en las ciénagas, el río Atrato y sus afluentes, por lo cual se esperaría tener mayor información que permita un análisis más profundo de la dinámica de los sistemas.

Para evaluar las cargas de contaminantes es necesario considerar la información hidráulica y climatológica de las estaciones del IDEAM cercanas al área de interés.

8.1 MATRIZ AGUA

En general se pudieron evidenciar en la matriz agua diferencias estadísticamente significativas entre los sitios muestreados en las ciénagas y los sitios correspondientes al río Atrato y sus principales afluentes. Variables como la conductividad, turbidez, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos, Sólidos Totales, DQO, Dureza, nutrientes fósforo y nitrógeno, y coliformes totales y fecales fueron considerablemente mayores en el río Atrato y principales afluentes que en las ciénagas.

En los coliformes fecales, se superó el valor máximo permisible en los ríos Curvaradó, Penderisco y la zona del medio Atrato, mientras que el pH se mantuvo entre los límites permisibles establecidos por los Objetivos de Calidad.

En los Sólidos Suspendidos Totales se evidenciaron concentraciones que superaron los límites máximos permisibles para las dos épocas de muestreo, en la zona del medio Atrato. El oxígeno disuelto, el bajo Atrato presentó valores inferiores al límite mínimo permisible (4 mg/L).

En las dos campañas de campo realizadas no se detectaron metales pesados en agua, con lo cual se puede afirmar que para estas dos campañas de muestreo las concentraciones de mercurio, si se presenta este contaminante, están por debajo del límite de cuantificación del laboratorio que 0,5 µg/L.

8.2 SEDIMENTOS LACUSTRES

Las concentraciones de metales aumentan considerablemente, tanto en magnitud como en variabilidad en la época seca. En época de lluvias las concentraciones de metales en los

sedimentos presentan menor variabilidad en los sitios de muestreo, asociado posiblemente a las dinámicas de transporte y mezcla.

Las concentraciones de cromo y mercurio en los sedimentos lacustres sobrepasan los límites de calidad establecidos por la SQG, lo cual podría representar diferentes niveles de riesgo para los ecosistemas de los sitios analizados. Por otra parte, los valores de EF indican el grado de alteración e intervención de las actividades antropogénicas al ciclo natural de estos elementos. Cr, Zn y Hg evidencian un enriquecimiento alto, el cual puede estar asociado a las actividades de explotación y beneficio de minería, artesanal y de gran escala, en la cuenca del río Atrato.

De acuerdo con los análisis iniciales de metales pesados se recomienda centrar la atención en los sedimentos muestreados en las ciénagas, dado que los sedimentos reflejan la dinámica histórica de la calidad de los cuerpos de agua.

Se recomienda complementar la evaluación de la contaminación por Hg, realizando el análisis de Hg y Metil-Hg en peces y personas. De esta manera se identificará el grado de bio-acumulación del mercurio.

9 REFERENCIAS

- Ablanedo, N., González, H., Campos, I., & Torres, I. (1992). Evaluación de la contaminación de los sedimentos de la bahía de Cienfuegos, Cuba. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 5-12.
- Alcivar, M., & Mosquera, J. (2011). *CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS (Cr TOTAL, Pb, Cd) EN AGUA SUPERFICIAL Y EDIMENTOS EN EL ESTERO SALADO (GUAYAQUIL)*. Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- ANH. (2010). *Información Geologica y Geofisica de Chocó*.
- Bastami, K. D. (2014). Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 262-267.
- Benavides, S., Sanchez, P., & Mojica, F. (1958). *Exploración de algunos suelos del Chocó*. IGAC.
- Benitez, F. (2019). *Conoce los ríos*. Obtenido de Conozca el Río Atrato, un cauce muy importante de Colombia: <https://conocelosrios.com/c-colombia/rio-atrato/>.
- Bradl, H. (2005). *Heavy metals in the environment : [origin, interaction and remediation]* (Vol. VI). Elsevier Academic Press.
- Cabrera, M. (2010). *VARIACIÓN TEMPORAL DE METALES PESADOS (Ni, Cd, Pb, Cu y Zn) EN Anadara notabilis DE LA LOCALIDAD DE GUAYACÁN, PENÍNSULA DE ARAYA, ESTADO SUCRE, VENEZUELA*. Universidad de Oriente Núcleo Sucre, Departamento de Biología . Cumaná: Universidad de Oriente.
- Cano, A. (2017). Garantías constitucionales del río Atrato como sujeto de derecho en Colombia. Derechos y medios de protección. *Revista Vis Iuris*, 4(8), 99-111.
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo*. Caracas: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Castro, G. (2011). *Efectos del mercurio en los peces y la salud pública en Perú*. Universidad Nacional Mayor de San Carlos. Lima: Sistema de Revisiones en Investigación Veterinaria de San Marcos.
- CCME. (2007). *Canadian Environmental Quality Guidelines*.
- Cupul-Magaña, L. A., Mösso-Aranda, C., Sierra, J. P., Martí, E., Ferman-Almada, J. L., Rodilla, M., . . . Sánchez-Arcila, A. (2006). Caracterización y patrones de distribución de los sedimentos superficiales en Bahía Cullera, España. *Ciencias Marinas*, 617-629.

- Delgado, J., Nieto, J. M., & Boski, T. (2010). Analysis of the spatial variati on of heavy metals in the Guadiana Estuary sediments (SW Iberian Peninsula) based on GIS-mapping techniques. *Estuarine, Coastal and Shlef Science*, 71-83.
- Español Cano, S. (2012). Contaminación por mercurio por la actividad minera. *Biomédica Instituto Nacional de Salud*, 32(3), 309-311.
- Espinosa, C. L. (2014). *INCIDENCIA DE LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA Y DE METALES PESADOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD MARINO COSTERA DEL SITIO COSTA RICA*. Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Goosen, D. (1960). *Levantamiento general de los suelos de la región de Urabá*. Departamento de Antioquia y Chocó. IGAC.
- Jiménez, D. (2012). *CUANTIFICACIÓN DE METALES PESADOS (CADMIO, CROMO, NIQUEL Y PLOMO) EN AGUA SUPERFICIAL, SEDIMENTOS Y ORGANISMOS (Crassostrea columbiensis) OSTION DE MANGLE EN EL PUENTE PORTETE DEL ESTERO SALADO (GUAYAQUIL)*. Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Koretsky, C. M., Haas, J. R., Miller, D., & Ndenga, N. T. (2006). Seasonal variations in pore water and sediment geochemistry of littoral lake sediments (Asylum Lake, MI, USA). *Geochem. Transact.* doi:doi:10.1186/1467-4866-7-11
- Marrugo, J. L., & Paternina, R. (2011). *Evaluación de la contaminación por metales pesados en la ciénaga La Soledad y Bahía Cispatá, Cuenca del Bajo Sinú, departamento de Córdoba*. Proyecto de investigación, Universidad de Córdoba, Departamento de Química, Montería.
- Martinez, E. F. (2014). *Estudio de suelos de la cuenca del río Atrato*. Informe de Pasantía, INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM, Bogotá.
- Martorell, J. (2010). *BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN DOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS DE LA COSTA SURATLÁNTICA ANDALUZA AFECTADOS POR CONTAMINACIÓN DIFUSA*. Universidad de Cádiz, Departamento de Química Analítica. Cádiz: Universidad de Cádiz.
- Mongabay Latam. (10 de Noviembre de 2019). *Periodismo ambiental independiente*. Obtenido de Río tóxico: minería, mercurio y asesinatos continúan afectando al río Atrato en Colombia | VIDEO: <https://es.mongabay.com/2019/11/colombia-contaminacion-en-el-rio-atrato/>
- Moore, F., Forghani, G., & Qishlaqi, A. (2009). Assesment of heavy metal contamination in water and surface sedimentsof the Maharlu saline lake, SW Iran. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A*, 33.
- Ordoñez, C. G. (2013). *Caracterización geoquímica de sedimentos de la laguna Limoncocha*. Tesis de maestría, Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Ambientales, Quito.

- Oyarzun, R., & Higuera, P. (2009). *Universidad Nacional del Nordeste*. Recuperado el 7 de Abril de 2015, de Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura:
http://exa.unne.edu.ar/investigacion/labquiam/public_html/Descargas/Metales%20Pesados.pdf
- Pinzón, L. F., Ospina, A., & Chávez, A. (2009). Interacción de los metales pesados entre el sedimento y la columna de agua en el caso del río Bogotá. *Revista Gestión Integral en Ingeniería Neogranadina*, 1(1).
- Planas, M. (2010). *Estudio sobre metales pesados en sedimentos en la cuenca del Jequetepeque, Perú*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rojas, C. (2011). *Estudios de la contaminación de los recursos hídricos en la cuenca del Río San Pedro, previos a la construcción de una hidroeléctrica (P.H. Las Cruces) en Nayarit, México*. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias División de Ciencias Biológicas y Ambientales. Jalisco: Universidad de Guadalajara.
- Rosas, H. (2005). Contaminación de sedimentos del río Anoia por metales pesados (Barcelona - España). *Investigación & Desarrollo*, 75-89.
- Téllez, J., Carvajal, R., & Gaitán, A. M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso de curtiembres. *Revista Facultad de Medicina Universidad Nacional de Colombia*, 50-61.
- USGS. (2019). *USGS. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*. Obtenido de USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Level-1 Data Products: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-enhanced-thematic-mapper-plus-etm?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects