

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO DEL RÍO CABÍ A TRAVÉS DE
LA FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN ASOCIADO A LA
ACTIVIDAD MINERA AURÍFERA**

IVAN RODRIGO RESTREPO VALENCIA

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES, CALDAS 2015

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO DEL RÍO CABÍ A TRAVÉS DE
LA FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN ASOCIADO A LA
ACTIVIDAD MINERA AURÍFERA**

IVAN RODRIGO RESTREPO VALENCIA

Trabajo de grado para optar al título de:

MAGÍSTER EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

**LUIS ALBERTO VARGAS
DIRECTOR DE PROYECTO**

Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES, CALDAS 2015**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Manizales Junio de 2015

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento principal es a Dios, por la Salud y Vida, a mi esposa Diana e hijos Iván y Lucas por su sacrificio de tiempo y espacio, a mis padres por su apoyo incondicional, a mi Institución la Corporación Autónoma para el Desarrollo Sostenible del Chocó, quien ha permitido que me desarrolle profesionalmente y que avance con gran parte de esta institución.

También un mérito especial a todas aquellas personas que en cada aspecto me han apoyado e impulsado en estos años de estudio.

RESUMEN

El presente trabajo guiará al lector en el análisis de la contaminación realizada por la actividad minera aluvial de oro y platino en el río Cabí, esto se realiza a través de la formulación de un índice de contaminación que permita evidenciar la afectación de esta actividad sobre la calidad del recurso hídrico; para la formulación del índice de contaminación se realizó un diagnóstico de la actividad minera, encontrando 17 unidades mineras (dragas y retroexcavadoras) ubicadas en el tramo principal del río Cabí, aguas arriba de la bocatoma del acueducto de Quibdó, después se evaluó la calidad y contaminación por sólidos suspendidos totales y por materia orgánica que se presenta en el recurso hídrico, a través de la aplicación del ICOMO e ICOSUS: Se encontró que la contaminación por materia orgánica es “Alta” en el tramo IV, sector cercano al casco urbano de Quibdó y “muy baja” contaminación asociada esta a los sólidos suspendidos totales, lo que evidencia que estas herramientas son insuficientes para determinar una afectación por contaminación minera.

A través de la información histórica de calidad del río Cabí y la aplicación del análisis de componentes principales (ACP), se seleccionaron 3 variables fisicoquímicas para evaluar la contaminación del recurso hídrico por la actividad minera, y a través de correlaciones se construyeron las tres (3) ecuaciones que permiten cuantificar y cualificar la contaminación, implementando un índice de contaminación específico nominado ICOMINERA, para evaluar la afectación de la actividad minera aurífera aluvial..

En la implementación del ICOMINERA existen tres estaciones de monitoreo de calidad de aguas, con contaminación alta y tres con contaminación media, siendo las más afectadas las estaciones de calidad ubicadas en las cercanías a la bocatoma del acueducto de Quibdó. Por esta razón se recomienda que el ICOMINERA sea utilizado como herramienta de planificación del recurso hídrico de consumo en la región, como es la regulación de uso, control de la actividad minera, reducción del riesgo sanitario, entre otros.

ABSTRAC

This paper will guide the reader in the analysis of pollution by alluvial mining of gold and platinum in the Cabi river, through the formulation of a pollution index that will uncover the involvement of this activity on the quality of water, finding 17 mining units (excavators and backhoes) located in the main section of the Cabi River, upstream of the intake of the aqueduct of Quibdó, then he evaluated Pollution quality and total suspended solids and organic matter, through the application of ICOMO and ICOSUS finding organic matter pollution "High" in the section IV associated proximity of the town and "very low pollution associated with the total suspended solids, which shows that these tools are insufficient to determine an affectation by mining pollution.

Through historical information CABI river quality and application of principal component analysis (PCA), 3 physicochemical variables were selected to assess the pollution of water resources by mining and through correlations were constructed three (3) equations to quantify and qualify the contamination by implementing a specific pollution index to assess the involvement of the alluvial gold mining ICOMINERA.

In implementing the ICOMINERA found that three monitoring stations for water quality with high pollution and three half pollution, the most affected quality stations located near the municipal water intake of Quibdo. For this reason it is recommended that ICOMINERA be used as a planning tool of water resources in regulating use, control of mining activity, reducing the health risk from consumption in the region

PALABRAS CLAVES

MINERIA, RECURSO HÍDRICO, CALIDAD DE AGUAS, CONTAMINACIÓN, ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN

KEYWORDS

MINING, WATER RESOURCES, WATER QUALITY, POLLUTION, POLLUTION INDICES

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	12
2. DISEÑO TEORICO	13
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
2.2 DESCRIPCION DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	14
2.2.1 Río Cabí.....	14
2.2.2 Diagnóstico general de la cuenca	16
2.2.2.2 Precipitación.....	16
2.2.2.3 Temperatura.....	16
2.2.2.4 Humedad relativa.....	16
2.2.2.5 Velocidad del viento.....	16
2.2.2.6 Brillo solar.....	16
2.2.2.7 Evaporación.....	16
2.2.2.8 Nubosidad	17
2.2.2.9 Cobertura Vegetal	17
2.2.3 Estaciones de muestreo de calidad de aguas sobre el río Cabí.....	17
2.2.4 Caudal del rio Cabí.....	20
2.2.5 Objetivos de calidad.....	21
2.2.6 Condiciones Socioeconómicas	24
2.2.6.1 Identificación de Vertimientos	24
2.3 ANTECEDENTES.....	27
2.3.1 Río Cabí	27
2.3.2 Índices de Calidad y Contaminación.....	27
2.4 JUSTIFICACIÓN.....	32
2.5 OBJETIVOS	33
2.5.1 Objetivo general	33
2.5.2 Objetivos específicos.....	33
2.6 MARCO DE REFERENCIA	34
2.6.1 Marco teórico	34
2.6.1.1 Calidad de aguas.....	34
2.6.1.2 Contaminación del agua.....	35
2.6.1.3 Índices de Calidad y de Contaminación.....	37
2.6.1.3.1 Índices de contaminación ICO	39
2.6.1.3.2 Parámetros fisicoquímicos utilizados en el cálculo de los ICO	39
2.6.1.3.3 Cálculo de los subíndices (I) de cada parámetro de los ICO.....	39
ICOMO	39
ICOSUS:	40
2.6.1.3.4 Clasificación de la calidad del agua según el valor de los ICO.....	40
2.6.1.4 Métodos de muestreo para aguas superficiales continentales y marinas, subterráneas, lluvias y de consumo.....	41
2.6.1.4.1 Tipos de muestreo	41
2.6.1.5 Características de la operación minera aurífera aluvial.....	41
2.6.1.5.1 Prospección y exploración	41
2.6.1.5.2 Explotación	42

2.6.1.5.3 Aspectos ambientales del proceso de Extracción del oro.....	43
3 METODOLOGIA	46
3.1 Diseño metodológico de la investigación.....	46
3.2 Población y muestra	46
3.3 Asignación de los valores y selección de las ecuaciones para el establecimiento de los subíndices	49
4 RESULTADOS Y DISCUSION.....	50
4.1 Diagnóstico de la actividad minera en el área de la cuenca del río Cabí.	50
4.2 Diagnóstico de la calidad de aguas del río Cabí.....	54
4.2.1 Cálculo del índice de contaminación de materia orgánica y de sólidos suspendidos totales	57
4.2.2 Análisis de resultados del cálculo de los índices de Contaminación.....	58
4.2.2.1 ICOMO	58
4.2.2.2 ICOSUS.....	59
4.2.3 Conclusiones generales de la aplicación de los índices de Contaminación ICOMO e ICOSUS ..	59
4.3 Selección de parámetros para la construcción del índice de contaminación asociado a la contaminación minera aurífera.....	60
4.3.1 Variables seleccionadas.....	61
4.3.2.1 Subíndice de turbiedad.....	62
4.3.2.2 Subíndice de sólidos suspendidos totales.....	65
4.3.2.3 Subíndice de mercurio.....	66
4.4 Ajuste de la ecuación del índice de contaminación por minería aurífera.....	71
4.5 Validación de los datos	72
5 CONCLUSIONES	78
6 RECOMENDACIONES	79
7 BIBLIOGRAFIA.....	81
ANEXOS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización Río Cabí, Departamento del Chocó.....	15
Figura 2. Estaciones de muestreo de calidad de agua sobre el Río Cabí.....	18
Figura 3. Tramo río Cabí con Objetivos de Calidad – Tramo IV.....	23
Figura 4. Función cálculo del subíndice de mercurio para el índice de calidad en el estudio “Desarrollo y Aplicación de un índice de calidad de aguas para los ríos en Puerto Rico” 2008.....	31
Figura 5. Ubicación minas sobre la cuenca del Río Cabí – Municipio de Quibdó	51
Figura 6. Correlación de variables más frecuente encontrada en el ACP de la información de calidad del Río Cabí.....	61
Figura 7. Función de Calidad de turbidez para el Índice de Calidad de Agua NSF1970.....	62
Figura 8. Regresión de Subíndice de Turbiedad asociado al índice de Calidad NSF	64
Figura 9. Curva de Contaminación asociada a la turbiedad y la función de la curva.....	64
Figura 10. Función de sólidos suspendidos totales en el cálculo del índice de contaminación por sólidos suspendidos	66
Figura 11. Línea de tendencia subíndice de mercurio en el estudio “Desarrollo y Aplicación de un índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico” 2008	68
Figura 12. Línea de tendencia y regresión del subíndice de mercurio	71
Figura 13. Relación del índice de contaminación minera sobre el río Cabí.....	75
Figura 14. Índice de Contaminación minera ICOMINERA aplicado sobre el río Cabí.....	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de la estación aeropuerto El Caraño	16
Tabla 2. Distribución de la cobertura vegetal.....	17
Tabla 3. Estaciones de monitoreo existentes sobre el cauce de la corriente hídrica	19
Tabla 4. Estaciones de monitoreo cuenca alta, media y baja de la corriente	19
Tabla 5. Tramos identificados a lo largo de la corriente superficial	20
Tabla 6. Mediciones de caudal sobre la subcuenca del río Cabí período 2005 - 2010.....	21
Tabla 7. Objetivos de Calidad Propuestos para el tramo IV del río Cabí	22
Tabla 8. Población estimada de la zona urbana de la cuenca del Río Cabí.....	25
Tabla 9. Tipo de disposición final de aguas residuales en la zona urbana	25
Tabla 10. Población Actual	26
Tabla 11. Información de mercurio total en aguas superficiales de referencia para la construcción del subíndice de contaminación	29
Tabla 12. Valores de mercurio Establecidos en el Índice de Calidad de agua de Puerto Rico	31
Tabla 13. Rangos de la clasificación de la contaminación del agua mediante los.....	41
valores de los índices ICO.....	41
Tabla 14. Normatividad Minera en Colombia.....	44
Tabla 15. Normatividad Ambiental en Colombia	45
Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del programa de muestreo de calidad de aguas de Codechocó	47
Tabla 17. Ubicación de minas en el tramo principal del Río Cabí.....	50
Tabla 18. Resultados de calidad de aguas del monitoreo al río Cabí febrero 2014	55
Tabla 19. Resultados de calidad de aguas monitoreo al río Cabí octubre 2014.....	56
Tabla 20. Cálculo del Índice de contaminación ICOMO para el río Cabí muestreo 28/02/20104.....	57
Tabla 21. Cálculo del Índice de contaminación ICOMO para el río Cabí Muestreo 30/10/2014	57
Tabla 22. Cálculo del Índice de contaminación ICOSUS para el río Cabí 28/02/20104 y 30/10/2014 .	58
Tabla 23. Valores de turbiedad asociado al índice de calidad NSF y los propuestos para el índice de contaminación	63
Tabla 24. Evaluación estadística de la información de mercurio total en agua superficial.....	67
Tabla 25. Evaluación estadística de los datos “ajustados” a la nueva selección de información.....	67
Tabla 26. Datos de mercurio asociados al subíndice de calidad de aguas para Puerto Rico.....	69
Tabla 27. Valores de concentración de mercurio total con el ajuste para el cálculo del subíndice de contaminación	69
Tabla 28. Valores de concentración de mercurio total ajustados para el cálculo del subíndice de contaminación.	70
Tabla 29. Valoración del índice de contaminación por minería aurífera	72
Tabla 30. Esquema de cálculo del índice ICOMINERA.....	72
Tabla 31. Datos del muestreo río Cabí para el cálculo del ICOMINERA 17/03/2015	73
Tabla 32. Calculo del ICOMINERA sobre los puntos establecidos del río Cabí.....	74
Tabla 33. Recomendaciones para la aplicación del ICOMINERA	80

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1. Bocatoma Acueducto Municipio de Quibdó	20
Imagen 2. Dragas artesanales para la extracción del metal en el río Cabí	52
Imagen 3. Draga mecanizada en el Río Cabí	52
Imagen 4. Entable minero a la orilla del río Cabí, método de extracción motobomba	53
Imagen 5. Clasificadora de mineral artesanal y buzo de draga	53
Imagen 6. Muestreo de aguas sobre el Río Cabí 2014	53
Imagen 7. Minería Con retroexcavadoras en el río Cabí 2014.....	54
Imagen 8. Estación de muestreo Puente Playita.....	59

INTRODUCCIÓN

La actividad minera se desarrolla de forma tradicional en el departamento del Chocó, principalmente en los minerales metálicos de cobre, oro, plata y platino, utilizando los cuerpos de agua como principal fuente de búsqueda y explotación de estos metales y cuya presencia es de forma “libre” en los depósitos aluviales de ríos y quebradas. En años anteriores, el alto precio del oro a nivel internacional, de 1.895 USD \$/onza troy, en el año 2011, hasta 1.080 USD \$/onza troy, en el 2015, generó un aumento del desarrollo de la actividad minera en la región; esta actividad se desarrolla tanto de forma legal, informal e ilegal en muchos municipios del departamento, generando presión sobre los recursos suelo y agua, y limitando el desarrollo de otras actividades que la comunidad ha realizado de forma milenaria a través de las cuencas hídricas, como transportarse, recrearse o también abastecerse de estas cuencas para la alimentación y los quehaceres del hogar.

La presión antrópica de la actividad minera en el Chocó se está presentando en muchos de los cuerpos de agua, en la parte alta de las bocatomas de los acueductos municipales, como es el caso del río Cabí en Quibdó, capital del departamento del Chocó, con aproximadamente 120.000 habitantes. La actividad minera desarrollada en esta cuenca ha cambiado de forma permanente el cauce principal del río, sus tributarios, áreas de recarga y demás, variando las características fisicoquímicas de la fuente con la adición de sólidos y sustancias de interés sanitario (mercurio), que limitan el uso actual de la fuente y condicionan así los tratamientos realizados por la empresa de acueducto.

En consideración a lo expuesto, se hace necesario establecer parámetros que permitan evaluarla con los criterios de contaminación asociados a la actividad minera en su operación, insumos y reactivos empleados, con el fin de determinar cualitativamente la afectación del recurso hídrico, y en consecuencia definir medidas de control y de gestión administrativa para el uso adecuado y fomento de la recuperación de la cuenca, con el objeto de beneficiar a las comunidades de la ronda hídrica del río Cabí.

Con este trabajo se propone contribuir en la formulación de un índice de contaminación que apoye la gestión del recurso hídrico, además de vincular una propuesta para controlar y administrar el recurso hídrico de esta y otras cuencas que presenten el mismo tipo de afectación, por parte de las autoridades ambientales, alcaldías y demás instituciones relacionadas con el tema.

2. DISEÑO TEÓRICO

TITULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO DEL RÍO CABÍ A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN DE UN ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN ASOCIADO A LA ACTIVIDAD MINERA AURÍFERA

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Para iniciar con el problema de la investigación tenemos que hacernos la pregunta de la investigación, **¿CUAL ES LA CONTAMINACIÓN AL RECURSO HÍDRICO QUE GENERA LA MINERIA AURÍFERA ALUVIAL SOBRE EL RÍO CABÍ?**

El problema parte desde la importancia del río Cabí para la población de Quibdó como fuente abastecedora del acueducto municipal con un 24% de cobertura actual, aproximadamente 30.000 habitantes, y la presencia de distintos entables de la actividad minera aguas arriba de la bocatoma; se establece que por el tipo de herramientas utilizadas (17 entables entre dragas, retroexcavadoras entre 2013 y 2014), la remoción de tierras alledañas y del lecho del río, y los vertimientos líquidos y sólidos, se generan cambios fisicoquímicos en el agua los cuales ponen en riesgo la disponibilidad de la fuente para su principal uso actualmente.

Situaciones similares se presentan en otras fuentes hídricas del departamento del Chocó, del país y del mundo, y a veces no se cuentan con herramientas que permitan contribuir a la toma de decisiones en la priorización del uso y la medición de la afectación de la actividad minera como tal; por lo anterior, para poder tomar decisiones para mitigar, controlar y prevenir los posibles efectos de esta contaminación, asociados a la comunidad, se requieren herramientas construidas con el soporte científico, estadístico y metodológico adecuado, evaluando las distintas variables asociadas a los vertimientos, y se tomen acciones preventivas y correctivas por parte de las autoridades ambientales, sanitarias y de competencia territorial local, regional y nacional.

Actualmente existen herramientas como los índices de contaminación, según Ramírez et al. (1997), que permiten evaluar distintos eventos de contaminación asociados a actividades antrópicas, pero no se cuenta con una herramienta específica para evaluar el efecto directo de la actividad minera aurífera aluvial; se menciona, esta actividad presenta unas características distintas en el departamento del Chocó a otro tipo de actividad minera de oro, sobre todo en el proceso de beneficio cuando se adicionan sustancias como el mercurio, con efectos específicos en la flora y fauna acuática y los ecosistemas importantes.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.2.1 Río Cabí¹.

La subcuenca hidrográfica del río Cabí está situada al sur-orienté de Quibdó, como una subcuenca de la gran hoya hidrográfica del río Atrato (Figura 1). De acuerdo con la Geografía Económica del Chocó, publicada en 1937, el río Cabí no nace en las estribaciones occidentales de los Farallones del Citará a una altitud de 2.170 m., ya es poco probable que esta fuente hídrica tenga su cabecera a esta elevación, y a una altura mucho menor la lámina de agua desaparece en la espesura del bosque. Otra evidencia de lo establecido es que la composición fisicoquímica de las rocas y sedimentos no son similares a las rocas predominantes a 2.170 msnm. Posteriormente a su nacimiento, arriba de la población de Guadalupe y paralelo al occidente a cinco kilómetros de la población de Tutunendo a unos 67 msnm (ver mapa), el río corre de oriente a occidente hacia el río Atrato, al cual tributa sus aguas a la altitud aproximada de 43 msnm. Su afluente principal es el río Purré que le vierte sus aguas por la margen izquierda. Otros afluentes importantes son el río Pacurita y las quebradas Agua Clara, El Rosario, La Bendición, Lombo, Pando y Beteguma.

La subcuenca del río Cabí está localizada en los municipios de Quibdó y Atrato en el departamento del Chocó – Colombia. La extensión de la subcuenca del río Cabí es de 16.219 ha, equivalente a 162, 19 km² en las cuales se encuentran establecidas las comunidades de Pacurita y Guadalupe, ubicados en los márgenes del río Cabí. San Martín y San José de Purré en el lecho del río Purré, afluente del primero. Se ha estimado una población de 19.938 personas en estas localidades, entre el sector urbano y rural, sin contar con la población de Quibdó, cabecera municipal. Étnico-territorialmente la subcuenca hace parte de la zona I del título comunitario de la Organización Campesina Integral del Atrato (ACIA). La subcuenca del río Cabí está definida por los siguientes límites geográficos:

Por el Norte, con las cuencas menores de los ríos Duatá y Tutunendo.

Por el Sur, con la cuenca del río Tanando.

Por el oriente, con la parte alta de la cuenca del río Tanando y afluentes menores que rinden sus aguas al río Atrato.

Por el Occidente con el río Atrato al cual tributa sus aguas

Los límites geodésicos los definen las siguientes coordenadas geográficas, con respecto al meridiano de Greenwich y a la línea del Ecuador:

- ✓ 76°30'41" de longitud occidental en el extremo más orientado de la cuenca del río Tanando.
- ✓ 76°39'28" de longitud occidental en el extremo más occidental de la cuenca.
- ✓ 5°44'12" de latitud norte en el extremo más septentrional de la cuenca.
- ✓ 5°36'30" de latitud norte en la parte más meridional de la cuenca.

La cuenca del río Cabí es atravesada por diversas vías de comunicación, de carácter regional y municipal, tanto en su área urbana como rural. La principal de ella es la vía Quibdó-Pereira sobre la cual se encuentra ubicado el Puente de Cabí (km 5), esta vía también conecta a la capital del departamento con la región del San Juan. A pesar de haberse construido esta vía hace más de 50 años, sólo fue pavimentada recientemente generando así un acelerado proceso de crecimiento lineal urbano, económico y turístico

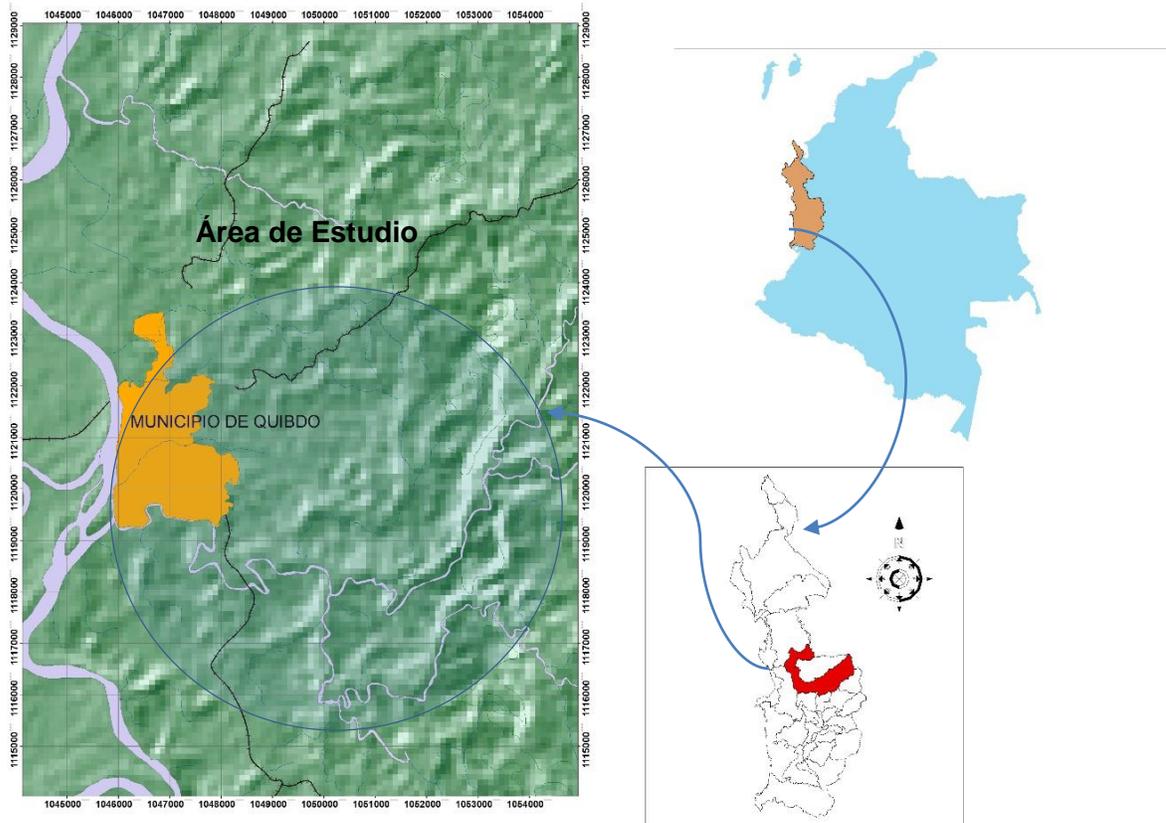
¹ Plan de Manejo Ambiental del río Cabí, Fundación Beteguma, 2005

en el área (fincas, cabañas, estaderos, empresas de gas y expendios de combustibles, etc.). De esta vía, a la altura del kilómetro nueve, se desprende un ramal de 18 km con destino a San José de Purré en el municipio del Atrato, construido hace cerca de 30 años por una empresa norteamericana que realizó trabajos de exploración de petróleo. Al principio la vía llegaba a dos kilómetros del pueblo donde existía el campamento y centro de actividades de la empresa, obligando a sus propios moradores a abrirla hasta el pueblo.

De igual manera, existen otras vías de comunicación secundarias que comunican a Quibdó con Guadalupe, mediante un ramal de cuatro kilómetros que se desprende de la vía Quibdó-Medellín a la altura del kilómetro 15, el cual cuenta con características similares a la vía a San José de Purré en cuanto al mal estado se refiere.

La vía Quibdó-Pacurita sale por la zona del barrio El Jardín al oriente de la capital, pasa por el Batallón Manosalva Flores y el Barrio Obapo donde termina el perímetro urbano, para atravesar una zona de colinas y lomeríos que descienden hasta el río Cabí a la altura de Pacurita. Esta vía de seis kilómetros fue construida por el Fondo Nacional de Caminos Vecinales en la década de los 80 y en el 2002 fueron construidos los cimientos de un puente sobre el río Cabí para llegar a Pacurita. Esta vía fue proyectada para continuar hasta el corregimiento de San Martín de Purré en el municipio del Atrato (aislado actualmente por vía terrestre), hacia donde existe una trocha que es transitada por los habitantes de esta población sobre la margen derecha del río Purré.

Figura 1. Localización río Cabí, departamento del Chocó



Fuente. Autor

2.2.2 Diagnóstico general de la cuenca

2.2.2.1 Caracterización climática. La presente caracterización climática de la zona de estudio comprende el análisis de las variables climatológicas como son la precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación y brillo solar, con énfasis en sus valores, medios anuales y su distribución temporal. (Tabla 1)

Tabla 1. Características generales de la estación aeropuerto El Caraño

Estación	Código	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación	Período
Aeropuerto El Caraño	1104501	Quibdó	05°42'N	76°39'W	0053 msnm	1947 a 2002

Fuente. IDEAM, 2004

2.2.2.2 Precipitación. La subcuenca hidrográfica del río Cabí, se asienta en una zona tropical muy húmeda, alcanzando un promedio anual de 8.048 ²mm. Los registros pluviométricos indican que se presenta una primera temporada lluviosa en el mes de abril y se prolonga hasta el final de junio, con su máxima intensidad en el mes de mayo; la segunda temporada lluviosa es más intensa, incluye el período de agosto a octubre. Igualmente se presenta una temporada relativamente menos lluviosa entre los meses de enero y marzo.

La zona de estudio se caracteriza por precipitaciones intensas con valores altos de precipitación en 24 horas que se puede presentar en cualquier día o mes del año; la región del Chocó es considerada como una de las más lluviosas del mundo.

2.2.2.3 Temperatura. La temperatura promedio anual de la zona es de 26,4°C, con temperaturas máximas registrada de 38,2°C y mínimos de 18°C³.

2.2.2.4 Humedad relativa. Los valores de humedad relativa media a través del año están en promedio alrededor del 86%, se caracteriza por presentar un máximo registrado de 93% y un mínimo de 80%⁴.

2.2.2.5 Velocidad del viento. La velocidad del viento en su valor promedio es bajo, cercano a 1,5 m/s, presentándose una distribución bimodal coincidiendo con el desplazamiento de ZCIT. En términos generales predomina en la superficie vientos locales (brisa de mar, de tierra, de valle, montaña y montaña valle). En horas de la noche el viento proviene del SE y en el día del NW.

2.2.2.6 Brillo solar. Se puede afirmar que los promedios presentan una relación muy consistente con los valores de precipitación, siendo más bajos con la temporada más lluviosa y más altos con el período menos lluvioso, según IDEAM el rango anual de horas de brillo solar es de 3 a 4 H/día⁵.

2.2.2.7 Evaporación. Esta variable permanece casi constante durante el año, presentándose un valor medio anual de 1.256 mm, el cual es alto debido a las altas radiaciones.

² IDEAM, Información de precipitación 2010

³ IDEAM, Información de temperatura estación aeropuerto El Caraño

⁴ Laboratorio de Aguas de Codechocó, registro de datos de Humedad del Ambiente 2013

⁵ IDEAM Documento sitios turísticos 2011

2.2.2.8 Nubosidad. Se puede afirmar que la nubosidad media en la zona permanece con valores muy cercanos a los 7 octas debido a la alta humedad y alta precipitación durante todo el año, con valores máximos registrados de 8 octas y un mínimo de 5 octas en promedio anual.

2.2.2.9 Cobertura vegetal. Mediante el uso de la cartografía base, restitución de fotografías aéreas e imágenes LANZAT, sobrevuelos y comprobación en campo, se estableció que la cobertura vegetal en la subcuenca muestra la siguiente distribución (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de la cobertura vegetal

Tipo de Cobertura	Área (ha)	Proporción del área (%)
Bosques degradados	12.331,8	76,1
Vegetación continua	2.324,1	14,3
Remoción 26 – 50% de vegetación	1.188,3	7,3
Otros tipo de cobertura	374,8	2,3
TOTAL	16.219	100

Fuente. Codechocó 2010

De acuerdo con el cuadro anterior, la totalidad del área de la subcuenca presenta por lo menos algún grado de intervención, debido a décadas de aprovechamiento de los recursos naturales, siendo la zona sur-oriental (7,3 % del área total) la más intervenida por la intensa explotación maderera, en donde se ha removido entre el 26 y el 50% de la vegetación arbórea.

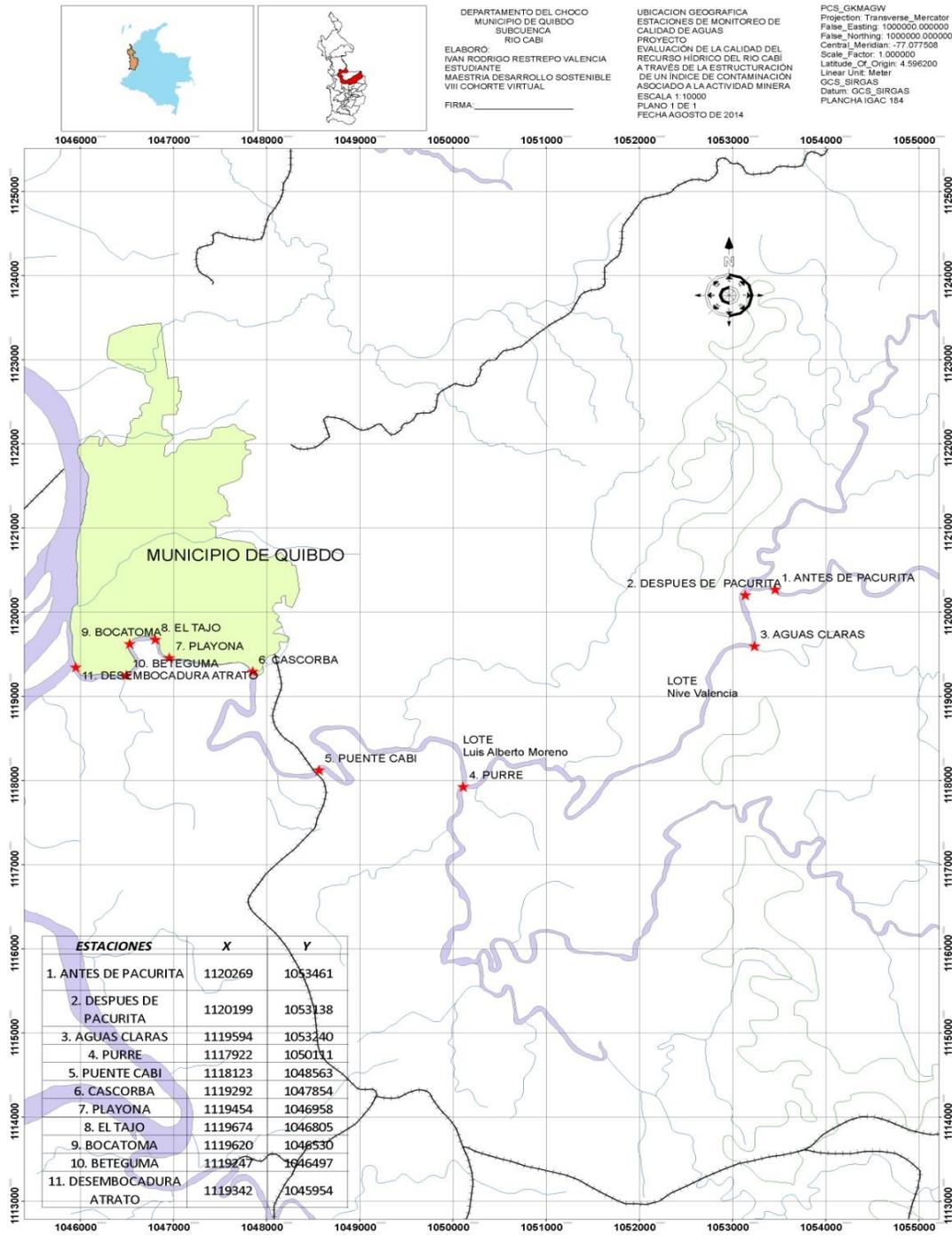
En la zona centro-oriental de la subcuenca, entre los ríos Cabí y Purré, se observa una importante área (14,3 % del área total) que a pesar de estar intervenida, aún conserva una espesa cobertura boscosa, probablemente debido a la dificultad de acceso, en donde se pueden encontrar los mayores diámetros de especies forestales y una enorme variedad animal y vegetal.

En los alrededores del nacimiento de los ríos Cabí y Pacurita, además de encontrarse zonas de bosque degradado, se pueden observar desde el aire numerosos claros en la selva de 0,5 a 1,5 hectáreas, conocidos como “cementeras”, en donde los campesinos de Guadalupe y Tutunendo principalmente, realizan actividades agrícolas migratorias después de la remoción del bosque, en turnos de una o dos cosechas solamente; en general no se realizan prácticas de fertilización de los suelos, y esto no permite una agricultura permanente, migrando de un lugar a otro y dejando abandonadas las cementeras que ya no producen.

2.2.3 Estaciones de muestreo de calidad de aguas sobre el río Cabí

La Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, a través de su programa de monitoreo de calidad de aguas continentales y marítimas, ha establecido inicialmente 11 estaciones de evaluación de la calidad del río Cabí (Tabla 3), ubicadas sobre todo el tramo navegable de la cuenca, y teniendo como criterio principal las distintas actividades que se desarrollan sobre la misma (Tabla 4). Estas estaciones se describen a continuación y son presentadas en la Figura 2:

Figura 2. Estaciones de muestreo de calidad de agua sobre el río Cabi



Fuente. Autor – Codechocó

Tabla 3. Estaciones de monitoreo existentes sobre el cauce de la corriente hídrica

Estación	Código	Localización
Estación N° 1	E1	Antes Pacurita
Estación N° 2	E2	Puente Pacurita
Estación N° 3	E3	Desembocadura Agua Clara
Estación N° 4	E4	Río Purré
Estación N° 5	E5	Puente de Cabí
Estación N° 6	E6	Desembocadura Quebrada Cascorva
Estación N° 7	E7	El Playón
Estación N° 8	E8	Quebrada Playita
Estación N° 9	E9	Río Cabí bocatoma
Estación N° 10	E10	Desembocadura quebrada Beteguma
Estación N° 11	E11	Desembocadura río Atrato

Fuente. Codechocó 2010.

Nota. El lateral “E” corresponde a la estación en particular, la cual en concurso con una numeración definen un código.

Tabla 4. Estaciones de monitoreo cuenca alta, media y baja de la corriente

Cuenca	Código	Localización	Coordenadas		Usos encontrados	Caracterización fluvial
			Norte	Este		
Alta	E1	Antes Pacurita	1120296	1053261	Recreativo y Transporte aguas residuales y residuos sólidos	Tabla
	E2	Puente Pacurita	1120042	1053187	Transporte aguas residuales y residuos sólidos	Tabla
	E3	Desembocadura Agua Clara	1119592	1053220		Remanso
	E4	Río Purré	1117949	1050208		Tabla
Media	E5	Puente de Cabí	1118084	1048410		Tabla
	E6	Desembocadura quebrada Cascorva	1119272	1047883		Remanso
	E7	El Playón	1119500	1047012		Remanso
Baja	E8	Quebrada Playita	1119703	1046879		Remanso
	E9	Río Cabí bocatoma	1119654	1046635		Remanso
	E10	Desembocadura quebrada Beteguma	1119305	1046537		Remanso
	E11	Desembocadura río Atrato	1119408	1046013		Remanso

Fuente. Codechocó. Coordenadas Magna Sirgas

Con fines de evaluación, análisis y reglamentación de la corriente hídrica, Codechocó dividió la cuenca en 4 tramos (Tabla 5), estableciendo condiciones de uso y aporte de los distintos tributarios, esto tramos son:

Tabla 5. Tramos identificados a lo largo de la corriente superficial

Tramo	Código	Localización
Tramo I	E1-E4	Río Pacurita hasta desembocadura Agua Clara
Tramo II	E5	Desembocadura Agua Clara hasta Puente de Cabí
Tramo III	E6-E7	Puente de Cabí hasta río Cabí, sector Playita
Tramo IV	E8-E11	Río Cabí, sector Playita hasta desembocadura quebrada Beteguma

Fuente. Codechocó

Imagen 1. Bocatoma acueducto de Quibdó



Fuente. Autor

2.2.4 Caudal del río Cabí.

Para la determinación del caudal del tramo principal del río Cabí, Codechocó realizó mediciones en tres puntos de muestreo utilizando el método de aforo a través de molinetes. Para calcular el caudal se utilizó la fórmula:

$$Q = A \cdot V$$

Donde: Q = caudal m^3/s .
 A = área de la sección en m^2
 V = velocidad en m/s .

Esta metodología se encuentra acorde con lo establecido por la guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM⁶, para medir el ancho de cada sección de muestreo se utilizó una cuerda de 100 m de longitud y con una vara graduada se midió la profundidad del mismo, con lo cual se obtuvo el área transversal de una sección del río; mientras que la velocidad se midió contabilizando el tiempo que tardó el flotador en recorrer una distancia determinada a lo largo del río.

Los aforos se realizaron cada 15 días en ocho puntos de muestreo distribuidos a lo largo y ancho de la subcuenca, estos puntos se escogieron teniendo en cuenta los sitios determinados para la realización de los análisis de calidad de aguas. El caudal máximo encontrado fue de 106,62 m^3/s a la altura de la desembocadura del río Purré y el mínimo fue de 1,32 m^3/s en la desembocadura de la quebrada La Nieve.

⁶ Guía para la caracterización de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, IDEAM

En el siguiente cuadro se presenta la variación de los caudales, velocidad, y profundidad en los diferentes puntos de muestreo:

Codechocó realizó mediciones del caudal del tramo principal del río Cabí (Tabla 6) entre los años 2005 y 2010, la metodología utilizada fue la batimetría y el aforo a través de velocímetro o molinete, estos equipos pertenecen a Codechocó. Estos fueron sus resultados.

Tabla 6. Mediciones de caudal sobre la subcuenca del río Cabí período 2005 - 2010

Serie	Estación	Fecha	Velocidad (m/s)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
3	Agua Clara	26/10/2005	0,86	11,67	11,07
3	Agua Clara	11/11/2005	0,9	19,61	19,32
3	Agua Clara	01/12/2005	0,87	11,4	11,58
1	Guadalupe	26/01/2006	0,55	6,59	4,25
3	Agua Clara	26/01/2006	0,93	18,47	18,78
3	Agua Clara	16/03/2007	1,06	65,63	72,52
4	Desembocadura Purré	16/03/2007	1,11	96,33	106,62
3	Agua Clara	25/05/2007	0,74	16,55	12,31
3	Agua Clara	13/09/2007	1,27	47,88	60,74
2	Pacurita	15/10/2009	0,48	8,16	3,95
3	Agua Clara	15/10/2009	0,33	16,31	5,37
2	Pacurita	29/10/2009	0,18	6,99	1,27
3	Agua Clara	29/10/2009	0,19	10,67	2,07
2	Pacurita	12/11/2009	0,36	8,18	2,95
3	Agua Clara	12/11/2009	0,3	14,77	4,37
2	Pacurita	25/11/2009	0,63	8,28	5,23
3	Agua Clara	25/11/2009	0,53	14,19	7,56
2	Pacurita	04/02/2010	0,27	4,95	1,34
3	Agua Clara	04/02/2010	0,47	9,52	4,47

Fuente. Codechocó

Estas mediciones se realizaron en la parte alta y media de la cuenca, en la parte baja se ha establecido un valor máximo en la desembocadura de 300⁷ m³/s.

2.2.5 Objetivos de calidad

Codechocó estableció los objetivos de calidad del río Cabí; este trabajo se realizó en la formulación del Plan de Ordenamiento y Reglamentación del recurso hídrico y se protocolizó a través de la Resolución 572 de 2012 (Tabla 7); Los objetivos se trazaron sobre el tramo IV donde se encuentra ubicada la bocatoma del acueducto, ya que la importancia del tramo en lo social, como fuente abastecedora de Quibdó y fuente receptora de las aguas residuales, se sumaron a los criterios de priorización y la definición de un impacto social de gran escala (Figura 3).

La metodología seleccionada para tal fin se ajusta a los términos de GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS DE CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA EN

⁷ Información Codechocó, Plan de Ordenamiento y Reglamentación del río Cabí, 2010

AUSENCIA DE LOS PLANES DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO – PORH
METODOLOGÍA MESOCA

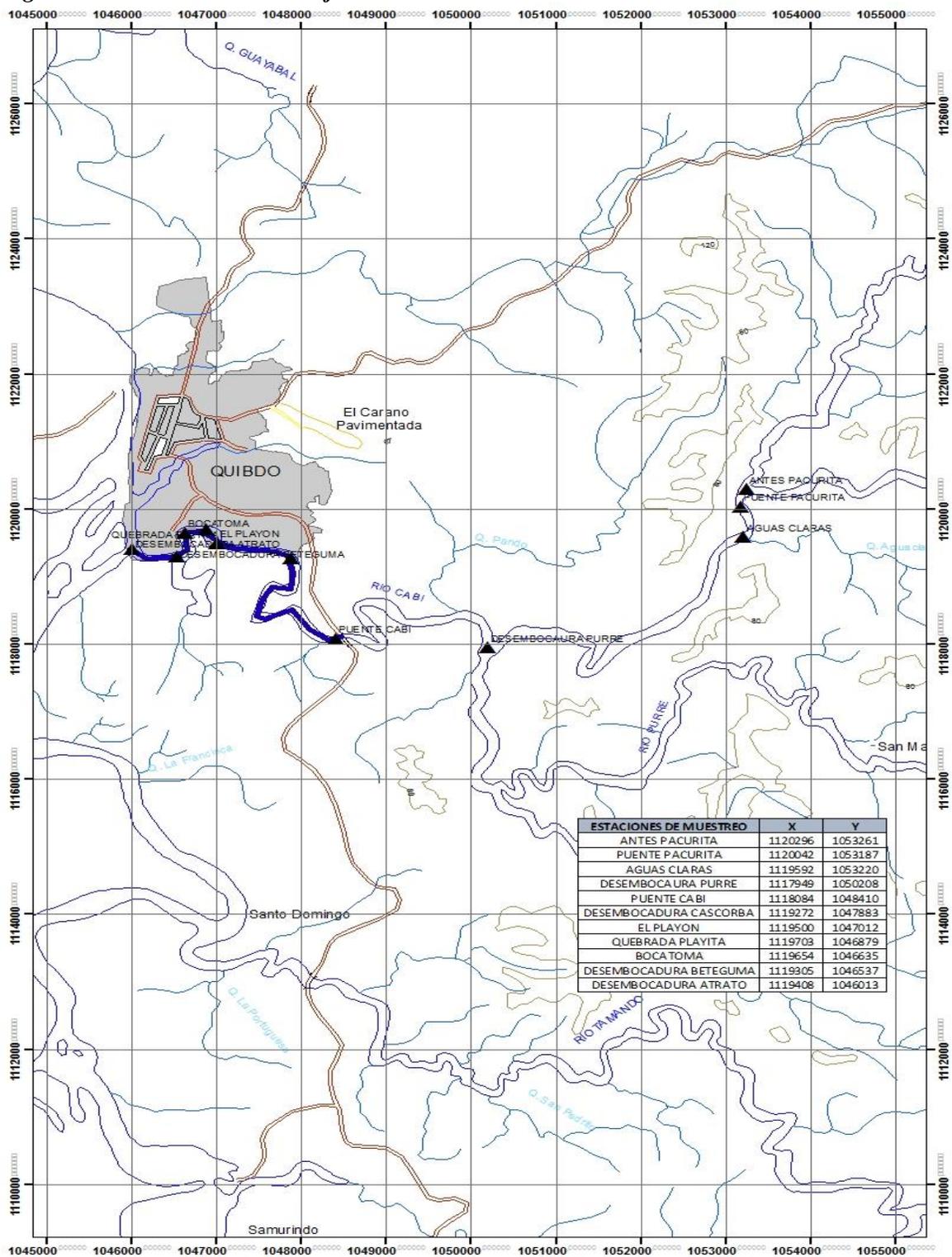
El método seleccionado para determinar los niveles de asimilación de carga orgánica en el tramo IV de la subcuenca es el método de Streeter Phelps para oxígeno disuelto, el punto seleccionado se encuentra en la desembocadura de la quebrada La Playita, ubicada en el barrio La Playita.

Tabla 7. Objetivos de calidad propuestos para el tramo IV del río Cabi

Cuenca	Río	Tramo	Uso preponderante	Parámetro	Unidad	ÍNDICE			Objetivo de calidad
						Actual	Nivel técnico y normativo	Deseado	
ATRATO	CABI	IV (TODO EL TRAMO)	DOMÉSTICO	OD	mg/l	>= 7.1	≥ 4	≥ 4	4
				DBO ₅	mg/l	<=2	0 – 25	≤ 15	≤ 10
				Sólidos suspendidos totales	mg/l	200	-	Ausentes	Ausentes
				Grasas y aceites	mg/l	Presentes	-	Ausentes	Ausentes
				Sustancias de interés sanitario	ausentes	ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes
				Coliformes Totales	NMP/100 ml	8800	≤ 20000	Ausentes	≤ 5000
				Coliformes fecales	NMP/100 ml	5800	≤ 2000	Ausentes	≤ 2000
				pH		5 a 9	7 – 9	5 a 9	5 a 9
T°	°C	T (2 a 3 °C por debajo de T Ambiente)							

Fuente. Codechocó – 2012

Figura 3. Tramo río Cabi con objetivos de calidad – Tramo IV



Fuente. Codechocó – Autor

2.2.6 Condiciones socioeconómicas

2.2.6.1 Identificación de vertimientos

La zona urbana de la cuenca hidrográfica del río Cabí se enmarca en el perímetro urbano de Quibdó; es un área de lomeríos formada básicamente por asentamientos subnormales, la cual sólo hasta la formulación del POT de Quibdó fue declarada como prioritaria para el desarrollo de planes parciales en las categorías de Suelo Urbano, Suelo de Expansión Urbana y Suelo Rural⁸ (de conformidad con lo establecido por los artículos 30 al 35 de la Ley 388 de 1997).

En el marco del diagnóstico de la cuenca del río Cabí, se ha realizado un análisis detallado de los componentes más importantes del conflicto ecológico regional por la que atraviesa esta cuenca, la cual es la fuente que abastece de agua a más 100.000 personas entre las cuatro comunidades rurales (Pacurita, Guadalupe, San Martín de Purré y San José de Purré) y la cabecera municipal de Quibdó, capital del departamento del Chocó.

El río Cabí sirve de límite natural para el crecimiento de estos asentamientos humanos (ver mapa de localización de centros poblados y vertimientos) en donde se localizan en Quibdó ocho barrios en tres comunas (4, 5 y 6) y numerosos sectores en donde habitan aproximadamente 18.899 personas⁷. (Tabla 8)

La cuenca del río Cabí, en su fragmentación zonal alta, media y baja, recibe descargas de residuos sólidos y líquidos, los cuales proceden principalmente de actividades productivas realizadas principalmente en las viviendas, seguidas de una poca o casi nula procedencia de actividades agrícolas o agropecuarias.

No obstante lo anterior, los impactos son más visibles en el área urbana de la cuenca, en donde se suman todos los desechos líquidos y sólidos (principalmente domésticos) arrojados al río y a sus afluentes ubicados en la zona baja; se estima un volumen de residuos líquidos y sólidos hacia la cuenca del río Cabí de 827.776,2 m³/año y 4.138,881 Ton/año respectivamente, que deterioran aún más la calidad del agua, como lo demuestran los análisis microbiológicos los cuales muestran altos niveles de contaminación creciente, con valores en la bocatoma del acueducto de 48.560 y 6530 UFC de coliformes⁴ totales y fecales respectivamente, superando ampliamente los estándares ambientales de calidad de agua para consumo doméstico, y por tanto no es apta para consumo humano directo (Resolución 2115 de 2007), recreación y tratamiento convencional (Decreto 1594 de 1984).

En la actualidad la zona urbana de la cuenca del río Cabí la componen ocho barrios, con una población de 18.899 personas y 4.470 viviendas, como lo muestra el siguiente cuadro:

⁸ Plan de Ordenamiento Territorial de Quibdó - POT

Tabla 8. Población estimada de la zona urbana de la cuenca del río Cabí

COMUNIDADES URBANAS	HABITANTES	VIVIENDAS
Barrio Medrano	3.739	896
Barrio Alfonso López	1.217	281
Barrio Simón Bolívar	562	118
Barrio Las Palmas	857	235
Barrio Horizonte	1.163	289
Barrio La Playita	1.704	378
Barrio Cabí	9.430	2.197
Zona ribereña	227	76
TOTAL	18.899	4.470

Fuente. PMA 2005 Fundación Beteguma

El 48% de los hogares de esta zona no tiene servicio sanitario, situación que afecta la calidad de vida, incrementa el índice de las necesidades básicas insatisfechas, además del problema de contaminación de afluentes hídricos y disposición de excretas al aire libre, el cual se constituya en un elemento propagador de enfermedades. Algunas viviendas cuentan con tazas campesinas que representan el 22,4% del total, otras con pozo séptico (15,0%), inodoro 12,8% y letrina 1,6% (Tabla 9).

Tabla 9. Tipo de disposición final de aguas residuales en la zona urbana

TIPO	% de Cobertura
Letrina	1,6
Inodoro	12,8
Pozo séptico	15,2
Taza campesina	22,4
No tiene	48
Total	100

Fuente. PMA 2005 Fundación Beteguma

La producción diaria de aguas residuales en el área urbana del río Cabí es aproximadamente de 2.267,88 m³/día, teniendo en cuenta solamente la población más cercana a esta fuente hídrica y a sus afluentes, las cuales causan un impacto inmediato por la disposición directa de las aguas residuales. La zona media del área urbana es la que mayor impacto negativo le causa al río Cabí, afectando directamente las quebradas Alfonso López, Divino Niño y Meteorito, con un porcentaje de producción de 44%; seguida de la parte baja con un 30,5% afectando la quebrada El Tajo y por última la zona alta a orilla del río, con un porcentaje de producción de 16,63% y 8,79% respectivamente, afectando las quebradas La Cascorva y El Desecho⁹.

Los problemas ambientales en el área de interés también se ven afectados por la insuficiencia en la recolección de residuos sólidos que realiza la empresa de aseo EPM Aguas del Atrato, lo cual genera una acumulación y formación de depósitos de desechos sólidos alrededor de las casas y calles, y que sirven como alimento a vectores capaces de transmitir enfermedades como son las moscas, cucarachas y roedores; además, se visualizan paisajes antiestéticos debido al material desechado indeseable y se presentan problemas sociales.

En la actualidad son muy pocas las viviendas que utilizan el servicio de recolección de residuos sólidos (vehículo recolector), para lo cual utilizan como destino final el río Cabí y sus afluentes.

⁹ Plan de Manejo Ambiental del río Cabí, Fundación Beteguma, 2005

El método más común para desalojar las aguas residuales domésticas que se generan en el sector urbano de la cuenca de Cabí es mediante el uso de tubería de PVC de 3” de diámetro, que se dirigen directamente desde los sanitarios, baños y cocinas hasta el río o las quebradas afluentes, vertiendo de forma intermitente. De igual forma, existe un vertimiento de agua residual doméstica continuo a la altura del puente que comunica a los barrios de Niño Jesús y Playita, el cual a través de un colector y con una tubería asbesto de 9” de diámetro transporta el agua residual generada en algunas viviendas del sector para luego disponerlas en la quebrada Playita afluente del río Cabí.

Por otro lado, la población rural¹⁰ comprendida por los corregimientos de Pacurita, Guadalupe, San Martín y San José de Purré, se encuentran distribuidas de la siguiente manera (Tabla 10):

Tabla 10. Población Actual

Centro poblado	Población actual (hab.)
Pacurita	1750
Guadalupe	305
San Martín de Purré	380
San José de Purré	515
Quibdó	112.886
Total	115.836

Fuente. Proyección Censo DANE – 2005 y DISPAC 2010

¹⁰ Distribuidora del Pacífico S.A. E.S.P. - DISPAC

2.3 ANTECEDENTES

2.3.1 Río Cabí

Existen varios antecedentes documentales realizados sobre la cuenca del río Cabí, los más relevantes son:

En el año 2002 se formuló el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Quibdó, Este documento actualizado en el año 2012, donde se describe las condiciones de vida de la población del municipio de Quibdó que tiene influencia directa sobre la cuenca del río Cabí, entre otras los corregimiento de Guadalupe y Beteguma, y los barrios del casco urbano ubicados sobre las orillas del río¹¹. También se describe el esquema de la disponibilidad de los servicios públicos municipales; la bocatoma del acueducto del casco urbano del municipio de Quibdó se ubica en la parte baja del río Cabí.

Entre 2005 y 2008 se desarrolló el “Plan de Manejo Ambiental de la Cuenca del río Cabí”, estudio formulado por la ONG Fundación Beteguma, y con la participación del Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico IIAP, La Universidad Tecnológica del Chocó y la Corporación Autónoma Regional Para el Desarrollo Sostenible del Chocó¹², Codechocó; este instrumento requiere en la actualidad, con los cambios normativos en el Decreto 1640 de 2012, un ajuste y actualización para que la autoridad ambiental competente (Codechocó) pueda adoptarlo.

En el año 2010, la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, formuló el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico del río Cabí¹³, en donde se definieron los tramos en el cuerpo hídrico principal, se establecieron los objetivos de calidad del tramo donde está la bocatoma del acueducto de Quibdó y se linearon los criterios de reglamentación de uso con fines de aprovechamiento para consumo humano, preservación de flora y fauna, dilución y asimilación según lo establecido en el Decreto 1594 del 1984 y 3930 del 2010.

En el año 2012, Codechocó estableció el programa de Monitoreo de Calidad¹⁴, de acuerdo a lo establecido en la política nacional hídrica y en el Decreto 1640 de 2012, en donde se definieron los criterios de priorización de cuencas y se escogió al río Cabí, como una de las principales con fines de ordenación y reglamentación de uso; en este documento se describe la calidad fisicoquímica del tramo principal de la cuenca durante seis años de monitoreo.

2.3.2 Índices de Calidad y Contaminación

Ramírez *et al.* (1997) desarrollaron en Colombia los índices de contaminación asociados para la valoración de la contaminación del recurso hídrico, propuestos a partir de la experiencia en monitoreos hidrobiológicos, implementados en la industria del petróleo, así se desarrollaron los índices de contaminación ICOSUS, contaminación por sólidos suspendidos, ICOMO, contaminación por materia orgánica, ICOMI, contaminación por mineralización e ICOTRO, contaminación por eutrofización, como complemento a la evaluación realizada a través de los distintos índices de calidad establecidos para los distintos usos.

Torres Vega *et al.* (2009) proponen en su estudio el desarrollo y aplicación de un índice de calidad de aguas para los ríos en Puerto Rico, entre los parámetros que se incluyen en la construcción del índice se

¹¹ POT, Municipio de Quibdó 2002 -2012

¹² Plan de Manejo Ambiental del río Cabí, Fundación Beteguma, 2005

¹³ Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico, Codechocó 2011

¹⁴ Programa de Monitoreo de Calidad de aguas, Codechocó 2012

encuentran oxígeno disuelto, pH, coliformes fecales, nitratos, fósforo total, demanda bioquímica de oxígeno, amonio, sólidos suspendidos totales, mercurio, plomo y temperatura, este desarrollo se aplicó a lo largo del cauce del río Casey y Humatas en Puerto Rico.

Latorre *et al.* ., (2012), evaluaron entre septiembre de 1998 y diciembre de 2009 la calidad del río Yumuri en Cuba, al analizar las variaciones de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos que pudieran afectar los usos recreativos y pesqueros del agua. Ellos tomaron 4 sitios de muestreo a lo largo del cauce del río. Los resultados del estudio invalidan la utilización del río con fines recreativos y pesquero.

Igualmente (Gallego *et al.* ., 2010) modelan la calidad del agua de las cuencas hidrográficas de la región de Cornare en el departamento de Antioquia, Colombia. Ellos utilizaron la metodología propuesta por el laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM. Los resultados indicaron que los índices agregados de calidad físicoquímica ICAfa se encuentran entre los rangos de 0,49 a 0,90, ubicando la calidad del agua de la cuenca en las categorías malo, medio y bueno. Así mismo, los índices más bajos se encuentran después de las descargas de aguas residuales de los municipios de Guarne, Marinilla, El Santuario, La Ceja y El Carmen de Viboral, en el departamento de Antioquia, donde el índice de calidad general ICAg, osciló entre 0,39 y 0,82 categorizando de malo, medio y bueno la calidad del tramo.

También Coto and Salgado *et al.* . (2011), en la evaluación de la calidad del agua de los cauces de los Ríos Tibás, Lajas, Tranqueras en Costa Rica. aplicaron dos índices basados en parámetros físicos, químicos y bacteriológicos con el fin de brindar recomendaciones para la gestión y el uso del recurso hídrico. Los índices aplicados fueron el Índice de Calidad de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos de América (ICAFNS) y el Índice del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad del Agua.

Para los valores de mercurio se tiene en cuenta lo aplicado en el estudio relacionado como de “ Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico” 2008, en donde incluyen la variable mercurio para el establecimiento de un índice de calidad de aguas superficiales con fines de evaluar la calidad del agua del río Grande Añasco; la selección de los valores se realizó a través de la aplicación de la metodología Delphi, donde un grupo de expertos académicos y de otros sectores determinaron los rangos y los valores claves para cada variable seleccionada en la construcción del Índice.

También se tiene en cuenta el estudio realizado en Venezuela “ Evaluación de la contaminación por mercurio en la biota acuática, aguas y sedimentos de la cuenca alta del río Cuyuni, estado de Bolívar en Venezuela, 2013” en donde se encontraron concentraciones diversas de mercurio para los ríos Cuyuni, quebrada Aimara, quebrada Amarilla, río Junín y río Bárbara.

Además en el Estudio “La Contaminación por mercurio en México 2004”, se presentan información sobre la producción de las minas de cinabrio en México y datos de mediciones de mercurio en agua superficial de los cuerpos hídricos como los ríos San Juan, Hidalgo, Tula Tepeji El Salto Afayucan, Laguna de Carmen, Machona y Mecocan y el río Coatzacoalcos

En Colombia y en el Chocó se cuenta, referente al mercurio, con información del Programa de Monitoreo del recurso Hídrico de la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, que realizó en el año 2010 el muestreo de mercurio total en agua superficial de los ríos San Juan y Condoto .

Además se cuenta en el Chocó con la información del Proyecto “Producción más Limpia para el sector Minero” desarrollado por la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, en el año 2010, donde se realizaron monitoreos de mercurio en distintas matrices como cabello, uñas, orina de seres humanos y también en vertimientos mineros.

Información de la concentración de mercurio total, muestreo en el Chocó y realizado por la empresa Asodeam, en el marco del contrato 067 de 2013 “IN-CGYOH-DIAG-067-ac. “Elaboración de estudios y diseños complementarios de acueducto y alcantarillado en los municipios de Medio San Juan, Istmina y Unión Panamericana, Volumen 3” donde se determinó el mercurio total en muestras de agua en estaciones ubicadas en el río San Juan y el río Condoto en el departamento del Chocó.

El resumen de la información de la variable mercurio se presenta a continuación (Tabla 11)

Tabla 11. Información de mercurio total en aguas superficiales de referencia para la construcción del subíndice de contaminación

Información de mercurio en aguas superficiales recopilada por el autor					
Lugar/Estación de Muestreo	Valor reportado	Unidad	Incertidumbre	Referencia	Método
Mojarra 1	0,85	µg/l	No calculado	Resultados muestreo Codechocó río San Juan 7 de julio 2010. Proyecto "Manejo Integral del Recurso Hídrico"	Espectrometría de Vapor frío
Istmina después	1,38	µg/l	No calculado		
Frente Andagoya	1,75	µg/l	No calculado		
Suruco	1,52	µg/l	No calculado		
Tapón antes	1,28	µg/l	No calculado	Resultados muestreo Codechocó río San Juan 12 de abril 2010. Proyecto "Manejo Integral del Recurso Hídrico"	
Tapón después	1,68	µg/l	No calculado		
Tadó antes	1,5	µg/l	No calculado		
Tadó después	1,7	µg/l	No calculado		
Profundó	1,88	µg/l	No calculado	Resultados muestreo Codechocó río Condoto 13 de abril 2010. Proyecto "Manejo Integral del Recurso Hídrico"	
Aguacate después	1,33	µg/l	No calculado		
Condoto antes	1,27	µg/l	No calculado		
Desembocadura Condoto	1,37	µg/l	No calculado	Resultados muestreo Codechocó río Condoto 27 de julio 2010. Proyecto "Manejo Integral del Recurso Hídrico"	
Santa Ana antes	1,45	µg/l	No calculado		
Santa Ana después	1,15	µg/l	No calculado		
Acoso antes	1,56	µg/l	No calculado		
Unión antes	1,8	µg/l	No calculado		
Muriña después	1,1	µg/l	No calculado		
Mina Viro Viro	1,70	µg/l	No calculado	Resultados muestreo Codechocó. Proyecto Producción más limpia Sector minero 21 de mayo de 2010 Vertimientos Mineros	
Mina Marcial Cortes	1,80	µg/l	No calculado		
Mina Isaac Vargas	1,75	µg/l	No calculado		
Río San Juan Istmina	0,488	µg/l	0.063	Resultados consultoría Asodeam - Hidroconsulta, Proyecto diseño de sistemas de Acueducto para los municipios de Acandí, Istmina Nóvita, río Quito, Unión Panamericana, Medio	SM3500Hg - SM 3112 B
Quebrada San Pablo Istmina	0,488	µg/l	0.063		
Río San Juan Andagoya	0,794	µg/l	0.063		
Río Acandí	0,488	µg/l	0.063		

Río Condoto – Andagoya	0,488	µg/l	0.063	Baudó, San José del Palmar y Medio San Juan en el departamento del Chocó - septiembre a diciembre de 2013	
Río Condoto - Río Iró	0,488	µg/l	0.063		
Río San Juan, Hidalgo, Tula Tepeji El Salto Afayucan	1	µg/l	Sin referencia	La contaminación por mercurio en México	SIN REFERENCIA
Laguna de Carmen, Machona y Mecoacan	0,4	µg/l			
Río San Juan	11	µg/l			
Río Coatzacoalcos	0,38	µg/l			
Río Uey	20,13	µg/l			
Río Cuyuni	15,29	µg/l	Evaluación de la contaminación por mercurio en la biota Acuática, Aguas y sedimentos de la Cuenca alta del río Cuyuni estado de Bolívar, Venezuela 2013		
Quebrada Aimara	13,58	µg/l			
Quebrada Amarilla	10,07	µg/l			
Río Junín	9,87	µg/l			
Río Bárbara	8,35	µg/l			

Fuente. Autor

Los valores asociados para el Índice de calidad de agua de Puerto Rico se presentan en la siguiente (Tabla 12) y (Figura 4).

Tabla 12. Valores de mercurio establecidos en el Índice de Calidad de agua de Puerto Rico

Valor del Índice	Concentración de Hg (µg/l)
1,00	0
0,56	1
0,34	2
0,21	3
0.14	4
0.10	5
0.07	6

Fuente. “Desarrollo y Aplicación de un índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico” (Torres, 2008)

Figura 4. Función cálculo del subíndice de mercurio para el índice de calidad en el estudio “Desarrollo y Aplicación de un índice de calidad de aguas para los ríos en Puerto Rico” 2008

➤ Mercurio

$$S_{Mercurio} = \left(1 + \frac{q}{6.30}\right)^{-4.29} \quad (D-10)$$

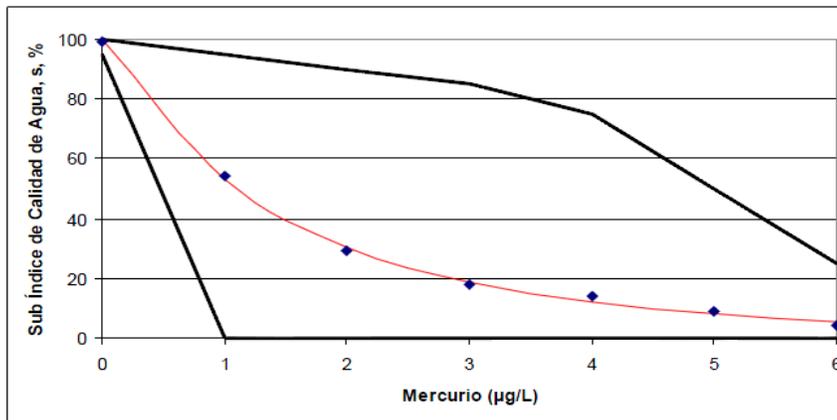


Figura D-9: Subíndice para Mercurio

Fuente. “Desarrollo y Aplicación de un índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico” Torres, 2008

2.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente la minería es uno de los motores de la economía nacional, la “locomotora minera” es la estrategia que ha adoptado el gobierno nacional para impulsar el desarrollo del país a través del aprovechamiento de los recursos naturales no renovables. En el departamento del Chocó, los sectores productivos que constituyen el motor de la economía local son el aprovechamiento forestal y la minería de oro y platino. El desarrollo minero se favorece en el departamento por las características geológicas especiales de la región y la cantidad de fuentes hídricas que surcan estas tierras, el desarrollo minero se realiza en la mayor parte de las zonas pobladas y donde se concentra la mayor parte de la población del departamento, como son las regiones del río San Juan y del río Atrato.

Según Codechocó (2013), existen aproximadamente 250 entables mineros identificados en el departamento, de los cuales solo uno (Aluviones de Colombia) cuenta con título minero y licencia ambiental, requisitos legales para el desarrollo de la actividad minera en Colombia, el resto de minas se “camuflan” en los vacíos legales de la ilegalidad, la informalidad y la minería tradicional.

La continua degradación de la calidad del agua del río Cabí, es causada principalmente por la actividad minera ejercida sobre el lecho del río. La minería también genera conflicto por los usos del agua. El río Cabí es la principal fuente de abastecimiento de agua para el consumo humano de la ciudad de Quibdó, con una población aproximada de 120.000 habitantes en la cabecera municipal. Sobre esta subcuenca se desarrolla la actividad minera aurífera utilizando tecnologías que degradan el lecho del río y remueven masivamente la tierra a través de retroexcavadoras y dragas. Además, utilizan sustancias como el azogue (mercurio), las cuales son vertidas directamente sobre el cauce principal del río, alterando negativamente su estado natural.

Estos riesgos se asocian a la Agenda 21 de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo que afirma que aproximadamente el 80% de todas las enfermedades y más de una tercera parte de las defunciones en países en vía de desarrollo son causadas por el consumo de agua contaminada (Rodríguez, 2012). Estos riesgos se asocian también a los vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales y de producción agrícola y ganadera (IDEAM, 2005).

Los riesgos asociados al deterioro de la calidad del agua del río Cabí hacen prioritaria su evaluación con el fin de tomar acciones de prevención, control y mitigación, de los factores que afectan negativamente esta fuente de abastecimiento. Por lo anterior, es importante y necesario determinar la contaminación hídrica generada por la actividad minera en el río Cabí; además, los resultados de este estudio servirán de aporte a instituciones públicas y privadas, del orden municipal, nacional e internacional. Se proyecta que estos resultados le interesarían a instituciones no gubernamentales (ONG), que luchan por la defensa de los derechos humanos, protección a la salud de las personas, el respecto a la biodiversidad y a investigadores comprometidos en descubrir la relación y los efectos del uso del agua para consumo humano contaminada por la actividad minera.

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 Objetivo general

Determinar la contaminación del río Cabí asociada a la actividad minera aurífera a través de la implementación de un índice de contaminación del recurso hídrico asociado a la actividad minera aurífera.

2.5.2 Objetivos específicos

Diagnosticar el estado actual de la calidad del recurso hídrico del tramo principal del río Cabí.

Determinar las condiciones de la operación de la actividad minera sobre el recurso hídrico del río Cabí.

Definir los criterios técnicos adecuados para la formulación del índice de contaminación de la actividad minera sobre el río Cabí.

Validar el instrumento establecido para la determinación de la contaminación por minería aurífera sobre el recurso hídrico en el río Cabí

2.6 MARCO DE REFERENCIA

2.6.1 Marco teórico

2.6.1.1 Calidad de aguas

La calidad de las aguas está definida por la composición química de estas y sus características físicas y biológicas, adquiridas a través de los diferentes procesos naturales y antropogénicos. La calidad del agua y su variación en el espacio temporal se modifica por la adición de contaminantes, asociada a las múltiples actividades socioeconómicas de acuerdo con las características propias de estas dinámicas y a fenómenos naturales que inciden directamente sobre el recurso hídrico afectado.

Dentro de la gestión del recurso hídrico la calidad es uno de los factores más importantes, ya que la evaluación de esta definirá los posibles usos que realiza una comunidad sobre el recurso afectado, además de generar la propuesta de mejoramiento y adaptación para la minimización del riesgo de afectación al ambiente y los ciclos ecosistémicos.

La evaluación de la calidad se realiza a través de monitoreos de calidad de agua, que se identifican como el compendio de información de una serie de localidades a intervalos regulares, destinado a recolectar los datos necesarios para evaluar la calidad del agua.

Los usos estipulados para el recurso hídrico dependen de la calidad del mismo, según la normatividad colombiana (Decreto 3930/10) son:

1. Consumo humano y doméstico.
2. Preservación de flora y fauna.
3. Agrícola.
4. Pecuario.
5. Recreativo.
6. Industrial.
7. Estético.
8. Pesca, maricultura y acuicultura.
9. Navegación y transporte acuático.

Se entiende por uso del agua para consumo humano y doméstico su empleo en actividades tales como:

- a) Fabricación o procesamiento de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución.
- b) Bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato.
- c) Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.
- d) Fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares.

Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, su empleo en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin

causar alteraciones sensibles en ellos, o para actividades que permitan la reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, tal como en los casos de pesca y acuicultura.

El uso agrícola del agua, se estipula como su empleo para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias. y el uso pecuario del agua cuando es utilizada para el consumo del ganado en sus diferentes especies y demás animales.

El uso recreativo se presenta cuando hay:

- a) Contacto primario con el agua, como en la natación y el buceo.
- b) Contacto secundario con el agua, como en los deportes náuticos y la pesca.

Se entiende por uso industrial del agua, su empleo en actividades tales como:

- a) Procesos manufactureros de transformación o explotación.
- b) Generación de energía.
- c) Minería.

Se entiende por uso del agua para transporte su empleo para navegación de cualquier tipo de embarcación o para la movilización de materiales por contacto directo. El uso estético del agua es para la armonización y embellecimiento del paisaje.

2.6.1.2 Contaminación del agua

La modificación de la calidad del agua a consecuencia de las actividades humanas y naturales, las cuales producen alteraciones en las condiciones fisicoquímicas y biológicas del agua y alteran su desempeño Bio - funcional limitando su uso con el deterioro del valor ecológico del recurso hídrico, se denominan contaminación; un contaminante es un factor o sustancia que genera esta alteración.

Un contaminante no siempre es añadido al recurso hídrico, lo que hace realmente peligroso o nocivo es el aumento o reducción de su concentración en el medio, ya sea por adición del mismo o por una reducción de otras sustancias o agentes externos en un lugar indebido y en un momento inoportuno (IDEAM, 2001).

Las principales causas de contaminación del recurso hídrico son:

- Adición de sustancias y vertimientos de aguas residuales de origen urbano, industrial, agropecuario y asociados al transporte (agua de lastre).
- Contaminación de la atmósfera que modifica la calidad de las aguas lluvias, y por ende la superficie del suelo es afectada por las aguas de escurrimiento.
- Disposición inadecuada de residuos sólidos, lixiviados de rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto.
- Derrames accidentales e infiltración de suelos.

Dentro de las distintas variables fisicoquímicas y microbiológicas que evidencian algún grado de contaminación del recurso hídrico podemos encontrar las siguientes:

DBO₅: La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) es un análisis usado para determinar los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas naturales, residuales domésticas e industriales. La temperatura seleccionada es de $20 \pm 1,0$ °C que es un valor de referencia en los cuerpos naturales de agua.

Aunque para la oxidación completa se requiere un tiempo infinito, en términos prácticos se considera que la reacción se completa en 20 días; sin embargo por ser este un período muy largo, la experiencia ha demostrado que aproximadamente entre el 70 y 80 % de la DBO₅ se ejerce en 5 días, razón por la cual el análisis se ha establecido en este tiempo.

Es necesario que en la muestra esté presente una población de microorganismos capaces de oxidar la materia orgánica biodegradable. Las aguas residuales domésticas no cloradas, los efluentes no desinfectados de plantas de tratamiento biológico y las aguas superficiales que reciben descargas residuales contienen poblaciones satisfactorias de microorganismos.

Sólidos Suspendidos Totales: Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se consideran como la cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de 0,45 micras y hace referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual (CAN).

Coliformes Totales: Las aguas tratadas impropia o sin protección sanitaria pueden contener microorganismos patógenos (capaces de producir enfermedad). Las bacterias Coliformes que no son esencialmente patógenas se encuentran a menudo junto con los microorganismos patógenos y son un buen índice del grado de seguridad bacteriológica de una muestra de agua.

El grupo coliformes incluye las bacterias en forma bacilar, aeróbicas o anaeróbicas facultativas, gram negativas, no esporógenas, fermentadoras de lactosa y productoras de gas a 35 ± 2 °C por 24 horas.

En aguas contaminadas las bacterias coliformes se hallan en densidades proporcionales al grado de contaminación fecal, lo cual nos indica que pueden encontrarse otros patógenos y que dicha agua es insegura para el consumo humano; generalmente esta contaminación puede ser accidental, pero más frecuentemente se debe a la evacuación sin control de aguas residuales y otros desechos líquidos procedentes del uso doméstico del agua o de desechos industriales.

Turbiedad: Se define como la propiedad óptica de una suspensión, la cual hace que la luz se disperse o absorba en lugar de transmitirse en línea recta, a través de la muestra. La turbiedad en el agua se debe a la presencia de partículas de material suspendido como arcilla, lodo, materia orgánica o inorgánica finamente dividida, plancton y otros microorganismos.

Las principales fuentes de contaminación originadas por el hombre que incrementa la turbiedad en los cuerpos de agua son: los cienos de las granjas, los residuos de construcciones, la operación de minas, los polvos provenientes de caminos sin asfaltar, los desechos humanos y los efluentes de las plantas de tratamiento.

- La turbiedad excesiva reduce la penetración de la luz. Al disminuir esta se afecta la producción de oxígeno por fotosíntesis.
- Cuando los valores de turbiedad llegan a 200 o más unidades se pone en peligro el sistema ecológico.
- En el agua potable las turbiedades mayores a cinco unidades son detectables visualmente, lo que produce en el consumidor poco deseo de ingerirla y utilizarla en sus alimentos.
- Al aumentar la turbiedad aumenta el costo de tratamiento de las aguas (se remueve mediante coagulación, sedimentación y filtración).
- La turbiedad interfiere en la desinfección, pues en aguas que contengan sólidos muchos organismos patógenos quedan oprimidos en estas partículas, protegiéndose del desinfectante.

Oxígeno disuelto: El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aeróbicos así como para otras formas de vida aerobia. No obstante, el oxígeno es ligeramente soluble en el agua. La cantidad real de oxígeno que puede estar presente en la solución está determinada por: a) la solubilidad del gas, b) la presión parcial del gas en la atmósfera, c) la temperatura y d) la pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos, etc.). La interrelación de estas variables debe ser consultada en textos apropiados para conocer los efectos de la temperatura y la salinidad sobre la concentración de oxígeno disuelto.

Mercurio (Metales Pesados): El mercurio es un metal que no posee función nutritiva o bioquímica alguna. Los mecanismos biológicos para eliminarlo son deficientes, y por eso, según lo que se sabe hasta el momento, el mercurio se biomagnifica (sus concentraciones aumentan) a lo largo de la cadena alimenticia (WHO 1989, ICME 1995). En bajas concentraciones, es altamente tóxico tanto para animales como para plantas; en consecuencia, cualquier aumento por encima de los niveles naturales podría tener efectos perjudiciales sobre un organismo expuesto (USPHS 1997). Aún si cesan inmediatamente los vertidos de mercurio, la capacidad de retenerlos por parte de los sedimentos puede demorar la eliminación de la contaminación por muchos años. Aunque hay evidencias que vinculan los niveles de mercurio total en el medio ambiente con los presentes en predadores superiores como los peces, el eje de la preocupación es la acumulación de metil mercurio (MeHg). El mercurio inorgánico puede ser metilado por microorganismos naturales del suelo, los sedimentos, el agua dulce y salada; en este proceso intervienen diversas poblaciones microbianas en condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas (USPHS 1997). Se acepta ampliamente que las formas orgánicas de Hg son incluso más tóxicas que las inorgánicas.

La forma orgánica más común del mercurio es el metil mercurio. Posee una alta solubilidad en lípidos y por eso atraviesa fácilmente las membranas celulares, ingresando con rapidez en la cadena alimenticia acuática. También tiene una vida media elevada, y debido al aumento en la longevidad de los predadores superiores en relación con estas otras propiedades observadas, brinda uno de los raros ejemplos de biomagnificación de metales en cadenas alimenticias. La bioacumulación de mercurio metílico en las cadenas alimenticias acuáticas resulta interesante porque por lo general constituyen la fuente más importante de exposición humana no laboral al compuesto (EPA 1984, USPHS 1997).

2.6.1.3 Índices de Calidad y de Contaminación

Los índices de calidad del agua consisten básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad del

agua. El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color.¹⁵

Su ventaja radica en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información.

Los índices pueden ser usados para mejorar o aumentar la información de calidad de agua y su difusión comunicativa, sin embargo, no pretenden reemplazar los medios de transmisión existente. De acuerdo con Ott (1978) los posibles usos de los índices son seis:

1. Manejo del recurso: En este caso los índices pueden proveer información a personas que toman decisiones sobre las prioridades del recurso.
2. Clasificación de áreas: Los índices son usados para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.
3. Aplicación de la normatividad: En situaciones específicas y de interés es posible determinar si se está sobrepasando la normatividad ambiental y las políticas existentes.
4. Análisis de la tendencia: El análisis de los índices en un periodo de tiempo pueden mostrar si la calidad ambiental está disminuyendo o mejorando.
5. Información pública: En este sentido los índices pueden tener utilidad en acciones de concientización y educación ambiental.
6. Investigación científica: Tiene el propósito de simplificar una gran cantidad de datos de manera que se pueda analizar fácilmente y proporcionar una visión de los fenómenos medioambientales.

Uno de los principales instrumentos establecidos para evaluar la contaminación del recurso hídrico son los índices de contaminación, los cuales son definidos como los criterios de evaluación del nivel de contaminación presente en el agua por uno o varios parámetros, con referencias nacionales e internacionales para distintos procesos antropogénicos y naturales; estos fueron desarrollados inicialmente por Ramírez *et al.* (1997), a partir del análisis de gran cantidad de información fisicoquímica resultante de diferentes estudios limnológicos relacionados en la industria del petróleo (1998).

A partir de este instrumento se han puesto en marcha a través de distintas autoridades ambientales e instituciones de investigación varios estudios para definir los criterios básicos de control y vigilancia de las afectaciones al recurso hídrico y permitir realizar una gestión adecuada en la planificación y administración del recurso con el objetivo de tomar las medidas necesarias en casos de contingencia y emergencias relacionadas a la contaminación de las fuentes.

¹⁵ Universidad de Pamplona, Indicadores de la calidad del agua

2.6.1.3.1 Índices de contaminación ICO

Los ICO's son criterios de evaluación del nivel de contaminación del agua desarrollados en Colombia por Ramírez *et al.* (1997), a partir de un "Análisis de los Componentes Principales" (ACP) y aplicados a una destacada cantidad de información fisicoquímica resultante de diferentes estudios limnológicos relacionados con la industria del petróleo. En este estudio se definieron cuatro índices de contaminación mediante los cuales es posible concluir sobre aspectos como mineralización, materia orgánica, sólidos suspendidos y nivel trófico. Estos índices definen el grado de contaminación de un cuerpo de agua mediante un número, que se encuentra entre 0 (muy bajo nivel de contaminación) y 1 (muy alto nivel de contaminación).

Para la formulación de los ICO's, Ramírez *et al.* (1997) eligieron algunas variables que consideraron relevantes por su papel ecológico o porque en sí mismas conjugan simultáneamente el papel de las distintas variables; sobre ellas se observaron las correlaciones que exhibieron en los diferentes estudios previamente referidos. Dichas variables fueron: Conductividad eléctrica, Sólidos Suspendidos, porcentaje de saturación de Oxígeno, DBO₅, Fósforo Total, Coliformes Totales y pH (Universidad del Valle – CVC, 2004).

Según Fernández et al. (2003) los ICO's presentan una ventaja respecto a los ICA ya que desagregan los tipos de contaminación y evitan que unas variables o problemas ambientales de contaminación queden enmascarados en torno a otras variables, lo que permite una mejor visualización de estos problemas en un sistema hídrico.

A manera de ejemplo se puede mencionar el caso de un río o vertimiento con alta temperatura, altas concentraciones de sólidos inorgánicos y turbiedad, el cual representa una condición ambiental diferente a otro río con alta concentración orgánica que se expresa en una gran DBO₅ y un elevado nivel de coliformes; no obstante uno y otro pueden conducir a un mismo ICA.

Los índices de contaminación que se evaluaron inicialmente en el río Cabí son el Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) y el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO).

2.6.1.3.2 Parámetros fisicoquímicos utilizados en el cálculo de los ICO

ICOMO: Índice de contaminación por materia orgánica, que evidencia la afectación de la materia orgánica en un cuerpo de agua; esta representa variables de contaminación como nitrógeno amoniacal, nitritos, fósforo, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO y Coliformes Fecales y Totales en función de la DBO₅, Coliformes Totales y porcentaje de saturación de Oxígeno disuelto. Las dos primeras variables reflejan fuentes diversas de contaminación orgánica, y la tercera expresa la respuesta ambiental del cuerpo de agua a este tipo de polución.

ICOSUS: se expresa en función de los sólidos suspendidos (mg/l).

2.6.1.3.3 Cálculo de los subíndices (I) de cada parámetro de los ICO

ICOMO

Para calcular el valor del ICOMO se emplea la siguiente expresión

$$\text{ICOMO} = 1/3 (\text{IDBO}_5 + \text{I Colif. Total} + \text{I \% de saturación de Oxígeno})$$

Donde:

$$I_{DBO5} = -0,05 + 0,70 \log (DBO5)$$

Si $DBO5 > 30 \text{ mg/l}$, entonces $I_{DBO5} = 1$

Si $DBO5 < 2 \text{ mg/l}$, entonces $I_{DBO5} = 0$

$$I_{\text{Colif. Total}} = -1,44 + 0,56 \log (\text{Colif Total})$$

Si Coliformes Totales $> 20000 \text{ NMP/100 ml}$, entonces $I_{\text{Colif Total}} = 1$

Si Coliformes Totales $< 500 \text{ NMP/100 ml}$, entonces $I_{\text{Colif Total}} = 0$

$$I_{\text{Oxígeno}} = 1 - 0,01 \text{ Oxígeno (\%)}$$

Si Oxígeno (%) mayor al 100%, $I_{\text{Oxígeno\%}} = 0$

En sistemas lóticos, los porcentajes de saturación de oxígeno mayores a 100 son ventajosos e indican una buena capacidad de oxigenación. En sistemas lénticos pueden reflejar problemas de eutrofización. Para estos últimos puede usarse:

$$I_{\text{Oxígeno}} = 0,01 * \text{Oxígeno (\%)} - 1$$

ICOSUS: Representa la afectación de los sólidos suspendidos totales sobre un cuerpo de agua, de fuentes orgánicas y de fuentes inorgánicas, sean fuentes naturales o antropogénicas.

Para el cálculo del ICOSUS no hay necesidad de determinar ningún subíndice, y sólo se aplica la ecuación matemática respectiva teniendo en cuenta ciertos valores de concentraciones límite de este parámetro.

$$\mathbf{ICOSUS = -0,02 + 0,003 \text{ Sólidos Suspendidos}}$$

Si sólidos suspendidos son mayores a 340 mg/l , entonces $ICOSUS = 1$

Si sólidos suspendidos son menores a 10 mg/l , entonces $ICOSUS = 0$

2.6.1.3.4 Clasificación de la calidad del agua según el valor de los ICO

Ramírez et al. (1997), propusieron unos rangos para realizar la clasificación de la contaminación del agua, mediante los valores de los Índices de Contaminación ICO. Dicha clasificación se presenta en la siguiente (Tabla 13):

Tabla 13. Rangos de la clasificación de la contaminación del agua mediante los valores de los índices ICO

VALOR DEL ICO	CLASIFICACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN
0 – 0,2	Muy baja
0,2 – 0,4	Baja
0,4 – 0,6	Media
0,6 – 0,8	Alta
0,8 – 1,0	Muy Alta

Fuente. CETESB, 2002

2.6.1.4 Métodos de muestreo para aguas superficiales continentales y marinas, subterráneas, lluvias y de consumo

2.6.1.4.1 Tipos de muestreo

Existen dos tipos de muestreo, muestreo manual y muestreo automático.

Muestreo manual: El muestreo manual se realiza cuando se tienen sitios de fácil acceso o aquellos que por medio de ciertas adaptaciones puedan facilitar la toma de muestras. La ventaja de éste tipo de muestreo es permitir al encargado de tomar la muestra observar los cambios en las características del agua en cuanto a sustancias flotantes, color, olor, aumento o disminución de caudales, etc.

Muestreo automático: El muestreo automático es aconsejable cuando los sitios son de difícil acceso o cuando se justifica y se tiene la facilidad de contar con un muestreador automático. Tiene como ventaja más precisión en la toma de muestras y como desventaja la complejidad de su montaje y calibración, además de que requieren revisiones continuas para evitar atascamientos u otras fallas.

Existen tres tipos de muestras: puntual, compuesta e integrada.

Muestra puntual es una muestra tomada en un lugar representativo en cualquier momento, la muestra compuesta se define como la mezcla de varias muestras puntuales tomadas en la misma fuente, a intervalos programados y por un período de tiempo definido las cuales pueden tener volúmenes iguales o ser proporcionales al caudal durante el período de muestras. La muestra integrada es aquella que se forma por la mezcla de muestras puntuales tomadas en distintos puntos simultáneamente, o lo más cerca posible.

La frecuencia de muestreo se define por el tipo de cuerpo de agua que se quiera monitorear o los objetivos que se persigan¹⁶.

2.6.1.5 Características de la operación minera aurífera aluvial

2.6.1.5.1 Prospección y exploración

Las actividades de exploración permiten planear adecuadamente la explotación, con el fin de obtener

¹⁶ Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, IDEAM

una mayor eficacia productiva y evitar el alto desperdicio del mineral por falta de conocimiento de las características del yacimiento.

La prospección geológica tiene como objetivo la localización de anomalías geológicas, con la generación de depósitos minerales; en la prospección se define la geología, se evalúan los recursos y reservas que albergan los yacimientos. En esta etapa se usan métodos geológicos, geoquímicos, aéreos (teledetección) (Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial, 2002).

En la etapa de exploración se realizan muestreos superficiales (apiques, trincheras), en la minería de aluvión, y se localizan los sitios del depósito mineral; el resultado de esta etapa es la ubicación de áreas favorables en las que se centra una investigación más detallada, o en muchos de los casos se empieza a extraer el material con la ayuda de herramientas o equipos pesados.

2.6.1.5.2 Explotación

Dependiendo el ambiente geológico en el cual se encuentre la reserva aurífera, así será el sistema de aprovechamiento del mineral, teniendo en cuenta que pueden influir factores como profundidad, forma e inclinación de los depósitos, distribución de leyes del mineral, características geo mecánicas de las rocas encajantes y del propio mineral, condiciones físicas y culturales de la zona, magnitud de la operación y maquinaria utilizada.

En el caso de la minería aurífera se utilizan como sistemas de explotación el subterráneo en la minería de filón y a cielo abierto en las explotaciones aluviales.

La fase de explotación incluye las etapas de planeamiento, montaje, desarrollo, beneficio, transformación y cierre. (Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial, 2002).

El oro y platino extraído y beneficiado en la subcuenca del río Cabí, municipio de Quibdó, es de naturaleza aluvial, destacándose el alto volumen de material procesado para la recuperación de los metales preciosos; la operación se realiza en forma mecanizada, trabajando con retroexcavadoras que en proceso de cadena extraen el material desde un nivel inferior para alimentarlo al concentrador estático (clasificadora en Z), en los cuales se tienen altura de la tolva de 5 m, pendientes que oscilan en el 10% y anchos de canalón que fluctúan de 1,20 m. Los tapetes utilizados para retener los metales pesados son costales de fique y costales de fibra sintética sobre los cuales se acondiciona la malla metálica denominada “metal expandido vena 13”¹⁷.

También se utiliza en este proceso dragas de succión mecánica, que realizan el mismo movimiento de material que las retroexcavadoras, directamente sobre el lecho del río, trasladándolo a un clasificador horizontal de 3 m con un tapete tipo costal para la retención del mineral a aprovechar.

El proceso de beneficio de material normalmente se realiza 1 o 2 veces por semana, previa “pesquisa” de los tapetes de la cabecera del canalón y se procede a reunir el concentrado para realizar la separación oro-platino de la “Jagua”.

Debido a la similitud en la densidad de estos metales (Oro: 18 a 19,3 g/cm³ y Platino: 19,3 a 21,1 g/cm³) ambos metales se retienen en el canalón, y en forma física no es posible su separación, razón por la cual el mercurio es utilizado básicamente como medio para separar el oro del platino; al adicionarse el

¹⁷ Proyecto “ Aplicación de Técnicas y Prácticas de producción más limpia en la minería auro – platinífera en el departamento del Chocó” Codechocó 2014

mercurio, empieza a formarse la amalgama de oro-mercurio, dejando el platino libre para su recuperación.

En la búsqueda de aumentar la densidad del mineral (oro y plata), en este proceso se adiciona mercurio metálico (azogue) para la amalgamación y concentración del oro, al acumular estas partículas, y fijar una masa de mayores proporciones a ser retenidas por el tapete. En este proceso el mercurio es adicionado al material en el paso por el clasificador, en donde además se adiciona agua para la fluidización del material y que se genere la separación adecuada.

2.6.1.5.3 Aspectos ambientales del proceso de extracción del oro

En el proceso de extracción de oro aluvial se genera la siguiente problemática sobre el recurso hídrico:

- Adición de sólidos al cuerpo de agua, surgidos por la remoción del lecho del río o por la remoción del material y el vertido de las aguas salientes del proceso a los cuerpos hídricos.
- Aprovechamiento de los recursos hídricos, mineros y madereros sin ningún tipo de control.
- Disminución de recursos pesqueros disponibles.
- Contaminación hídrica y de suelos por vertimiento de mercurio y otros efluentes mineros.
- Vertimientos de combustibles y lubricantes a los cuerpos hídricos.

Todos estos problemas asociados a los conflictos de orden social y público que se relacionan con la actividad minera a nivel regional y local dificultan que esta actividad se desarrolle adecuadamente y que la protección del ambiente no sea un factor determinante para el minero y para el propietario de la tierra donde se desarrolla la actividad.

La actividad minera en el departamento del Chocó se ha expandido por las principales cuencas hidrográficas de la región, abarcando la cuenca del río San Juan y la cuenca del río Atrato, esta última donde se ubica la zona de este estudio que es la subcuenca del río Cabí.

2.6.2 Marco normativo

A continuación se presentan las normas mineras y ambientales más relevantes en el tema del estudio: (Tablas 14 y 15)

Tabla 14. Normatividad Minera en Colombia

CLASE DE NORMA	NUMERO	FECHA DE EXPEDICION	MATERIA DE APLICACION
Ley	685	15 de agosto de 2001	Actual Código de Minas, el cual reglamenta el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables y el fomento de la explotación de los recursos mineros estatales y privados en Colombia.
Ley	1382	09 de febrero de 2010	Reforma algunos artículos de la Ley 685 de 2001, declarada inexecutable a partir de 2 años por la sentencia C-366 del 11 de mayo de 2011, por no haber sido consultadas las comunidades indígenas y afro descendientes, vigentes hasta el 10/05/2013, aplica solo para los contratos de concesión nacidos bajo su vigencia.
Decreto	2715	28 de julio de 2010	Define los términos de la minería tradicional, legalización minera con mini dragas, autorizaciones temporales, prórroga de los contratos de concesión minera.
Ley	1450	16 de junio de 2011	Plan Nacional de Desarrollo, es la herramienta de planificación del desarrollo nacional, introduce algunas modificaciones sobre multas, reservas mineras, prohibiciones a cierto tipo de herramientas como dragas y retroexcavadoras en minería tradicional, estructura las líneas del Plan Nacional de Ordenamiento Minero, adiciona causales de caducidad y suspensión
Decreto	1970	21 de septiembre de 2012	Trámite y requisitos para las solicitudes, visitas de viabilización.
Decreto	2235	30 de octubre de 2012	Dstrucción de maquinaria pesada y sus partes en actividades de exploración y explotación de minerales sin las autorizaciones y exigencias previstas en la ley
Resolución	205	26 de marzo de 2013	Se establece el procedimiento para la declaración y delimitación de áreas de reservas especial de que trata el artículo 31 de la Ley 685 de 2001.
Decreto	933	9 de mayo de 2013	Define la minería tradicional, tramite para la formalización de mineros tradicionales, causales de rechazo.
Ley	1658	15 de julio de 2013	Disposiciones para la comercialización y los usos de mercurio, incentivos para la reducción, eliminación, incentivos para la formalización, subcontrato de formalización minera, devolución de áreas para la formalización minera, beneficio para la formalización, establecimiento de sello minero ambiental colombiano.

Fuente. Normatividad colombiana

Tabla 15. Normatividad Ambiental en Colombia

LEGISLACION AMBIENTAL	
Ley 2 del 16 de diciembre de 1959	Mediante la cual se declaran 7 zonas de reservas, que abarcan 51.376.621 hectáreas para el desarrollo de la economía forestal, la conservación de las aguas, los suelos y la fauna silvestre. Ellas son: 1. Zona de Reserva Forestal del Pacífico, con un área de 8.010.504 hectáreas. 2. Zona de Reserva Forestal Central, con un área de 1.543.707 hectáreas. 3. Zona de Reserva Forestal del río Magdalena, con un área de 2.155.591 hectáreas. 4. Zona de Reserva Forestal de la Sierra Nevada de Santa Marta, con un área de 539.215 hectáreas. 5. Zona de Reserva Forestal de la Sierra de los Motilones, con un área de 552.691 hectáreas. 6. Zona de Reserva Forestal del Cocuy, con un área de 730.389 hectáreas. 7. Zona de Reserva Forestal de la Amazonia. Con un área de 37.844.524 hectáreas.
Decreto Ley 2811 del 28 de diciembre de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 99 del 22 de diciembre de 1993	Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.
Ley 1333 del 21 de julio de 2009	Régimen Sancionatorio Ambiental
Decreto 2820 del 5 de agosto de 2010	Por el cual se reglamenta el título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
Decreto 2372 del 30 de julio de 2010	Por el cual se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y Decreto Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones.
Resolución 918 del 20 de mayo de 2011	Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para la sustracción de áreas en las reservas forestales nacionales y regionales, para el desarrollo de actividades considerando de utilidad pública o interés social y se adoptan otras determinaciones.
Decreto 3573 del 27 de septiembre de 2011	Por el cual se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales-ANLA- y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1640 de 2012	Por el cual se reglamenta la ordenación de cuencas hidrográficas
Decreto 953 del 17 de mayo de 2013	Reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993, modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011 con el fin de promover la conservación y recuperación de las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales, mediante la adquisición y mantenimiento de dichas áreas y la financiación de los esquemas de pago por servicios ambientales.
Resolución 705 del 28 de junio de 2013	Se establecen unas Reservas de Recursos Naturales de manera temporal.
Resolución 761 del 12 de julio de 2013	Se adopta una cartografía oficial integrada de las reservas naturales establecidas en la Resolución 705 de 2013 denominada “Reservas de Recursos Naturales Temporales”
Decreto 2041 septiembre de 2014	Por el cual se reglamenta el título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales incluidas las licencias que debe otorgar la autoridad ambiental regional en el tema minero
Resolución 631 de 2015	Por el cual se reglamenta el Decreto 3930 de 2010 en relación a las características de los vertimientos y se establecen los parámetros y valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua

Fuente. Normatividad colombiana

3 METODOLOGIA

3.1 Diseño metodológico de la investigación

La investigación realizada en este trabajo de grado logró construir a través de información primaria y secundaria un instrumento que permita determinar y cualificar la afectación que realiza la actividad minera sobre un cuerpo hídrico, en este caso el río Cabí, fuente abastecedora del acueducto municipal de Quibdó – Chocó, y a través de este instrumento contribuir a proyectar medidas de control, prevención y administración del recurso hídrico.

La investigación delimitó el área de estudio como el tramo principal del río Cabí para la recolección de información primaria, desde la desembocadura de la quebrada Guadalupe, hasta la desembocadura del río Cabí al río Atrato; el estudio se realizó de noviembre de 2013 a marzo de 2015, en donde se implementaron las jornadas de muestreo y levantamiento de información.

La información secundaria que se revisó fue referente a la calidad y cantidad del recurso hídrico, localización de la fuente, historia de las actividades desarrolladas en la fuente o sobre la fuente, historia minera en la región y en el área de influencia de la subcuenca, tributarios y poblaciones asentadas, reglamentos e instrumentos de planificación consolidados y/o reglamentados sobre la fuente, además de las bases necesarias y experiencias relacionadas sobre los instrumentos de cualificación del estado de cuencas y ríos que se puedan aplicar a la problemática de la fuente evaluada.

La información primaria permitió obtener un diagnóstico real del estado en calidad, cantidad y actividades que se realizan actualmente sobre la subcuenca del río Cabí, realizando dos muestreos de calidad, priorizando la información necesaria para construir el instrumento de cualificación y un muestreo de cantidad que asoció la cualificación a la masa de agua aportante en todo momento de la subcuenca.

La información obtenida de los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos fue analizada a través de la comparación con las normatividad colombiana actual vigente (Decreto 3930 de 2010, Resolución 613 de 2015), además se realizó la evaluación de la información a través de los índices de calidad, de contaminación por materia orgánica, y por sólidos suspendidos totales.

3.2 Población y muestra

Para la toma de muestras se utilizaron los protocolos establecidos por el IDEAM y Codechocó para tal fin, basados en lo establecido en el Standard Methods for the examination of water and wastewater edición 22 de 2012; para la construcción del índice de contaminación por contaminación minera se definieron los parámetros límites de esta actividad y se siguió la metodología utilizada por Ramírez et al. (1997) para la construcción de otros índices de contaminación a nivel nacional, además del soporte bibliográfico adecuado de otros índices de contaminación y calidad similares propuestos en otras partes del mundo.

La cantidad de muestras que se tomaron se estableció según la disponibilidad y accesibilidad a los sitios de muestreo y teniendo en cuenta la frecuencia de monitoreo que realiza la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, donde se realizan dos monitoreos anuales, además se programó un muestreo adicional para la validación del instrumento formulado.

A continuación se describen las variables fisicoquímicas y que evalúa actualmente la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, a través de su programa de monitoreo del recurso hídrico, de la cual se tiene información disponible durante varios períodos de muestreo desde el año 2006 a la fecha (Tabla 16).

Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del programa de muestreo de calidad de aguas de Codechocó

Parámetro	Lugar	Método	Equipos	Incertidumbre del Método
Temperatura	In – situ	Potenciómetro	Termómetro digital	±0,01°
Oxígeno Disuelto	In – situ	Electrodo de Membrana	Oxímetro WTW315 i	0,1
pH	In – situ	Potenciómetro	PH metro Sevenmulti	0,01
Conductividad Eléctrica	In – situ	Potenciómetro	PH metro Sevenmulti	1,01
Turbidez	Laboratorio	Nefelómetro	Turbidímetro HACH 2100	0,233
Cloruros	Laboratorio	Titulométrico	Titulador SCHOTT	-
Alcalinidad Total	Laboratorio	Titulométrico	Titulador SCHOTT	6
Dureza total	Laboratorio	Titulométrico	Titulador SCHOTT	2
Nitratos	Laboratorio	Reducción con cadmio	Espectrofotómetro Genesys 6	0,01
DBO ₅	Laboratorio	Winkler	Encubadora E&Q	2
Sólidos Suspendidos Totales	Laboratorio	Gravimétrico	Sistema de filtración sartorius	10,38
Sólidos Totales	Laboratorio	Gravimétrico	Sistema de filtración sartorius	60
Fosfatos	Laboratorio	Ácido Ascórbico	Espectrofotómetro Genesys 6	0,02
Coliformes Totales	Laboratorio	Filtración por membrana/Número más Probable	Sistema Quanty Tray	-
Coliformes Fecales	Laboratorio	Filtración por membrana/Número más Probable	Sistema Quanty Tray	-

Fuente. Codechocó.

Los parámetros evaluados se definieron para analizar la calidad de agua superficial con fines de definir, limitar y preestablecer los usos establecidos en el Decreto 1594 de 1984 y reiterados en el Decreto 3930 de 2010.

El volumen de agua de cada muestra depende de lo requerido en el laboratorio para determinar los analitos en el agua, como mínimo se requiere un (1) litro de muestra asociado a cada uno de los recipientes que se utilicen en el muestreo.

La preservación de las muestras depende del tipo de analito que se va a determinar en el proceso de muestreo, esta preservación garantiza en el laboratorio la máxima representatividad del analito evidenciado en campo y en el laboratorio, por eso es muy importante tomar las precauciones adecuadas para garantizar que las muestras lleguen en los tiempos y las condiciones adecuadas para su análisis.

La preservación, recipiente y volumen de muestra para cada tipo de análisis se encuentran en el anexo 1. Para el desarrollo del trabajo de investigación se utilizó el muestreo manual en cada uno de los puntos de monitoreo, las muestras que se tomaron son de tipo puntual.

Después de aplicado el índice y evaluado con valores reales de calidad del recurso hídrico se construyó una base de indicadores cuantitativos y cualitativos para definir los criterios de los instrumentos de control a establecer en la evaluación de las cuencas, para lo cual primaron los normativos implementados por las autoridades nacionales, por los institutos de investigación a nivel nacional y las experiencias de administración de las autoridades ambientales.

Para el diseño del instrumento que permitió evaluar la contaminación asociada a la actividad minera aurífera, se tiene en cuenta el procedimiento metodológico descrito por Ramírez et (1997) el cual consta de:

- Selección de los parámetros objeto de criterio de evaluación de la calidad que se relacionen con el desarrollo de la actividad descrita o la sustancia a definir; para esta selección se utilizaron criterios objetivos y la aplicación de la técnica estadística multivariada del análisis de componentes principales (ACP), la cual tiene como propósito reducir numerosas variables a un mínimo de componentes principales, explicando una correlación de varianza (Johnson and Wichern, 1982).
- La relación del ACP con la formulación de los índices de contaminación no estriba en sus resultados, sino en el cálculo de matrices de correlación entre todas las variables, lo que permite definir asociaciones entre ellas (Margalef, 1983; Ramírez, 1988; George et al. ,1991).
- Asignación de valores de contaminación entre cero y uno en la escala de las variables.
- Selección de la ecuación que permita relacionar el valor de la variable y su incidencia en la contaminación.
- Aplicación del análisis de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados ordinarios a la relación entre el índice y el parámetro.
- Ajuste de la ecuación estimada.

Esta metodología se implementó para el establecimiento de los índices de contaminación utilizados actualmente para la evaluación de la mineralización, eutrofización, materia orgánica, contaminación por pH y contaminación por temperatura desarrollados por *Ramírez y Viña 1998*, los cuales han sido utilizados como instrumentos de evaluación y planificación de la gestión del recurso hídrico en distintas autoridades ambientales del país.

Después de definir las variables fisicoquímicas, las ecuaciones y los valores de los índices, se realizó un nuevo muestreo donde se priorizó el monitoreo de las variables seleccionadas para la construcción del índice de contaminación minera formulado, como son mercurio, turbiedad y sólidos suspendidos totales, y se realizó una corrida del modelo establecido en una base de Excel para la cuantificación y cualificación de los resultados del cálculo del índice, y así determinar el estado actual de la contaminación asociada a la minería aurífera aluvial sobre el río Cabí.

Finalmente se planteó los lineamientos de evaluación e interpretación cualitativa de los valores arrojados en el cálculo del índice de contaminación para las autoridades ambientales y sanitarias de la región, en pro de facilitar la toma de decisiones y de potenciar las medidas de control que se puedan tomar para el cuidado del recurso hídrico de la cuenca y de la comunidad asentada en ella.

3.3 Asignación de los valores y selección de las ecuaciones para el establecimiento de los subíndices

Para la asignación de los valores relacionados con el índice de contaminación por la actividad minera, los parámetros fisicoquímico seleccionados y el desarrollo de los subíndices se tienen en cuenta diversos aspectos como son:

- Los valores máximos y mínimos que son admitidos para los extremos del Índice, cuantificándose el valor máximo como “1” y el valor mínimo como “0”.
- El valor mínimo corresponden a los asociados a los mínimos posibles a determinar por las metodologías analíticas actuales y/o a valores que no representen riesgo o afectación en el cuerpo hídrico para cualquier uso avalado en la normatividad colombiana vigente.
- El valor máximo establecido para cada parámetro, corresponde al valor desde el cual se determine una concentración que sea altamente nociva, sin descartar que pueden existir valores mayores, los cuales tendieran como referencia al valor más alto del índice “1”.
- Se tendrán en cuenta referencias de otros índices (Calidad y Contaminación) y de usos del agua y los resultados de la aplicación del análisis de componentes principales ACP para establecer los Subíndices de Contaminación de Turbiedad y de Sólidos Suspendidos Totales ya que existen soportes bibliográficos verificados de la aplicación como parámetros de contaminación; para el subíndice de mercurio se buscaron las referencias bibliográficas y la información necesaria para su construcción.
- Para cada subíndice de la variable seleccionada se proyecta una curva con los valores ajustados ubicando en el eje de las abscisas (X) la relación de los valores del Parámetro y en el eje de las ordenadas (Y) los valores asociados al Índice los cuales van desde “0” hasta “1”, como valor máximo a calcular.
- Sobre los valores resultantes para cada subíndice se lleva a cabo el análisis de regresión por mínimos cuadrados, con la definición de la pendiente de la curva y la estimación por modelos lineales, exponenciales, logarítmicos, parabólicos, de potencia y recíproco, seleccionando en cada caso las relaciones estadísticas validas con un 95% de confiabilidad y que además presenten el coeficiente de correlación más cercano a “1” (r^2).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diagnóstico de la actividad minera en el área de la cuenca del río Cabí

En una visita realizada en conjunto con personal técnico de la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, Codechocó, los días 13 de abril de 2013 y 27 de julio de 2014, se pudo identificar aproximadamente 17 entables mineros (13 dragas y 4 retroexcavadora), (Figura 5, las cuales realizan la actividad extractiva directamente sobre el lecho del río, en su tramo principal y algunos tributarios, además se pudo denotar que se realizaban los vertimientos directos sobre el tramo principal del río Cabí. Todas estas minas se ubican aguas arriba de la bocatoma del acueducto municipal de Quibdó, el cual abastece a más del 40% de la población del municipio¹⁸(Tabla 17)

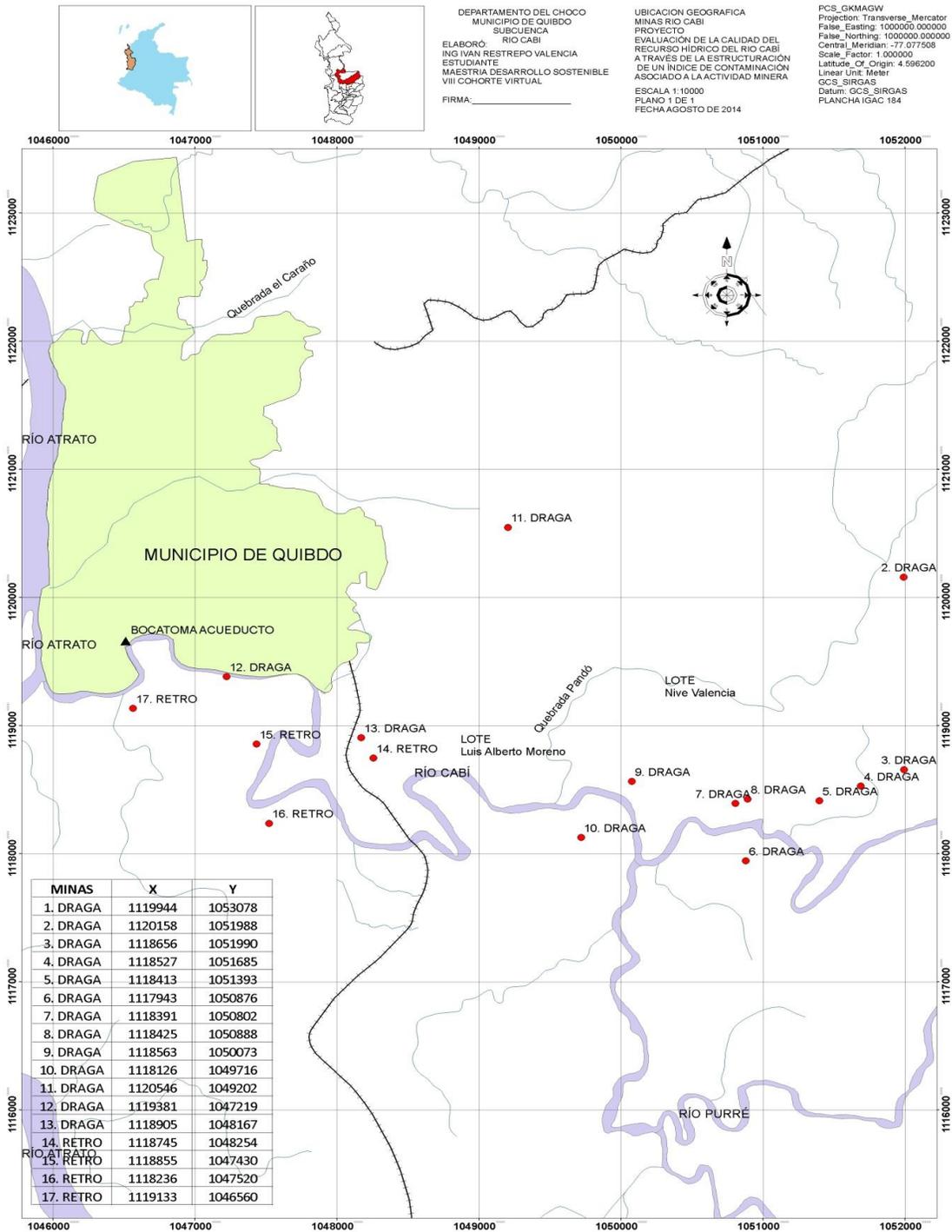
Tabla 17. Ubicación de minas en el tramo principal del río Cabí

MINAS	X	Y
1. DRAGA	1119944	1053078
2. DRAGA	1120158	1051988
3. DRAGA	1118656	1051990
4. DRAGA	1118527	1051685
5. DRAGA	1118413	1051393
6. DRAGA	1117943	1050876
7. DRAGA	1118391	1050802
8. DRAGA	1118425	1050888
9. DRAGA	1118563	1050073
10. DRAGA	1118126	1049716
11. DRAGA	1120546	1049202
12. DRAGA	1119381	1047219
13. DRAGA	1118905	1048167
14. RETRO	1118745	1048254
15. RETRO	1118855	1047430
16. RETRO	1118236	1047520
17. RETRO	1119133	1046560

Fuente. Autor - Codechocó 2013-2014. Datum Magna Sirgas

¹⁸ Datos suministrados por EPM Aguas del Atrato a Codechocó, en el proceso de Pago de Tasa por utilización de aguas 2013

Figura 5. Ubicación minas sobre la cuenca del río Cabí – Municipio de Quibdó



Fuente. Autor

En el siguiente registro gráfico se pueden observar las condiciones de operación de la actividad minera con retroexcavadoras y dragas, además de las condiciones del tramo principal del río Cabí (Imagen 2-7), y de sus vertimientos se visualiza la adición de sólidos suspendidos.

Imagen 2. Dragas artesanales para la extracción del metal en el río Cabi



Fuente. Codechocó – Autor

Imagen 3. Draga mecanizada en el río Cabi



Fuente. Codechocó – Autor

Imagen 4. Entable minero a la orilla del río Cabí, método de extracción con motobomba



Fuente. Codechocó – Autor

Imagen 5. Clasificadora de mineral artesanal y buzo de draga



Fuente. Codechocó – Autor

Imagen 6. Muestreo de aguas sobre el río Cabí, 2014



Fuente. Codechocó – Autor

Imagen 7. Minería con retroexcavadoras en el río Cabí, 2014



Fuente. Codechocó – Autor

4.2 Diagnóstico de la calidad de aguas del río Cabí

La actividad minera, como actividad antrópica, afecta la calidad del agua de cualquier fuente hídrica si sus efluentes o vertimientos se realizan sin tratamiento previo. Sobre la cuenca del río Cabí se realiza la deposición de más de 10 unidades de actividad minera, actividad mixta entre dragas y retroexcavadoras; estas actividades aportan contaminantes al cuerpo de agua, los cuales aumentan la concentración de algunos parámetros a puntos críticos (turbiedad, sólidos suspendidos totales) y adicionan sustancias que son ajenas a los procesos naturales de la cuenca (mercurio).

Hay que resaltar que por el tipo de minería y por el proceso de beneficio minero, la actividad sobre la cuenca del río Cabí no utiliza cianuro como agente de concentrado del oro fino; se menciona que una de las razones para no utilizar cianuro es que no realiza el proceso de molienda asociado a la extracción del metal, ya que el tamaño del oro es lo suficientemente “grande” y que permite un alto porcentaje de extracción.

La información de calidad recopilada se presenta en las siguientes tablas (Tabla 18 a 19).

Tabla 18. Resultados de calidad de aguas del monitoreo al río Cabí febrero 2014

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL CHOCÓ														
CODECHOCÓ														
SUBDIRECCION DE CALIDAD Y CONTROL AMBIENTAL														
LABORATORIO DE AGUAS DE CODECHOCÓ														
MANUAL DE FORMATOS														
CALIDAD DEL RECURSO													M-FORM-02	
													F-FISQ-24	
													Página 1 de 1	
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	CUENCA: RÍO CABÍ													
	FECHA: 28/02/2014													
	ESTACIONES DE MUESTREO												METODO	REFERENCIA
	Antes Pacurita 1	Pte. Pacurita 2	Desembocadura Aguas Claras 3	Desembocadura Pururé 4	Pte. Cabí 5	Desembocadura Cascorva 6	El Playón 7	Pte. Playita 8	Bocatoma acueducto 9	Desembocadura Beteguma 10	Desembocadura Cabí 11			
Turbiedad (NTU)	14,3	12,8	13,2	23,5	27,2	29,2	33,1	76,2	31,1	31,1	30,6	Nefelómetro	SM 2130B	1
pH	8,52	8,9	7,25	6,7	6,29	6,2	5,96	6,44	6,65	6,3	5,92	Potenciómetro	SM 4500H B	0,01
Temperatura °C	24,37	24,31	24,35	24,51	24,43	24,47	24,47	24,83	24,47	24,51	24,43	Potenciómetro	SM 2550B	N.A
Conductividad (µs/cm)	11	8	8	9	9	9	9	53	9	9	9	Electrométrico	SM 2510B	0,8
Oxígeno disuelto mg/l	4,8	5,31	5,27	5,2	5,17	5,11	5,09	3,62	4,9	5,05	4,8	Electrodo de Membrana	SM 4500O G	N.A
Saturación de O %	57,8	65,4	66,5	63,6	63	62,5	62	44,8	60,5	61,6	59,1	Electrodo de Membrana	SM 4500O G	N.A
Dureza Total mg/l	33,6	9,9	19,8	33,7	11,9	11,9	29,7	49,5	31,7	19,8	29,7	Titulométrico	SM 2340C	4
Coliformes Fecales UFC/100 ml	700	200	300	300	300	1100	300	18800	1300	1000	900	Filtración por membrana	SM 9222D	N.A
Coliformes totales UFC/100 ml	4500	3600	6000	5400	5900	6500	7000	>200	7400	6800	5400	Filtración por membrana	SM 9222B	N.A
Sólidos suspendidos totales mg/l	24	22	22	28	10	28	36	48	30	22	28	Gravimétrico	SM 2540D	10,38
Sólidos totales mg/l	44	44	44	64	60	64	60	108	68	64	68	Gravimétrico	SM 2540B	60
Alcalinidad mg/l	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	20	<6	<6	<6	Titulométrico	SM 2320B	6
DBO5 mg/l	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	4,45	<2	<2	<2	Electrodo de Membrana	SM 5210B	2
Fosfatos mg/l	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,09	0,03	0,02	0,08	Ácido Ascórbico	SM 4500P E	N.A

Fuente. Codechocó

Tabla 19. Resultados de calidad de aguas monitoreo al río Cabí octubre 2014

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL CHOCÓ														
CODECHOCÓ														
SUBDIRECCION DE CALIDAD Y CONTROL AMBIENTAL														
LABORATORIO DE AGUAS DE CODECHOCÓ														
MANUAL DE FORMATOS														
CALIDAD DEL RECURSO													M-FORM-02	
													F-FISQ-24	
													Página 1 de 1	
CUENCA: RÍO CABÍ														
FECHA: 30/10/2014														
PARÓMETROS FÍSICOQUÍMICOS	ESTACIONES DE MUESTREO											METODO	REFERENCIA	LÍMITE DE DETECCIÓN
	Antes Pacurita 1	Pte. Pacurita 2	Desembocadura Aguas Claras 3	Desembocadura Purré 4	Pte. Cabí 5	Desembocadura Cascorva 6	El playón 7	Pte. Playita 8	Bocatoma acueducto 9	Desembocadura Beteguma 10	Desembocadura Cabí 11			
Turbiedad (NTU)	12	8,83	8,77	68,1	16,9	21,9	26,4	31,8	26,7	63,7	37,1	Nefelómetro	SM 2130B	1
pH	6,34	6,1	6,4	5,96	5,93	5,43	5,58	5,73	5,74	5,53	5,64	Potenciómetro	SM 4500H B	0,01
Temperatura °C	24,6	24,37	24,54	24,7	24,79	24,87	24,8	25,52	24,88	24,89	26,87	Potenciómetro	SM 2550B	N.A
Conductividad (µs/cm)	11	7	10	10	9	10	10	15	10	10	10	Electrométrico	SM 2510B	0,8
Oxígeno disuelto mg/l	9,33	9,46	9,67	9,8	9,29	9,28	9,22	9,23	10,04	9,35	9,17	Electrodo de Membrana	SM 45000 G	N.A
Saturación de O %	106,1	107,2	110,1	111,2	105,8	105,6	104,8	105,1	113,3	105,9	104,3	Electrodo de Membrana	SM 45000 G	N.A
Dureza Total mg/l	30	20	28	28	30	30	30	20	40	30	30	Titulométrico	SM 2340C	4
Coliformes Fecales NMP	1610	3310			2790			43520	2230		4080	Filtración por membrana	SM 9222D	N.A
Coliformes totales NMP	104620	241960			155310			>2419,6	173240		198630	Filtración por membrana	SM 9222B	N.A
Sólidos suspendidos totales mg/l	12	12	156	156	<10,38	16	18	28	24	14	28	Gravimétrico	SM 2540D	10,38
Sólidos totales mg/l	32	32	36	176	36	36	40	48	56	164	80	Gravimétrico	SM 2540B	60
Alcalinidad mg/l	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	Titulométrico	SM 2320B	6
DBO5 mg/l	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	Electrodo de Membrana	SM 5210B	2
Fosfatos mg/l												Ácido Ascórbico	SM 4500P E	N.A

Fuente. Codechocó

4.2.1 Cálculo del índice de contaminación de materia orgánica y de sólidos suspendidos totales

Aplicando las metodologías desarrolladas por Ramírez et al. (1997), y con la información recolectada en los monitoreos de Codechocó sobre la cuenca del río Cabí se calcularon los Índices de Contaminación por materia orgánica y por sólidos suspendidos totales, con el fin de evaluar los distintos impactos asociados a la calidad del recurso y poder estimar el estado actual de la subcuenca (Tablas 20 a 22).

Los resultados son:

Tabla 20. Cálculo del índice de contaminación ICOMO para el río Cabí muestreo 28/02/20104

Estaciones	ICOMO				
	Valores de los Subíndices			Valor ICOMO	Valoración
	IDBO	IColiT	Ioxi		
Antes Pacurita 1	0,161	0,605	0,422	0,39	Baja
Pte. Pacurita 2	0,161	0,551	0,346	0,35	Baja
Desembocadura Aguas Claras 3	0,161	0,675	0,335	0,39	Baja
Desembocadura Purré 4	0,161	0,65	0,364	0,39	Baja
Pte. Cabí 5	0,161	0,671	0,37	0,4	Media
Desembocadura Cascorva 6	0,161	0,695	0,375	0,41	Media
El Playón 7	0,161	0,713	0,38	0,42	Media
Pte. Playita 8	0,404	0,968	0,552	0,64	Alta
Bocatoma acueducto 9	0,161	0,726	0,395	0,43	Media
Desembocadura Beteguma 10	0,161	0,706	0,384	0,42	Media
Desembocadura Cabí 11	0,161	0,65	0,409	0,41	Media

Fuente. Autor

Tabla 21. Cálculo del índice de contaminación ICOMO para el río Cabí Muestreo 30/10/2014

Estaciones	ICOMO				
	Valores de los Subíndices			Valor ICOMO	Valoración
	IDBO	IColiT	Ioxi		
Antes Pacurita 1	0,161	0,61	0,422	0,4	Baja
Pte. Pacurita 2	0,161	0,66	0,346	0,39	Baja
Desembocadura Aguas Claras 3	0,161	0,68	0,335	0,39	Baja
Desembocadura Purré 4	0,161	0,65	0,364	0,39	Baja
Pte. Cabi 5	0,161	0,67	0,37	0,4	Media
Desembocadura Cascorva 6	0,161	0,69	0,375	0,41	Media
El Playon 7	0,161	0,71	0,38	0,42	Media
Pte. Playita 8	0,161	0,43	0,552	0,46	Media
Bocatoma acueducto 9	0,161	0,73	0,395	0,43	Media
Desembocadura Beteguma 10	0,161	0,71	0,384	0,42	Media
Desembocadura Cabí 11	0,161	0,65	0,409	0,41	Media

Fuente. Autor

Tabla 22. Cálculo del índice de contaminación ICOSUS para el río Cabí 28/02/20104 y 30/10/2014

Estaciones	ICOSUS	
	Valor ICOSUS	Valoración
Antes Pacurita 1	0,05	Muy baja
Pte. Pacurita 2	0,05	Muy baja
Desembocadura Aguas Claras 3	0,05	Muy baja
Desembocadura Purré 4	0,06	Muy baja
Pte. Cabí 5	0,01	Muy baja
Desembocadura Cascorva 6	0,06	Muy baja
El Playón 7	0,09	Muy baja
Pte. Playita 8	0,12	Muy baja
Bocatoma acueducto 9	0,07	Muy baja
Desembocadura Beteguma 10	0,05	Muy baja
Desembocadura Cabí 11	0,06	Muy baja

Fuente. Autor

4.2.2 Análisis de resultados del cálculo de los índices de Contaminación

4.2.2.1 ICOMO

La determinación del Índice de Contaminación por materia orgánica sobre el río Cabí nos permite evidenciar la influencia de las actividades domésticas humanas, y donde se encuentra población aguas arriba; solo en la parte media baja del río, el índice de contaminación refleja una afectación media, encontrándose en valores entre 0,40 y 0,64 correspondiendo estos cambios al inicio del casco urbano de la ciudad de Quibdó, y determinando el punto más alto en la estación Puente Playita (Imagen 8), donde se ubica uno de los descoles del sistema de alcantarillado de Quibdó.

Imagen 8. Estación de muestreo Puente Playita



Fuente. Autor

Se deduce que esta contaminación posiblemente incremente los costos de tratamiento del sistema de acueducto de Quibdó, cuya bocatoma se encuentra aguas debajo de la estación Puente Playita, con el grado de contaminación por materia orgánica más alto.

4.2.2.2 ICOSUS

La evaluación del Índice de Contaminación por sólidos suspendidos totales arroja valores muy bajos en el muestreo realizado, indicando que el río Cabí presenta muy baja afectación por sólidos en suspensión; la afectación de las actividades antrópicas no se puede evidenciar por este parámetro.

4.2.3 Conclusiones generales de la aplicación de los Índices de Contaminación ICOMO e ICOSUS

En términos generales, los índices de contaminación ICOMO e ICOSUS permiten de forma simplificada referenciar la afectación de un cuerpo hídrico por actividades antrópicas asociadas a acciones comunes y diarias de las personas, como las actividades domésticas, el transporte y los eventos de actividades asociadas con la remoción de tierra, ya sea del lecho de los ríos o de áreas y/o zonas aledañas a estos.

En este caso los índices nos permiten evidenciar que el río Cabí presenta intervención antrópica por causas domésticas y una baja afectación por descarga de materiales sobre el lecho del río asociados estos a procesos de remoción de tierra, pero es evidente que estos índices en un contexto de generalidad no pueden identificar la afectación puntual de una actividad específica, dificultando las decisiones de comando y control que deben tomar las autoridades sanitarias y ambientales cuando efectivamente se demuestra la contaminación y el deterioro del recurso hídrico de una cuenca hidrográfica.

En el caso específico del río Cabí, al evidenciarse actividad minera aguas arriba, el ICOSUS calculado con este muestreo no nos permite saber en cuál de las estaciones puede verse mayormente afectada por la presencia de minería aluvial, información que no podría complementar acciones y/o decisiones que regulen la actividad minera y que reduzcan los riesgos de tratamiento con fines del abastecimiento a la población de Quibdó.

4.3 Selección de parámetros para la construcción del índice de contaminación asociado a la contaminación minera aurífera.

En la identificación de las variables que afectan la calidad del agua, asociadas por el desarrollo de la actividad minera, se presentan por los cambios en los aspectos organolépticos y químicos que presenta el cuerpo de agua en el aumento de la concentración de algunas y en la inclusión de otras.

La actividad minera aurífera, realizada en la zona de estudio (río Cabí), cuenta con un accionar común al desarrollo de toda la minería en general, el modo de operación consiste en la remoción masiva de tierra, ya sea del lecho del fondo del río o de los depósitos aluviales de tierra aledaños a los tramos hídricos principales, y sometidos a un proceso de clasificación y tamizado con fines de separar por peso específico los metales asociados a este material.

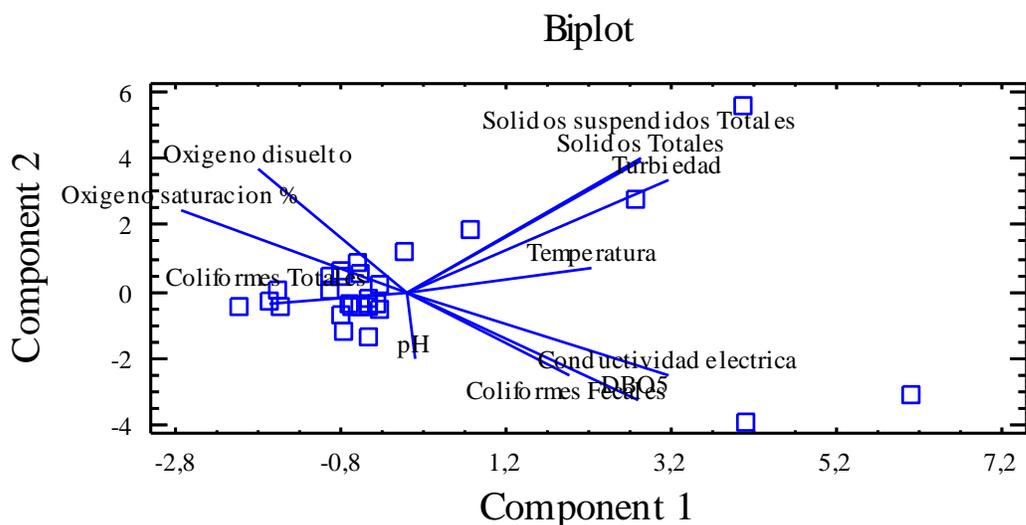
Para la selección de las variables se utilizó la metodología aplicada por Ramírez y Restrepo 1997, para la formulación de cuatro índices de contaminación de aguas, en donde se utilizó la técnica de análisis de componentes principales (ACP) para correlacionar variables fisicoquímicas de muestreos realizados entre los años 2007 a 2014 sobre el río Cabí, teniendo en cuenta que este recurso hídrico ha sido afectado por la actividad minera desde hace varios años (Anexo 3).

Para el análisis realizado se tomaron los datos del programa de monitoreo de Codehocó en donde se buscó agrupar con condiciones ambientales similares más de siete (7) parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para relacionarlos en al menos dos componentes principales, partiendo de las correlaciones que existan entre las variables (ver anexo 4).

En la aplicación del ACP no se buscan los resultados matemáticos de los componentes sino la correlación más frecuente que existan entre las variables, para definir en un estado donde se desarrolla la actividad, y cuales variables pueden identificar las demás. El cálculo del análisis de componentes principales se realizó a través del programa statgraphics (Figura 6).

A partir de estos resultados se pudo evidenciar la siguiente correlación:

Figura 6. Correlación de variables más frecuente encontrada en el ACP de la información de calidad del río Cabí



Fuente. Autor

En esta correlación, presentada en la Figura 6, se observó la relación directa que existe entre los sólidos totales, suspendidos y la turbiedad, donde se encuentran en el lado más positivo del componente 1 y un poco más distanciado del componente dos pero con una correlación positiva.

4.3.1 Variables seleccionadas

En relación a este proceso físico se preseleccionaron las variables más importantes, visibles y cuantificables, las cuales se correlacionaron en el ejercicio de análisis de componentes principales y se derivan de los procesos de remoción de tierra y clasificación, y tamizado del metal de oro para este caso. Las variables seleccionadas son turbiedad, sólidos suspendidos totales.

Por la incidencia de la introducción del mercurio en el proceso, elemento externo a las condiciones naturales del entorno donde se desarrolla el proceso minero aurífero aluvial, se seleccionó la variable fisicoquímica de mercurio total en agua, ya que esta variable es un indicador directo del impacto de la minería aurífera aluvial en zonas donde no se encuentra este elemento de forma natural.

Sólidos Suspendidos Totales: Son adicionados al cuerpo de agua en todas las etapas del proceso de extracción y beneficio minero; se asocia al material sólido que se encuentra mezclado con el agua y es retenido a través de una membrana de filtración superior a 45 µm; esta variable se relaciona con procesos extractivos, erosivos generados de forma natural o por la acción del hombre sobre la tierra. En el caso de la minería aurífera de la zona, el efecto de esta variable es directa, inducida por las tecnologías y metodologías de extracción utilizadas.

Turbidez: Parámetro que define la falta de transparencia del agua asociado a partículas en suspensión, las cuales difractan la luz y evitan su paso; según el Decreto 1594 del 84 su concentración máxima en aguas para destinación de flora y fauna (el uso más permisible de la norma) es de 180 NTU, la OMS y en la Resolución 2115 de 2007 regula la turbidez en aguas aptas para el consumo humano de 2 NTU.

Mercurio: Es un parámetro directamente relacionado con la actividad minera aurífera, su concentración se calcula según la capacidad de dilución y transporte que se pueda presentar en el recurso hídrico; esta sustancia no se encuentra de forma metálica en el medio natural, así que su aparición es por adición antrópica. Según el Decreto 1594 del 1984 la concentración máxima permisible es de 10 µg/l; aunque este parámetro no fue criterio del análisis de componentes principales por no haber datos en la memoria histórica revisada, esta variable es un componente directo de la minería y se hace necesaria su inclusión para la evaluación de la contaminación del agua.

4.3.2.1 Subíndice de turbiedad

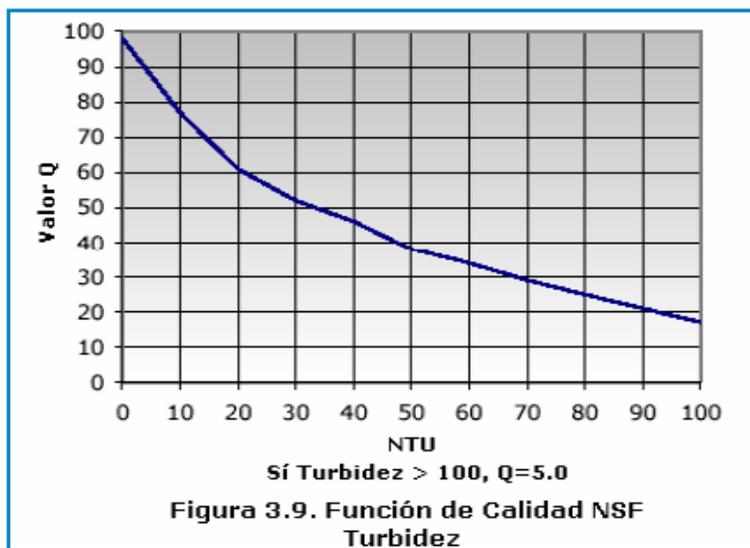
Para la selección de los valores en la proyección del subíndice de turbiedad se parte de la relación establecida para este parámetro en la construcción del índice de calidad de agua de consumo NSF 1970 (National Sanitary Foundation) con las siguientes modificaciones:

- Invertir la escala de Evaluación de “0” a “1”, y se establece la escala de “1” a “0”.
- Ajustar los valores en los extremos y los valores promedio de referencia.
- Realizar el cálculo de la curva, determinar la ecuación de la curva y la regresión con mayor grado de confianza, para este cálculo se utilizaron los programas Excel y Advanced Grapher.

La turbidez es un parámetro que se encuentra asociado a la calidad del agua, como lo demuestra su presencia en los índices de calidad de Oregón, Idaho, Des moines, Valle del río Miami, Washington, Greensboro, de Montoya, Dalmatia, AMEOBA, en donde para cada índice presenta funciones muy similares, teniendo en cuenta los diferentes usos propuestos para cada índice. Esta relación favorece la propuesta del establecimiento de la variable como subíndice de contaminación.

Para definir los valores se parte de la base de la función establecida para la Turbidez en el índice de Calidad NSF, como se muestra en la siguiente (Figura 7).

Figura 7. Función de calidad de turbidez para el Índice de Calidad de Agua NSF1970



Fuente. ICASe ICOs de Importancia Mundial. Universidad de Pamplona

De la gráfica anterior se extraen los valores de relación entre la concentración en NTU y el valor asociado al Índice (Tabla 23).

Tabla 23. Valores de turbiedad asociado al índice de calidad NSF y los propuestos para el índice de contaminación

Turbiedad NTU	Subíndice NSF	Subíndice estimado para el ICO
0	100	0,17
10	77	0,21
20	60	0,25
30	53	0,28
40	47	0,34
50	38	0,38
60	34	0,47
70	28	0,53
80	25	0,6
90	21	0,77
100	17	1

Fuente. Índice NSF – Autor

Se define también la función asociada a la turbiedad establecida en el Índice de Calidad NSF, calculada después de establecer la curva de los datos correlacionados con los valores asociados para cada subíndice, la ecuación es:

$$Y = 90,8240 * e^{(0,0166212*x)}$$

con $R^2=0,992$

Desviación Estándar asociada a los valores $S=3,46$

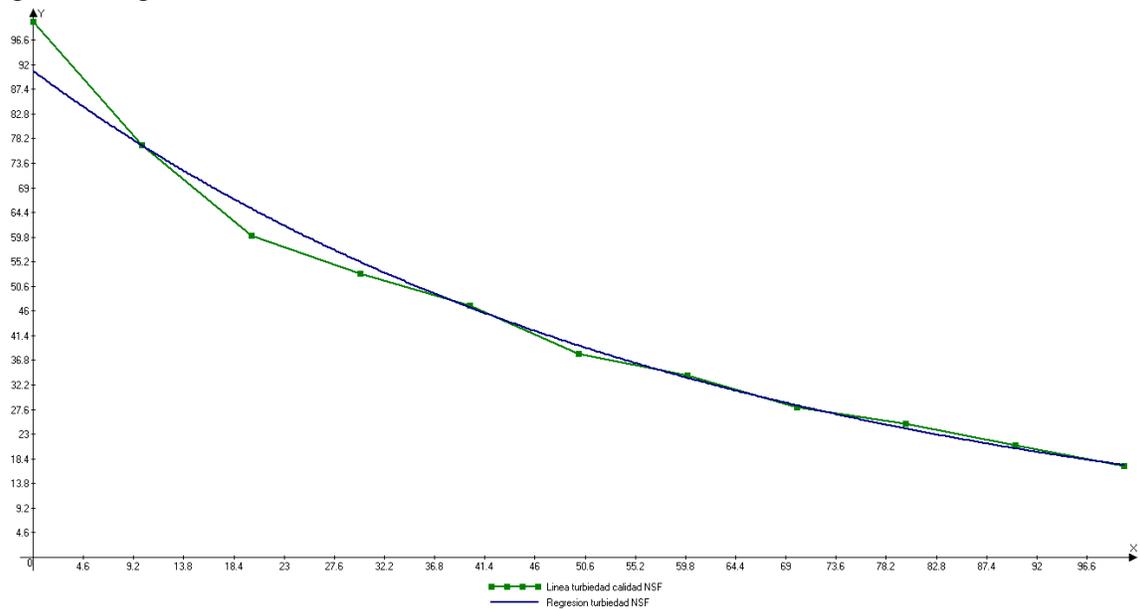
Donde

Y= valor del Índice a calcular

X= Valor asociado a la Turbiedad en NTU

Con esta ecuación se calculó la regresión de la curva asociada al subíndice de Calidad NSF para turbiedad, para corroborar la relación de los valores y la precisión de la medición con el fin de ajustar los valores para convertir el subíndice de Calidad en valores del subíndice de Contaminación (Figura 8).

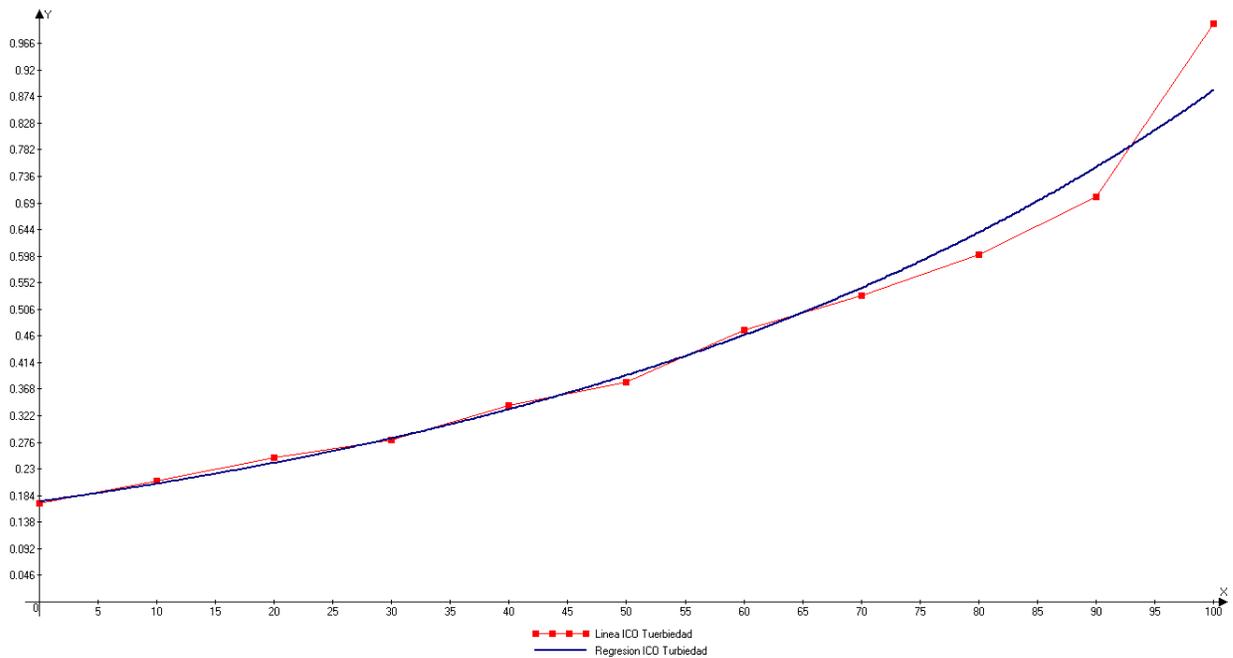
Figura 8. Regresión de subíndice de Turbiedad asociado al índice de Calidad NSF



Fuente. Autor

Después de la verificación de los valores se procedió a proyectar los datos para el subíndice de contaminación teniendo en cuenta los valores proyectados y el cambio de la escala de operación de 100 a 1, e invirtiendo los valores como lo plantea la metodología inicial (Figura 9), los resultados son los siguientes:

Figura 9. Curva de Contaminación asociada a la turbiedad y la función de la curva



Fuente. Autor

La función de la curva del subíndice de turbiedad calculada es la siguiente

$$Y = 0,174 * e^{(0,0163*x)}$$

$R^2=0,990$

Desviación Estándar de los valores de la Turbiedad $S=0,0424$

Donde:

Y= Valor del Índice a calcular

X= Valor asociado a la Turbiedad en NTU

Con esta función se procede al cálculo de los subíndices de turbiedad que influyen en la determinación del Índice de Contaminación por minería aurífera; esta función nos determina que para cualquier valor de turbiedad que supere las 100 NTU el subíndice de contaminación es “1” y que cualquier valor inferior a o NTU el valor mínimo de expresión del índice es “0,17”. En este caso la función determinada es de carácter exponencial.

4.3.2.2 Subíndice de sólidos suspendidos totales

Para la selección de los valores en la proyección del subíndice de Sólidos Suspendidos Totales (SST), dentro del índice de contaminación por la actividad minera aurífera, se tiene en cuenta el índice de contaminación establecido por Ramírez et al. (1997) ICOSUS, en el cual se cuenta con la variación de los sólidos suspendidos totales que afectan a un cuerpo de agua.

Este subíndice refleja la afectación del aporte en sólidos de la actividad minera aurífera de forma complementaria y permite establecer el aporte asociado únicamente a esta actividad al integrarlo con las otras variables definidas en el Índice de Contaminación.

La función asociada a este subíndice es:

$$Y = -0,02+0.003* X \text{ (Sólidos suspendidos)}$$

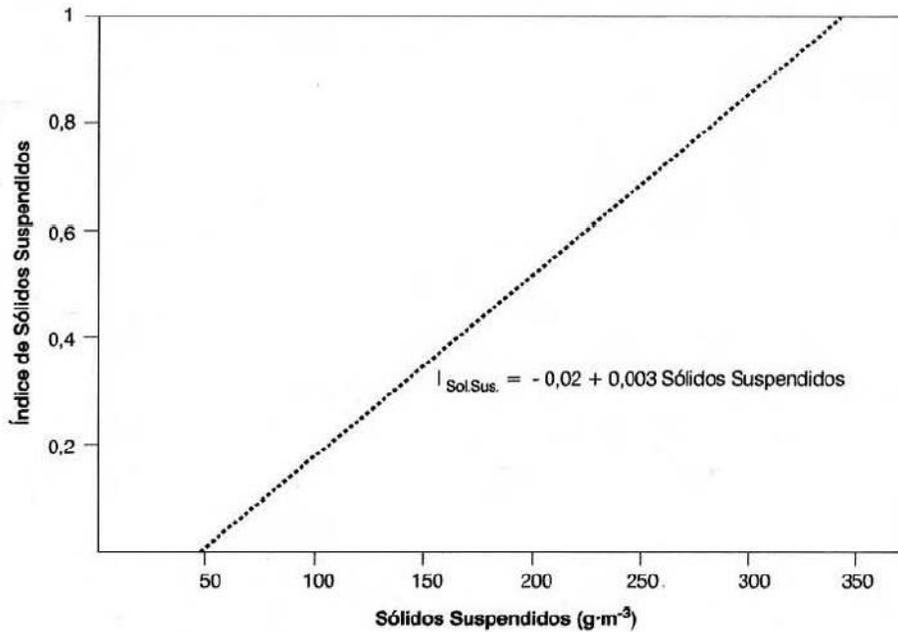
Donde:

Y= Valor del Índice a calcular.

X= Valor asociado a los Sólidos Suspendidos totales en mg/l.

La gráfica de la función asociada a los Sólidos suspendidos Totales (Figura 10) es la siguiente:

Figura 10. Función de sólidos suspendidos totales en el cálculo del índice de contaminación por sólidos suspendidos



Fuente. Ramírez et al. (1997), cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales, formulación y aplicación.

Para esta función, a los sólidos suspendidos con valores superiores a 340 mg/l se le asigna un valor del subíndice de “1” y para valores inferiores a 10 mg/l se le asigna un valor de “0”.

4.3.2.3 Subíndice de mercurio

Para el establecimiento de los valores para el cálculo del subíndice de mercurio se tienen en cuenta varias referencias las cuales se denotan en los antecedentes referidos al tema de mercurio en aguas superficiales de fuentes en Colombia y en otros países como México y Puerto Rico.

Estos datos recopilados de información secundaria fueron sometidos a un proceso estadístico para determinar las correlaciones de la información y así realizar los ajustes para la proyección de los valores de referencia en la determinación de la función asociada a la contaminación por mercurio (Tabla 24).

Tabla 24. Evaluación estadística de la información de mercurio total en agua superficial

Ítem	Valor
Media	3,42
Error típico	0,82
Mediana	1,48
Moda	0,49
Desviación estándar	4,90
Varianza de la muestra	24,03
Rango	19,75
Mínimo	0,38
Máximo	20,13
Cuenta	36,00
Nivel de confianza (95.0%)	1,66

Fuente. Autor

Este desarrollo estadístico nos permitió visualizar los valores dispersos asociados a la desviación estándar y la varianza; la dispersión en los valores se atribuye a la interacción de los datos altos definidos en el estudio “Evaluación de la contaminación por mercurio en la biota Acuática, Aguas y sedimentos de la cuenca alta del río Cuyuni, estado de Bolívar en Venezuela 2013”, cuyos valores no se consideran “comunes” o típicos para correlacionarlos con el subíndice de Contaminación. Por esta razón se calcularon nuevamente las variables estadísticas sin tener en cuenta esta información (Tabla 25).

Tabla 25. Evaluación estadística de los datos “ajustados” a la nueva selección de información

Ítem	Valor
Media	1,23
Error típico	0,09
Mediana	1,35
Moda	0,49
Desviación estándar	0,49
Varianza de la muestra	0,24
Rango	1,48
Mínimo	0,40
Máximo	1,88
Nivel de confianza (95.0%)	0,19

Fuente. Autor

En este análisis se resaltan los valores de la media aritmética que es 1,23 ($\mu\text{g/l}$) y el valor asociado para el error 0,09 y el Rango entre los valores (1,48 $\mu\text{g/l}$), los cuales nos definen la magnitud de la amplitud del rango de datos a seleccionar de mercurio para el desarrollo de la curva de correlación de concentración y la longitud de los coeficientes de valores del subíndice de contaminación.

Para el desarrollo del subíndice se toma también como referencia el cálculo del índice de calidad establecido en el estudios “Desarrollo y Aplicación de un índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico 2008”(Torres 2008), al que se le aplica la misma metodología asociada para el cálculo de los índices de contaminación de Ramírez et al. (1997), y se ajusta el valor extremo inferior de acuerdo a los limitantes en el desarrollo metodológico en el laboratorio y el valor extremo superior a

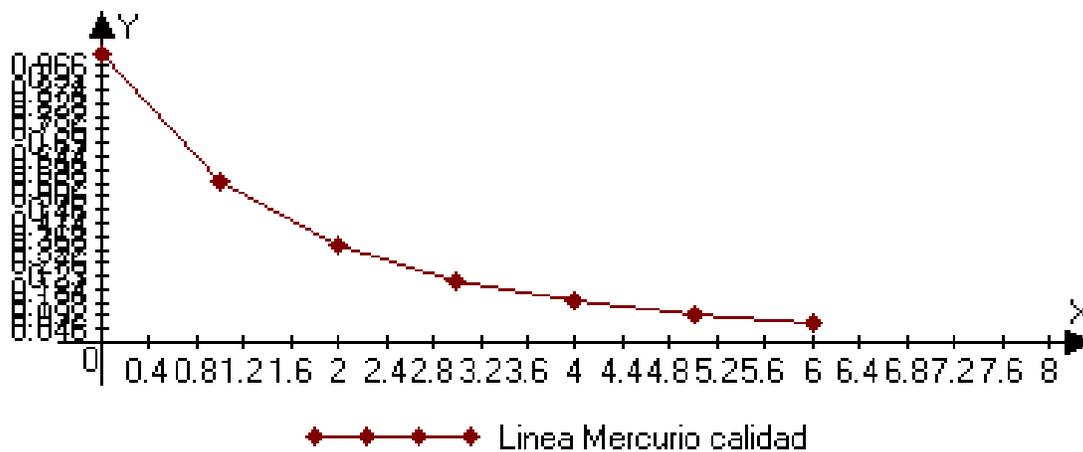
los condicionamientos normativos que actualmente están vigentes en la normatividad colombiana para el uso de las aguas, según lo establecido en el Decreto 1594 de 1984, artículo 45, Decreto 3930 de 2010 y la Resolución 631 de 2015, artículo 10 asociado a los límites de vertido de la actividad minera.

En el análisis realizado encontramos que para los usos menos restrictivos, la normatividad colombiana limita la utilización del recurso hídrico superficial cuando las concentraciones de mercurio total superan los 10 µg/l, lo anterior no quiere decir que el agua no pueda tener concentraciones superiores, pero si evidencia que a nivel de control y restricciones 10 µg/l es el valor del límite superior para definir si el recurso hídrico presenta una afectación por mercurio y por ende se encuentra contaminado por este parámetro.

Actualmente para las restricciones por vertimientos, la Resolución 613 de 2015 condiciona que las actividades de minería que viertan sus aguas al recurso hídrico deben limitar los vertimientos asociados con este parámetro a 2 µg/l, este valor no se debe confundir con el asociado al cuerpo hídrico y el respectivo balance de materia que se debe hacer cuando el vertimiento cae al cuerpo de agua.

Para el establecimiento de la función de contaminación por mercurio se realizó primero la proyección del índice de calidad (Figura 11).

Figura 11. Línea de tendencia subíndice de mercurio en el estudio “Desarrollo y Aplicación de un índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico” 2008



Fuente. Estudio “Desarrollo y Aplicación de un índice de Calidad de Aguas para los ríos en Puerto Rico” (Torres 2008).

De esta línea de tendencia de la figura 11 se estableció la función asociada que define la curva de la siguiente forma (Tabla 26):

Tabla 26. Datos de mercurio asociados al subíndice de calidad de aguas para Puerto Rico

Valor del Índice	Concentración de Hg (µg/l)
1,00	0
0,56	1
0,34	2
0,21	3
0,14	4
0,10	5
0,07	6

Fuente. Autor

La ecuación que representa la curva es:

Ecuación calidad mercurio

$$Y = 0,877 * e^{(-0,44*x)}$$

$$R^2=0,990$$

Desviación estándar S=0,052

Donde

Y= Valor del Índice.

X=Concentración de mercurio en µg/l.

Después de definir la ecuación de la curva en la figura 11 se establecen los valores asociados para el subíndice de contaminación con relación a los calculados con la ecuación del índice de calidad.

(Tabla 27)

Tabla 27. Valores de concentración de mercurio total con el ajuste para el cálculo del subíndice de contaminación

Valor del Índice	Concentración de Hg (µg/l)
1,00	6
0,56	5
0,34	4
0,21	3
0,14	2
0,10	1
0,07	0

Fuente. Autor

Con la información anterior y teniendo en cuenta las referencias normativas y la correlación estadística de la información secundaria de mercurio total en fuentes de agua superficial de la zona y de otras partes del mundo, se proyectaron los valores del índice según los siguientes parámetros:

- Valor mínimo de mercurio es 0,480 µg/l, asociado al valor detectable por las metodologías analíticas usadas como referencia (Vapor frío).
- Valor máximo de mercurio es 10 µg/l, asociado al valor en la normatividad colombiana que restringe cualquier uso del recurso hídrico al encontrarse esta concentración.
- Para la amplitud de los valores del subíndice se tiene en cuenta el error establecido en el análisis de los datos estadísticos.

- Para la amplitud de los valores de mercurio se tiene en cuenta la media aritmética en este caso el valor es de 1,23 $\mu\text{g/l}$, pero se ajusta al menor valor (1) en el manejo de cifras significativas.

En la tabla (Tabla 28) se presentan los valores asociados al subíndice de contaminación que queda de la siguiente forma:

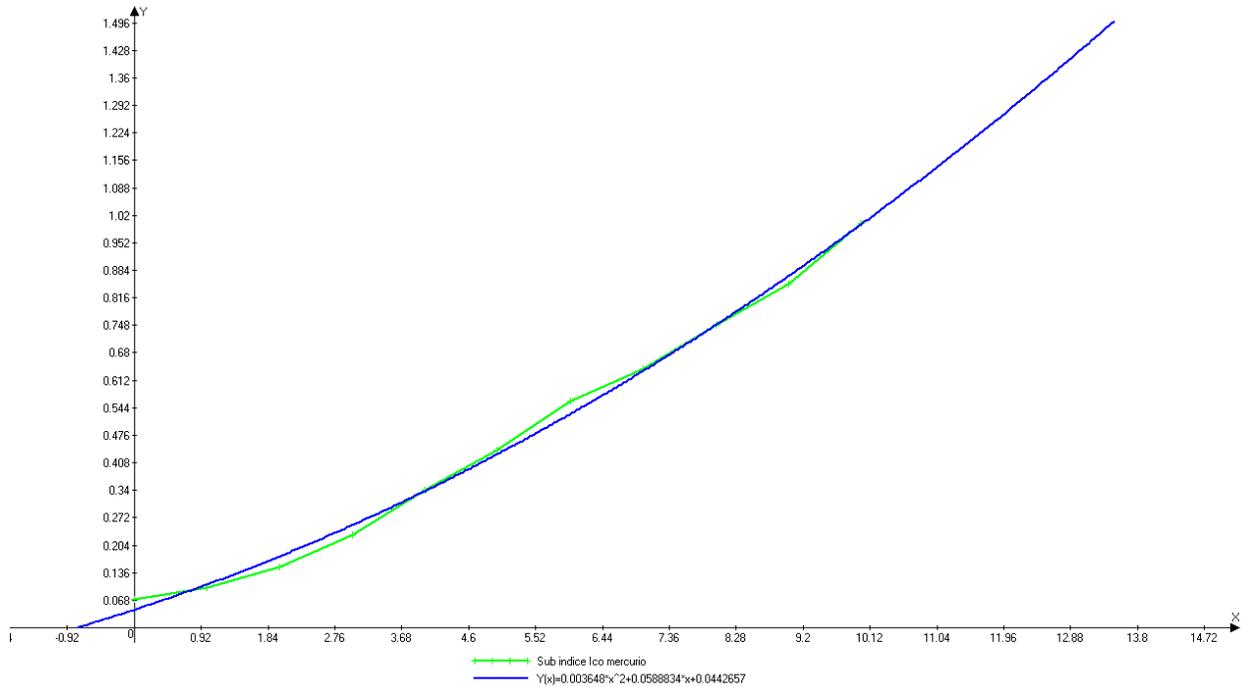
Tabla 28. Valores de concentración de mercurio total ajustados para el cálculo del subíndice de contaminación.

Valor del Índice	Concentración de Hg ($\mu\text{g/l}$)
1,00	10
0,85	9
0,75	8
0,64	7
0,56	6
0,44	5
0,34	4
0,21	3
0,14	2
0,10	1
0,07	0

Fuente. Autor

Con estos valores se proyecta la curva de mercurio y se realiza el cálculo de la regresión, para así definir la ecuación que cuantificará el subíndice de mercurio (Figura 12)

Figura 12. Línea de tendencia y regresión del subíndice de mercurio



Fuente. Autor

La ecuación que define la función es:

$$Y = 0,003648x^2 + 0,0589 * x + 0,0443$$

, $R^2=0,9965$

Desviación Estándar $S=0,018$

Donde

Y= Valor del subíndice de mercurio

X= Concentración de mercurio en $\mu\text{g/l}$

Para este caso la función encontrada para el cálculo del subíndice de mercurio es una función polinómica.

4.4 Ajuste de la ecuación del índice de contaminación por minería aurífera

Después de realizar el cálculo de las funciones para cada una de las variables y establecer las ecuaciones que permiten determinar los valores de los parámetros, se construye la fórmula de agregación para definir el índice, para esto se utilizará el promedio aritmético; las ecuaciones resultantes son:

I. Turbiedad: $Y = 0,174 * e^{(0,0163*x)}$

I. Sólidos suspendidos Totales: $-0,02+0.003*(\text{Sólidos suspendidos})$.

I. Mercurio: $Y = 0,003648x^2 + 0,0589 * x + 0,0443$ con $x=$ valor de mercurio total.

Para resumir el índice de contaminación por minería aurífera se denominara ICOMINERA y su expresión matemática se define así:

$$ICOMINERA = 1/3(I. Turbiedad + I. Sólidos suspendidos Totales + I. Mercurio)$$

Según la metodología planteada por Ramírez *et al.* (1997) el peso de cada uno de los componentes que soportan el índice es igual y equivalente en este caso a la tercera parte de la suma algebraica para el valor final de índice que se considera adimensional.

La valoración del ICOMINERA (Tabla 29) queda distribuida de la siguiente forma, tomando los criterios de calificación cualitativa establecida por Ramírez *et al.* (1997):

Tabla 29. Valoración del índice de contaminación por minería aurífera

Valor del índice	Valoración cualitativa
0- 0,2	No hay Contaminación
0,21-0,4	Contaminación Leve
0,41-0,6	Contaminación Media
0,61-0,8	Contaminación Alta
0,81-1	Contaminación Muy Alta

Fuente. Autor

Para el desarrollo del cálculo del índice se estructuró una Macro en el programa Excel en donde se introducen los datos obtenidos de la evaluación de la calidad del agua y se genera la respuesta del valor del índice y su respectiva valoración cualitativa (Tabla 30).

Tabla 30. Esquema de cálculo del índice ICOMINERA

Código	Estaciones	Turbiedad (NTU)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	Mercurio Total (µg/l)	Ico Turbiedad	Ico Sólidos Suspendidos Totales	Ico Mercurio	ICOMINERA	Valoración

Fuente. Autor

4.5 Validación de los datos

En el proceso de validación del índice se pone a prueba la efectividad del planteamiento teórico estimado para el cálculo y la correlación con los datos de campo y las medidas de laboratorio que permitan determinar si una fuente está o no contaminada por la actividad minera aurífera.

Esta correlación permitió realizar los ajustes necesarios para el desarrollo adecuado del índice, para esto el día 17 de marzo de 2015 se realizó un nuevo muestreo sobre el río Cabí, con el fin de obtener los datos de campo específicos para la determinación del índice ICOMINERA; las muestras se tomaron en cada una de las estaciones de monitoreo establecidas por Codechocó; los datos obtenidos se relacionan a continuación (Tabla 31):

Tabla 31. Datos del muestreo río Cabí para el cálculo del ICOMINERA 17/03/2015

Estaciones de Monitoreo Río Cabí	Turbiedad (NTU)	Sólidos Suspendedos Totales (mg/l)	Mercurio Total (µg/l)
Antes Pacurita	18,1	18	0,9
Después Pacurita	29,1	42	0,89
Desembocadura quebrada Aguas Claras	32,2	46	1,2
Desembocadura río Purré	133,0	179	1,7
Puente Cabí	23,0	176	1,3
Desembocadura quebrada Cascorva	153,0	236	1,5
El Playón	184,0	273	1,5
Desembocadura quebrada El Tajo	174,0	271	1,1
Bocatoma acueducto	161,0	230	1,05
Desembocadura río Atrato	171,0	262	0,85

Fuente. Codehocó monitoréo marzo 2015 – Autor

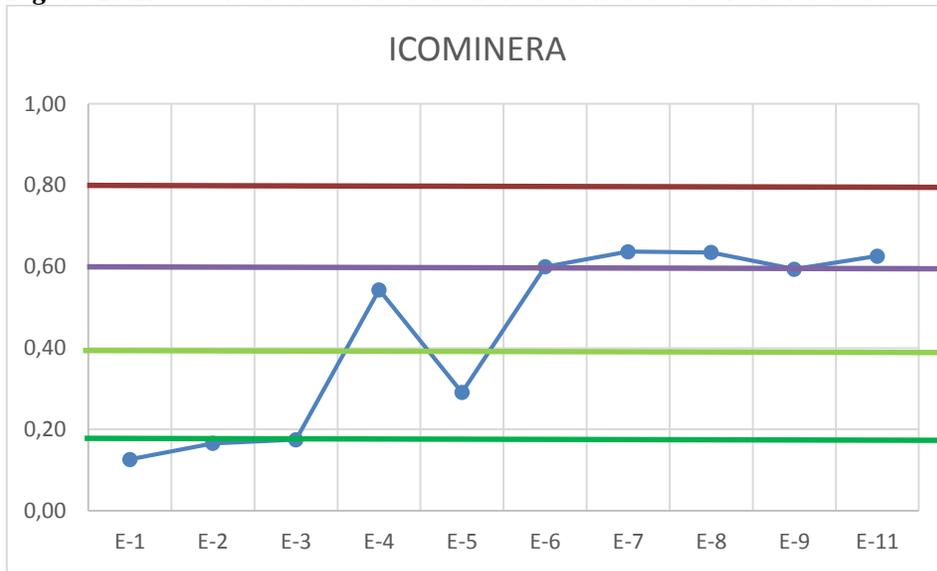
Con esta información y el modelo de Excel del ICOMINERA, se procedió al cálculo del índice de contaminación por minería aurífera aluvial como se puede ver a continuación (Tabla 32):

Tabla 32. Calculo del ICOMINERA sobre los puntos establecidos del río Cabí

Código	Estaciones	Turbiedad (NTU)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	Mercurio Total (µg/l)	Ico Turbiedad	Ico Sólidos Suspendidos Totales	Ico Mercurio	ICOMINERA	Valoración
E-1	Antes Pacurita	18	18	1,07	0,23	0,03	0,11	0,13	No hay Contaminación
E-2	Después Pacurita	29	42	1,07	0,28	0,11	0,11	0,17	No hay Contaminación
E-3	Desembocadura quebrada Aguas Claras	32	46	1,07	0,29	0,12	0,11	0,17	No hay Contaminación
E-4	Desembocadura río Purré	133	179	1,07	1,00	0,52	0,11	0,54	Contaminación Media
E-5	Puente Cabí	23	176	1,07	0,25	0,51	0,11	0,29	Contaminación Leve
E-6	Desembocadura quebrada Cascorva	153	236	1,07	1,00	0,69	0,11	0,60	Contaminación Media
E-7	El Playón	184	273	1,07	1,00	0,80	0,11	0,64	Contaminación Alta
E-8	Desembocadura quebrada El Tajo	174	271	1,07	1,00	0,79	0,11	0,63	Contaminación Alta
E-9	Bocatoma acueducto	161	230	1,07	1,00	0,67	0,11	0,59	Contaminación Media
E-10	Desembocadura quebrada Beteguma*	*	*		-	-	-	-	
E-11	Desembocadura río Atrato	171	262	1,07	1,00	0,77	0,11	0,63	Contaminación Alta

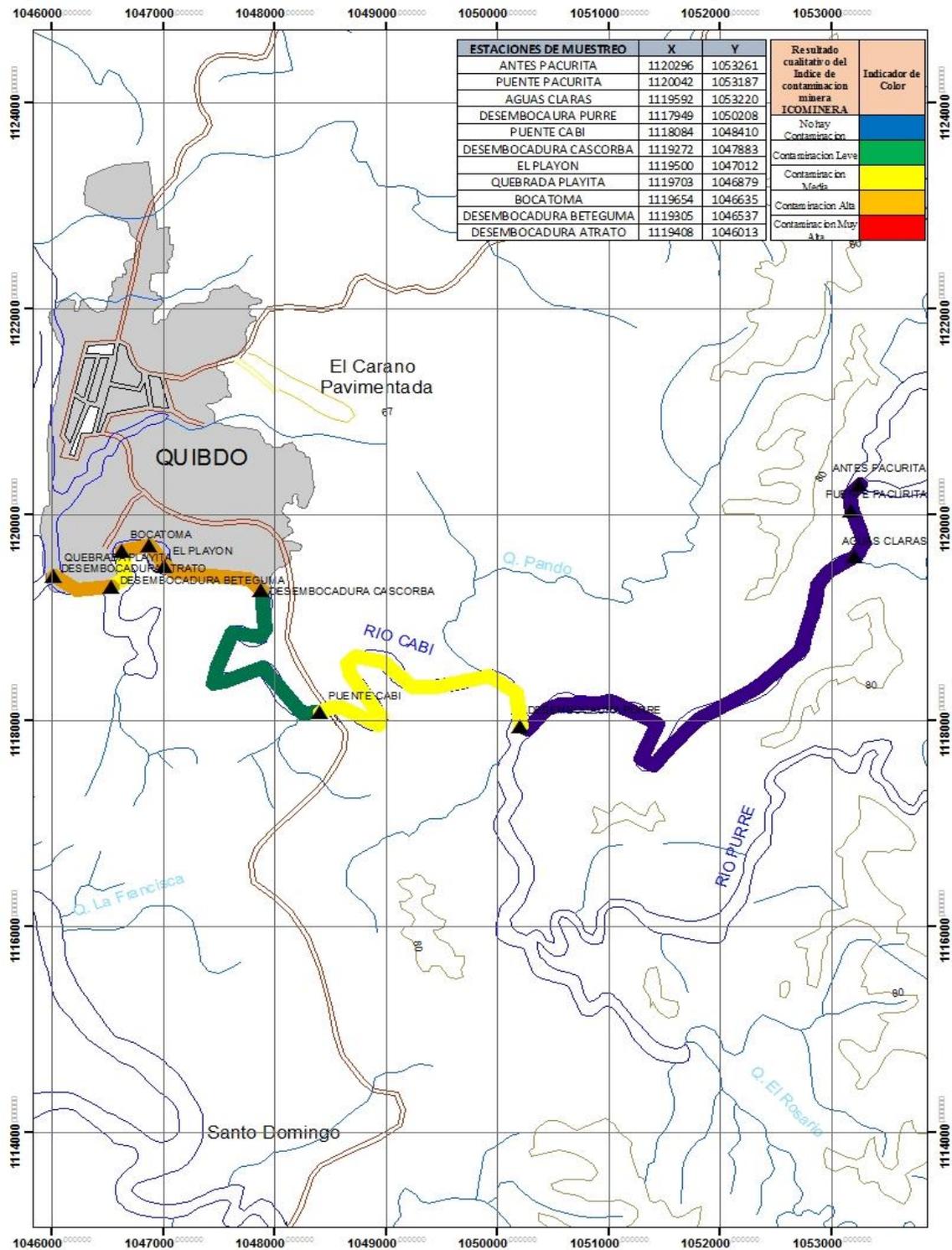
Fuente. Autor, *en este estación no se tomaron datos de campo

Figura 13. Relación del índice de contaminación minera sobre el río Cabí



Fuente. Autor

Figura 14. Índice de Contaminación minera ICOMINERA aplicado sobre el río Cabi



Fuente. Autor

Para entender los resultados del índice de contaminación aplicado a la información de calidad de aguas del río Cabi se plantea un análisis por punto de muestreo y un análisis integral de todo el tramo evaluado.

En el análisis puntual se evalúa que más del 50% de las estaciones se encuentran en contaminación alta, y estas estaciones se ubican en la parte baja de la cuenca, antes de la desembocadura del río Cabí en el río Atrato. En las primeras estaciones no se determina contaminación por minería aurífera; desde la estación de “Puente Cabí” se pueden ver los efectos reales de la afectación minera, además desde esta estación inicia el tramo donde Codechocó estableció como objetivo de calidad el uso con fines de abastecimiento de acueductos por encontrarse en esta zona la bocatoma del acueducto de Quibdó.

En el análisis del tramo el promedio del valor del índice de contaminación relaciona una contaminación media por minería aluvial (0,44), para lo cual las autoridades ambientales y sanitarias deben proponer medidas para minimizar este impacto y evitar que el cuerpo de agua llegue a niveles más críticos de control; el índice también permite puntualizar las zonas de estudio específico con el objeto de identificar posibles entables mineros que están afectando la cuenca (Figuras 13 y 14).

5 CONCLUSIONES

1. En el muestreo se evidenció una alta presencia de unidades productivas mineras ubicadas sobre el lecho del cuerpo hídrico del río Cabí (17), aproximadamente 0,82 unidades/km de lecho del río, dada la cercanía de este río a la cabecera municipal de Quibdó; se evidencian también deficiencias en la presencia y control de las autoridades sanitarias, civiles y ambientales.
2. La zona más afectada por actividades antrópicas es el tramo IV, tramo que es objeto de control y vigilancia de acuerdo a los objetivos de calidad por parte de la autoridad ambiental (Codechocó), y de control y vigilancia por parte de la autoridad sanitaria municipal, ya que allí se encuentra la bocatoma que abastece el acueducto de Quibdó; esto lo demuestran los resultados de la medición de los índices de contaminación por materia orgánica ICOMO (0.64) con una valoración alta y el índice de contaminación por sólidos suspendidos totales determinados en este estudio (0,12) con una valoración baja.
3. Se evidenció en este estudio la influencia directa de la actividad minera aurífera aluvial sobre el recurso hídrico del río Cabí; la adición de vertimientos y la remoción del lecho del río, evidencian cambios en la forma de este y permite identificar las zonas más impactadas por los vertimientos de esta actividad.
4. La aplicación del análisis de componentes principales de los parámetros de calidad determinados sobre el río Cabí permitió definir los parámetros que presentan más correlación en un cuerpo de agua afectado por la actividad minera los cuales fueron sólidos suspendidos totales, turbiedad y mercurio total, aplicando la metodología para definir la ecuación del índice según Ramírez *et al.* (1997), la correlación de estas variables y permitir el análisis y la formulación del índice de contaminación por la actividad minera aurífera aluvial.
5. La aplicación de las líneas de tendencia y regresiones lineales permitieron definir el alcance matemático de cada variable a expresar en la formulación del índice de contaminación; las mejores correlaciones permiten proyectar adecuadamente la correlación del valor del índice con la medición de la variable fisicoquímica.
6. La fórmula del índice que permite medir la contaminación de la minera aurífera aluvial sobre el cuerpo hídrico del río Cabí es “ $ICOMINERA = 1/3(I. Turbiedad + I. Sólidos suspendidos Totales + I. Mercurio)$ ” donde ICOMINERA es el índice formulado y relaciona las variables anteriormente seleccionadas.
7. Las fórmulas para cada una de las variables que se correlacionan en el índice de contaminación por minería aurífera aluvial son:
I. Turbiedad: $Y = 0,174 * e^{(0,0163*x)}$
I. Sólidos suspendidos Totales: $-0,02 + 0,003*(Sólidos suspendidos)$
I. Mercurio: $Y = 0,003648x^2 + 0,0589 * x + 0,0443$ con x= valor de mercurio total
8. La aplicación del índice de contaminación por minería aurífera ICOMINERA, sobre la calidad del agua del río Cabí, permitió determinar zonas de baja contaminación de la actividad minera, así como zonas de contaminación media y alta en donde se evidencia el impacto actual de esta actividad, principalmente sobre el tramo IV, donde se encuentra ubicada la bocatoma del acueducto de Quibdó.
9. El índice ICOMINERA solo tiene aplicación donde se evidencia físicamente la presencia de minería aurífera, ya que las variables también se pueden asociar a otros sectores industriales, en donde la información que se determina no tendría validez en el contexto de contaminación minera, pero si en la afectación del recurso hídrico.

6 RECOMENDACIONES

La aplicación de la propuesta de índice de contaminación por la actividad minera aurífera aluvial se recomienda principalmente para soportar decisiones relacionadas con el ordenamiento del recurso hídrico, reglamentación de corrientes y ordenación de cuencas hidrográficas, además se vincula como una herramienta más que permite que las comunidades conozcan en un momento temporal el estado de un cuerpo de agua el cual se ve afectado por el desarrollo de este tipo de minería.

Se recomienda a las autoridades sanitarias la aplicación de esta herramienta para la planificación de las acciones de mitigación de los distintos impactos asociados a la actividad minera aurífera aluvial y la afectación de estas sustancias en la salud de la comunidad.

Se recomienda realizar la validación de esta herramienta en otros cuerpos de agua, que presenten actividad minera de forma similar como el río Cabí o que en algún momento hayan tenido esta actividad en su cauce, como el resultado de la evaluación del impacto de la actividad minera.

Esta herramienta puede contribuir a la identificación de sitios y fuentes de agua que están siendo afectados actualmente por la actividad minera aurífera aluvial, además de facilitar el control de la minería ilegal, y con una caracterización se puede permitir evaluar los efectos de esta actividad sin conocer exactamente el origen de la fuente de contaminación.

Se recomienda evaluar otros parámetros en otros sectores mineros que puedan fortalecer y darle robustez a la investigación realizada, con el fin de aplicar esta metodología en otras zonas críticas afectadas por la minería en el país.

Se recomienda la aplicación del índice ICOMINERA en fuentes de agua que sean tenidas en cuenta para el abastecimiento de acueductos y de comunidades, sirviendo como herramienta de prevención de control de salud pública.

El autor recomienda los siguientes criterios en la lectura e interpretación para los sectores ambiental y sanitario.

Tabla 33. Recomendaciones para la aplicación del ICOMINERA

Resultado cualitativo del Índice de contaminación minera ICOMINERA	Observación según sector de aplicación		
	Sector Ambiental	Sector Salud	Indicador de Color
No hay Contaminación	Sin restricciones de uso, ajustar al programa de control y monitoreo del recurso hídrico	Sin restricciones de uso para consumo humano con tratamiento previo; se permita el contacto primario sin restricciones	
Contaminación Leve	Cuerpo hídrico que debe incluirse para vigilancia especial, visitas a la zona para identificación de usuarios y actividades, solo restricciones de uso para potabilización	Se permite el contacto con la piel en contacto primario; vigilar si la fuente es utilizada para consumo humano y verificar que se realice el tratamiento	
Contaminación Media		No se permite el contacto primario; revisar el comportamiento de las enfermedades asociadas al recurso hídrico en la zona; generar la primera alerta con restricciones	
Contaminación Alta	Restricción para todos los usos, generar alertas ambientales, iniciar procesos sancionatorios y operativos de control de las actividades que generan esta contaminación, aumentar los monitoreos de vigilancia e iniciar proceso de minimización de impactos y tratamiento de efluentes	Generar alarma sanitaria; fuente hídrica no apta para consumo humano con tratamiento; iniciar programa de vigilancia del recurso hidrobiológico asociado al sitio de contaminación	
Contaminación Muy Alta			

Fuente. Autor

7 BIBLIOGRAFIA

APHA, A. WPCP, (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater, Washington, DC, 22th edn. APHA.

Asodeam, Asociación para el Desarrollo del San Juan, (2014) . Elaboración de estudios y diseños complementarios de acueducto y alcantarillado en Unión Panamericana, y acueducto en Istmina y Medio San Juan, Contrato 067/2013 volumen 3. Estudios de caudales y calidad de aguas municipios de Medio San Juan, Istmina y Unión Panamericana.

Bharti N., Katyal D. (2011). Water Quality índices used for surface water vulnerability assessment, University School of environment Management. G.G.S Indrapratha University, Dwarka New Dalhi, India.

Calidad del Agua valoración y monitoreo, Universidad de Pamplona, Investigación en calidad de Agua.

Codechocó, Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó, (2011). Plan de Ordenamiento y Reglamentación del río Cabí.

Codechocó, Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó (2014). Proyecto Manejo Integral del Recurso Hídrico en el departamento del Chocó, , Información de Calidad del río Cabí años 2009 - 2014.

Coto, J. M. and Salgado, (2011). Calidad del agua de los ríos de la Microcuenca IV del río Virilla., V.. Uniciencia, 24.

Cuadras Carles, (2007). Nuevos métodos de análisis multivariante, Barcelona España

CVC, Universidad del Valle, (2004). Estudio de la calidad del agua del río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de índices de calidad y contaminación.

Fernández Nelson, Ramírez Alberto, Fredy Solano, (2010). Physic –Chemical Water Quality índices a Comparative Review, , Universidad de Pamplona, Universidad Javeriana, revista Bistua .

Farina Oriana, Pisapia Daniel, Gonzales y Lasso, (2013). Evaluación de la contaminación por mercurio en la biota acuática, aguas y sedimentos de la cuenca alta del río Cuyuní, estado de Bolívar, Venezuela, programa de evaluaciones rápidas de ecosistemas acuáticos.

Fernández Nelson, Ramos Gabriel, ICATEST V1.0, (2010). Una herramienta informática para el análisis y valoración de la calidad del Agua , Universidad de Pamplona.

Fernández Nelson, Solano Fredy, (2008). Índices de Calidad y de contaminación del agua. Universidad de Pamplona.

Fundación Beteguma, Corporación Autónoma Ambiental para el Desarrollo del Chocó, (2005). Plan de Manejo Ambiental del río Cabí,

Gómez Sandra, Rojas Sandra, (2014). Afectación Ambiental de la calidad del agua de la quebrada Cascabel generada por la explotación minera artesanal municipio de Marmato, departamento de Caldas, Universidad de Manizales, Maestría en Desarrollo Sostenible.

Jiménez Mario, Vélez Mari, (2006). Análisis comparativo indicadores de la calidad de agua superficiales, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Avances en Recursos hidráulicos, número 14.

Metas y Metrólogos asociados, (2010). Medición de la Turbidez en la calidad del Agua, La Guía Metas.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2010). Política Nacional Hídrica.

Monerris Miguel, Domenech Paula, (2005). Modelación de la Calidad del agua, Universidad Politécnica de Valencia.

Peña Daniel, (2002). Análisis de datos multivariantes Colombia.

Ramírez A. Restrepo R, Viña G, (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales, formulación y aplicación. Eco nest Ltda., revista Ciencia Tecnología y Futuro – volumen 1 número 3 .

Ramírez R Restrepo, M Cardeñosa, (1999). Índices de Contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos, Ecotest Ltda., CTy F Ciencia Tecnología y Futuro vol. 1 número 5 .

Rodríguez Gómez, M. Economía & Región, 6, 5-26 Samboni, N., Reyes Trujillo, A. and Carvajal, Y. (2012), Determinantes de la mortalidad y la prevalencia de enfermedades diarreicas agudas en menores de cinco años en Colombia. Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta. Revista Ingeniería y Competitividad, 13.

Ruiz Natalia, Escobar Yesid, Escobar Juan Carlos, (2007). Revisión de Parámetros Físicoquímicos como indicadores de Calidad y contaminación del agua, Revista Ingeniería e Investigación vol. 27 núm. 3 .

Tearmoto Tomoko, Yamashiki yosuke, Takara Kaoru, (2013). Application of water quality index and sensitivity Analysis. Kyoto university, journal of disaster research vol. 8 núm. 1 .

Torres Francisco, (2009). Desarrollo y aplicación de un índice de calidad de agua para ríos en Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico .

Torres Patricia, Cruz Camilo, Patiño Paola, (2009). Índices de Calidad de Agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano, una revisión crítica, Revista Ingenieras Universidad de Medellín.

Valdés-Basto, J., Samboni-Ruiz, N. E. and Carvajal-Escobar, (2011). Desarrollo de un Indicador de la Calidad del Agua usando Estadística Aplicada, Caso de Estudio: Subcuenca Zanjón Oscuro., Y. Revista Tecno Lógicas, 165-180.

Yarto Mario, Gavilán Arturo, Díaz José. La contaminación por mercurio en México, Gaceta Ecológica 72.

Zagato PA, Lorenzetti ML, Lamparelli MC, Salvador MPE, Menengon JR, Bertolotti E, (2009). Water Quality index for aquatic biota protección, CETESB Compañía de Tecnología de Saneamiento Básico, Brasil .

Zambrano, Y. and Luis, J, (2011). Estudio de la calidad de Agua en los afluentes de la Micro cuenca del río Blanco para determinar las causas de la Degradación y Alternativas de manejo.

http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/indice_hidrobiologico.asp

http://www.idea.unal.edu.co/eventos/CisdaIV/ponencias/E3_Gestion_agua/E3_rafael_oyaga.pdf

http://www.miliarium.com/Proyectos/RestauracionAmbiental/Hidrologia/Calidad_Aguas.asp

<http://www.cvc.gov.co/cvc/Mosaic/dpdf2/Volumen10/1-ECARCpag1-158.pdf>

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

ANEXOS

ANEXO 1 - Tabla de preservación de muestras

Determinación	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra, ml	Tipo de muestra ³	Preservación ⁴	Almacenamiento máximo recomendado ⁵
Acidez	P, V	100	s	Refrigeración	14 d
Alcalinidad	P, V	200	s	Refrigeración	14 d
Boro	P	100	s, c	No requiere	6 meses
Bromuro	P, V	100	s, c	No requiere	28 d
Carbono orgánico, total	V	100	s, c	Análisis inmediato, o refrigerar agregando H ₃ PO ₄ o H ₂ SO ₄ hasta pH < 2	14 d ⁷
Cianuro:	P, V	500	s, c	Agregar NaOH hasta pH > 12, refrigerar en la oscuridad ⁶	14 d ⁷
Total				Agregar 100 mg Na ₂ S ₂ O ₃ /L	
Clorable	P, V				
Cloro, residual	P, V	500	s	Análisis inmediato	-
Clorofila	P, V	500	s, c	30 días en la oscuridad	30 d
Cloruro	P, V	50	s, c	No requiere	28 d
Color	P, V	500	s, c	Refrigerar	48 h
Purgables por purga y trampa	V, tapón de TFE				
		2 x 40	s		
Conductividad	P, V	500	s, c	Refrigerar	28 d
DBO	P, V	1000	s	Refrigerar	48 h
Dióxido de carbono	P, V	100	s	Análisis inmediato	-
Dióxido de cloro	P, V	500	s	Análisis inmediato	-
DQO	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2	28 d
Dureza	P, V	100	s, c	Agregar HNO ₃ hasta pH<2	6 meses
Fluoruro	P	300	s, c	No requiere	28 d
Fosfato	V (A)	100	s	Para fosfato disuelto, filtrar inmediatamente; refrigerar	48 h
Gas digestor de lodos	V, botella de gases	-	-	-	-
Grasas y aceites	V, boca ancha calibrado	1000	s, c	Agregar HCl hasta pH<2, refrigerar	28 d
Metales, general		500	s	Filtrar ⁸ , Agregar HNO ₃ hasta pH<2	6 meses
Cromo VI	P (A), V(A)	300	s	Refrigerar	24 h
Cobre, colorimetría	P (A), V(A)				
Mercurio	P (A), V(A)	500	s, c	Agregar HNO ₃ hasta pH<2, 4°C, refrigerar	28 d
Nitrógeno					
Amoniac	P, V	500	s, c	Analizar lo más pronto posible o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar	28 d
				Analizar lo más pronto posible o refrigerar	

Nitrato	P, V	100	s, c	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar	48 h (28 d para muestras cloradas)
				analizar lo más pronto posible o refrigerar	28 d
				Refrigerar, Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2	
Nitrato + nitrito	P, V	200	s, c		48 h
Nitrito	P, V	100	s, c		28 d
Orgánico, Kjeldhal	P, V	500	s, c		
Olor	V	500	s	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	-
Oxígeno, disuelto	V, botella de DBO	500	s		
Electrodo				Analice inmediatamente	-
Winkler				La titulación puede demorarse luego de la acidificación	8 h
Ozono				V	1000
pH	P, V	50	s	Análisis inmediato	-
Sabor	V	500	s	Analizar lo más pronto posible; refrigerar	-
Salinidad	V, sello de cera	240	s	Análisis inmediato o usar sello de cera	-
Sílica	P	200	s, c	Refrigerar, no congelar	28 d
Sólidos	P, V	200	s, c	Refrigerar	2 – 7 d
Sulfato	P, V	100	s, c	Refrigerar	28 d
Sulfuro	P, V	100 ¹	s, c	Refrigerar, agregar 4 gotas de acetato de zinc/100 ml; agregar NaOH hasta pH>9	7 d
Temperatura	P, V	-	s	Análisis inmediato	-
Turbidez	P, V	100	s, c	Analizar el mismo día, para más de 24 h guardar en oscuridad, refrigerar	48 h
Yodo	P, V	500	s, c	Análisis inmediato	-
¹ Para detalles adicionales ver el texto y los protocolos respectivos. Para las determinaciones no enumeradas, usar recipientes de vidrio o plástico; preferiblemente refrigerar durante el almacenamiento y analizar lo más pronto posible.					
² P = plástico (polietileno o equivalente); V = vidrio; V(A) o P(A) = enjuagado con HNO ₃ 1+1; V(S) = vidrio enjuagado con solvente orgánico o secado en mufla					
³ s = simple o puntual; c = compuesta					
⁴ Refrigerar = almacenar a 4°C en ausencia de luz. La preservación de la muestra debe realizarse en el momento de la toma de muestra. Para muestras compuestas, cada alícuota debe preservarse en el momento de su recolección. Cuando el uso de un muestreador automático haga imposible la preservación de cada alícuota, las muestras deben mantenerse a 4°C hasta que se complete la composición.					
⁵ Las muestras deben ser analizadas lo más pronto posible después de su recolección. los tiempos listados son los períodos máximos que pueden transcurrir antes del análisis para considerarlo válido. Las muestras pueden dejarse durante un mayor tiempo. Algunas muestras pueden no ser estables por el período máximo dado en la tabla. Si se envían las muestras por correo, deben cumplir con las regulaciones de transporte de materiales peligrosos (consultar Método EPA)					
⁶ Si la muestra está clorada, consultar su pretratamiento en el protocolo o en Standard Methods.					
⁷ El máximo tiempo de almacenamiento es de 24 h si está presente sulfuro, el cual puede detectarse por ennegrecimiento de papel mojado en acetato de plomo antes de ajustar el pH; si el sulfuro está presente puede removerse adicionando nitrato de cadmio en polvo hasta que se obtenga prueba negativa; después se filtra y se adiciona NaOH hasta pH 12.					
⁸ Para metales disueltos las muestras deben filtrarse inmediatamente en el sitio de muestreo, antes de agregar al ácido.					

ANEXO 2

RESULTADOS DE LABORATORIO

		FT – LABCAM – 13 Versión 06		
PAGINA 1 DE 2	INFORME DE RESULTADOS-IR-025-2015			
Programa CALIDAD AMBIENTAL MARINA Laboratorio de Calidad Ambiental Marina Calle 25 #2-55, Playa Salguero Tel. 4328600 Ext. 146 - Santa Marta, COLOMBIA http://invemar.org.co lilia.ibanez@invemar.org.co				
SOLICITANTE DEL ANÁLISIS	CODECHOCO			
DIRECCIÓN DEL SOLICITANTE	Carrera 1a. N°. 22-96, Quibdó - Chocó			
Tipo de Muestreo	Muestreo realizado por	Análisis Subcontratados		
No especificado en convenio 016 de 2014	CODECHOCO	No		
Plan de Muestreo	No especificado en convenio 016 de 2014			
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS				
ESTACIÓN / LOCALIDAD	TIPO DE MUESTRA	FECHA DE RECOLECCIÓN	FECHA DE RECEPCIÓN LABCAM	ENTREGA POR
E1	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E2	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E3	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E4	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E5	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E6	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E7	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E8	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E9	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
E10	Agua	17/03/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
MINA SAN JOSE 14:20	Agua	23/04/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
MINA SAN JOSE 14:30	Agua	23/04/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
MINA A. QUINTO 12:15	Agua	23/04/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.
MINA A. QUINTO 12:20	Agua	23/04/2015	29/05/2015	Ivan Restrepo, vía Correo certificado.



FT – LABCAM – 13

Versión 06

PAGINA 2 DE 2

INFORME DE RESULTADOS-IR-025-2015

METODOLOGÍA

ENSAYOS	TECNICAS ANALITICAS
Mercurio Total (Hg, µg/L)	Método EPA 7473, 2007. Mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación y espectrometría de absorción atómica.

CONTROL DE CALIDAD ANALITICA

ENSAYO	LIMITE DE DE TECCION	PRECISION % C.V.	Analista (s)
Mercurio Total (Hg, µg/L)	1,07	3,2	A. Contreras

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ESTACIÓN/LOCALIDAD	Hg (µg/L)
E1	<LD
E2	<LD
E3	<LD
E4	<LD
E5	<LD
E6	<LD
E7	<LD
E8	<LD
E9	<LD
E10	<LD
MINA SAN JOSE 14:20	<LD
MINA SAN JOSE 14:30	<LD
MINA A. QUINTO 1215	<LD
MINA A. QUINTO 1220	<LD

Fecha de inicio de los ensayos	01/06/2015	Fecha de finalización de los ensayos	02/06/2015
--------------------------------	------------	--------------------------------------	------------

Aprobó:

Karen Patricia Ibarra Gutiérrez (PQ-3390)
Jefe de LABCAM

Lilia Rosa Ibáñez Sierra (PQ-En trámite)
Jefe de Calidad LABCAM

Fin del Informe

Los resultados de este informe solamente son válidos para las muestras ensayadas y no deben ser reproducidos parcial o totalmente sin autorización escrita de INVEMAR-CAM y el SOLICITANTE del análisis.

ANEXO 3 Datos históricos de Calidad río Cabí

ANEXO 4

Análisis de componentes principales, resultados obtenidos al procesar la información histórica del río Cabí para la selección de variables en la construcción del índice de contaminación minera

Programa estadístico utilizado: STATGRAPHIC versión 2.0

Principal Components Analysis

Analysis Summary

Data variables:

Coliformes Fecales
Coliformes Totales
Conductividad electrica
DBO5
Oxigeno disuelto
Oxigeno saturacion %
pH
Solidos suspendidos Totales
Solidos Totales
Temperatura
Turbiedad

Data input: observations

Number of complete cases: 45

Missing value treatment: listwise

Standardized: yes

Number of components extracted: 4

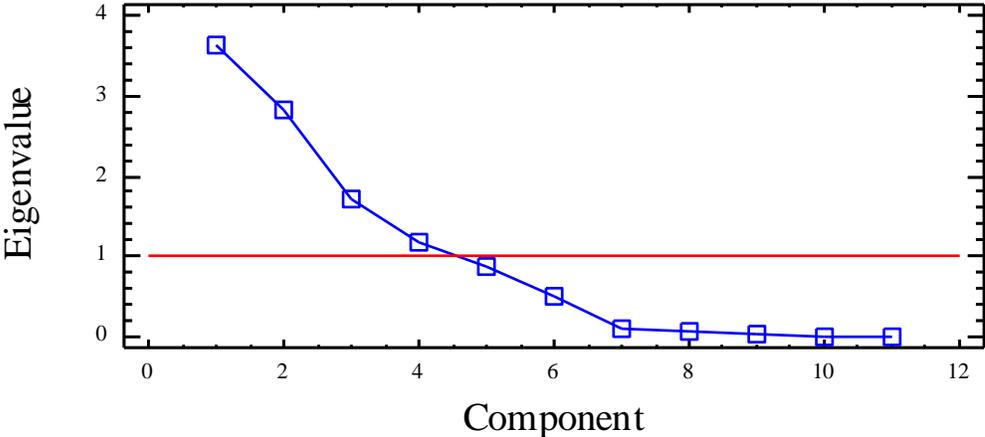
Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	3,62333	32,939	32,939
2	2,83342	25,758	58,698
3	1,70484	15,499	74,196
4	1,18705	10,791	84,988
5	0,891567	8,105	93,093
6	0,507215	4,611	97,704
7	0,106198	0,965	98,669
8	0,087855	0,799	99,468
9	0,0409622	0,372	99,840
10	0,009357	0,085	99,925
11	0,00821479	0,075	100,000

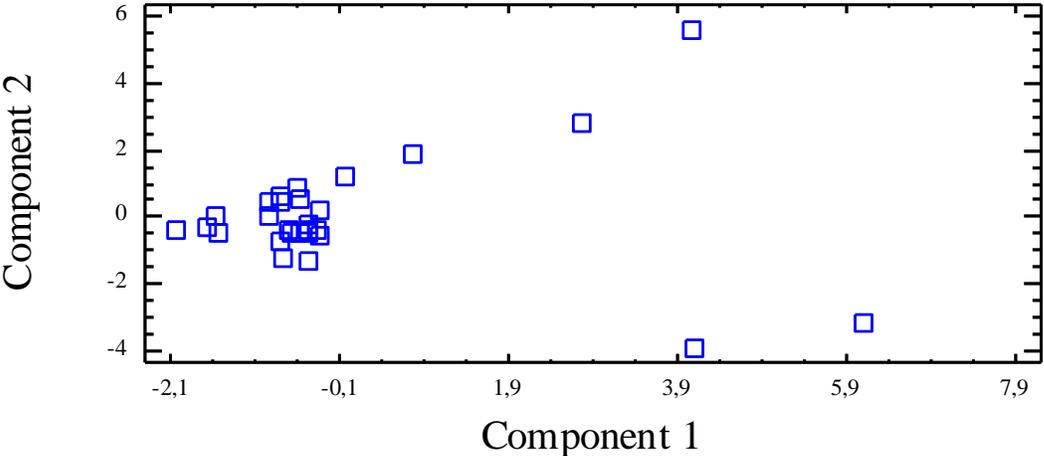
The StatAdvisor

This procedure performs a principal components analysis. The purpose of the analysis is to obtain a small number of linear combinations of the 11 variables which account for most of the variability in the data. In this case, 4 components have been extracted, since 1888 components had eigenvalues greater than or equal to 1,0. Together they account for 84,9876% of the variability in the original data.

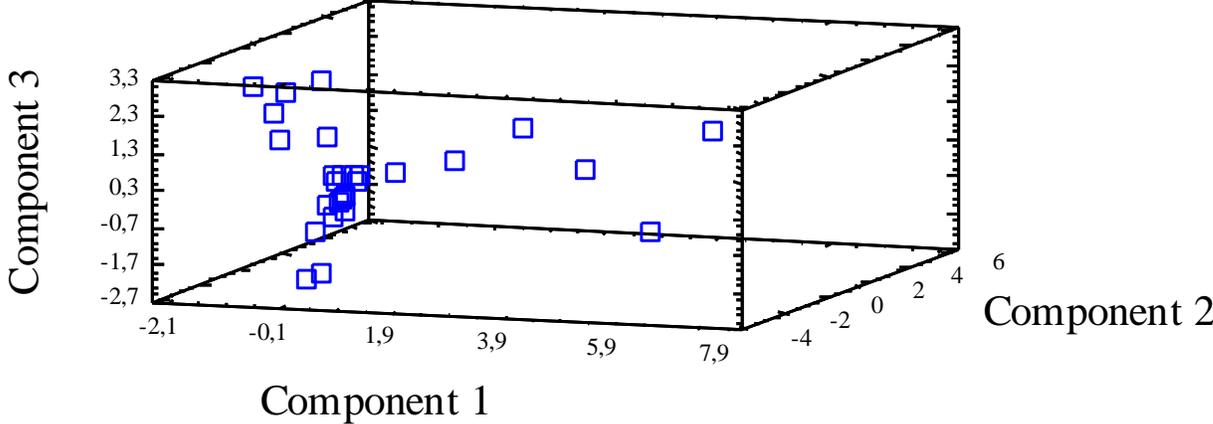
Scree Plot



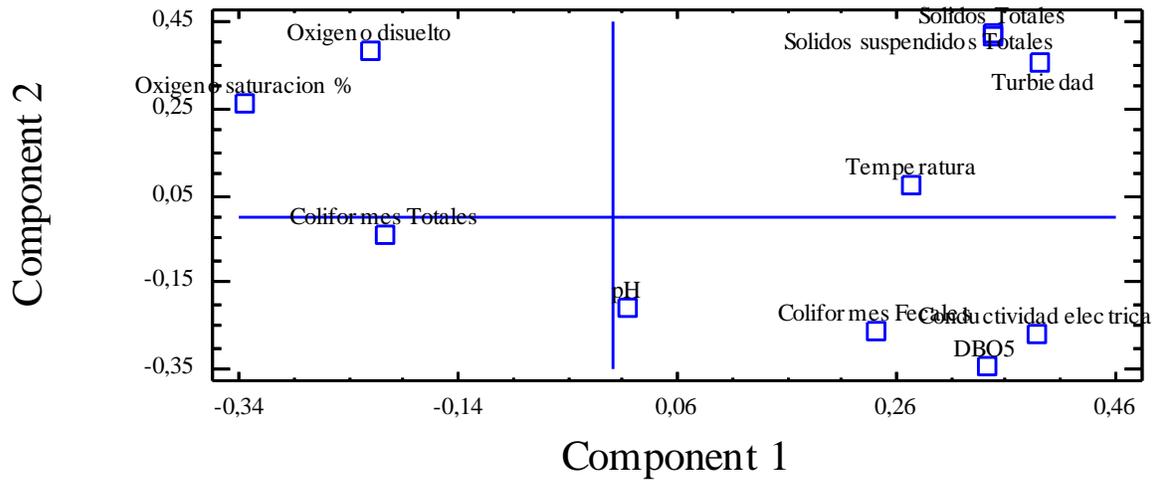
Scatterplot



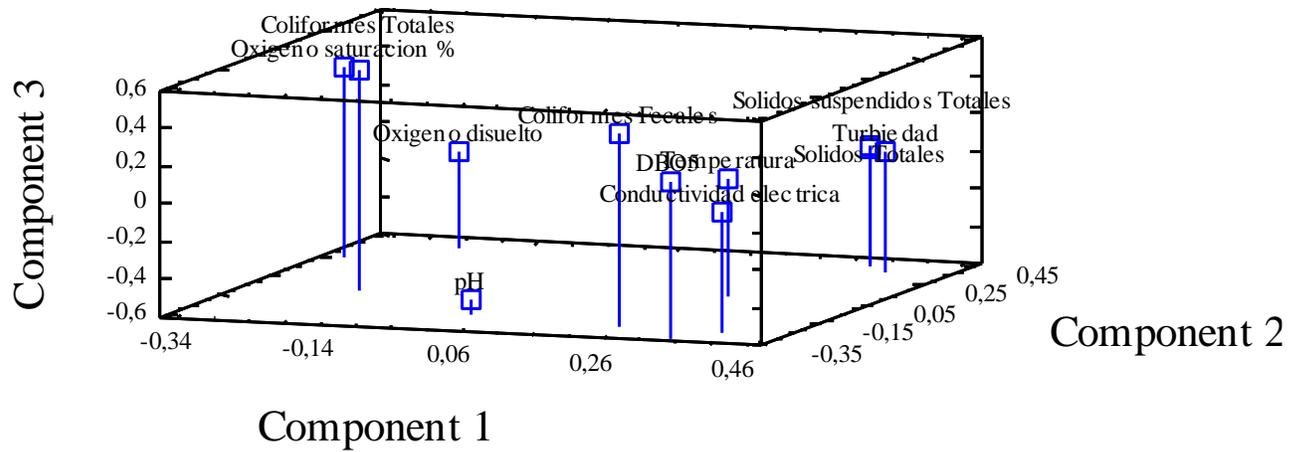
Scatterplot



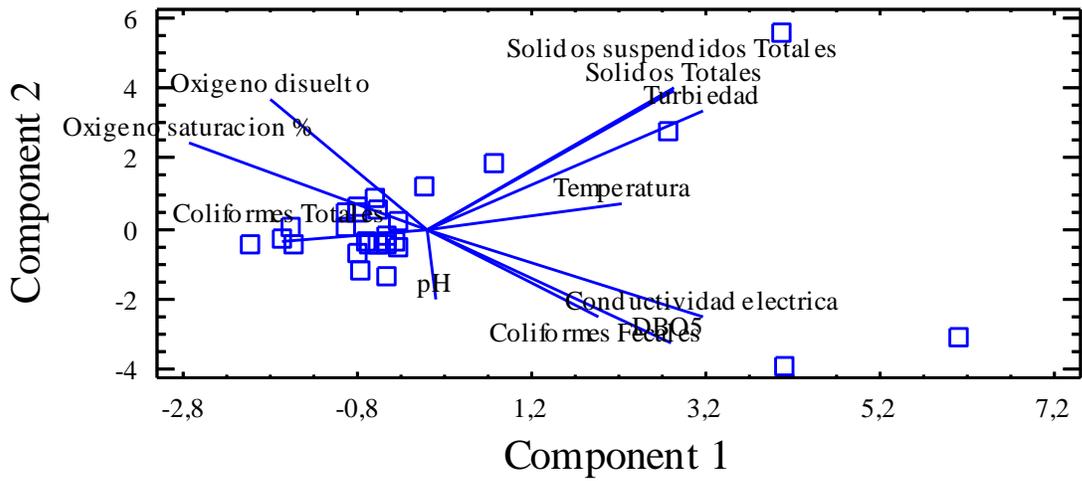
Plot of Component Weights



Plot of Component Weights



Biplot



Biplot

