

## **1. DIAGNOSTICO DE LA SITUACIÓN DE CALIDAD**

### **1.1.MODELO QUAL2K**

El modelo Qual2K fue desarrollado por la EPA Agencia Protección Ambiental, creado en el año 2001 por Steve Chapra. Este modelo considera los procesos de oxigenación presentes en el río además de los ciclos del nitrógeno y fósforo y como estos a su vez afectan el crecimiento de las algas.

Esta es una aplicación de Visual Basic que trabaja en Microsoft Excel y la integración numérica es realizada mediante un compilador Fortran 95. Este modelo es de tipo unidimensional e incorpora parámetros de calidad de agua , parámetros hidráulicos, datos de elevación , ubicación geográfica , meteorología y procesos de re aireación, permitiendo la simulación de flujo y la calidad de agua de cuerpos de agua loticos , incluyendo factores como zonas anóxicas , tributarios, tramos y vertimientos de fuentes puntuales y difusas.

Sus características principales son: El modelo opera en Excel, lo cual facilita la captura de datos, así como la generación y presentación de resultados y, además, no hay limitaciones en la especificación del número de tramos que se pueden modelar.

- El modelo realiza un análisis unidimensional, lo que indica que considera que se realiza una buena mezcla tanto lateral como verticalmente. La problemática que representa tener un modelo unidimensional se compensa con el hecho de que se le pueden incorporar los aportes laterales que ingresan al río producto de los efluentes o de ríos tributarios.
- Para cada elemento de cálculo se describe un equilibrio hidrológico en términos del flujo, un equilibrio de calor en términos de la temperatura, y un balance material en términos de la concentración.
- Permite calcular en forma explícita las interacciones entre el agua y los sedimentos que determinan la calidad de agua.
- Entre los procesos que considera el modelo se pueden citar: interacciones entre el sedimento y el agua, algas inferiores, extinción de luz, pH y patógenos.

- Entre las características hidráulicas necesarias se encuentran profundidad y velocidad.
- El tiempo del recorrido es calculado en función del volumen y del flujo de este tramo.
- Utiliza reacciones bioquímicas como fotosíntesis o respiración, generación y consumo de oxígeno.
- Calcula las interacciones principales entre aproximadamente 15 variables de estado.

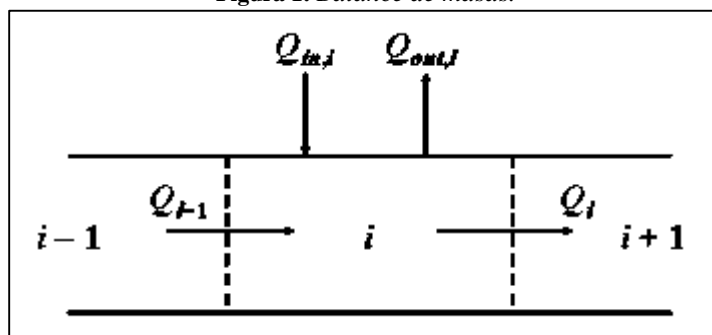
## **1.2.MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS**

El modelo simula las siguientes variables: conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton (algas en la columna de agua), detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal (Holguín, 2014).

- Temperatura: Todas las reacciones entre todas las variables del estado son dependientes de la temperatura y usando una formulación del tipo de Streeter-Phelps. El modelo calcula un factor de la corrección para todos los coeficientes. La temperatura del agua es calculada automáticamente por el modelo. En cada tramo se realiza un equilibrio de calor completo entre la radiación entrante total de onda corta, la radiación atmosférica entrante total, la radiación de la superficie del agua, la pérdida de calor por la evaporación y la pérdida de calor por la conducción a la atmósfera.
- Ciclo del nitrógeno: se encuentran presentes el nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito, y nitrato. La fijación y la mineralización del nitrógeno orgánico, la nitrificación que se divide en la oxidación del amoníaco en nitrito y la oxidación del nitrito en el nitrato, la regeneración del sedimento y de la respiración algal, son algunos de los factores que considera el equilibrio del nitrógeno. Además, se pueden corregir las tasas de reacción de nitrificación.

El programa Qual2k trabaja con un balance de masas, el cual es el siguiente:

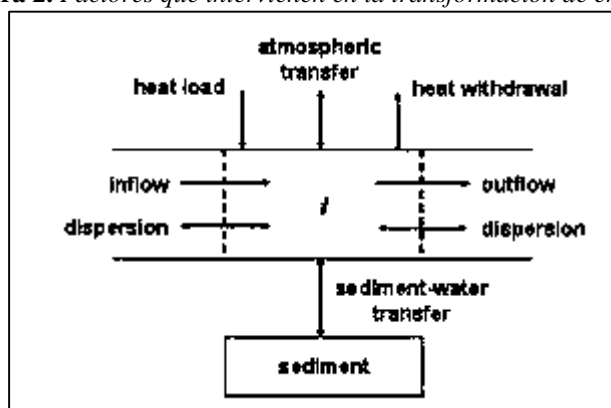
Figura 1. Balance de masas.



Fuente: Chapra, 2008

En el cual se integran los siguientes factores:

Figura 2. Factores que intervienen en la transformación de energía.



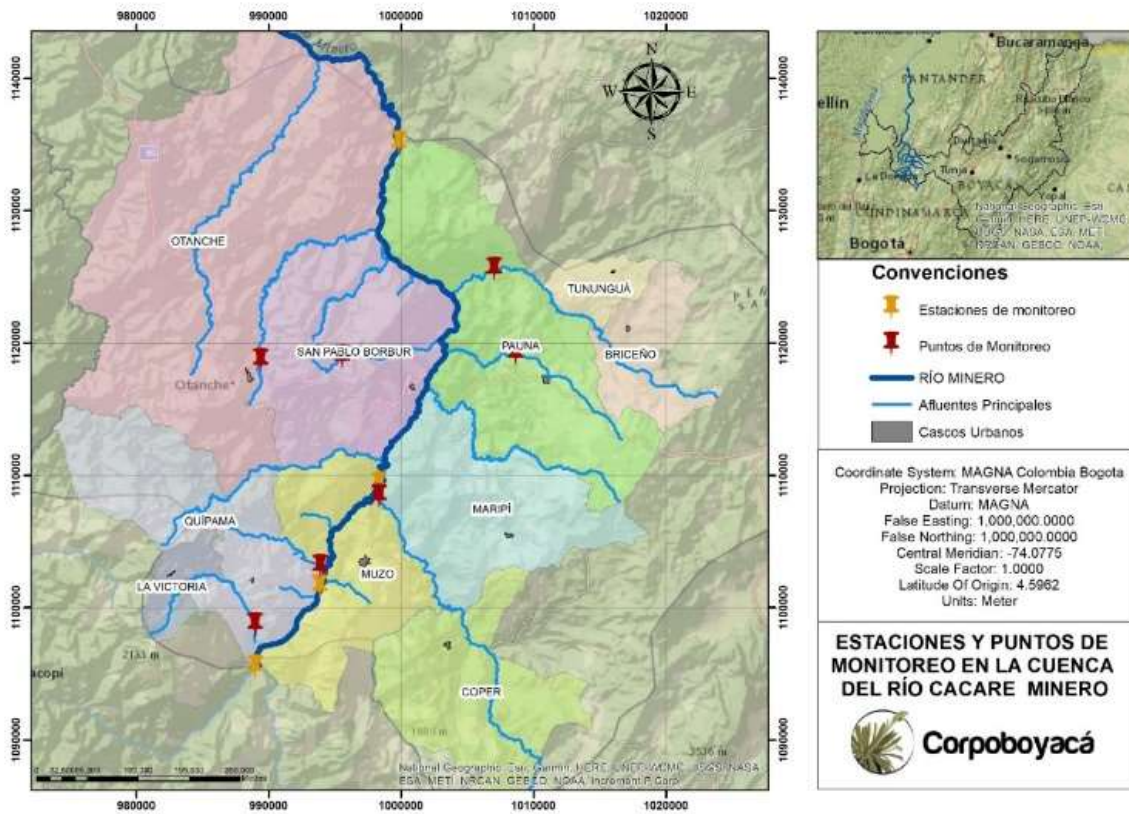
Fuente: Chapra, 2008

El balance de masas contiene un Caudal de entrada, dispersión y un caudal de salida y su respectiva dispersión, los factores alternos son: la entrada de masa, la transferencia atmosférica, la salida de masa y la entrada y salida de algas y sedimentos.

### 1.3. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE MONITOREO

Para conocer la calidad hídrica de la corriente principal del río Minero se recopiló información base de los datos registrados en la campaña de monitoreo realizada en presente año (2021) en el que se generó un levantamiento hidrométrico de 4 estaciones de monitoreo (puntos que se encuentran ubicados en la corriente principal) y 6 puntos de monitoreo (Afluentes y ríos tributarios). Los cuales se representan en la siguiente cartografía:

**Figura 3** Estaciones y puntos de monitoreo en la cuenca del Río Minero



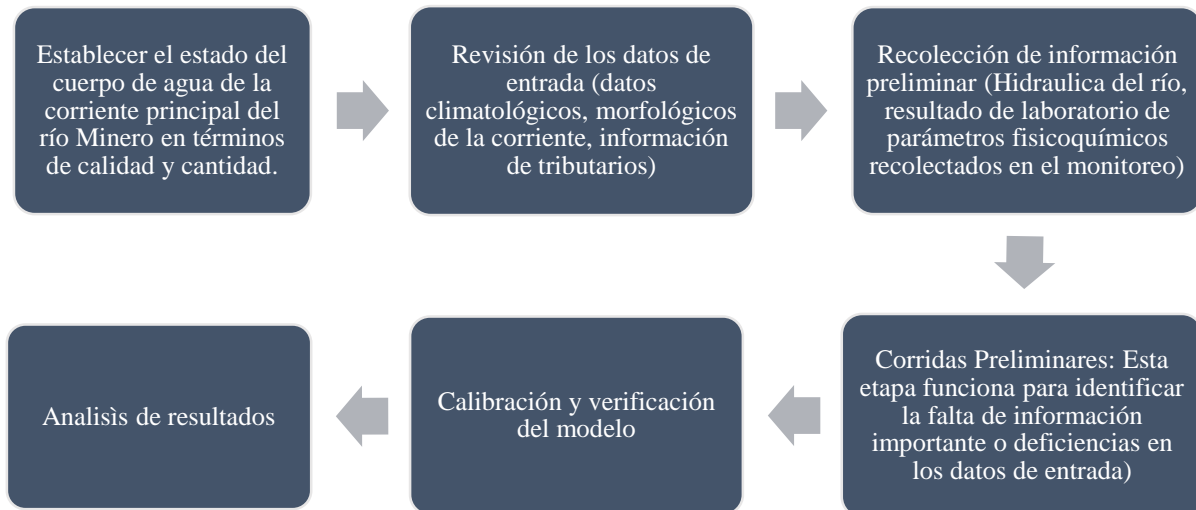
**Tabla 1** Estaciones y puntos de monitoreo de la corriente principal del Río Minero.

TRAMO	TIPO	NOMBRE
1	Estación	Estación de Inicio, Puente Guaquimay
	Punto	Q. El Batán
	Punto	Q. Itoco
	Estación	Puente Vía Muzo
	Punto	Río Guazo
2	Estación	Río Minero – Mina Polveros
	Punto	Q. Paunera
	Punto	Q. Buri Buri
	Punto	Río Ibacapí
	Punto	Q. Tambrías
	Estación	Estación Final- Otro Mundo

Fuente: Corpoboyacá

#### 1.4.METODOLOGÍA

**Figura 4.** Proceso De Modelación De Calidad Del Agua De La Corriente Del Río Minero



**Fuente:** Corpoboyacá

### 1.5.DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada incluyen: localización , fecha , opciones de control para la integración numérica de las ecuaciones de balance de masa, caudal y concentraciones en la condición de frontera aguas arriba (cabecera), condiciones de frontera de caudal y concentración para las fuentes puntuales y difusas de contaminación, longitudes de los segmentos y tramos, elevaciones, geometría e hidráulica (curvas de calibración de profundidad y velocidad, o los parámetros para resolver la ecuación de Manning considerando flujo uniforme y sección trapezoidal), temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, cobertura de nubes, sombra, parámetros para el modelo de atenuación de luz en la columna de agua, opciones para los modelos de radiación solar, evaporación y radiación de onda larga, valores de los parámetros (constantes y tasas de transformación) que gobiernan la calidad del agua, los parámetros de control del algoritmo genético para la calibración automática opcional de las constantes y tasas de transformación de la calidad del agua. (Chapra et.al., 2008).

La información de calidad y cantidad del agua para ingresar en el modelo fue recopilada en la campaña de monitoreo realizada por el laboratorio Anascol en el año 2018 en el cual se midieron los respectivos parámetros de calidad que requiere el programa tales como conductividad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, DBO5, nitrógeno orgánico, nitrógeno

amoniacal, nitratos, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, patógenos, alcalinidad, temperatura y caudal.

Para los efectos de modelación el programa ejecuta la producción de phytoplankton y crecimiento de plantas macrófitas, demanda bioquímica de oxígeno, producción de oxígeno por fotosíntesis y re-aireación atmosférica y demanda de oxígeno por la materia orgánica sedimentada en el lecho. Adicionalmente incluye un balance de masa para minerales conservativos, y componentes no conservativos tales como sustancias radioactivas. En QUAL2Kw, la Clorofila-a se modela como un indicador de la cantidad de biomasa de algas y phytoplankton. También calcula variables tales como el Nitrógeno Total, Fósforo Total, Nitrógeno Total Kjeldahl, Total de Sólidos Suspendidos, DBO última. El cálculo de la Demanda de Oxígeno en los sedimentos (SOD, por sus siglas en inglés) y el Flujo de Nutrientes de los mismos, se realiza con un modelo desarrollado por Di Toro (Di Toro et al. 1991, Di Toro and Fitzpatrick. 1993, Di Toro 2001), a grandes rasgos, este modelo toma el carbono orgánico, el nitrógeno y el fósforo en la zona anaerobia donde se encuentran los sedimentos y a través de reacciones de mineralización los transforma en metano disuelto, amonio y fósforo inorgánico, estos componentes son llevados a la zona aerobia donde parte del metano y el amonio se oxida, el flujo necesario de oxígeno para que este proceso de oxidación ocurra es la demanda de oxígeno disuelto (SOD).

## **1.6.IDENTIFICACIÓN DE FUENTES PUNTUALES Y DIFUSAS**

Las fuentes de contaminación del agua se dividen en fuentes puntuales y fuentes difusas, la primera consiste en fuentes que entran al medio ambiente por un solo punto de entrada que se identifica fácilmente, mientras que las fuentes difusas son aquellas que se reparten en áreas más extensas. Las fuentes puntuales tienden a ser aquellas directamente identificadas por sus orígenes en actividades humanas y son descargadas por tuberías y alcantarillas a los cuerpos de agua (fábricas, plantas de tratamiento de aguas residuales, minas, pozos petroleros, etc). Las fuentes difusas por el contrario son relativamente más difíciles de identificar y controlar (Vertimiento de sustancias químicas, tierras de cultivo, lotes para pastar ganado, construcciones, tanques sépticos) (Manahan, 2006).

En el QUAL2K las fronteras internas del modelo corresponden a las fuentes puntuales (ríos, extracciones y vertimientos). La corriente principal del río Minero se ubica en el

Departamento de Boyacá, en los municipios de Coper, Muzo, La Victoria, Quípama, Maripí, Pauna, Tununguá, Briceño, San pablo de Borbur, Otanche; según el IGAC, la zonificación hidrográfica de Colombia corresponde al Área Hidrográfica del Magdalena-Cauca, Zona Hidrográfica Medio Magdalena y Subzona Hidrográfica Río Carare Minero

La corriente principal recibe el mayor aporte de caudal de las siguientes quebradas: Río Guazo o Palenque, Río Ibacapí, Quebrada El Batán, Quebrada Itoco, Quebrada Paunera, Quebrada Piache, Quebrada Buri Buri y Quebrada Tambrías.

Para el modelo, las fronteras externas corresponden a las estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo del tramo de estudio. El modelo permite ingresar los valores de calidad del agua medidos en la corriente de forma puntual, el valor medio de los datos medidos en un tiempo determinado y los valores mínimos y máximos observados para cada parámetro de calidad de agua en las estaciones monitoreadas.

## 1.7. ESCENARIO DE SIMULACIÓN

### 1.7.1. Escenario base

Como punto de partida se debe conocer el estado actual de la corriente principal del río Minero, para esto se realizó una simulación con los datos recolectados en la campaña de monitoreo del año 2021 del mes de Julio.

Con este escenario se va a establecer las condiciones actuales que presenta este cuerpo hídrico el cual va a ser calibrado con los datos medidos en campo (datos de calidad, hidrología e hidráulica de la campaña de monitoreo), tomando estos datos como punto de partida. Al considerarse como línea base se ajustaron algunos de los parámetros del modelo (tasas de reacción, sedimentación, entre otros) para obtener una mejor representación de los datos reportados por el laboratorio.

**Tabla 2.** *Criterios a modelar en el Escenario base de la corriente principal.*

Parámetros	Cuerpo de agua receptor-Río Minero	Tributarios	Vertimientos
Caudal	Caudal medido en época de estiaje	Caudal medido en época de estiaje	Caudal monitoreado en campo
Calidad de agua	Concentraciones normales en época de estiaje	Concentraciones normales en época de estiaje	Concentraciones monitoreadas en campaña de monitoreo

Hidráulica del río	Datos de batimetría tomados en campo	Datos de batimetría tomados en campo	No aplica
Climatología	datos climatológicos de humedad relativa, velocidad del viento, temperatura ambiente, brillo solar y punto de rocío.	No aplica	No aplica

Fuente: Corpoboyacá

### 1.7.2. Resultados y análisis de resultados

Se realizó la alimentación del modelo de calidad de agua QUAL2Kw tal y como se describió en la metodología, la información general ingresada en cada hoja de trabajo del programa se puede resumir de la siguiente forma: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tomados en campo en las campañas de monitoreo, descripción de los tramos del río, constantes hidráulicas, selección de las constantes cinéticas de calibración, condiciones meteorológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales.

### 1.7.3. Características de la cabecera de la corriente.

En la siguiente figura se presenta la hoja de trabajo Headwater, en la cual se ingresó el caudal y la información fisicoquímica de la cabecera de la corriente.

Figura 5. Hoja Headwater del programa Qual2k.



Parameter	Unit	1200 a.m.	1400 a.m.	1600 a.m.	1800 a.m.	2000 a.m.	2200 a.m.	0000 a.m.	0200 a.m.	0400 a.m.	0600 a.m.	0800 a.m.	
Headwater Flow	m <sup>3</sup> /s	15.701											
Headwater Downstream Inventory	No	0											
Headwater Water Quality		1200 a.m. 1400 a.m. 1600 a.m. 1800 a.m. 2000 a.m. 2200 a.m. 0000 a.m. 0200 a.m. 0400 a.m. 0600 a.m. 0800 a.m.											
Temperature	°C	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	
Conductivity	µmhos	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	325.00	
Inorganic Solids	mg/L	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	
Dissolved Oxygen	mg/L	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	
Chloride	mg/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Chloride	mg/L	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	
Organic Nitrogen	mg/L	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	2910.00	
NH4 Nitrogen	mg/L	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	
NO3 Nitrogen	mg/L	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	
Organic Phosphorus	mg/L	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Inorganic Phosphorus (DIP)	mg/L	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	
Phosphorus	mg/L	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	
Sulfate (SO4)	mg/L	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	
Sulfur	mg/L	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00	
Sulfate concentration (Sulfate)	mg/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Alkalinity	mg/L-Ca	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	
pH		8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	

Fuente: Corpoboyacá

### 1.7.4. Hoja Reach o Tramos

En esta hoja se ingresaron las constantes hidráulicas de la corriente y la información de cada uno de los tramos en los que se segmentó el río.

Figura 6. Hoja Reach programa Qual2k.

Reach	Flow rate (Q)	Velocity (V)	Depth (D)	Width (W)	Temperature	Dissolved Oxygen	Organic Nitrogen	NH4 Nitrogen	NO3 Nitrogen	Organic Phosphorus	Inorganic Phosphorus	Sulfate	Alkalinity	pH
Reach 1	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 2	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 3	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 4	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 5	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 6	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 7	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 8	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 9	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 10	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 11	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16
Reach 12	15.701	0.18	0.40	14.00	22.00	6.63	2910.00	30.00	300.00	100.00	40.00	5.62	63.00	8.16

Fuente: Corpoboyacá

### 1.7.5. Hoja de cálculo para puntos fijos.

En la siguiente figura se presenta la hoja de trabajo “Point Sources”, en la cual se ingresó el caudal y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales es decir a sus afluentes.

Figura 7. Hoja Point Source.

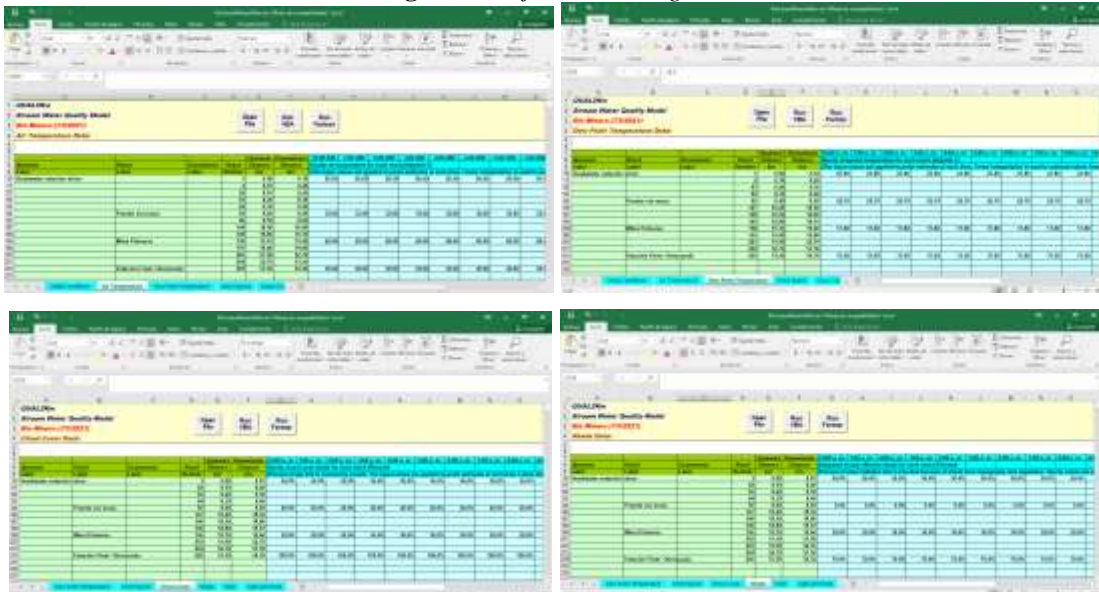
Point	Longitude	Latitude	Altitude	Temperature	Humidity	Cloud cover	Wind speed	Wind direction	Wind gust	Wind gust direction	Wind gust speed	Wind gust direction	Wind gust speed	Wind gust direction	Wind gust speed	Wind gust direction	Wind gust speed	Wind gust direction	Wind gust speed	Wind gust direction
Q1 Balsa	8.32	5.5100	22.30	210.00	202.00	5.36	5.36	2.10	400.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00	207.00
Q2 Balsa	8.37	5.5100	25.20	630.00	600.00	6.06	6.06	2.54	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00
Q3 Balsa	8.42	5.5100	25.50	321.00	272.00	7.23	7.23	2.21	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00
Q4 Puentes	8.29	5.5177	22.50	303.00	256.00	6.41	6.41	1.80	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
Q5 Balsa	8.36	5.5100	23.00	57.00	50.00	5.43	5.43	2.30	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00
Q6 Balsa	8.31	5.4533	24.00	428.00	380.00	8.30	8.30	2.07	200.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00	407.00
Q7 Tumbes	8.33	5.5177	24.50	200.00	180.00	5.40	5.40	2.10	200.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00	543.00

Fuente: Corpoboyacá.

### 1.7.6. Hojas de registro de datos meteorológicos

Se presentan las hojas de trabajo “Air temperature”, “Dew point temperature”, “Wind speed” y Cloud cover”, en las cuales se ingresaron los datos meteorológicos.

Figura 8. Hojas meteorológicas.



Fuente: Corpoboyacá

### 1.7.7. Hojas de salida del modelo

Después de que el modelo Qual2k ha efectuado los cálculos necesarios para poder realizar las corridas de simulación, se generan diferentes hojas electrónicas y gráficas con los resultados en el mismo Excel. En las figuras resultantes se pueden comparar las curvas

correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo del río.

**Figura 9.** Hoja de resumen programa Qual2K.

Station Label	zphq	ztem (mmHg)	DS (mg/L)	DC(mg/L)	SRCo (mg/L)	CDOX (mg/L)	BioBOD <sub>5</sub>	BIBioBOD <sub>5</sub>	NO <sub>3</sub> -N(mg/L)	PO <sub>4</sub> -P(mg/L)	Amoq P (mg/L)	Phos (mg/L)	Disturb (hr)
Headwater estación in	0.00	525.00	09.00	6.83	0.00	7.75	2958.00	90.00	100.00	100.00	49.00	100.00	
90	8.05	293.00	27.20	7.75	0.75	5.14	2107.15	106.50	102.07	126.68	54.36	126.50	
91	8.15	293.00	26.55	7.75	0.75	5.15	2106.00	106.27	102.94	126.40	54.52	126.42	
92	8.25	293.00	26.00	7.75	0.75	5.19	2106.18	106.03	102.91	126.13	54.69	126.45	
93	8.35	293.00	25.42	7.75	0.20	5.19	2105.68	105.80	102.88	125.85	54.85	126.49	
94 Puentes vía muelle	8.45	293.00	24.81	7.75	0.20	5.11	2105.10	105.48	102.84	125.40	55.00	126.54	
157	18.65	324.00	105.15	7.62	0.25	6.30	1200.40	317.65	264.36	35.04	63.10	161.12	
158	18.95	324.00	102.22	7.62	0.25	6.27	1199.90	318.13	265.02	34.47	63.50	161.21	
159 Mina Polvorin	19.25	324.00	93.97	7.65	0.27	6.25	1198.84	313.76	266.02	33.63	63.94	161.25	
212	52.30	344.34	43.68	7.93	0.50	3.70	874.00	230.34	121.76	62.17	69.10	166.96	
213	53.10	344.34	43.68	7.97	0.50	3.67	873.81	227.25	121.21	61.53	69.45	167.49	
214 Estación Final. Otrom	53.80	344.34	43.68	7.93	0.51	3.54	873.45	225.11	121.74	60.60	70.07	167.76	
215 Terminus	54.30	344.34	43.68	7.93	0.51	3.44	873.45	225.11	121.74	60.60	70.07	167.76	

Fuente: Corpoboyacá

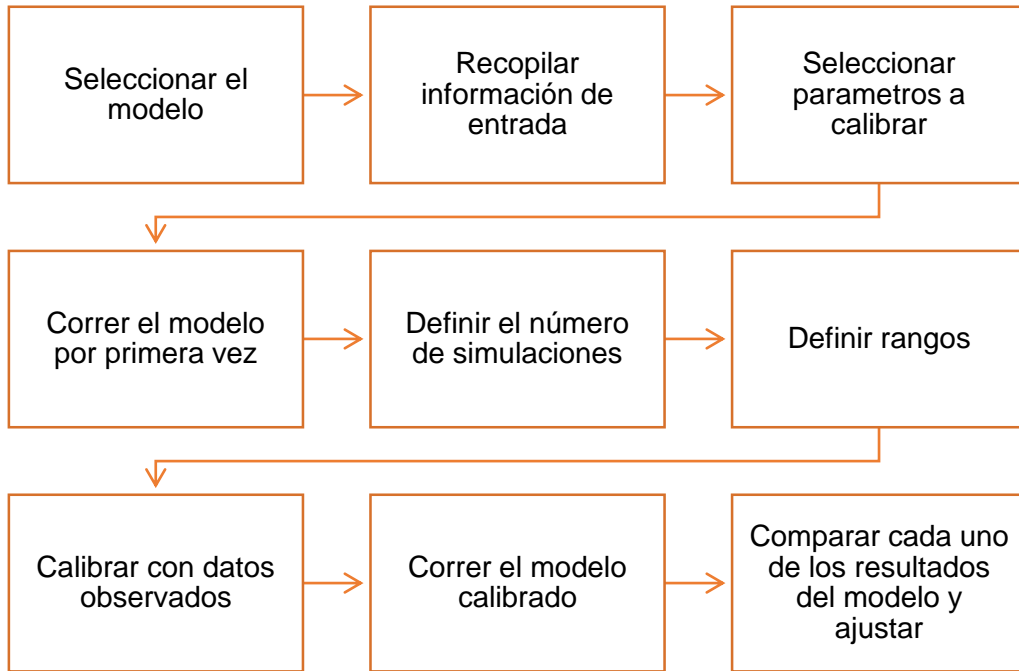
## 1.8.CALIBRACIÓN.

A continuación, se presentan los resultados de la calibración del modelo, teniendo en cuenta que la calibración se realizó a partir de la información de la campaña de monitoreo realizada en tiempo seco (julio),” para encontrar las constantes cinéticas de la corriente.

### 1.8.1. Metodología.

El primer paso es la selección del modelo es el paso inicial en la modelación y calibración, luego se deben ingresar los datos de entrada al modelo, es decir los datos obtenidos en las mediciones de campo y se deben definir las condiciones de frontera de este modelo. Seguidamente, se seleccionan los parámetros del modelo a calibrar, y con esto, se seleccionan los rangos aceptables de calibración de cada parámetro y el número de simulaciones óptimo para obtener los datos deseados. Después de esto, se generan los números aleatorios a partir de los rangos seleccionados de cada parámetro un número “n” grande de veces. A continuación, se expresa la metodología utilizada:

**Figura 10. Metodología de calibración del programa Qual2K.**



Fuente: Corpoboyacá

**Figura 11. Rangos de calibración para el modelo**

Parameter	Value (Units)	Symbol	Autocal	Min value	Max value
k1	0.1	k1	No	0.00	0.00
k2	0.1	k2	No	0.00	0.00
k3	0.1	k3	No	0.00	0.00
k4	0.1	k4	No	0.00	0.00
k5	0.1	k5	No	0.00	0.00
k6	0.1	k6	No	0.00	0.00
k7	0.1	k7	No	0.00	0.00
k8	0.1	k8	No	0.00	0.00
k9	0.1	k9	No	0.00	0.00
k10	0.1	k10	No	0.00	0.00
k11	0.1	k11	No	0.00	0.00
k12	0.1	k12	No	0.00	0.00
k13	0.1	k13	No	0.00	0.00
k14	0.1	k14	No	0.00	0.00
k15	0.1	k15	No	0.00	0.00
k16	0.1	k16	No	0.00	0.00
k17	0.1	k17	No	0.00	0.00
k18	0.1	k18	No	0.00	0.00
k19	0.1	k19	No	0.00	0.00
k20	0.1	k20	No	0.00	0.00
k21	0.1	k21	No	0.00	0.00
k22	0.1	k22	No	0.00	0.00
k23	0.1	k23	No	0.00	0.00
k24	0.1	k24	No	0.00	0.00
k25	0.1	k25	No	0.00	0.00
k26	0.1	k26	No	0.00	0.00
k27	0.1	k27	No	0.00	0.00
k28	0.1	k28	No	0.00	0.00
k29	0.1	k29	No	0.00	0.00
k30	0.1	k30	No	0.00	0.00
k31	0.1	k31	No	0.00	0.00
k32	0.1	k32	No	0.00	0.00
k33	0.1	k33	No	0.00	0.00
k34	0.1	k34	No	0.00	0.00
k35	0.1	k35	No	0.00	0.00
k36	0.1	k36	No	0.00	0.00
k37	0.1	k37	No	0.00	0.00
k38	0.1	k38	No	0.00	0.00
k39	0.1	k39	No	0.00	0.00
k40	0.1	k40	No	0.00	0.00
k41	0.1	k41	No	0.00	0.00
k42	0.1	k42	No	0.00	0.00
k43	0.1	k43	No	0.00	0.00
k44	0.1	k44	No	0.00	0.00
k45	0.1	k45	No	0.00	0.00
k46	0.1	k46	No	0.00	0.00
k47	0.1	k47	No	0.00	0.00
k48	0.1	k48	No	0.00	0.00
k49	0.1	k49	No	0.00	0.00
k50	0.1	k50	No	0.00	0.00
k51	0.1	k51	No	0.00	0.00
k52	0.1	k52	No	0.00	0.00
k53	0.1	k53	No	0.00	0.00
k54	0.1	k54	No	0.00	0.00
k55	0.1	k55	No	0.00	0.00
k56	0.1	k56	No	0.00	0.00
k57	0.1	k57	No	0.00	0.00
k58	0.1	k58	No	0.00	0.00
k59	0.1	k59	No	0.00	0.00
k60	0.1	k60	No	0.00	0.00
k61	0.1	k61	No	0.00	0.00
k62	0.1	k62	No	0.00	0.00
k63	0.1	k63	No	0.00	0.00
k64	0.1	k64	No	0.00	0.00
k65	0.1	k65	No	0.00	0.00
k66	0.1	k66	No	0.00	0.00
k67	0.1	k67	No	0.00	0.00
k68	0.1	k68	No	0.00	0.00
k69	0.1	k69	No	0.00	0.00
k70	0.1	k70	No	0.00	0.00
k71	0.1	k71	No	0.00	0.00
k72	0.1	k72	No	0.00	0.00
k73	0.1	k73	No	0.00	0.00
k74	0.1	k74	No	0.00	0.00
k75	0.1	k75	No	0.00	0.00
k76	0.1	k76	No	0.00	0.00
k77	0.1	k77	No	0.00	0.00
k78	0.1	k78	No	0.00	0.00
k79	0.1	k79	No	0.00	0.00
k80	0.1	k80	No	0.00	0.00
k81	0.1	k81	No	0.00	0.00
k82	0.1	k82	No	0.00	0.00
k83	0.1	k83	No	0.00	0.00
k84	0.1	k84	No	0.00	0.00
k85	0.1	k85	No	0.00	0.00
k86	0.1	k86	No	0.00	0.00
k87	0.1	k87	No	0.00	0.00
k88	0.1	k88	No	0.00	0.00
k89	0.1	k89	No	0.00	0.00
k90	0.1	k90	No	0.00	0.00
k91	0.1	k91	No	0.00	0.00
k92	0.1	k92	No	0.00	0.00
k93	0.1	k93	No	0.00	0.00
k94	0.1	k94	No	0.00	0.00
k95	0.1	k95	No	0.00	0.00
k96	0.1	k96	No	0.00	0.00
k97	0.1	k97	No	0.00	0.00
k98	0.1	k98	No	0.00	0.00
k99	0.1	k99	No	0.00	0.00
k100	0.1	k100	No	0.00	0.00

Fuente: Corpoboyacá

## 1.9. ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELO CALIBRADO

Una vez seleccionados, mediante el proceso de calibración, los parámetros óptimos del modelo, se corren nuevamente la campaña de medición, para obtener los resultados con el modelo calibrado. Los resultados calibrados para la campaña se utilizan para evaluar la calidad del agua del río y por lo tanto los posibles conflictos uso-calidad que se puedan presentar. La evaluación se realiza por medio de la metodología expuesta en el decreto

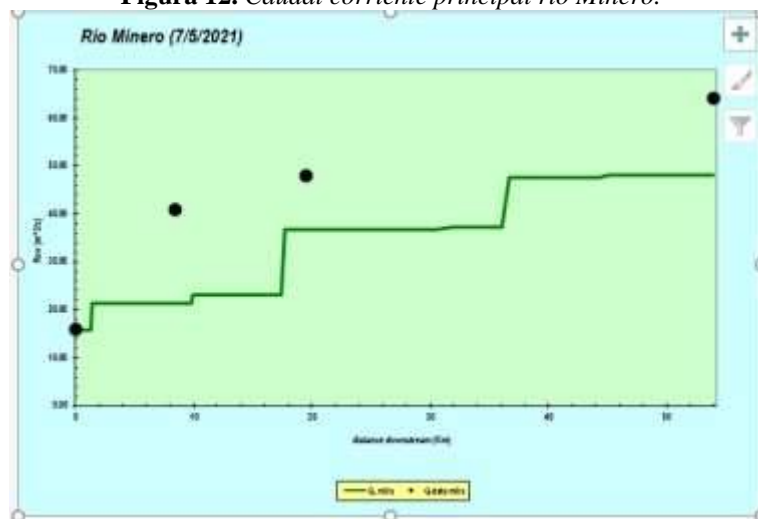
“Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales”.

En forma general los resultados de la calibración del modelo de simulación muestran un ajuste moderado entre los valores calculados por el modelo y los valores medidos en campo de las diferentes variables, los resultados aquí encontrados establecen una línea base para futuras modelaciones que permitan ajustar las constantes calibradas. Los resultados se expresan a continuación:

### 1.9.1. Caudal

El caudal es determinado por el programa mediante los balances de flujo, partiendo del caudal de cabecera del río y los aportes por fuentes puntuales y ríos tributarios a lo largo de su recorrido. Es importante tener en cuenta que al modelo solo se ingresó la información de caudal para los tributarios y aportes de afluentes directos a la corriente principal del río Minero.

**Figura 12.** Caudal corriente principal río Minero.

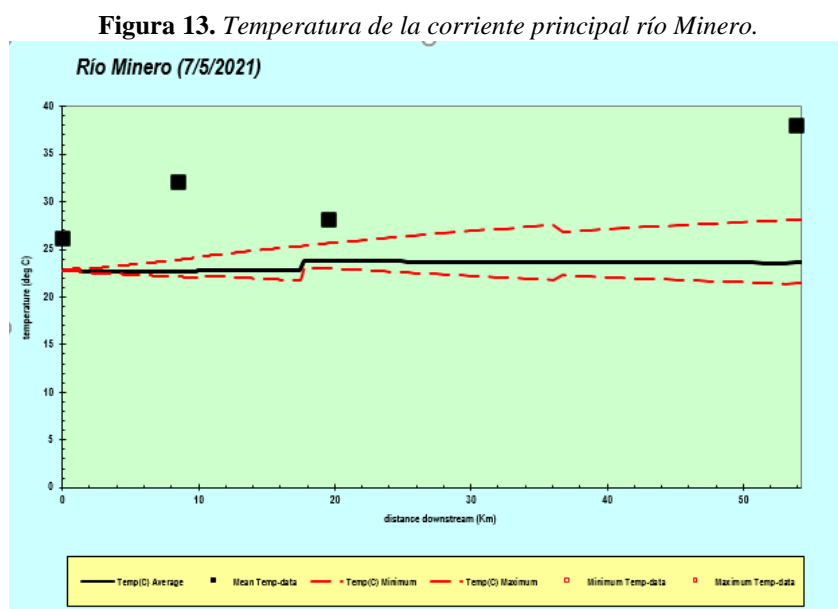


**Fuente:** Corpoboyacá.

Los resultados reflejan que el caudal aumenta progresivamente a lo largo del recorrido en la cabecera presenta un caudal de 15,781 m<sup>3</sup>/s y termina en la estación final denominada Otro mundo en el tramo 2 con un caudal de 64,050 m<sup>3</sup>/s. Cabe aclarar que el caudal no es un parámetro que se pueda calibrar ya que no se tiene información de fuentes difusas

## 1.9.2. Temperatura.

La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases (Jiménez, 2000). Los resultados para la calibración y la confirmación de la temperatura se presentan a continuación:



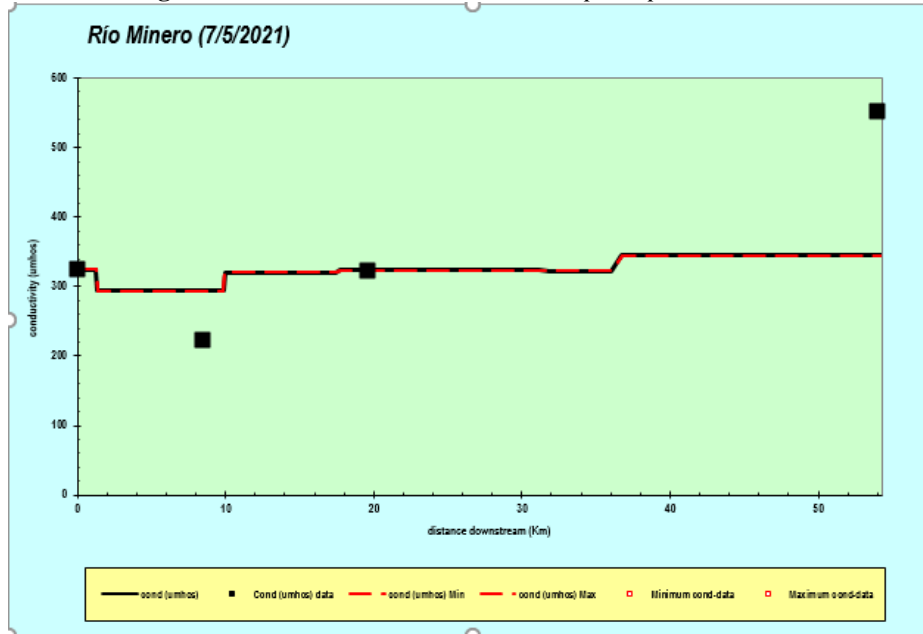
Fuente: Corpoboyacá.

La temperatura representada en la anterior grafica demuestra que el pico más alto se presenta en la estación final de monitoreo que se denomina Otro Mundo (Tramo 2) con un valor de 38°C después de recibir el aporte del afluente de la Quebrada Tambrías en la cual se obtuvo un valor de 24.50 °C. Posteriormente, a medida que el río avanza la temperatura va encontrando un punto de equilibrio presentando valores que oscilan entre los 26 y 28 °C valores normales para corrientes ubicadas en esta zona.

## 1.9.3. Conductividad

La conductividad del agua está compuesta por iones provenientes de sales disueltas y materia orgánica. Al determinar la concentración de iones disueltos en el agua se puede calcular la cantidad de solidos disueltos totales presentes en esta. Los resultados de conductividad se expresan a continuación:

**Figura 14.** Conductividad de la corriente principal río Minero.



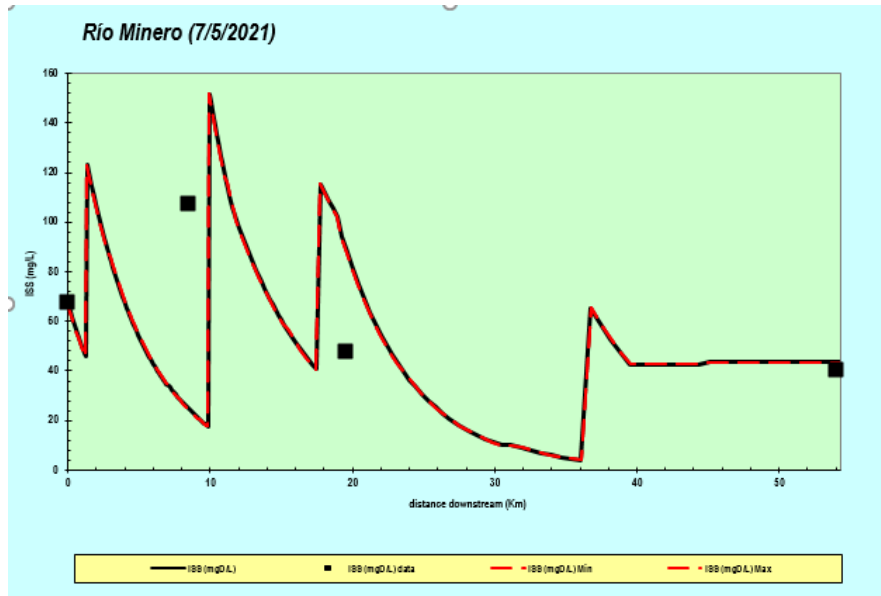
Fuente: Corpoboyacá.

Con respecto a la conductividad se puede observar como a medida que avanza la corriente en la distancia empieza a ascender los niveles de conductividad, registrando su valor más bajo en la estación Puente Vía Muzo con un valor de 222 umhos, se puede evidenciar que los sólidos se no tienen mayor disolución, sino que dichos sólidos se suspenden, debido a la actividad minera; la concentración más alta se presentó en la última estación de Otro mundo con un valor de 553 umhos, el comportamiento que se puede deber a la presencia de solidos totales disueltos que se encuentran en este tramo del río ya que estos parámetros están altamente correlacionados. En este punto la corriente del río aumenta y se acerca a los límites del departamento de Santander

#### **1.9.4. Sólidos Suspendidos Inorgánicos.**

En la siguiente grafica se expresan los resultados de los sólidos suspendidos inorgánicos como resultado de la confirmación desde su nacimiento hasta la desembocadura del río Minero.

**Figura 15.** Sólidos Suspendidos Inorgánicos de la corriente principal río Minero.



**Fuente:** Corpoboyacá.

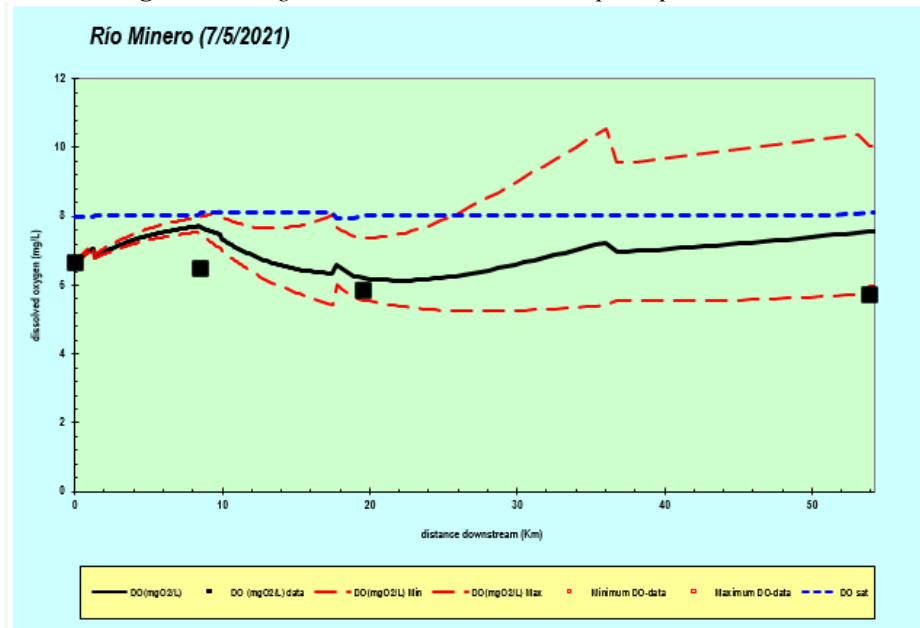
La concentración de Sólidos Suspendidos Inorgánicos al inicio del tramo de acuerdo a la campaña de monitoreo se encuentra en un rango de 40 a 68 (mg D/L), sin embargo se presenta su mayor pico en la estación de monitoreo Puente Vía Muzo (107.2mgD/l) esto puede ser causado al aporte de carga de sales e iones por el tipo de agua que se encuentra en este tramo, debido a las actividades que se encuentran en dicha estación de monitoreo. Los sólidos inorgánicos a pesar de ser una fracción menor que los sólidos orgánicos son más complejos de degradar.

### 1.9.5. Oxígeno Disuelto

A continuación, se presentan los resultados de calibración en el parámetro de Oxígeno Disuelto en el río Minero en este caso la línea azul representa el Oxígeno disuelto máximo que se puede alcanzar a lo largo de la corriente (Oxígeno disuelto de saturación) la línea continua representa los resultados de simulación y los puntos los dados medidos en campo.



**Figura 16.** Oxígeno Disuelto de la corriente principal río Minero.



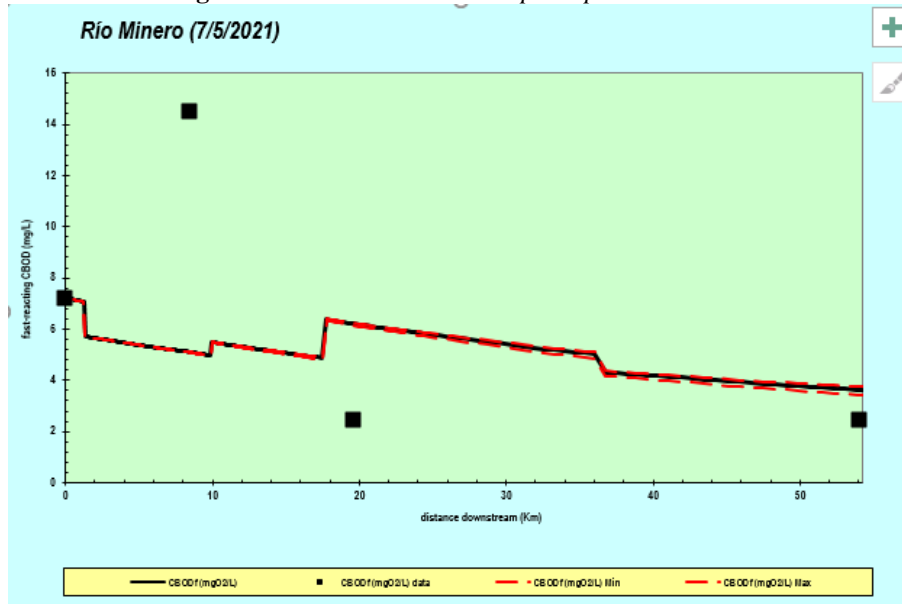
**Fuente:** Corpoboyacá.

En términos de Oxígeno disuelto los valores arrojados después de la calibración demuestran un buen nivel de oxígeno presente en el agua, debido a que una concentración de oxígeno disuelto menor a 3 mg/l afecta la diversidad biológica. El comportamiento presentado es muy común en los ríos de montaña que tienen una gran capacidad de autodepuración, debido a las altas tasas de reaireación ocasionadas por la gran turbulencia de flujo. Y no se evidencia saturación de oxígeno.

### 1.9.6. DBO rápida

Los resultados de Calibración de la DBO rápida ( $DBO_5$ ) en la corriente principal del río Minero se encuentran a continuación:

Figura 17. DBO de la corriente principal río Minero.



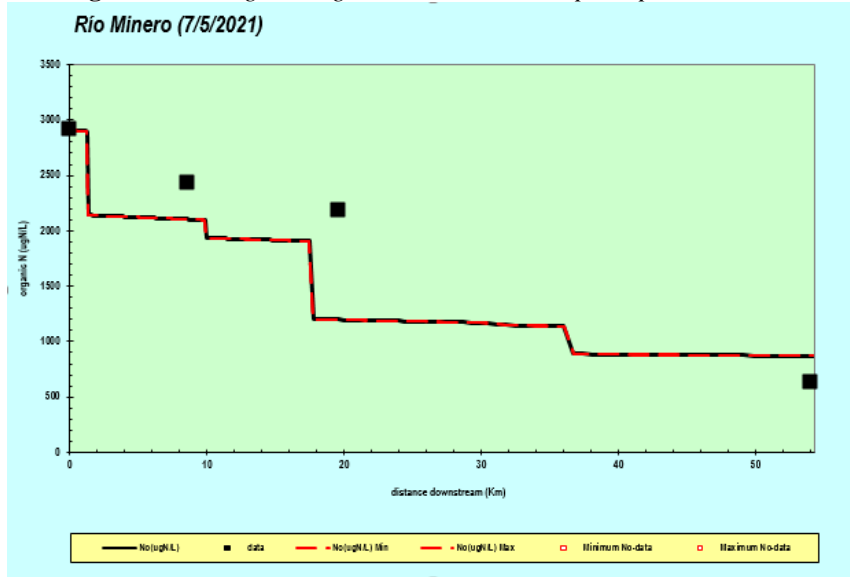
Fuente: Corpoboyacá.

En la mayoría de las estaciones de monitoreo se presentaron valores en un rango de 2 a 5 mg/l DBO lo cual refleja una buena calidad en la corriente principal, sin embargo, en la estación Puente Vía Muzo (ESTACIÓN 2) se evidencia que existe un incremento de 14.45 mg/L, esto se puede deber a que en la zona de dicha estación se encuentran actividades industriales de extracción de minerales de piedras preciosas, por tal motivo hay que realizar acciones de mejora que eviten el incremento de este parámetro, dado a que concentraciones superiores a los 5 mg/l corresponden a corrientes contaminadas.

### 1.9.7. Nitrógeno Orgánico

El nitrógeno orgánico está sujeto al consumo de los microorganismos, los cuales eventualmente procesarán el nitrógeno orgánico en amoníaco a partir de hidrólisis. Posteriormente el amonio se oxida y se nitrifica, convirtiéndose en nitritos y finalmente el nitrito se convierte en nitrato a partir de las nitrobacterias. A continuación, se presentan los resultados después de la simulación.

**Figura 18.** Nitrógeno Orgánico de la corriente principal río Minero.  
Río Minero (7/5/2021)



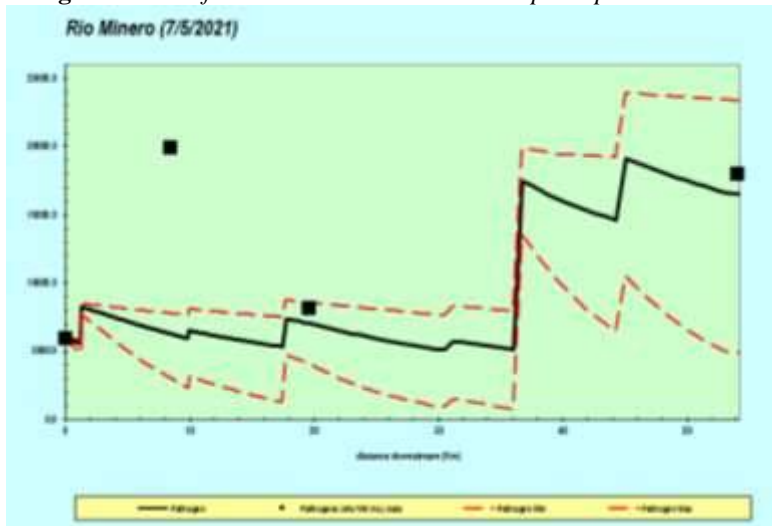
Fuente: Corpoboyacá.

El nitrógeno orgánico registrado en campo reporto un descenso en las concentraciones desde la estación de inicio hasta la estación final. El modelo de simulación genera el mismo comportamiento, este decaimiento de Norg es debido a la reacción de hidrolisis o amonificación en presencia de oxígeno disuelto.

### 1.9.8. Coliformes Totales

El modelo QUAL2KW calcula la tasa de mortalidad de los patógenos, La eliminación de patógenos se determina en función de la temperatura, salinidad, la luz y la sedimentación.

**Figura 19.** Coliformes Totales de la corriente principal río Minero.



Fuente: Corpoboyacá.

El modelo calibrado que desarrollo el programa Qual2k representa el comportamiento de la media de los datos, lo cual refleja el rango en el que se deben presentar los datos registrados en campo, la tasa de mortalidad asciende en la última estación de acuerdo a la tasa de radiación solar de 162 W/m<sup>2</sup> y temperatura de 38°C, la profundidad es baja provocando que los patógenos al morir se genere mayor sedimentación.

Sin embargo, en la estación 2 *Puente vía Muzo* el aumento de coliformes se debe a la actividad humana en esta zona (centros poblados) cerca al Río Minero, no tienen tratamientos de aguas residuales y vierten directamente al río, afectando de manera drástica este punto.