Recibido: 4 de febrero 2020 **Aceptado: 22 de febrero 2020**

Modelación Numérica de la Calidad del Agua en el Rio Rocha en la Sección Comprendida entre el Puente Siles y Puente Killman

Numerical Modeling of Water Quality in the Rocha River in the Section Between the Siles Bridge and the Killman Bridge

Villazón M.F., Gabriel T.F.

Universidad Mayor de San Simón, Laboratorio de Hidráulica, Cochabamba, Bolivia

mauricio.villazon@fcyt.umss.edu.bo

Resumen: El Rio Rocha atraviesa el área metropolitana de Cochabamba de este a oeste, desde el municipio de Sacaba hasta el de Sipe Sipe, entrelazando a seis de los siete municipios del área metropolitana. A lo largo de este recorrido, sus aguas reciben una serie de contaminantes, desde aguas servidas, desechos líquidos domésticos e industriales, textilerías, mataderos, especialmente de curtiembres, residuos de pesticidas, herbicidas y fertilizantes, la principal fuente de contaminación son las alcantarillas, cuyas aguas son vertidas directamente sin tratamiento. Se recopilo información de muestras de la calidad del agua del río Rocha de 4 meses, entre Jun-2006 y Sep-2006; de 4 puntos de muestreo que son el puente Siles, puente Recoleta, puente Cobija y puente Killman. También se recabaron datos meteorológicos de la estación Sarco, que se encuentra cercana al río y fueron proporcionados por SENAMHI, los caudales introducidos en el modelo a flujo permanente fueron de la información obtenida de los puntos de muestreo del río. Finalmente se realizó una simulación de la calidad del agua del río rocha en el modelo HEC-RAS, los parámetros considerados fueron la Temperatura, OD, DBO, NO2 y NO3, todos estos a nivel mensual. Se aplicó un análisis de sensibilidad para poder calibrar los parámetros que requiere el modelo, luego de calibrar el modelo se obtuvieron resultados coherentes de los parámetros estudiados a lo largo del río.

Palabras clave: calidad de agua, rio Rocha, modelo HEC-RAS.

Abstract: The Rio Rocha crosses the metropolitan area of Cochabamba from east to west, from the municipality of Sacaba to that of Sipe Sipe, intertwining six of the seven municipalities of the metropolitan area. Along this route, its waters receive a series of pollutants, from sewage, domestic and industrial liquid waste, textures, slaughterhouses, especially tanneries, pesticide residues, herbicides and fertilizers, the main source of contamination is sewers, whose waters are discharged directly without treatment. Information on water quality samples from the 4-month Rocha River was collected between Jun-2006 and Sep-2006; of 4 sampling points that are the Siles bridge, Recoleta bridge, Cobija bridge and Killman bridge.

Meteorological data was also collected from the Sarco station, which is close to the river and provided by SENAMHI, the flows introduced in the model at permanent flow were from the information obtained of the river sampling points. Finally, a simulation of the water quality of the Rocha river was carried out in the HEC-RAS model, the parameters considered were Temperature, OD, BOD, NO2 and NO3, all of them monthly. A sensitivity analysis was applied to be able to calibrate the parameters required by the model, after calibrating the model, consistent results were obtained from the parameters studied along the river.

Key words: Water Quality, Rocha river, HEC-RAS model.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Los ríos y corrientes de agua superficial están continuamente expuestos a descargas de residuos y vertimientos de diferente naturaleza que pueden potencialmente afectar a la salud pública y la vida acuática, limitar los usos del agua, afectar la ecología, la agricultura y causar perdidas de amenidad del paisaje.

Los modelos de transporte y calidad del agua sirven como herramientas en estudios de recursos hídricos y de saneamiento del medio ambiente que buscan una aplicación efectiva de técnicas para el manejo y control de la calidad del agua (THOMAS y MUELLER, 1987; CHAPRA, 1997) citado por (CAMACHO & DIAZ GRANADOS).

La reciente y creciente mejora de los recursos computacionales ha hecho factible el desarrollo y aplicación de complejos modelos numéricos, especialmente distribuidos, para evaluar diversos procesos a varias escalas incluyendo la calidad de agua de una cuenca hidrográfica (VÁZQUEZ, 2003; RANKINEN y COL., 2006).

1.2 Planteamiento del Problema de Investigación

El sector industrial de la región metropolitana de Cochabamba, emplaza muchas industrias a lo largo del curso del rio Rocha, desde el kilómetro 9 hacia la localidad de sacaba hasta la zona del calvario en la localidad de Quillacollo, principalmente industrias alimenticias (avícolas, mataderos, procesadores de carne, aceites y otros), industrias de bebidas (alcohólicas y no alcohólicas), de cuero, papel y químicas (plásticos, jabones y otros), la mayoría de los residuos líquidos de estas industrias son descargados a canales o cursos de agua, que son utilizados para riego principalmente, siendo el excedente finalmente descargado al rio rocha. Este hecho empeora notablemente la calidad del agua del rio, ya que además de la contaminación microbiológica y orgánica, el agua recibe tóxicos como solventes orgánicos, metales pesados y otros [6].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar la modelación numérica de la calidad del agua en el rio rocha en la sección comprendida entre el puente siles y el puente killman, mediante el programa computacional HEC-RAS versión 4.1

1.3.2 Objetivo Especifico

- Ejecutar la modelación hidrodinámica con flujo permanente y la calidad del agua.
- Realizar un análisis de sensibilidad, de la estabilidad del modelo y de los coeficientes de calibración.

1.4 Área de Estudio

La cuenca del rio Rocha se encuentra en el departamento de Cochabamba en Bolivia, comprende las cuencas hidrográficas correspondientes a las dos áreas conocidas como; Valle Central y Valle de Sacaba. Se encuentra en los paralelos 17º23' de latitud sur y los 65º52' de longitud oeste, tiene una superficie total de 1616.63 Km2, pertenece hidrográficamente a la cuenca del rio Grande, ubicada dentro de la hoya amazónica.

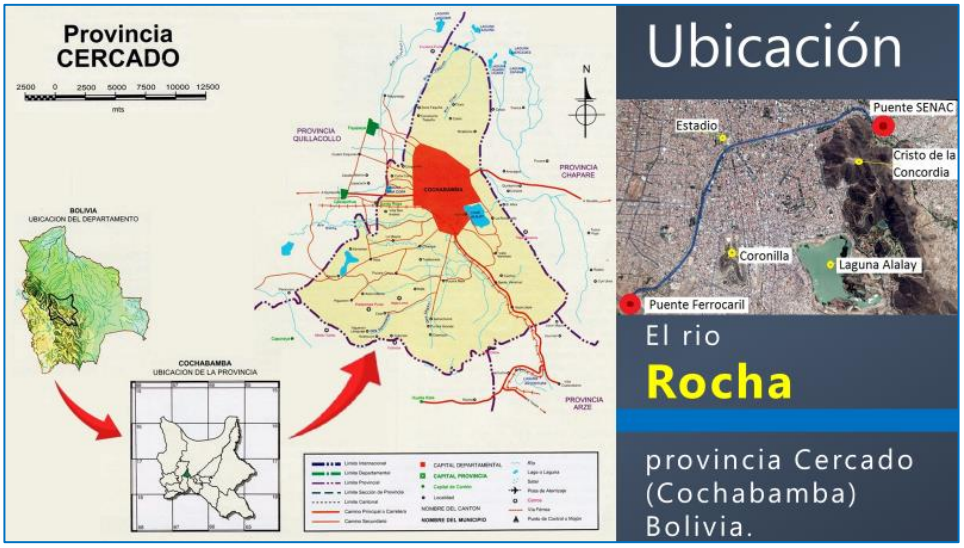


Figura 1: Ubicación del Área de Estudio

2 Sustento Teórico

2.1 Calidad del agua

Las actividades humanas inducida están causando la contaminación del agua que está cambiando la química de calidad, físico, biológico y radiológico de agua. Hay dos tipos de fuentes de contaminación que son fuentes puntuales y no puntuales. Los nutrientes o toxinas, que están siendo producidos por los organismos en la fauna, no se consideran como contaminantes [9]:

- Fuentes puntuales en la que la descarga de los elementos de contención está siendo dispuesta desde un sitio discreto que incluye las aguas residuales industriales y domésticas, tanques sépticos y derrames peligrosos.
- De fuentes no puntuales en el que la descarga de los elementos de contención está siendo dispuesta directa al cuerpo de agua en el rango de unas amplias zonas o una combinación de fuentes de puntuales de descarga.

La calidad del agua de los cuerpos de agua superficial es aceptable dependiendo de tiempo presente y usos futuros. La calidad de los cuerpos de agua debe preservar la salud humana y el ecosistema acuático, debe servir para fines humanos recreativos como nadar y pescar, y también debe ser un placer para la vista. El termino de calidad del agua generalmente se refiere a la idoneidad del agua para mantener a varios usuarios u operaciones [5].

2.2 Parámetros de la Calidad del Agua

2.2.1 Temperatura

La temperatura es tal vez el parámetro físico más importante del agua. Además de efectuar la viscosidad de las reacciones químicas, interviene el diseño de la mayoría de los procesos de tratamiento del agua (coagulación, sedimentación, etc.) [2].

2.2.2 Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO)

La DBO se define como la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica presente en el agua residual mediante la acción de bacterias en condiciones aerobias. La DBO es causada por la respiración de las bacterias y cesara al agotarse totalmente la materia orgánica. (OROZCO, 2005).

2.2.3 Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno molecular disuelto en agua; OD es un parámetro muy crítico en la calidad del agua a la vida acuática, la mortalidad de peces y otros. Las descargas de sustancias orgánicas resultan en el consumo de la OD en los cuerpos de agua que conducen a la disminución de las concentraciones OD.

La reducción en los niveles de OD afecta proceso de reproducción de peces y, sin embargo, puede causar la muerte. (HOBOKEN, 2006).

2.2.4 Nitrógeno

Los compuestos de Nitrógeno tienen un papel importante en el agua, el NH4+, NO2-, NO3-, así como el nitrógeno orgánico, son necesarios para el desarrollo de la vida animal y vegetal en ambientes acuáticos.

Algunos de los efectos que puede tener el nitrógeno en el agua es que puede ocasionar la disminución de oxígeno disuelto, es capaz de estimular el crecimiento de las plantas, en compañía de fosforo puede provocar eutrofización en los ecosistemas acuáticos, además presentar un riesgo para la salud del hombre, toxicidad para la vida acuática y afectar la capacidad de uso del agua.

La concentración de nitrógeno en ambientes acuáticos puede incrementarse por las actividades humanas como la agricultura el uso de fertilizantes con altos contenidos de nitrógeno, descargas de aguas residuales, filtración de fosas sépticas y escurrimiento de zonas urbanas y zonas ganaderas [2].

2.3 Modelo de Calidad del Agua

En el mundo hay necesidad de proteger los recursos hídricos de los posibles impactos que genera el desarrollo urbano, industrial y agrícola. El modelo de calidad del agua es una herramienta importante que contribuye en el proceso de toma de decisiones y por lo tanto fortalece el desarrollo sostenible. Estos modelos son útiles para entender las variaciones en la calidad del agua asociada por ejemplo a la descarga de un contaminante, a cambios en el uso de la tierra o a los efectos de cambios en el clima. Este tipo de herramienta juega un rol importante en ayudar a las autoridades ambientales a entender relaciones causa – efecto asociadas a las descargas de contaminantes a las corrientes receptoras. También pueden ser utilizados para evaluar beneficios de la instalación de plantas de tratamientos de aguas residuales, estudios de impacto ambiental y planes de saneamiento [12].

Los parámetros hidrodinámicos y de agua de calidad de las aguas receptoras varían con el tiempo y la ubicación. Además, los modelos de calidad del agua son muy apropiadas para integrar diferentes parámetros tales como los niveles de agua, flujos y agua bioquímica. En general, los modelos tienen como objetivo predecir las operaciones de transporte y de dispersión a seguir por la entrada de resultados para el modelo de elementos calidad del agua [7].

Modelización de la calidad del agua se utiliza para describir las características del agua de superficie en términos de condiciones químicas, físicas, radiológicas y biológicas. Además, el objetivo de la utilización de modelos de calidad del agua debe ser definido y con el fin de concluir el resultado requerido. En la mayoría de los casos,

los parámetros de calidad del agua y la descarga de efluentes a los cuerpos de agua han sido los objetivos fijados. Los procesos de modelización de la calidad del agua son costosos [7].

2.4 HEC-RAS Software Comercial

Hay muchos programas informáticos disponibles para el modelado de la calidad del agua tales como DELFT3D, SWMM, SMS, HSPF, TRISULA, QUAL2E, DIVAST, MIKE11, WASP4 y HEC-RAS (Hydrological Engineering Center-River Analysis System) es un software comercial que modela el sistema hidráulico de los ríos, el flujo de agua y otros canales de un solo alcance a las redes complejas, estructuras tales como puentes, alcantarillas vertederos y diques [10]. Este software fue creado por la United States Army Corps Engineers USACE.

El sistema HEC-RAS contiene cuatro componentes unidimensionales para el análisis del rio:

1. Cálculos de perfiles de la superficie del agua de flujo permanente.
2. Simulación de flujo no permanente
3. Cálculos de transporte de sedimentos de contorno móvil
4. Análisis la calidad del agua.

Los cuatro componentes utilizan una representación geométrica de datos común y el cálculo geométrico e hidráulico común. Además de los cuatro componentes de análisis del rio, el sistema contiene varias características de diseño hidráulicos que se pueden recurrir una vez que se calculan los perfiles básicos de la superficie del agua [3].

2.4.1 Información geométrica

El principal objetivo de HEC-RAS es calcular las elevaciones de la superficie del agua para todos los lugares requeridos, ya sea para las simulaciones de estado permanente o no permanente. Los datos geométricos básicos necesarios para los análisis de río son la información de sección transversal, longitud de alcance, los coeficientes de la pérdida de energía que incluyen pérdidas por fricción y pérdidas de contracción y expansiones, y los datos de unión corriente. En el caso de que las anchuras o profundidades están variando significativamente entre las secciones transversales, la interpolación puede ser utilizado a través de HEC-RAS opción geométrico [8].

2.4.2 Información secciones transversales

Las secciones transversales son representantes de los lugares a lo largo del río, y se indican los cambios de pistas y rugosidad de la sección del río. La separación entre

canales es importante dependiendo del tipo de estudio. La sección transversal se define mediante la introducción de la estación y elevación (X, Y coordenadas) con un número de estación dada. Normalmente los números de estaciones dadas serán reducidos numéricamente de aguas arriba a aguas abajo a fin de identificar la ubicación exacta dentro del software. Alcance longitudes que define la distancia entre dos secciones transversales consecutivos deben introducirse también. La distancia entre los bancos de izquierda y margen derecha de dos secciones transversales consecutivas representar cómo meandros del tramo de río. Coeficientes de pérdida de energía, que son la rugosidad, la expansión y contracción, deben incluirse [10].

2.4.3 Estado flujo permanente

En condición de estado estable HEC-RAS, se requiere que el número de perfiles, de flujo máximo y condiciones de contorno [10]. Para el cálculo del perfil de la superficie del agua, HEC- RAS utiliza la ecuación de energía (Vea la ecuación 1) con el método de paso estándar). Por otra parte, la pérdida de carga de energía (he) que es causada por la contracción y expansión entre las secciones transversales se calcula por la siguiente ecuación [10]:

$$h_e = LS_f + C\left[\frac{\alpha^2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha^2 V_1^2}{2g}\right] \qquad \text{(ec. 1)}$$

L = Longitud ponderada de descarga (m)
Sf = Pendiente de fricción Representante entre dos secciones
C = Coeficiente de expansión o la pérdida de contracción
La pendiente de fricción Sf se calcula usando la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}}{n} \qquad \text{(ec. 2)}$$

Q= Caudal (m3 s-1)
n = Coeficiente de rugosidad de Manning
A = Área del canal (m2)
R= Radio hidráulico (m)

2.5 Calidad del Agua en HEC-RAS

Este componente en HEC-RAS permite al usuario realizar los análisis de calidad del agua con la temperatura detallada y la limitación de los parámetros de calidad de agua a las algas, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno carbonoso, nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico, fosfato orgánico, ortofosfato y de amonio. Al principio, el usuario puede definir las celdas de calidad del agua que se encuentran entre las secciones transversales (figura 2). Las condiciones de contorno deben ser seleccionados que puede ser aguas abajo, aguas arriba, y lateral (figura 3), donde se

puede utilizar una combinación de condiciones de contorno. Además, los valores iniciales para cada coeficiente constituyente y la dispersión deben ser conocido. Sin embargo, para modelo de temperatura del agua, al menos uno de datos meteorológicos terminados debe estar disponibles, que incluye la temperatura del aire, la humedad, la nubosidad, radiación solar, velocidad del viento y la presión atmosférica. Los requisitos establecidos datos meteorológicos incluyen latitud, longitud y la información física elevación del sitio. Después de eso, los conjuntos de datos meteorológicos deben ser asignados a las diferentes celdas de calidad del agua. El usuario tiene la capacidad de controlar la vía entre las variables de estado de algas, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno carbonoso, nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico, fosfato orgánico, ortofosfato y de amonio utilizando el construido en rangos de parámetros de nutrientes. Los parámetros de nutrientes incluyen tasa constante para las reacciones químicas y físicas entre las variables mencionadas anteriormente. Por otra parte, esas constantes gobiernan la fuente (S) en la ecuación de dispersión advección [10].

$$\frac{\partial}{\partial t}(V\varnothing) = -\frac{\partial}{\partial x}(Q\varnothing)\Delta x + \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma A \frac{\partial \varnothing}{\partial x}\right)\Delta x \pm S \qquad \text{(ec. 3)}$$

V = Volumen de la célula de la calidad del agua (m3)
Ø = Temperatura del agua de concentración (º C)
Q = Caudal (m3 s-1)
Γ = Coeficiente de dispersión definido por el usuario (m2 s-1)
A = Área de la sección transversal (m2)
S = Fuentes o sumideros (mg L-1)

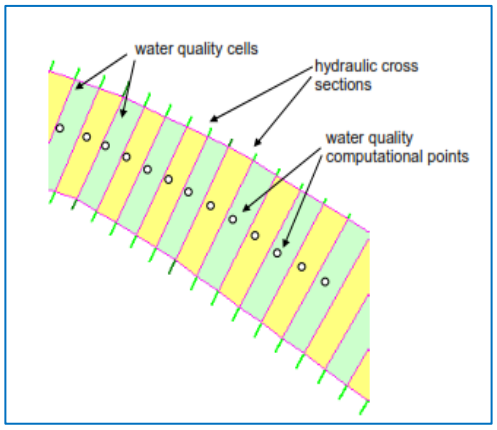


Figura 2: Configuración predeterminada de la Celda de calidad del agua.

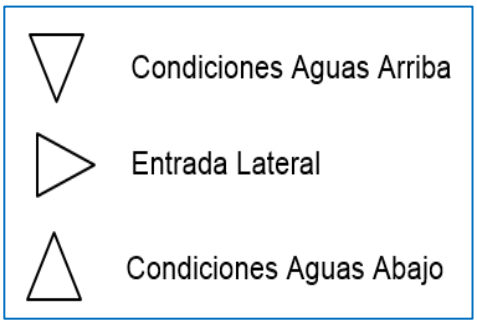


Figura 3: Iconos específicos para la ubicación de las condiciones de contorno.

3 Materiales y Metodología

3.1 Materiales

3.1.1 Datos del Rio Rocha

CANALE et al (1995) consideran que un modelo ha sido valido cuando las respuestas de las simulaciones reproducen con precisión los datos de campo. Por lo que la recopilación de datos del sistema resulta fundamental ya que todos los resultados producidos por el modelo están basados en los datos de entrada de las fronteras.

Para desarrollar el modelo de calidad del agua, se utilizó de un modelo hidrodinámico. Hay varios tipos de datos necesarios para el desarrollo del modelo.

3.1.2 Información Geométrica

En este estudio, se cuenta con datos disponibles de un levantamiento topográfico realizada con un Dron. Esta información consiste en modelos digitales del terreno, modelo digital de superficie, curvas de nivel, orto mosaicos de una resolución de 25x25cm. El mismo contempla el rio Rocha desde el puente SENAC de Sacaba, hasta el puente Cajón. Este levantamiento se caracteriza por tener un detalle de las obras existentes en el curso del rio, y sus márgenes [11].

Con este tipo de información del rio Rocha se elabora el modelo geométrico del HEC-RAS. El perfil longitudinal está compuesto por dos pendientes representativas, siendo el primer tramo desde el puente SENAC con una pendiente del 0.008, pasado el puente Cala-Cala hasta la entrada del puente Cajón con una pendiente leve 0.004. Las secciones transversales que se generaron son de 424 cada 20 metros. El coeficiente de Manning fue definido a lo largo de su recorrido [11]. Todo este trabajo fue elaborado por Lourenço Mario T. (2018), y este se puede apreciar en el artículo

científico "Comparación de modelos hidrodinámicos 1D y 2D para la evaluación del dragado en el análisis de alternativas de implementación del tren metropolitano de Cochabamba en el rio Rocha". Haremos el uso de este modelo HEC-RAS, calibrado y Validado.

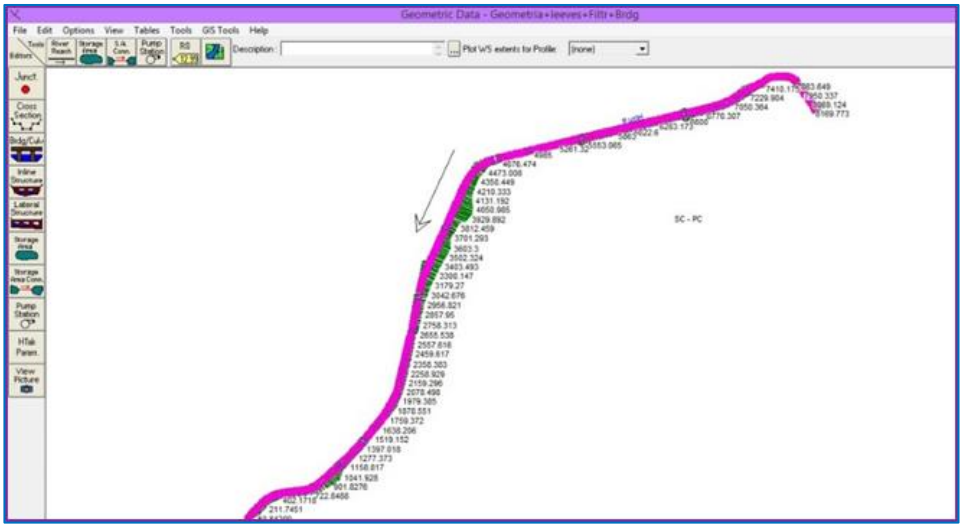


Figura 4: Geometría del rio Rocha

3.1.3 Información de Caudales para el modelo hidrodinámico

Los caudales que se usara en el modelo de calidad del agua, se obtienen del articulo científico "Evaluación de la calidad de las aguas del rio Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba-Bolivia" elaborado por Toledo Rene (2006), estos caudales se determinaron en los meses de junio, julio, agosto y septiembre ubicados en 4 puentes: puente Siles, puente Recoleta, puente Cobija y puente Killman.

mes	lugar	caudal Q
JUNIO	P. SILES	0.041
	P. RECOLETA	0.03
	P. COBIJA	0.091
	P. KILLMANN	0.123
JULIO	P. SILES	0.037
	P. RECOLETA	0.028
	P. COBIJA	0.085
	P. KILLMANN	0.096
AGOSTO	P. SILES	0.011
	P. RECOLETA	0.009
	P. COBIJA	0.063
	P. KILLMANN	0.078
SEPTIEMBRE	P. SILES	0.007
	P. RECOLETA	0.006
	P. COBIJA	0.024
	P. KILLMANN	0.032

FIGURA 1

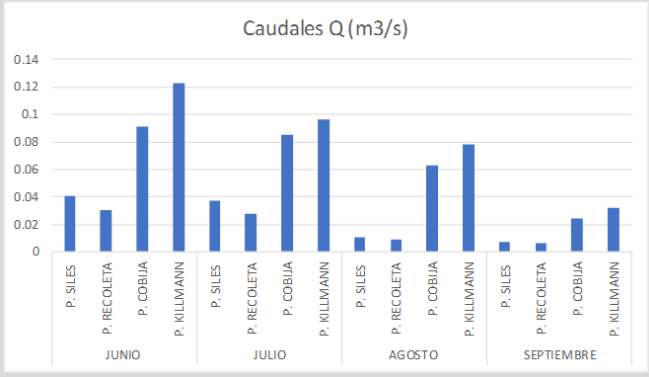


Figura 5: Caudales en el Trayecto del rio Rocha

3.1.4 Parámetros de Calidad del Agua

Las herramientas y posibilidades del módulo de calidad del agua del programa HEC-RAS no han podido ser aprovechadas en su totalidad debido a la falta de información continua y simultánea de los parámetros de calidad del agua. No fue posible modelar todos los parámetros disponibles en la herramienta de modelación de la calidad del agua del programa. La modelación de la calidad del agua del presente proyecto de aplicación se enfocó en los parámetros de Temperatura, Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea, Nitritos y Nitratos.

Figura 6: Ubicación de los puntos de muestreo a lo largo del rio Rocha

Los datos de calidad del agua de los puntos de muestreo del puente Siles, puente Recoleta, puente Cobija y el puente Killman fueron obtenidos del documento "Evaluación de la calidad de las aguas del río Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba-Bolivia".

3.1.5 Datos Meteorológicos

La información climatológica recopilada se obtuvo de la página del Servicio Nacional de Meteorológica e Hidrología SENAMHI, de la estación SARCO del año 2006 ya que los datos de la calidad del agua son del mismo año.

Esta estación es la más cercana al tramo de estudio del Rio Rocha y la que posee datos suficientes para la modelación. Los parámetros meteorológicos requeridos por el modelo son: presión atmosférica, temperatura del aire, humedad, radiación, nubosidad y velocidad del viento.

Casi todos los parámetros meteorológicos fueron encontrados en la página del servicio SENAMHI en la estación "SARCO" (2006), exceptuando la presión atmosférica que se obtuvo de la estación "Cochabamba Aeropuerto" (2008) y la radiación solar que se obtuvo de la estación "Inac Cbba Aut" (2015), las estaciones están cercanas a la zona del estudio. Debido a que en la estación SARCO en el año (2006) no se contaba con instrumentos que pudieran medir la presión atmosférica y la radiación solar.

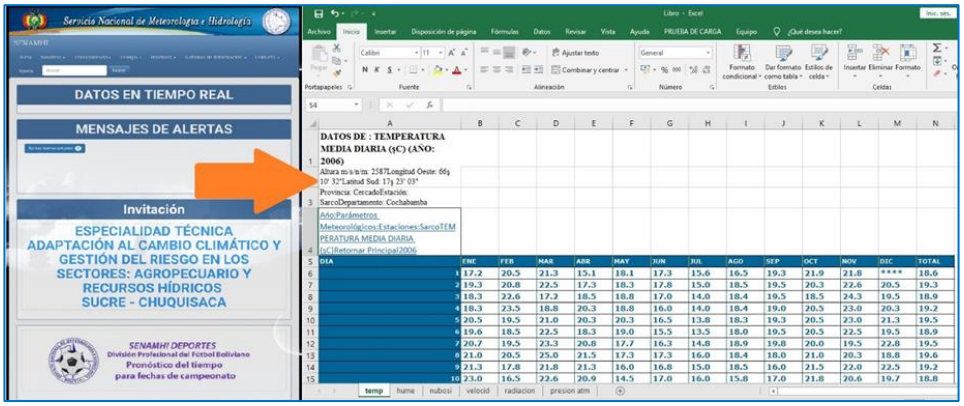


Figura 7: Pagina SENAMHI, exportando los datos de temperatura en la hoja Excel

3.2 Metodologías

3.2.1 Desarrollo del Modelo Hidráulico

Hay dos tipos de modelos hidráulicos para este estudio; el estado de flujo permanente y el estado de flujo no permanente. Sin embargo, la elección de la metodología se basa en la naturaleza de la superficie del agua. El modelado de estado flujo permanente es inherentemente conservadora, ya que se supone que el flujo máximo se produce inmediatamente y continuamente en todas las partes del modelo hidráulico durante la simulación. Por otro lado, el modelado estado de flujo no permanente es aplicable para los problemas dependientes del tiempo tales como la atenuación de la onda de inundación, operación basada en el tiempo de las estructuras de control, bombas y caudal variable [4]. En este estudio se utilizó el modelo de flujo permanente para rio Rocha.

Se introduce la condición de borde de aguas abajo del tramo analizando, esta condición de borde es la profundidad normal (normal Depth) con el valor de la pendiente de 0.04 y en aguas arriba altura critica (critical Depth).

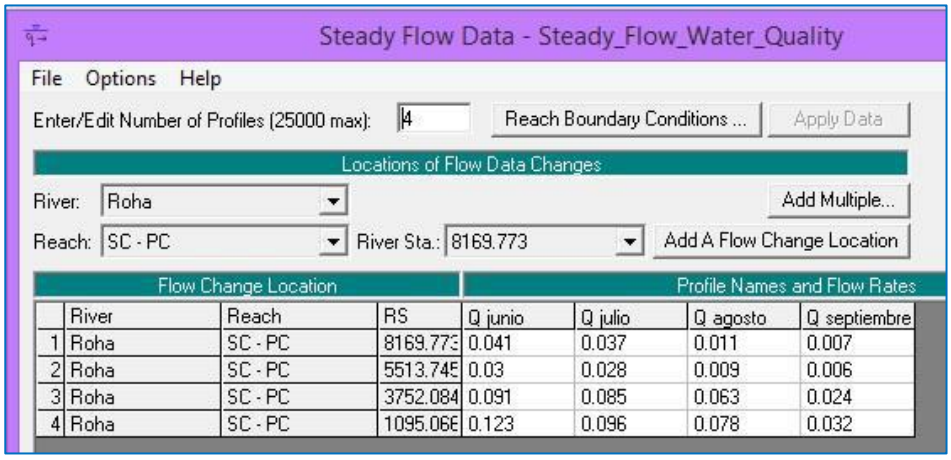


Figura 8: HEC-RAS flujo permanente

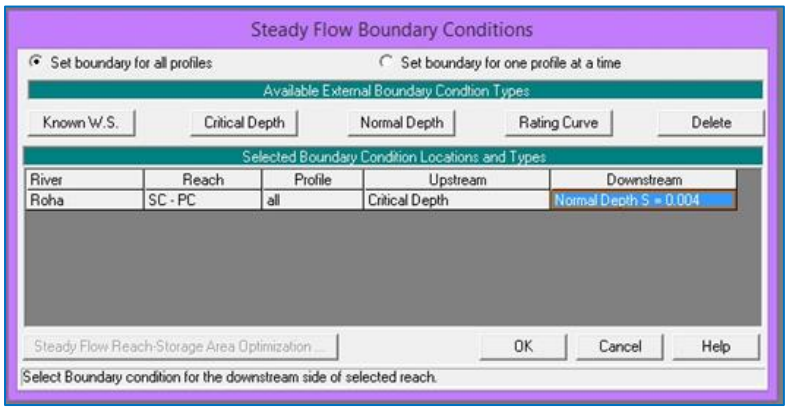


Figura 9: Ventana HEC-RAS condiciones de borde

3.2.2 Desarrollo del Modelo de Calidad del Agua

Para el modelado de la calidad del agua en HEC-RAS, se seleccionaron opciones de temperatura y nutrientes. Las condiciones de contorno en el modelo fueron representadas por cuatro puentes (Tabla 1). Para cada condición de contorno, se añadieron diferentes parámetros de calidad de agua para el modelo en los diferentes meses.

Tabla 1.Parámetros de Calidad del agua (mg L-1) Valores de entrada

ubicacon:	puente cobija										
fecha	Q	Temp.	algas	OD	CBOD	OrgN	NH4	NO2	NO3	ORGP	PO4
15/06/2006	0.091	23.6	0	8.51	27.6	0	0	0.4	0.14	0	0
15/07/2006	0.085	18.2	0	8.8	35	0	0	0.36	0.11	0	0
15/08/2006	0.063	23.2	0	8.7	18	0	0	0.38	0.33	0	0
15/09/2006	0.024	27.9	0	8.3	16	0	0	0.41	0.14	0	0

ubicacon:	puente siles										
fecha	Q	Temp.	algas	OD	CBOD	OrgN	NH4	NO2	NO3	ORGP	PO4
15/06/2006	0.041	18	0	5.78	37.7	0	0	0.16	0.16	0	0
15/07/2006	0.037	17.4	0	3.9	32.2	0	0	0.22	0.18	0	0
15/08/2006	0.011	20.2	0	6.3	32	0	0	0.16	0.16	0	0
15/09/2006	0.007	28.7	0	7.1	35	0	0	0.04	0.16	0	0

ubicacon:	puente recoleta										
fecha	Q	Temp.	algas	OD	CBOD	OrgN	NH4	NO2	NO3	ORGP	PO4
15/06/2006	0.03	23.7	0	9.68	28.7	0	0	0.4	0.2	0	0
15/07/2006	0.028	17.1	0	9	20.2	0	0	0.41	0.11	0	0
15/08/2006	0.009	22	0	13.1	40	0	0	0.27	0.17	0	0
15/09/2006	0.006	30.4	0	9.4	26	0	0	0.41	0.18	0	0

ubicacon:	puente Killmann										
fecha	Q	Temp.	algas	OD	CBOD	OrgN	NH4	NO2	NO3	ORGP	PO4
15/06/2006	0.123	22.7	0	6.91	27.6	0	0	0.39	0.14	0	0
15/07/2006	0.096	17.5	0	7.2	33.1	0	0	0.29	0.48	0	0
15/08/2006	0.078	21.6	0	7.1	180	0	0	0	0.12	0	0
15/09/2006	0.032	26.6	0	6.7	106.7	0	0	0	0.2	0	0

Se introducen los valores iniciales para los parámetros de calidad del agua van a ser los mismos valores de condiciones de borde del mes de junio mencionadas en la

Tabla 1. Para comenzar la modelación se asume un valor del coeficiente de Dispersión de 1 m2 s-1, este valor se modificará con el análisis de sensibilidad de calibración. Posteriormente se introduce los conjuntos de datos meteorológicos, estos datos son valores diarios desde 01/06/2006 hasta 30/09/2006.

Tabla 2. Entrada de datos meteorológicos en la estación SARCO

estacion:	Sarco					
institucion:	semanhi					
Fecha	Temp. Air	Hum.	Nub.	Vel.	Rad.	Pre. Atm
Dia/Mes/Año	(º C)	(%)	[Fraccion 0-1]	(m s^{-1})	(W m^{-2})	(mmHg)
01/06/2006	17.30	74.00	0.63	0.00	100.38	562.92
02/06/2006	17.80	52.00	0.38	0.00	98.78	562.17
03/06/2006	17.00	46.00	0.00	0.00	100.82	562.25
04/06/2006	16.00	43.00	0.13	0.00	104.50	561.72
05/06/2006	16.50	50.00	0.00	0.36	92.69	562.40
06/06/2006	15.50	50.00	0.25	0.00	89.35	562.62

4 Resultados y Discusión

4.1 Análisis de sensibilidad de la estabilidad del modelo

Se realiza el análisis de la sensibilidad del modelo, por medio de los cambios en el paso del tiempo computacional y la distancia de las celdas de la calidad del agua (figura 10). Determinando un rango de tiempo y de las celdas, para los cuatro meses que se van a simular, asegurando la estabilidad del modelo.

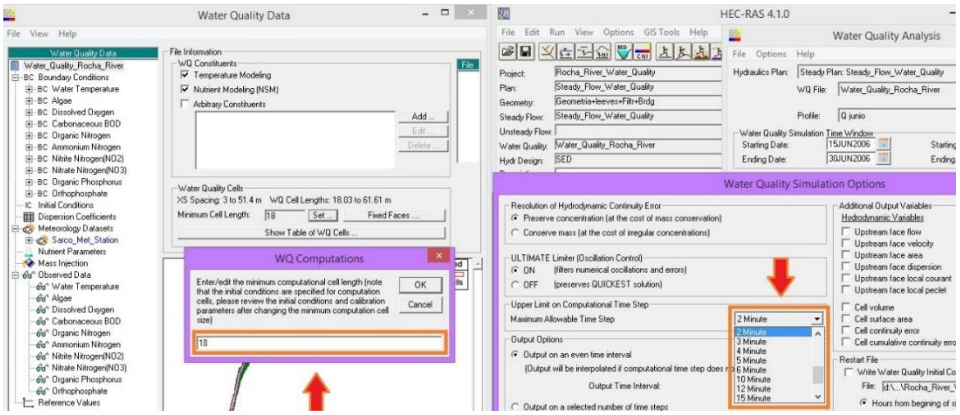


Figura 10: Selección de valores para la celda de calidad del agua (izquierda) y los valores del tiempo de simulación (derecha)

Para una mejor manera de interpretar los resultados, se presentará una tabla donde las casillas con color rojos (X) son donde el modelo colapsa y deja de correr, de color naranja (≠) presenta inestabilidad, y las verdes (OK) son las corridas estables.

Tabla 3. Matriz de corridas del mes de junio, julio y agosto

	distancia de la celda de calidad de aguas (m)														
tiempo computacional	10	17	20	50	100	150	200	250	300	350	400	500	1000	4077	4078
1 min	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X
2 min	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X
5 min	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X
10 min	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X
15 min	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X
30 min	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X
1 hor	X	X	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	X

Rango de estabilidad del modelo de calidad del agua en los meses de junio, julio y agosto: 18 m < (Longitud de la celda) < 4078 m, modelación estable.

Para el mes de junio, julio, agosto se realiza 105 corridas de cada una y los resultados en las casillas de color rojo presentan problemas en la simulación, el tiempo computacional no influye en los problemas del modelo, si no la distancia de las celdas de calidad del agua, al ejecutar el modelo con valores menores a los 18 m y mayores a los 4077 m, el modelo de la calidad del agua colapsa.

Rango de estabilidad del mes de septiembre: 350 m < (longitud de la celda) < 4.078 m, modelación estable

En esta última tabla del mes de septiembre, se observa mucha inestabilidad en comparación a los anteriores meses. Esto se debe a que el caudal, a comienzos de este mes es tan bajo que en la modelación del flujo permanente las velocidades se aproximan a cero, es ahí donde presentan inestabilidades o donde no corre el modelo de calidad de aguas.

Aun comienzo se pensó que en el mes de septiembre daría los mismos resultados que la tabla de junio, julio y agosto, pero fue una sorpresa inesperada, lo cual nos permite conocer el comportamiento del modelo de calidad de agua en el HEC-RAS. La demora de la simulación se aprecia, cuando más pequeño es el tiempo de simulación o menor la longitud de la celda de calidad de agua. Al realizar estas 579 simulaciones en este análisis de los 4 meses, se determina un tiempo de computo de 2 min y una longitud de 360 m para una estabilidad en el modelo de calidad del agua.

Tabla 4. Matriz de corridas del mes de septiembre

tiempo computacional	distancia de la celda de calidad de aguas (m)																
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	160	170	180	190	200	210	220
2 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	≠	≠
5 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	≠	≠
10 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	≠	≠
15 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	≠	≠
30 min	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	≠	≠
1 hor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	≠	≠

tiempo computacional	distancia de la celda de calidad de aguas (m)															
	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	4077	4078
2 min	X	X	X	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
3 min	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
4 min	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
5 min	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
10 min	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
15 min	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
30 min	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X
1 hor	X	≠	≠	X	≠	Ok	Ok	Ok	≠	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	X

A continuación, se presenta una gráfica de todas las curvas simuladas del mes de septiembre, con diferentes tiempos de cómputo y longitudes de celdas de calidad de agua, de los valores Oxígeno Disuelto (OD).

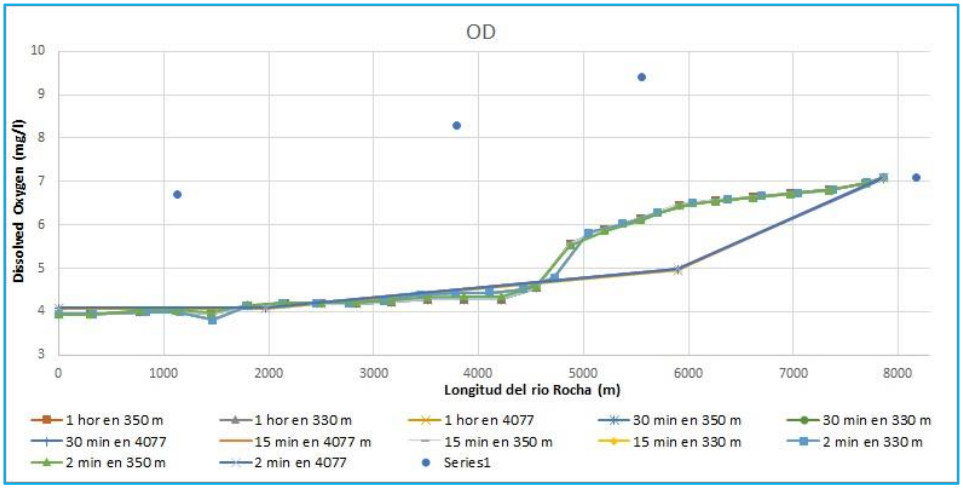


Figura 11: Valores OD de septiembre, diferentes tiempos y longitudes

Si observamos en la figura 11, en una curva cualquiera del OD, con una longitud de celda establecida, en cualquier serie de tiempo nos da la misma curva. Estos datos

no ayudan mucho en la calibración del modelo de calidad del agua, solo sirven para determinar un rango de estabilidad del modelo.

4.2 Análisis de sensibilidad con los parámetros de calibración

El análisis de sensibilidad se enfocará más en estos 5 coeficientes, K1 y K3 para calibrar el DBO, K2 y K4 para calibrar el OD, y finalmente el coeficiente de dispersión para calibrar la temperatura. Los parámetros que no están en la tabla 5, se mantendrán con los valores por defecto del HEC-RAS.

Tabla 5. Valores iniciales de los parámetros de calibración del modelo de calidad del agua

simbolo	descripcion	unidad	valor
K1	Coeficiente de desoxigenacion	dia -1	0.02
K2	Coeficiente de oxigenacion o reaireacion	dia -1	1
K3	Tasa de perdida de DBOC por sedimentos	dia -1	0
K4	Consumo Bentico de Oxigeno	mg m2 dia-1	0
fixed Dispersion	coeficiente de dispersion	m2/s	1

4.2.1 Coeficientes de Eficiencia

En el proceso de calibración se consideró el análisis diario en un periodo de 4 meses junio, julio, agosto y septiembre. Identificados los parámetros más sensitivos, se procedió a signar valores a los parámetros de entrada del modelo y generar los valores de OD, DBO, NO2, NO3 y Temperatura. Posteriormente serán comparados con los valores observados (muestras), mediante métodos gráficos y estadísticos; coeficiente determinación (R2), coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, PBIAS y RMSE.

a) **Coeficiente de Nash-Sutcliffe**

Es una forma de normalizar la función objetivos de mínimos cuadrados. Determina la magnitud relativa de varianza residual en comparación con la variación de datos medidos, un ajuste perfecto de este criterio viene dado por la unidad, un ajuste negativo indica que un modelo es "pobre" y no se ajusta a los datos observados. Mientras más cercano a uno sea este criterio estadístico mejor será la bondad de ajuste. Se obtiene de la siguiente manera [1]:

$$Nash = 1,0 - \frac{\sum_{j=1}^{N}\left(O_j - S_j\right)^2}{\sum_{j=1}^{N}\left(O_j - \overline{O}\right)^2} \qquad \text{(ec. 4)}$$

En donde O es la muestra observado, S la muestra simulado y Ō es el promedio de la muestra observado sobre el periodo de datos.

b) **Coeficiente de determinación de Pearson (R2)**

El coeficiente de correlación de Pearson describe el grado de colinealidad entre data simulada y observada. Tiene un rango de 0 a 1, donde r=0 refiere que no existe alguna relación lineal y valores de r=1 indican una perfecta relación lineal. Valores mayores a 0.5 normalmente son considerados aceptables (SANTHI et al 2001. VAN LIEW et. al 2003).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(O_j - \overline{O}\right)\left(S_j - \overline{S}\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left(O_j - \overline{O}\right)^2}\sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left(S_j - \overline{S}\right)^2}} \right)^2 \qquad \text{(ec. 5)}$$

c) **Relación de RMSE y la desviación estándar de las observaciones (RMR)**

Siendo el factor RMSE uno de los factores estadísticos de índice de error más usados, se utilizó el factor RMR evaluar el modelo de realizado en esta investigación. El factor RSR estandariza el factor RMSE usando la derivación estándar de las observaciones, combinando tanto un índice de error y la información adicional recomendada por LEGATES y MCCABE (MORIASI et al., 2007)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(O_j - S_j\right)^2}{n}} \qquad \text{(ec. 6)}$$

d) **Porcentaje BIAS (PBIAS)**

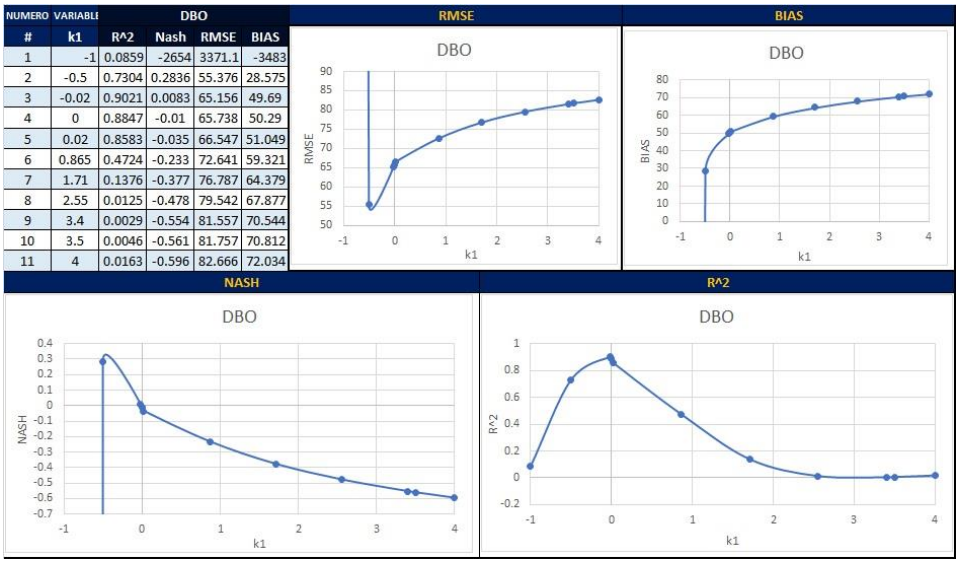
El cual mide la tendencia promedio de la data simulada y es comparada homólogamente con la data observada. El valor óptimo de PBIAS es cero, valores cercanos a 0 indican mejor precisión del modelo; valores positivos indican subestimación de la tendencia y valores negativos indican sobrestimación del de la

tendencia. Valores menores de PBIAS<15% indican un ajuste satisfactorio. (MORIASI et. al., 2007)

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N} \left(O_j - S_j \right) * (100)}{\sum_{j=1}^{N} \left(O_j \right)} \right] \qquad \text{(ec. 7)}$$

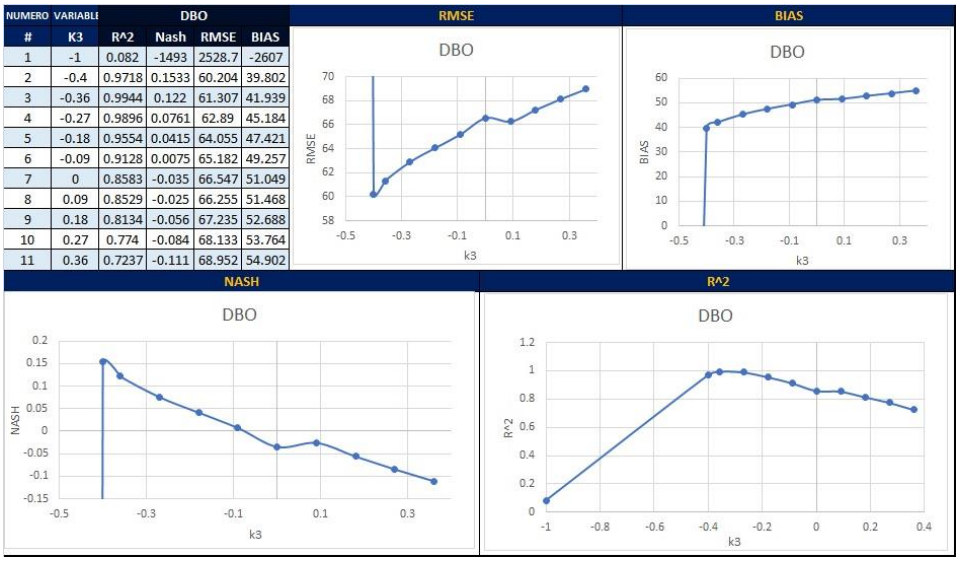
4.2.2 Análisis de Sensibilidad del DBO K1 y K3 del mes de agosto

Se van a variar los valores de k1, con los resultados de cada simulación se va determinar su eficiencia R^2, Nash, RMSE y BIAS, que miden la variabilidad de las observaciones. Mediante las gráficas se observa la mayor eficiencia en los picos de las curvas de Nash y R^2, y en las curvas que más se aproximan a cero de RMSE y BIAS.



NUMERO	VARIABLE	DBO			
#	k1	R^2	Nash	RMSE	BIAS
1	-1	0.0859	-2654	3371.1	-3483
2	-0.5	0.7304	0.2836	55.376	28.575
3	-0.02	0.9021	0.0083	65.156	49.69
4	0	0.8847	-0.01	65.738	50.29
5	0.02	0.8583	-0.035	66.547	51.049
6	0.865	0.4724	-0.233	72.641	59.321
7	1.71	0.1376	-0.377	76.787	64.379
8	2.55	0.0125	-0.478	79.542	67.877
9	3.4	0.0029	-0.554	81.557	70.544
10	3.5	0.0046	-0.561	81.757	70.812
11	4	0.0163	-0.596	82.666	72.034

Figura 12: Análisis de sensibilidad DBO (k1), valor eficiente K1= -0.5



NUMERO	VARIABLE	DBO			
#	K3	R^2	Nash	RMSE	BIAS
1	-1	0.082	-1493	2528.7	-2607
2	-0.4	0.9718	0.1533	60.204	39.802
3	-0.36	0.9944	0.122	61.307	41.939
4	-0.27	0.9896	0.0761	62.89	45.184
5	-0.18	0.9554	0.0415	64.055	47.421
6	-0.09	0.9128	0.0075	65.182	49.257
7	0	0.8583	-0.035	66.547	51.049
8	0.09	0.8529	-0.025	66.255	51.468
9	0.18	0.8134	-0.056	67.235	52.688
10	0.27	0.774	-0.084	68.133	53.764
11	0.36	0.7237	-0.111	68.952	54.902

Figura 13: Análisis de sensibilidad DBO (k3), valor eficiente K3= -0.4

Los parámetros que dan una buena eficiencia se encuentran resumido en la siguiente tabla, con estos valores se va realizar una nueva simulación para calibrar el modelo de calidad del agua del mes de agosto, esto se realiza para cada mes.

Tabla 6. Parámetros de los coeficientes del mes de agosto

PARAMETROS DE COEFICIENTES AGOSTO			
Simb.	Descripcion	Unidad	Valor
K1	Coeficiente de desoxigenacion	dia -1	-0.5
K2	Coeficiente de oxigenacion o	dia -1	37.5
K3	Tasa de perdida de DBOC por sedimentos	dia -1	-0.4
K4	Consumo Bentico de Oxigeno	dia -1	-0.5
fixed Disp.	coeficiente de dispersion	m2/s	500

La comparación de los resultados del modelo de calidad del agua del rio Rocha, con los cambios en los coeficientes k1, k2, k3, k4 y el coeficiente de dispersión del mes agosto, se va comparar de manera cualitativa y cuantitativa:

- Cualitativa (Visual)

En las gráficas se observa los puntos observados, los valores simulados inicialmente con los valores por defecto del programa y los valores simulados con los ajustes de los coeficientes, para las variables de OD, DBO, NO2 y Temperatura.

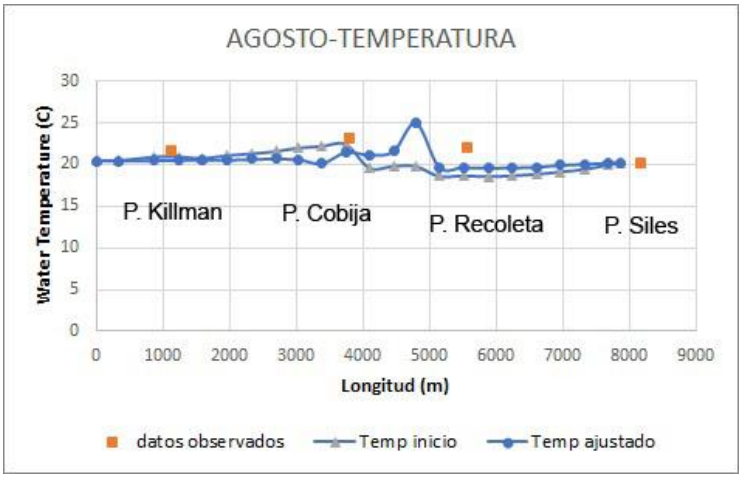


Figura 14: Temperatura Agosto ajustada

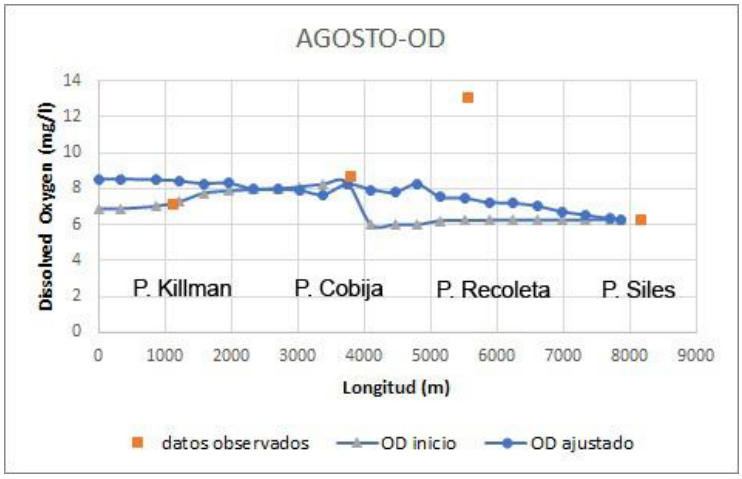


Figura 15: Oxígeno Disuelto Agosto ajustada

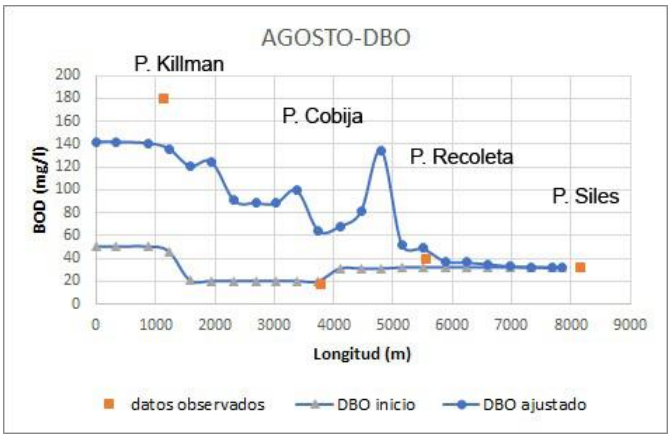


Figura 16: DBO Agosto ajustado

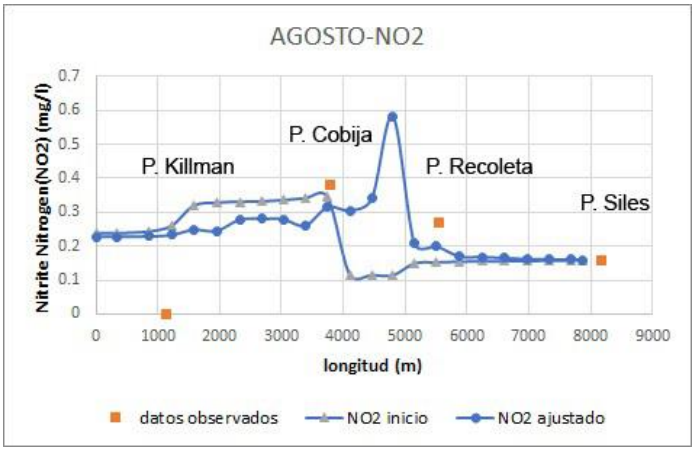


Figura 17: Nitritos Agosto ajustada

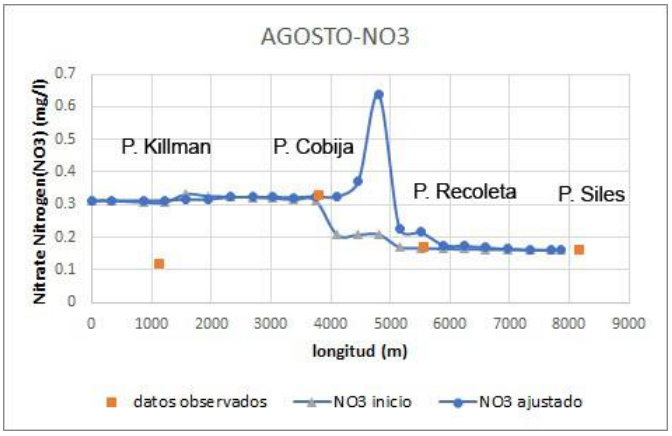


Figura 18: Gráfico 9: Nitratos Agosto ajustado

- Cuantitativo (NASH, R2, RMSE Y BIAS)

En la tabla se aprecia los cambios de las eficiencias de cada variable, existe una mejora en las eficiencias después de los ajustes en los coeficientes de calibración.

Tabla 7. Comparación de eficiencias antes y después del ajuste de calibración

MES AGOSTO: PARAMETROS DETERMINADOS HEC-RAS									
TEMPERATURA		OD		DBO		NO2		NO3	
Nash	-1.680	Nash	-0.467	Nash	0.217	Nash	0.450	Nash	-0.167
R^2	0.162	R^2	0.054	R^2	0.649	R^2	0.021	R^2	0.097
RMSE	1.801	RMSE	3.442	RMSE	66.547	RMSE	0.144	RMSE	0.094
BIAS	5.937	BIAS	21.029	BIAS	51.049	BIAS	-9.358	BIAS	-19.511
MES AGOSTO: PARAMETROS AJUSTDOS									
TEMPERATURA		OD		DBO		NO2		NO3	
Nash	-1.05616987	Nash	-0.0571846	Nash	0.81949393	Nash	0.58100303	Nash	-0.27463453
R^2	0.31351617	R^2	0.01220462	R^2	0.65125069	R^2	0.11676505	R^2	0.15851075
RMSE	1.57732861	RMSE	2.92202767	RMSE	31.9554643	RMSE	0.12608853	RMSE	0.09874692
BIAS	6.02832186	BIAS	13.7140066	BIAS	-4.30666101	BIAS	-11.2426836	BIAS	-29.5639948

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se determinaron los datos de ingreso requeridos para la modelación de la Temperatura, OD, DBO, NO2, NO3 y los nutrientes restantes se introducen, con un valor de 0, debido a que no se tienen los valores medidos en las muestras, si no se introducen los valores en el modelo de calidad del agua en el HEC-RAS, no corre la modelación. Para la introducción de los datos meteorológicos, se tienen que tener mucho cuidado con las unidades que tienen en SENAMHI y el HEC-RAS, debido en algunos casos se tiene que convertir a las unidades correspondientes que te pide el modelo de calidad del agua.

Para realizar la modelación se tiene introducir los datos de manera ordenada, caso contrario al introducir los datos de calidad del agua antes que la modelación hidrodinámica, el HEC-RAS no reconocerá algunos datos de la temperatura y de los nutrientes, y esto se verá reflejado con una interrogación en las condiciones de contorno.

En el primer análisis de sensibilidad realizado para la estabilidad, se puede concluir que, en una determinada longitud de la celda de calidad del agua, y con un tiempo de computo ya sea desde los 2 min hasta 1 hr, el resultado es el mismo, lo cual no sirve para calibrar el modelo.

En el segundo análisis de sensibilidad realizado para determinar los parámetros coeficientes óptimos, k1, k2, k3, k4 y el coeficiente de dispersión, que más se ajustan a los valores observados. La eficiencia de Nash, R^2, RMSE y el BIAS, ayudaron

seleccionar los coeficientes más óptimos para la calibración del modelo. Los resultados fueron buenos, esto se evaluó de dos maneras, cualitativa (visual) y cuantitativa (eficiencia).

La herramienta computación (HEC-RAS) ha demostrado ser válida para reproducir el comportamiento longitudinal de la temperatura, DBO, OD, NO2 y NO3 en el caso del Rio rocha.

5.2 Recomendaciones

Los datos meteorológicos que faltaban en una estación, se completaron con una estación cercana al lugar del estudio, se debe introducir con las unidades del HEC-RAS, caso contrario los datos son incorrectos.

Para seleccionar el mejor coeficiente que se ajusta a los datos observados, se necesitó de cuatro coeficientes de eficiencia, debido a que con dos no eran lo suficientes para determinar un valor óptimo.

Se recomienda realizar una copia del archivo del HEC-RAS, ya por diferentes motivos existió apagones de electricidad mientras se realizaba el cargado o el modelado, que daño el archivo y se tendría que realizar nuevamente el modelo.

Referencias Bibliográficas

[1] ALBUJA, E., TENELANDA, D. 2014.Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca Altoandina de rio Zhurucay. Cuenca-Ecuador. Junio 2014.

[2] GUANO, M., VELASTEGUI, V. 2014. Manual básico para la modelación numérica de la calidad del agua en ríos: Programa computacional HEC-RAS versión 4.0. ejemplo de aplicación a un tramo del rio Machángara dentro de la zona de influencia de la ciudad de Quito. Quito. Septiembre 2014.

[3] HEC-RAS. Manual del modelo HEC-RAS. 2010.

[4] HUSSIEN, H. 2015. Water Quality Modeling of Dubai Creek Using HEC-RAS. Sharjah-United Arab Emirates. Mayo 2015.

[5] J. L. Schnoor, 1996. Environmental Modeling Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil, New York: Wiley.

[6] MANZANO, N. 2015. El Complejo territorial de la región metropolitana de Cochabamba. Cochabamba-Bolivia: Talleres Gráficos "Kipus", 9789995429898.

[7] M. D. Palmer, Water Quality: A Guide to Effective Practice, The World Bank, 2001.

[8] M. L. Weber-Shirk, "HEC-RAS," [Online]. Available: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-hecras-hecras.html.

[9] N. Scholz and G. Tchobanoglous, Water Pollution, New York: McGraw-Hill, 2001.

[10] "HEC-RAS river analysis system," US Army Corps of Engineers, 2010. [Online]. Available: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf.

[11] TAMES, M. 2018. Modelación Hidráulica Hidrológica en el análisis de alternativas para la implementación del tren metropolitano en un tramo del rio Rocha. Cochabamba-Bolivia.

[12] FlowNet Sustainable Water Solutions. [Online] Available: http://www.flownet.co/servicios/desarollo-de-modelos-matematicos-para-la-gestion-del-agua/modelos-de-calidad-del-agua.