



Universidad Autónoma de Chiapas

Facultad de Ingeniería

Campus I

“Aplicación del modelo de calidad de agua QUAL2K sobre un tramo del Rio Seco en el municipio de Paraíso, Tabasco”

Tesis

Que para obtener el grado de

Maestra en Ingeniería con Formación en Calidad del Agua

Presenta

Erika Alicia López Ortiz C070082

Directora de Tesis

Dra. Daisy Escobar Castillejos

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Noviembre 2022



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
30 de noviembre del 2022
Oficio No. F.I.01.2134/2022

**C. ERIKA ALICIA LÓPEZ ORTIZ
ALUMNA DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON FORMACIÓN EN CALIDAD DEL AGUA
PRESENTE.**


Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

**“APLICACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA QUAL2K SOBRE UN TRAMO DEL
RIO SECO EN EL MUNICIPIO DE PARAÍSO, TABASCO”**

CERTIFICO el VOTO APROBATORIO emitido por este jurado, y autorizo la impresión de dicho trabajo para que sea sustentado en su Examen Profesional para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con formación en Calidad del agua.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”**


**DR. JOSÉ ALONSO FIGUEROA GALLEGOS
ENCARGADO DE DIRECCIÓN**



Ccp. Dra. Daisy Escobar Castillejos. Coordinadora de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería. UNACH.
Archivo/minutario
JAFG/DEC/tpg*



Código: FO-113-09-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Erika Alicia López Ortiz,

Autor (a) de la tesis bajo el título de “_____”

Aplicación del modelo de calidad de agua QUAL2K sobre un tramo del Rio Seco en el municipio de Paraíso, Tabasco,”

presentada y aprobada en el año 2023 como requisito para obtener el título o grado de Maestra en Ingeniería con Formación en Calidad del Agua, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 18 días del mes de Mayo del año 20 23.


Erika Alicia López Ortiz

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios quien es el único que sabe cuánto esfuerzo hay detrás de este trabajo, por haberme dado la oportunidad de alcanzar este logro.

A mi familia de quienes siempre recibí el apoyo y animo incondicional en todo momento de continuar con este proyecto, a ti hermano quien fungió como una parte valiosa para el trámite final, por tu tiempo y dedicación.

A mis amigos quienes no me dejaron renunciar aun en la distancia y a mi directora, por su asesoría, acompañamiento, paciencia y sobre todo su accesibilidad.

¡Muchas! ¡Muchas gracias! a todos, que diosito bendiga a cada uno de ustedes.

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUCCION	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 ALCANCES DEL PROYECTO.....	15
1.4 LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	15
CAPÍTULO 2: MODELO QUAL2K.....	17
2.1 QUAL2K	17
2.2 ESTRUCTURA CONCEPTUAL DEL MODELO	20
2.3 SEGMENTACIÓN E HIDRÁULICA	22
2.3.1 Balance de flujo	24
2.3.2 Características hidráulicas	26
2.4 TEMPERATURA	27
2.5 CONSTITUYENTES Y BALANCE DE MASA GENERAL	28
2.6 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO	35
2.6.1 Interfaz del modelo.....	36
CAPÍTULO 3: MARCO GEOGRAFICO	39
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA.....	39
3.1.1 Tabasco	39
3.1.2 Paraíso.....	40
3.1.3 Rio Seco	41

CAPÍTULO 4: TOPOGRAFIA.....	42
4.1 ESTACIONES DE MONITOREO.....	42
4.2 EJE Y SECCIONES.....	43
CAPITULO 5: COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	
.....	48
5.1 PUNTOS DE MUESTREO.....	48
5.2 VARIABLES	49
5.3 CAUDAL.....	49
5.4 BATIMETRÍA	49
5.5 TEMPERATURA DE ROCÍO Y VELOCIDAD DEL VIENTO	50
5.6 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA.....	51
CAPITULO 6: APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2K.....	56
6.1 ESQUEMATIZACIÓN.....	56
6.2 CONFIGURACIÓN INICIAL	57
6.3 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA DEL RIO SECO Y EL QUAL2K	59
6.4 CORRIDA DEL MODELO CON LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL RIO SECO.....	60
CAPITULO 7: CONCLUSION.....	64
CAPITULO 8: ANEXOS.....	65
ANEXO 1. EVIDENCIA VISUAL.....	65
Anexo 2. Cuenca Hidrográfica	70
Anexo 3. Trayectoria longitudinal	71
Anexo 4. Secciones trapezoidales equivalentes.....	72
Anexo 5. Temperatura de roció y velocidad del viento	73

Anexo 6. Parámetros de calidad del agua	74
Anexo 7. Registro de indicadores de Calidad del Agua del 2015 al 2020 de la CONAGUA	77
BIBLIOGRAFIA	79

Índice de tablas

Tabla 1. Variables estado del modelo (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).....	28
Tabla 2. Localización de estaciones de monitoreo (Elaboración propia).....	43
Tabla 3. Puntos de monitoreo y ubicación (CNA, 2021).	48
Tabla 4. Caudal (Elaboración propia).....	49
Tabla 5. Datos de secciones topográficas (Elaboración propia) ver anexo.	50
Tabla 6. Temperatura de rocío y velocidad de viento (Elaboración propia) ver anexo.	50
Tabla 7. Calidad del agua estación SC-09 (Elaboración propia).....	51
Tabla 8. Calidad del agua estación SC-10 (Elaboración propia).....	51
Tabla 9. Calidad del agua estación SC-11 (Elaboración propia).....	52
Tabla 10. Calidad del agua estación DLTAB2470 (Elaboración propia).....	52
Tabla 11. Calidad del agua estación SC-15 (Elaboración propia).....	53
Tabla 12. Calidad del agua estación DLTAB2472 (Elaboración propia).....	53
Tabla 13. Variables de calidad calculadas a partir de las mediciones registradas (Elaboración propia).....	54

Índice de figuras

Figura 1. Orden de cuenca (Vega X.,2020).....	20
Figura 2. Esquema general del modelo QUAL2K (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).	23
Figura 3. Esquema de segmentación para un río con afluentes en el QUAL2K (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).....	24
Figura 4. Esquema del balance de flujo (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).	25
Figura 5. Esquema del balance de calor (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).	28
Figura 6. Esquema del balance de masas (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).....	30
Figura 7. Modelos cinéticos y procesos de transferencia de masa del QUAL2K (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).....	31
Figura 8. Hojas de cálculo de las variables de diseño (QUAL2K, 2012).	36
Figura 9. Hojas de cálculo de las variables de campo del (QUAL2K, 2012).	36
Figura 10. Hojas de resultados (QUAL2K , 2012).....	37
Figura 11. Hojas de graficas (QUAL2K, 2012).	37
Figura 12. Interfaz inicial de datos de entrada (QUAL2K, 2012).....	37
Figura 13. Interfaz de celdas con llenado automático (QUAL2K, 2012).....	38

Figura 14. Municipios de Tabasco (INEGI, 2020).....	39
Figura 15. Paraíso, Tabasco (INEGI, 2020).	40
Figura 16. Localización del cauce (Elaboración propia).....	41
Figura 17. Estaciones de monitoreo (Elaboración propia).	42
Figura 18. Eje principal del cauce, cadenamientos y curvas de nivel (Elaboración propia).44	
Figura 19. Sección 13+880 de la estación SE-09 (Elaboración propia).....	45
Figura 20. Sección 10+420 de la estación SE-10 (Elaboración propia).....	45
Figura 21. Sección 8+560 de la estación SE-11 (Elaboración propia).....	46
Figura 22. Sección 5+160 de la estación DLTAB2470 (Elaboración propia).	46
Figura 23. Sección 2+720 de la estación SC-15 (Elaboración propia).....	47
Figura 24. Sección 0+740 de la estación DLTAB2472 (Elaboración propia).	47
Figura 25. Diagrama de puntos de muestreo del río Seco (Elaboración propia).....	56
Figura 26. Interfaz inicial QUAL2K (Elaboración propia).	57
Figura 27. Interfaz de Headwater del Qual2k (Elaboración propia).	58
Figura 28. Interfaz de Reach del Qual2k (Elaboración propia).....	58
Figura 29. Head Water con parámetros de calidad del agua del río Seco SC-09 (Elaboración propia).....	59

Figura 30. WQ Data con parámetros de calidad del agua del río Seco SC-09, SEC-10, SC-11, DLTAB2470, SC-15 y DLTAB2472 (Elaboración propia).	59
Figura 31. WQ Data min y max con parámetros de calidad del agua del río Seco SC-09, SEC-10, SC-11, DLTAB2470, SC-15 y DLTAB2472 (Elaboración propia).	60
Figura 32. Graficas de DBO5 simulada (Elaboración propia).	61
Figura 33. Oxígeno disuelto simulado (Elaboración propia)	61
Figura 34. Graficas de DBO5 simulada (Elaboración propia).	62
Figura 35. Oxígeno disuelto simulado (Elaboración propia)	62

Capítulo 1: INTRODUCCION

Hablar de calidad del agua, es sinónimo de hacer referencia a las características físicas, químicas y biológicas del líquido en su estado actual. Hoy en día, resulta tan evidente su deterioro que, gran parte del territorio se encuentra lejos de presentar una buena calidad. Esto, debido a que su calidad se ve afectada por diversos factores, tales como, usos de suelo, producción industrial y agrícola (CA, 2017).

En porcentajes generales y a nivel mundial, en la actualidad el agua que se trata en países desarrollados es menor o igual a un diez por ciento, y particularmente en el territorio mexicano, este porcentaje de tratamiento oscila muy cerca de un veinte por ciento en aguas que se usan para servicios urbanos o industriales. Lo cual indica que, gran parte de este vital líquido se vierte en los ríos, lagos o mares sin tener algún tratamiento preliminar, lo cual provoca su contaminación y, por ende, una notable reducción en su cantidad, calidad y disponibilidad (Agua, 2002).

Derivado de esta problemática y con la finalidad de poder estimar la calidad o grado de contaminación que presenta el agua en algún punto, se han desarrollado diversos índices de monitoreo tanto de uso general como de uso particular que, para el caso de nuestro territorio mexicano se emplea el denominado Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual agrupa de forma ponderada algunos parámetros indicadores de deterioro en la calidad del agua (León, 1991). Así también, se encuentran las herramientas utilizadas para control como son los modelos matemáticos de calidad del agua, los cuales coadyuvan en la planificación, prevención y toma de decisiones para el correcto manejo y disposición de los recursos hídricos. El empleo de estos modelos matemáticos para la simulación de procesos de

transporte y dispersión de contaminantes que se encuentran vertidos en cauces o cuerpos de agua, han incrementado su uso en gran medida, debido a la necesidad de estudiar y evaluar la contaminación que se genera por su vertimiento e impacto en el cuerpo receptor (Torres F., Ramírez H., Rodríguez C., Tejera M. & Vásquez M., 2015).

Los modelos de calidad de agua son relaciones matemáticas que brindan una mejor comprensión y cuantificación a cerca de la relación causa-efecto existente en los procesos físicos, químicos y biológicos, que se descargan en cuerpos de agua receptores, como lo son ríos, lagos y estuarios. Dichos modelos matemáticos se han empleado en aguas superficiales como una herramienta para su evaluación debido a su deterioro. Las simulaciones predictivas resultantes, sirven para poder establecer planes de gestión, control y mantenimiento (Bracho L., Angulo L. y Díaz L., 2016).

El propósito de los modelos matemáticos es representar una realidad de la calidad del agua, con la finalidad de representar el impacto que generan los vertimientos en relación con la calidad del agua de las fuentes hídricas y generar el trazo de buenos planes de control. Es esto que, en el presente trabajo se ha planteado como objetivo principal, aplicar el modelo matemático QUAL2K sobre un tramo del Río Seco que atraviesa los dos predios de la refinería de Dos Bocas, que nos permita representar y modelar el río en una longitud de 19.56 kilómetros, así como el comportamiento de los principales contaminantes. Se ha considerado la hidrografía, topografía, características y condiciones de las corrientes, medidas a través de los datos históricos generados en las diferentes estaciones de monitoreo, que gestiona el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) de los recursos hídricos en México.

1.1 Planteamiento del problema

México es uno de los países que, en la actualidad enfrenta serios problemas en la calidad de sus cuerpos de agua, debido al poco control de los vertimientos, poca estrategia en la urbanización y mala educación civil para su conservación. Por esto, el uso de herramientas que nos permitan modelar a través de diversos parámetros la calidad o estado actual del agua, resultan de gran utilidad puesto que, a través de ellos se pueden identificar áreas que presenten un índice alto de contaminación.

De lo anteriormente expuesto, se deriva el interés por conocer el estado actual del Río Seco al modelarlo en el QUAL2K, ya que se encuentra muy cercano a un área que actualmente está sufriendo grandes cambios.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Aplicar el modelo de calidad de agua QUAL2K sobre la corriente superficial de un tramo del Río Seco en el municipio de Paraíso, Tabasco, para la modelación de la calidad del agua.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la funcionalidad del modelo QUAL2K como herramienta en la modelación de la calidad del agua.
- Identificar los parámetros requeridos para utilizar la herramienta QUAL2K.
- Realizar la caracterización hidrológica del área de estudio.

- Realizar la topografía del tramo para obtención de secciones y perfil, en una longitud aproximada de 19.56 Kilómetros.
- Recolectar información sobre la calidad de agua en el Rio Seco, a partir de datos históricos registrados en los seis sitios de monitoreo operados por la Conagua a través de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua.
- Aplicar el modelo QUAL2K para el cauce del Rio Seco en el tramo de estudio.
- Analizar los resultados finales arrojados por el modelo QUAL2K.

1.3 Alcances del proyecto

- La modelación es exclusiva para el tramo en estudio que abarcan 19.56 kilómetros del Rio Seco, ya que los parámetros son variables en cada sistema natural.
- El análisis de tránsito de contaminantes en el tramo en estudio, será unidimensional y de flujo permanente, es decir, la representación y los resultados solo varían en una dirección a lo largo del rio y, además, el caudal siempre será el mismo en un punto dado a lo largo del rio.
- El flujo del tramo en estudio será completamente mezclado verticalmente y lateralmente, es decir, si existe algún vertimiento a lo largo del rio, este se mezcla inmediatamente en ambos ejes.

1.4 Limitaciones del proyecto

- No se realizaron muestreos de campo debido a la emergencia sanitaria que derivó el COVID-19 y ordenó la suspensión de actividades en el ámbito público, privado y social.

- Los valores y/o información necesaria para la aplicación del modelo en el tramo de estudio fueron estimados con base a los registros del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).

2.1 QUAL2K

El QUAL2K es una herramienta para el modelado de la calidad del agua para ríos o corrientes de agua, diseñado por la Environmental Protection Agency (EPA) e intenta representar una mejor versión y más actual del QUAL2E. Este modelo puede simular una serie de componentes, entre los cuales podemos encontrar la temperatura, pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda de oxígeno de sedimentos, oxígeno disuelto (OD), nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (NH_3), nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3), nitrógeno total, fósforo orgánico, fósforo inorgánico (PO_4), fósforo total, el fitoplancton y algas de fondo. (Bracho L., Angulo L. y Díaz L., 2016).

Entre las características principales que presenta el modelo QUAL2K en cualquiera de sus versiones, podemos encontrar los siguientes:

- Avalado por la EPA
- Software se ejecuta en Microsoft Windows
- Los cálculos numéricos se llevan a cabo en el Fortran 90
- Las hojas de Excel son utilizadas como una interfaz gráfica para el usuario
- Las operaciones de la interfaz son programadas en Visual Basic
- Es un modelo unidimensional
- Flujo permanente espacialmente variado
- Flujo completamente mezclado vertical y lateralmente
- Variación diurna de calor

- Variación diurna de la calidad del agua

Tipo de software e interfaz gráfica: Este modelo se desarrolla en el sistema de Windows a través del lenguaje que maneja Visual Basic. Mientras que, su interfaz gráfica opera dentro de las hojas del software Excel, lo cual permite que este modelo sea comprensible y accesible.

El modelo opera en Excel: Al operar en esta herramienta, facilita la obtención, generación y concentración de información y resultados.

Dimensionalidad (Unidimensional): la unidimensionalidad que presenta el modelo nos indica que el agua se encuentra totalmente mezclada tanto en dirección lateral como vertical. El problema del modelo unidimensional se compensa con el hecho de que puede incluir descargas laterales que ingresan al río como resultado de aguas residuales o afluentes.

Hidrodinámica (Flujo permanente espacialmente variado): para el modelo el flujo de agua es simulado en condiciones hidráulicas estables, es decir, se simulan en condiciones de flujo permanente, con periodos de caudal y cargas constantes en el tiempo. El caudal es siempre el mismo en un punto dado a lo largo del río y solo varía entre diferentes localizaciones en el eje longitudinal del río.

Flujo completamente mezclado vertical y lateralmente: de existir vertimientos (V), el modelo asume que este se mezcla inmediatamente en eje vertical y lateral.

Variación diurna de calor: El calor del agua y la temperatura, se simulan en el modelo en función de los aspectos meteorológicos, en una escala de variación diurna.

Variación diurna de la calidad del agua: todas las variables de calidad del agua se simulan en una escala de tiempo circadiano.

Para cada elemento de cálculo, el balance hidrológico se describe en términos de flujo, temperatura de balance de calor y concentración de balance de materia. Con su ayuda, es posible calcular explícitamente las interacciones agua-sedimento que determinan la calidad del agua.

Otros procesos que son considerados por el modelo son, las interacciones que ocurren entre el sedimento y el agua, lo ocurrido con las algas inferiores, en la extinción de luz, en el pH y en los patógenos. Adicional, podemos mencionar que, las características hidráulicas indispensables para el modelo son la profundidad y velocidad y que el cálculo del tiempo de recorrido se efectúa en función del volumen y flujo del tramo a modelar. También, emplea reacciones bioquímicas como lo son la fotosíntesis o respiración, generación y consumo de oxígeno, por tanto, efectúa cálculos principales entre aproximadamente 15 variables de estado.

Finalmente, el modelo QUAL2K considera de manera particular ciertos elementos y procesos que ocurren en los cuerpos de agua, entre los cuales se encuentran:

La temperatura: todas las reacciones entre todas las variables de estado dependen de la temperatura y utilizan una formulación tipo Streeter-Phelps. El modelo calcula un factor de corrección para todos los coeficientes. El modelo calcula automáticamente la temperatura del agua. Equilibrio térmico completo entre la radiación de onda corta entrante, la radiación atmosférica entrante total, la radiación de la superficie del agua, la pérdida de calor por evaporación y la pérdida de calor atmosférico.

El ciclo del nitrógeno: se encuentran presentes el nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito, y nitrato. La fijación y mineralización del nitrógeno orgánico, la nitrificación, que se divide en oxidación de amoníaco a nitrito y oxidación de nitrito a nitrato, la regeneración de sedimentos y la respiración de algas, son algunos de los factores responsables del balance de nitrógeno. Además, se puede ajustar la velocidad de la reacción de nitrificación.

2.2 Estructura conceptual del modelo

Cualquier modelo simplifica los sistemas hídricos en cinco características, forma del sistema, caudal, hidráulica, calor y los constituyentes.

- **Forma del sistema (esquemmatización)**

El modelo requiere una simplificación de una cuenca a uno o varios ríos que sean el objeto de estudio, es decir, de una forma de área a una forma de línea.

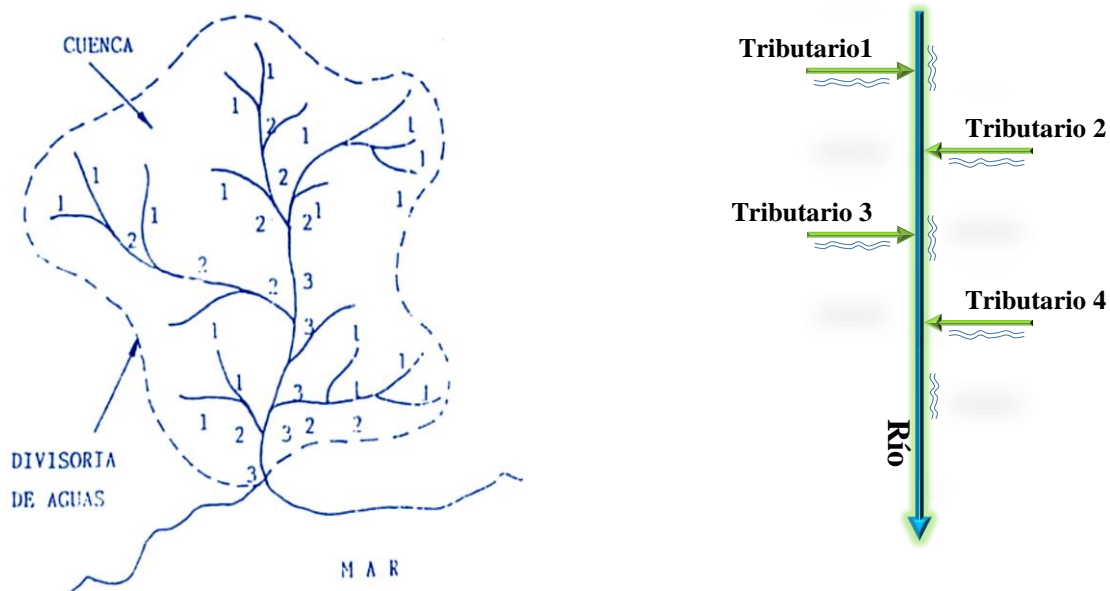


Figura 1. Orden de cuenca (Vega X.,2020).

- **Caudal (balance hídrico y condición de análisis)**

El modelo suma y resta los flujos que entran y salen a través de diferentes fronteras, el balance se realiza a nivel de cada elemento, es decir, en las subdivisiones de cada tramo.

- **Hidráulica (movimiento del agua)**

El modelo utiliza tres métodos para calcular la velocidad y profundidad, el método de las relaciones hidráulicas, ecuación de Manning y ecuación de vertederos. De estos tres métodos el modelo, solo selecciona uno entre las relaciones hidráulicas y ecuaciones de Manning, la ecuación de vertederos solo se utiliza en caso de la presencia de cascadas y vertederos. Considerando que, el caudal es conocido en cada punto del río, debido a que, el modelo suma y resta entradas y salidas, entonces se puede despejar y estimar la velocidad y profundidad de las ecuaciones de Manning o de las relaciones hidráulicas, siempre que se proporcione la geometría y rugosidad en el caso de la ecuación de Manning o los valores análogos en las relaciones hidráulicas, es decir, los coeficientes y exponentes de estas relaciones.

El modelo QUAL2K siempre representa a los ríos como canales trapezoidales o rectangulares simples, lo cual es una hidráulica simple y apropiada para modelación de calidad del agua.

- **Calor (balance de calor)**

El modelo efectúa un balance de térmico en cada volumen de control, es decir en las subdivisiones del tramo, sin embargo, aparecen nuevos elementos que aportan y quitan calor, es decir, entra en juego las transferencias de calor por el sol, el viento, los sedimentos, entre otros elementos. El QUAL2K tiene un submodelo para evaluar los efectos por la meteorología, es decir por elementos como el sol, el viento y las nubes. El QUAL2K tiene

un submodelo para evaluar las transferencias de calor entre el agua de río y los sedimentos que conforman su cauce. El QUAL2K tiene cuenta con ecuaciones para evaluar las transferencias de calor entre volúmenes de control por efectos de dispersión longitudinal.

- **Transformación de constituyentes**

El modelo tiene la capacidad de simular los procesos de pérdida y ganancia de oxígeno, así como la transformación de varias constituyentes. En total 18 variables de estado conforman el modelo, de las cuales solo dos (conductividad y patógeno, no son interdependientes de las otras variables, es decir, las otras 16 variables se afectan unas a otras en un balance de constituyentes.

2.3 Segmentación e hidráulica

Una vez efectuada la simplificación (cuenca-río), se procede a dividir el río en tramos que a su vez se subdividen en elementos. El diagrama que representa el modelo matemático de simulación QUAL2K esquematiza todas las características del sistema que se requiere modelar. En el modelado de flujo superficial, esta representación se refiere a las propiedades hidrogeométricas y la definición de los límites del modelo (límites internos y externos). (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

- Los límites exteriores corresponden a las estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo del tramo de estudio.
- Los límites internos corresponden a los afluentes tributarios, las extracciones y los vertimientos, para los cuales se debe tener información de caudales y calidad del agua.

El modelo esquematiza un río como una serie de tramos. Estos representan tramos de río que contienen características hidráulicas constantes como la pendiente, el ancho y fondo. Estos se numeran en orden ascendente a partir de la cabecera del cauce principal del río. Tenga en cuenta que, tanto las fuentes puntuales y no puntuales como las extracciones puntuales y no puntuales (abstracciones), se puede situar en cualquier punto a lo largo del canal (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

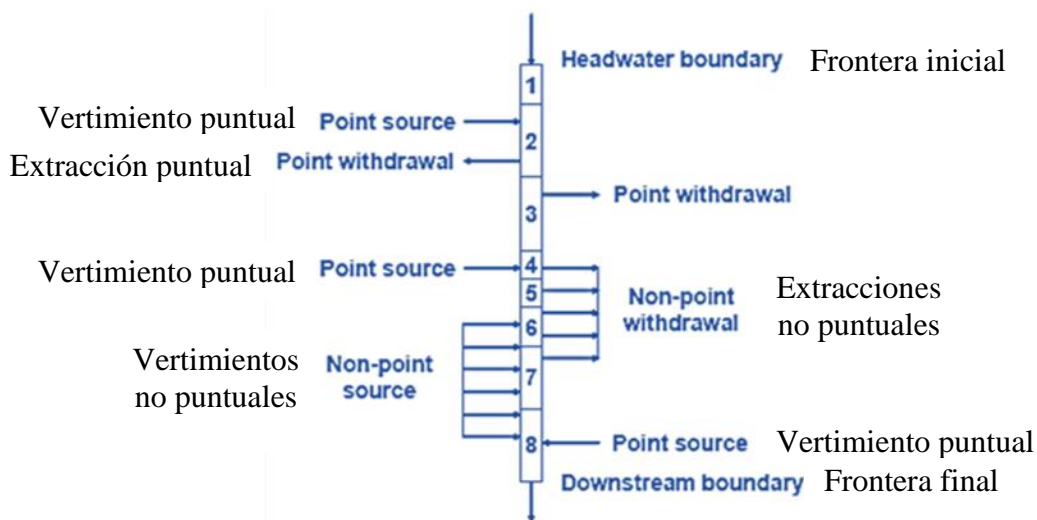


Figura 2. Esquema general del modelo QUAL2K (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

Para los sistemas con afluentes (tributarios), los tramos se numeran en orden ascendente a partir del Head water (Frontera Inicial o punto inicial de la representación del río) del río principal. Cuando se llega a un cruce con un afluente, serie numérica continúa en la cabecera de ese afluente. Las cabeceras como los afluentes se numeran consecutivamente siguiendo un esquema de secuencia similar al de los tramos. También se debe tener en cuenta que las ramas principales del sistema, es decir, la rama principal y cada afluente se denominan segmentos. Esta característica resulta muy relevante en la práctica porque el software proporciona gráficos de salida del modelo por segmentos. Es decir, el software crea áreas

individuales tanto para el cauce principal como para cada afluente que intervenga en este (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

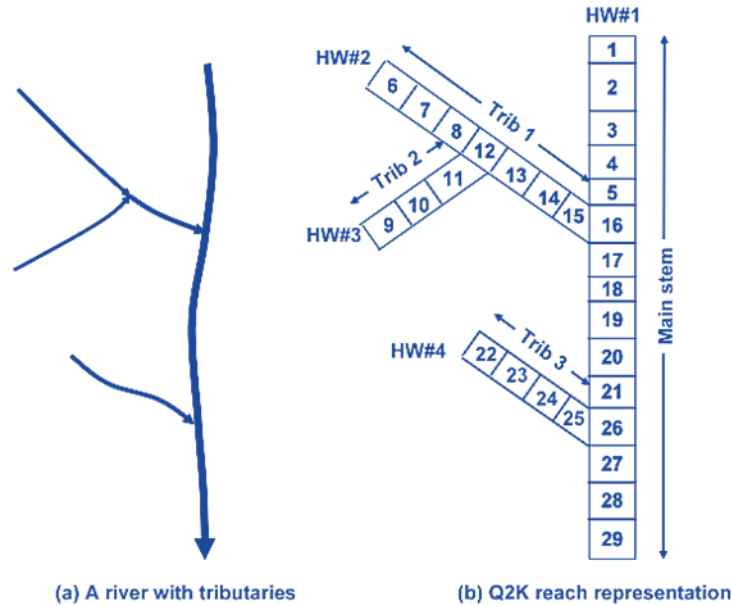


Figura 3. Esquema de segmentación para un río con afluentes en el QUAL2K (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

2.3.1 Balance de flujo

El modelo QUAL2K opera en estado estacionario, es decir, el flujo de entrada y salida de cada elemento informático que se haya analizado, se mantiene invariable a lo largo del tiempo.

En donde,

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i}$$

Q_i = Caudal de salida del elemento i hacia el elemento aguas abajo $i + 1$ en m^3/d .

Q_{i-1} : Caudal de entrada del elemento aguas arriba $i - 1$ en m^3/d .

$Q_{in,i}$: Caudal de entrada neto lateral por fuentes puntuales y difusas en m^3/d .

$Q_{out,i}$: Caudal de salida neto lateral por fuentes puntuales y difusas en m³/d.

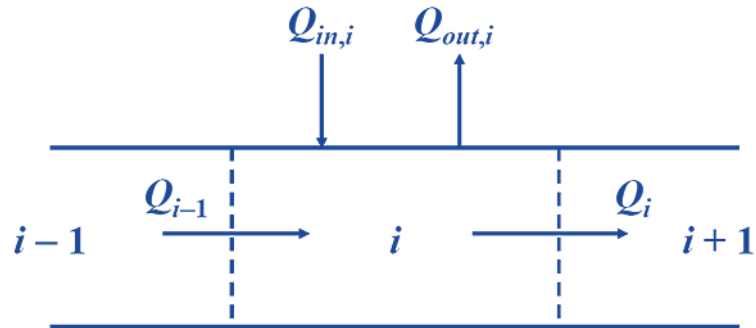


Figura 4. Esquema del balance de flujo (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

Por lo tanto, el flujo de salida aguas abajo es simplemente la diferencia entre el flujo de entrada y ganancias de la fuente menos pérdidas por extracción (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

La entrada total de las fuentes se calcula como,

$$Q_{in,i} = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j}$$

Donde,

$Q_{ps,i,j}$ = Caudal de entrada de la fuente puntual j-ésima al elemento i en m³/d

psi = El número total de puntos fuentes al elemento i

$Q_{nps,i,j}$ = es el j-ésimo flujo de entrada de fuente no puntual al elemento i en m³/d

npsi = el número total de entradas de fuentes difusas al elemento i.

La salida total de los retiros se calcula como,

$$Q_{out,i} = \sum_{j=1}^{pai} Q_{pa,i,j} + \sum_{j=1}^{npai} Q_{npa,i,j}$$

Donde,

$Q_{pa,i,j}$ = flujo de salida de retiro del punto j-ésimo del elemento i en m³/d

pai = el número total de retiros puntuales del elemento i

$Q_{npa,i,j}$ = es el j-ésimo flujo de salida de retiros no puntuales del elemento i en m³/d

$npai$ = el número total de flujos de extracción no puntuales del elemento i.

2.3.2 Características hidráulicas

Posterior a calcular el flujo de salida de cada elemento que conforman el afluente en estudio, la profundidad y la velocidad se calculan mediante uno los tres métodos siguientes:

- Diques/Vertederos
- Curvas nominales
- Ecuaciones de Manning.

El más usual es el de Manning, sin embargo, el programa es quien decide cuál de estos emplear, tomando las siguientes consideraciones:

1. Si al modelo se le ingresa la altura y el ancho del vertedero, el programa implementara o tomara la de vertederos.
2. Si al modelo se le ingresan los coeficientes de la curva (a y α), este implementara el método de curvas nominales.

3. En caso de no cumplirse ninguno de los dos casos antes descritos, entonces el modelo utilizara la ecuación de Manning.

2.4 Temperatura

El balance de calor tiene en cuenta las transferencias de calor de elementos adyacentes, cargas, extracciones, la atmósfera y los sedimentos. Un balance de calor se puede escribir para el elemento i como,

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right)$$

Donde,

T_i = temperatura en el elemento i en °C

t = tiempo en d

E'_i = el coeficiente de dispersión global entre los elementos i e $i + 1$ en m^3/d

$W_{h,i}$ = la carga de calor neta de fuentes puntuales y no puntuales en elemento i en cal/d

ρ_w = la densidad del agua en g/cm^3

C_{pw} = el calor específico del agua en $cal/(g \text{ } ^\circ C)$

$J_{a,i}$ = el flujo de calor aire-agua en $cal/(cm^2 \text{ d})$

$J_{s,i}$ = el flujo de calor sedimento-agua en $cal/(cm^2 \text{ d})$.

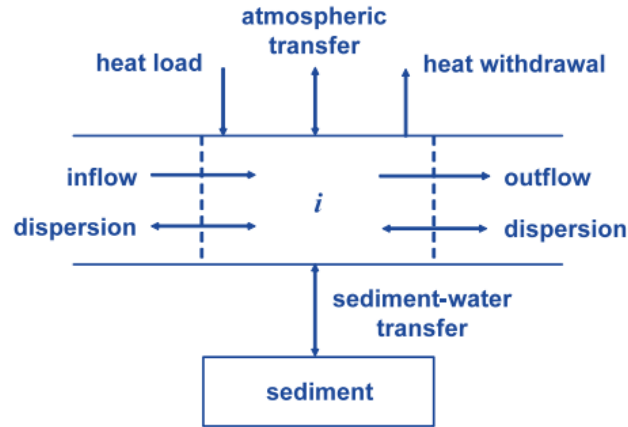


Figura 5. Esquema del balance de calor (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

2.5 Constituyentes y balance de masa general

Los componentes del modelo o variables de estado, se enumeran en la tabla siguiente:

Variable	Símbolo	Unidades
Conductividad	s	μmhos
Sólidos suspendidos inorgánicos	m_i	mgD/L
Oxígeno disuelto	O	mgO_2/L
DBO_c lenta	c_s	mgO_2/L
DBO_c rápida	c_f	mgO_2/L
Nitrógeno orgánico	n_o	$\mu\text{gN/L}$
Nitrógeno amoniacal	n_a	$\mu\text{gN/L}$
Nitratos	n_n	$\mu\text{gN/L}$
Fosforo orgánico	p_o	$\mu\text{gP/L}$
Fosforo inorgánico	p_i	$\mu\text{gP/L}$
Fitoplancton	a_p	$\mu\text{gA/L}$
Material orgánico particulado	m_o	$\mu\text{gD/L}$
Patógenos	X	$\text{cfu}/100 \text{ mL}$
Alcalinidad	Alk	mgCaCO_3/L
Carbono inorgánico total	c_T	mole/L
Biomasa de algas del suelo	a_b	mgA/m^2
Algas del suelo de nitrógeno	IN_b	mgN/m^2
Algas del suelo de fosforo	IP_b	mgP/m^2

Tabla 1. Variables estado del modelo (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

* mg/L = g/m³; D, C, N, P y A, hacen referencia al peso seco del carbono, nitrógeno, fósforo y clorofila.

* El término cfu significa unidad formadora de colonias, que es una medida del número de bacterias viables.

En este modelo, el flujo se representa como una cadena unidimensional de segmentos completamente mezclados que están conectados secuencialmente por mecanismos de transporte advectivo y disipativo (Fig. 6). Este modelo emplea una solución en diferencias finitas para las ecuaciones de transferencia de masa (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

El balance de masas general para un constituyente en un elemento (excepto las algas del fondo) se escribe como:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

Donde,

W_i = aporte externo del elemento constituyente i en g/d o mg/d

S_i = fuentes del constituyente debido a las reacciones y a los mecanismos de transferencia de masa en g/m³/d o mg/m³/d

E'_i = coeficiente de dispersión entre elementos i e $i + 1$ en m³/d

El balance de masas puede ser expresado como se muestra en la siguiente figura:

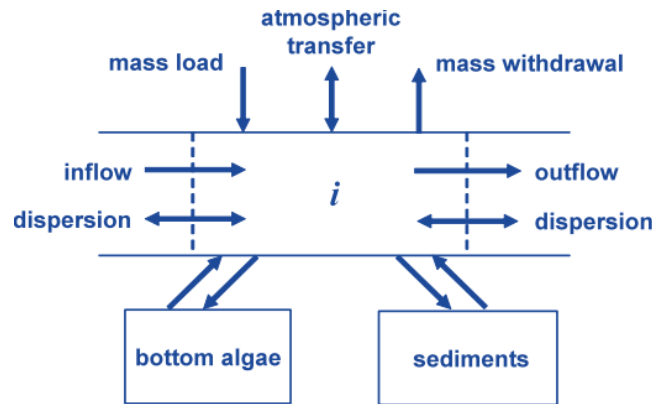


Figura 6. Esquema del balance de masas (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

La ecuación diferencial se resuelve numéricamente utilizando el método de diferenciación implícito. El álgebra matricial se utiliza para crear y resolver múltiples ecuaciones simultáneas (González L., Torres F., Rodríguez H., y Rivera N., 2013).

La carga externa se calcula como

$$W_i = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} c_{psi,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j} c_{npsi,j}$$

Donde,

$c_{ps,i,j}$ es la j-ésima concentración de fuente puntual para el elemento i en mg/L ó $\mu\text{g/L}$

$c_{nps,i,j}$ es la j-ésima concentración de fuente no puntual para el elemento i en mg/L o $\mu\text{g/L}$.

Para las algas de fondo, se omiten los términos de transporte y carga,

$$\frac{da_{b,i}}{dt} = S_{b,i}$$

$$\frac{dIN_b}{dt} = S_{bN,i}$$

$$\frac{dIP_b}{dt} = S_{bP,i}$$

Donde,

$S_{b,i}$ = fuentes y sumideros de biomasa de algas de fondo debido a reacciones en $mgA/m^2/d$

$S_{bN,i}$ = fuentes y sumideros de nitrógeno de algas de fondo debido a reacciones en $mgN/m^2/d$

$S_{bP,i}$ = fuentes y sumideros de fósforo de algas de fondo debido a reacciones en $mgP/m^2/d$

La Figura 7 esquematiza el diagrama de la interacción existente entre las variables de calidad del agua, representa una discusión completa de la teoría de modelos resueltos en el QUAL2K (González L., Torres F., Rodríguez H., y Rivera N., 2013).

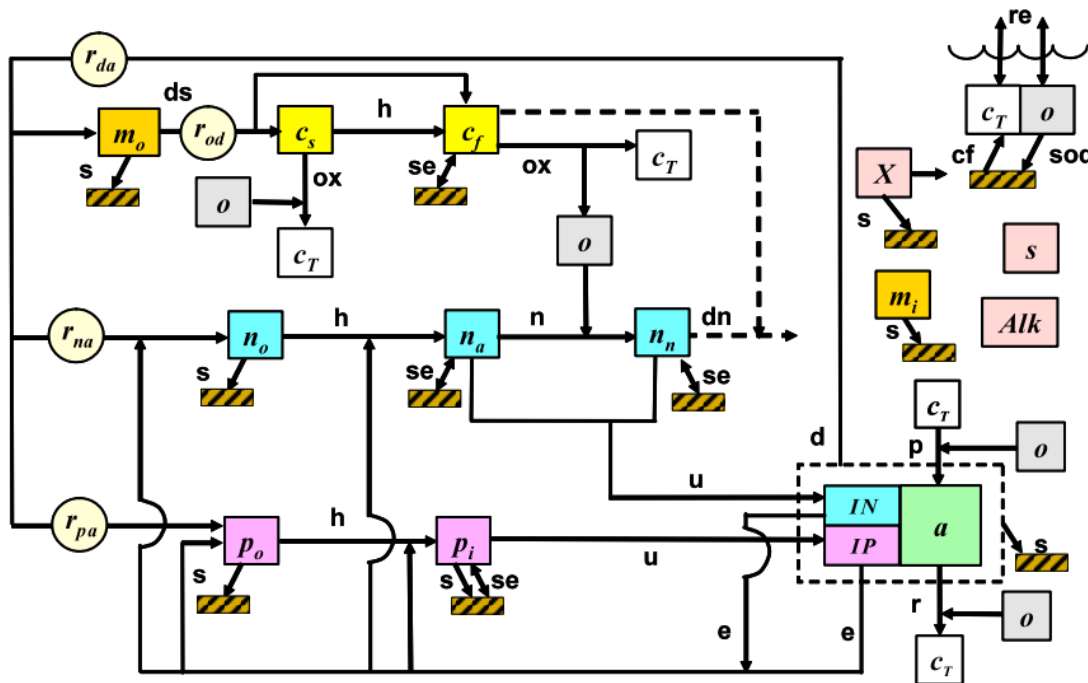


Figura 7. Modelos cinéticos y procesos de transferencia de masa del QUAL2K (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

Procesos cinéticos: disolución (ds), hidrólisis (h), oxidación (ox), nitrificación (n), desnitrificación (dn), fotosíntesis (p), respiración (r), excreción (e), muerte (d), respiración/excreción (rx) (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

Procesos de transferencia de masa: reaereación (re) sedimentación (s), la demanda de oxígeno de sedimentos (SOD), intercambio de sedimento (se), y flujo de carbono inorgánico del sedimento (cf) (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

La evolución que presentan los diferentes parámetros de calidad del agua y sus interdependencias, se enuncian a continuación:

- **DBO:**

La DBO incrementa a causa de la disolución de detrito, y se elimina por hidrólisis y oxidación.

- **Nitrógeno orgánico (NO):**

El NO incrementa a causa de la muerte de plantas y se elimina por hidrólisis y sedimentación.

- **Amonio:**

El amonio incrementa a causa de la hidrólisis del nitrógeno orgánico (NO) y a la respiración del fitoplancton y se elimina por la nitrificación y fotosíntesis de las plantas.

- **Nitratos:**

Los nitratos incrementan debido a la nitrificación del amonio y se eliminan por la desnitrificación y fotosíntesis.

- **Fósforo orgánico:**

El fósforo orgánico incrementa debido a la muerte de las plantas y se elimina a través de la hidrólisis y sedimentación.

- **Fósforo inorgánico:**

El fósforo inorgánico incrementa a causa de la hidrólisis del fósforo orgánico y la respiración del fitoplancton y se elimina por medio de la fotosíntesis.

- **Oxígeno disuelto:**

El oxígeno disuelto incrementa por la fotosíntesis y se elimina a través de la oxidación de la DBO rápida, la nitrificación y la respiración de las plantas.

- **Fitoplancton:**

El fitoplancton incrementa por la fotosíntesis y se elimina a través de la respiración, muerte y sedimentación.

Los procesos antes mencionados se representan a través de modelos matemáticos. Como, por ejemplo, la ecuación diferencial que es empleada en el QUAL2K para describir la reacción o transformación de NO_3 , se presenta a continuación, donde cada término representa una fuente o sumidero de NO_3 y el nitrógeno de nitrato incrementa a causa de la nitrificación del amoníaco y se elimina debido al proceso de desnitrificación y fotosíntesis de las plantas (González L., Torres F., Rodríguez H., y Rivera N., 2013).

$$\frac{dNO_3}{dt} = F_{na} K_{na} NH_4 - (1 - F_{dn}) K_{dn} NO_3 - r_{na} (1 - P_p) \mu_p P - r_{nd} (1 - P_b) \mu_a A$$

Donde,

F_{na} = atenuación debido a bajos niveles de oxígeno [adimensional]

K_{na} = tasa de nitrificación de nitrógeno amoniacal, [1/d]

F_{dn} = efecto de bajos niveles de oxígeno en la desnitrificación, [adimensional]

K_{dn} = tasa de desnitrificación, [/d]

r_{na} = proporción de oxígeno consumido en la nitrificación, [gO₂/gN]

P_p = preferencia de amonio como fuente de nitrógeno para el fitoplancton, [adimensional]

μ_p = tasa de fotosíntesis del fitoplancton, [/d]

P = fitoplancton, [mgC/L]

r_{nd} = proporción de oxígeno consumido en la desnitrificación, [gO₂/gN]

P_a = preferencia de amonio como fuente de nitrógeno para algas de fondo, [adimensional]

μ_a = tasa de crecimiento de algas, [/d]

A = concentración de biomasa algal, [mgA/L]

En el programa de modelación QUAL2K, la longitud total de la corriente que se estudia se subdivide en una serie de subtramos o elementos computacionales que se caracterizan por trabajar como pequeños reactores que se encuentran completamente mezclados. Para cada uno de estos elementos computacionales, se efectúa un balance hidrológico en función del caudal existente, un balance térmico en función de la temperatura y un balance de masa en función de la concentración de cada compuesto. Además, debe tenerse en cuenta los procesos de transporte, fuentes externas y fuentes internas. Posteriormente las ecuaciones de balance que resulten se resuelven para el caso de flujo permanente a través del método clásico de diferencias finitas implícito y finalmente, los resultados se traducen en líneas curvas que muestran la variación de los parámetros modelados sobre el área longitudinal de toda la corriente modelada (Villalobos H., 2008).

2.6 Características del modelo

El programa de modelación del QUAL2K se lleva a cabo a través de la plataforma Windows por medio del lenguaje denominado Visual Basic y la funcionalidad de su interface gráfica se encuentra bajo la herramienta del software Excel, por esto, su empleo resulta practico y accesible (Castro M., 2015).

El archivo de Excel contiene diversas pestañas u hojas de cálculo marcadas con diferentes colores, en las cuales se deben ingresar todos los datos de las variables de entrada que sean necesarios para la modelación y sobre estas mismas serán ejecutadas. Cada una de estas hojas de cálculo presentan una denominación de acuerdo a la clase de información contenida, las cuales pueden clasificarse como parámetros fisicoquímicos y microbiológicos recolectados en campo a través de muestreos en su monitoreo, caracterización longitudinal del cauce, constantes hidráulicas, valores de las constantes cinéticas de calibración del modelo, condiciones meteorológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), y en su caso, la información fisicoquímica relacionada a fuentes puntuales y difusas como tributarios, captaciones y vertimientos (Chapra S., Pelletier G. y Tao H., 2008).

En el modelo se puede observar el empleo de diferentes colores, las cuales sirven para identificar si la información debe ser ingresada por el modelador o en su caso corresponden a los resultados arrojados por el programa (Castro M., 2015).

2.6.1 Interfaz del modelo

Hojas de cálculo y/o pestañas de Excel color cian, estas representan a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el modelador. En estas predomina el ingreso de datos de entrada (Datos de entrada).

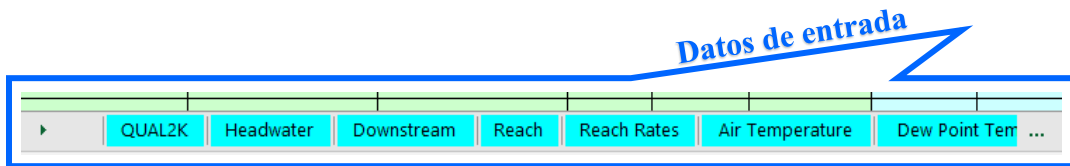


Figura 8. Hojas de cálculo de las variables de diseño (QUAL2K, 2012).

Hojas de cálculo y/o pestañas de Excel color amarillo, corresponden a los datos recolectados o muestreados en campo y que deben ser ingresados por el modelador. Estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo.

En estas se ingresan datos esperados con los cuales se realizará el ajuste o calibración del modelo (Resultados esperados con base en mediciones de campo).

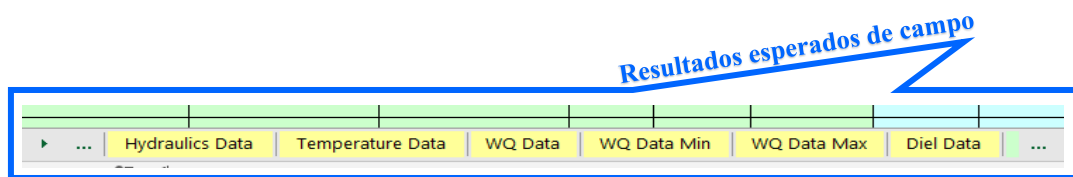


Figura 9. Hojas de cálculo de las variables de campo del (QUAL2K, 2012).

Hojas de cálculo y/o pestañas de Excel color verde, corresponden a los resultados del modelo. En estas el modelo organiza los resultados en valores (Resultados del modelo-Tablas).

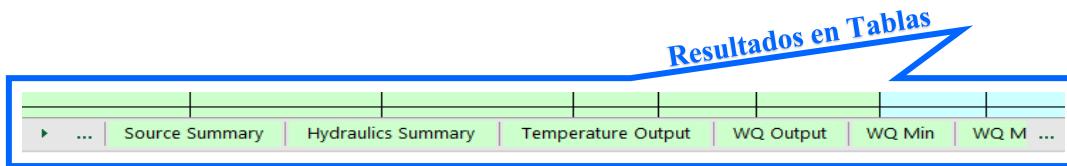


Figura 10. Hojas de resultados (QUAL2K , 2012).

Hojas de cálculo y/o pestañas color rosa, el modelo organiza los resultados en gráficos preestablecidos (Resultados del modelo-Gráficas).

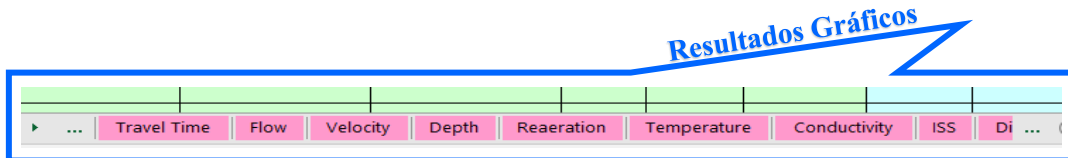


Figura 11. Hojas de graficas (QUAL2K, 2012).

Interfaz principal las celdas de color azul, se ingresan valores o información relacionada al caso de estudio (Datos de entrada).

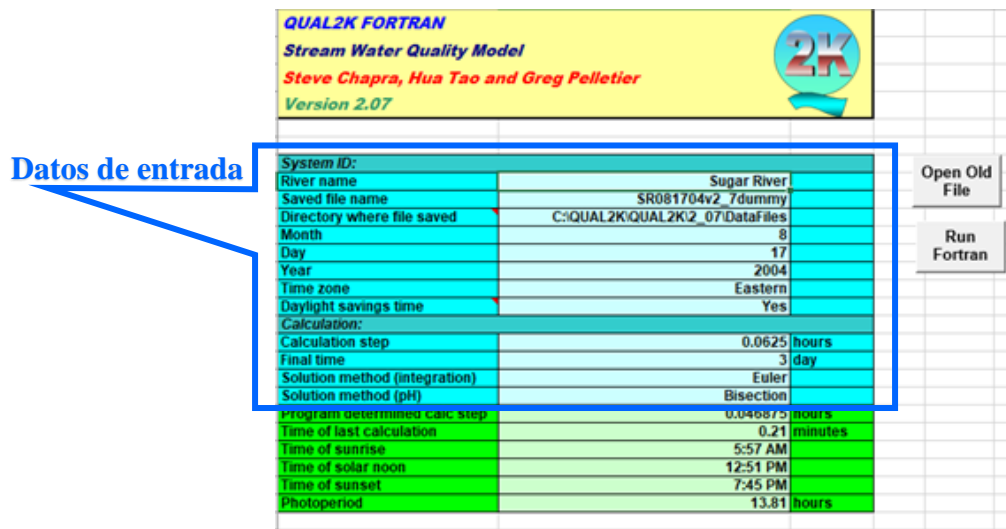



Figura 12. Interfaz inicial de datos de entrada (QUAL2K, 2012).

Interfaz principal las celdas de color verde, no se deben ingresar datos, ya que estas casillas son rellenas automáticamente cuando el modelo es ejecutado y son denominadas resultados tipo tablas (Resultados del modelo-Tabla).

QUAL2K FORTRAN
Stream Water Quality Model
Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier
Version 2.07



System ID:			
River name		Sugar River	
Saved file name		SR081704v2_7dummy	
Directory where file saved		C:\QUAL2K\QUAL2K2_07\DataFiles	
Month		8	
Day		17	
Year		2004	
Time zone		Eastern	
Daylight savings time		Yes	
Calculation:			
Calculation step		0.0625	hours
Final time		3	day
Solution method (integration)		Euler	
Solution method (rft)		Bisection	
Program determined calc step		0.046875	hours
Time of last calculation		0.21	minutes
Time of sunrise		5:57 AM	
Time of solar noon		12:51 PM	
Time of sunset		7:45 PM	
Photoperiod		13.81	hours

Open Old File

Run Fortran

Resultados en Tabla

Figura 13. Interfaz de celdas con llenado automático (QUAL2K, 2012).

Posterior a que el modelo QUAL2K haya efectuado todos los cálculos que son indispensables para poder efectuar las corridas de simulación, se generan diferentes hojas electrónicas y gráficas que muestran los resultados. A través de estas gráficas se puede efectuar la comparación de las curvas correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo de todo el cauce, en relación a los datos tomados en campo en las estaciones de monitoreo (Castro M., 2015).

CAPÍTULO 3: MARCO GEOGRAFICO

En este capítulo, se presentan las características geográficas como el clima, hidrográfica, relieve, etc. con el fin de efectuar la caracterización específica del área en estudio.

3.1 Descripción del área

3.1.1 Tabasco

El estado de Tabasco se forma por 17 municipios, Balancán, Cárdenas, Centla, Centro, Comalcalco, Cunduacán, Emiliano Zapata, Huimanguillo, Jalapa, Jalpa de Méndez, Jonuta, Macuspana, Nacajuca, Paraíso, Tacotalpa, Teapa, Tenosique. La extensión territorial abarca desde la llanura costera del Golfo de México hasta las sierras del norte de Chiapas, ubicándose geográficamente en las latitudes $18^{\circ}39'$ al norte y $17^{\circ}15'$ al sur y en la longitud $-91^{\circ}00'$ al este y $-94^{\circ}07'$ al Oeste. Prácticamente, Tabasco está dividido por las Regiones Grijalva y Usumacinta, las que a su vez se subdividen en cinco regiones que son Centro, Chontalpa, Sierra, Ríos y Pantanos (SAIG, 2020).

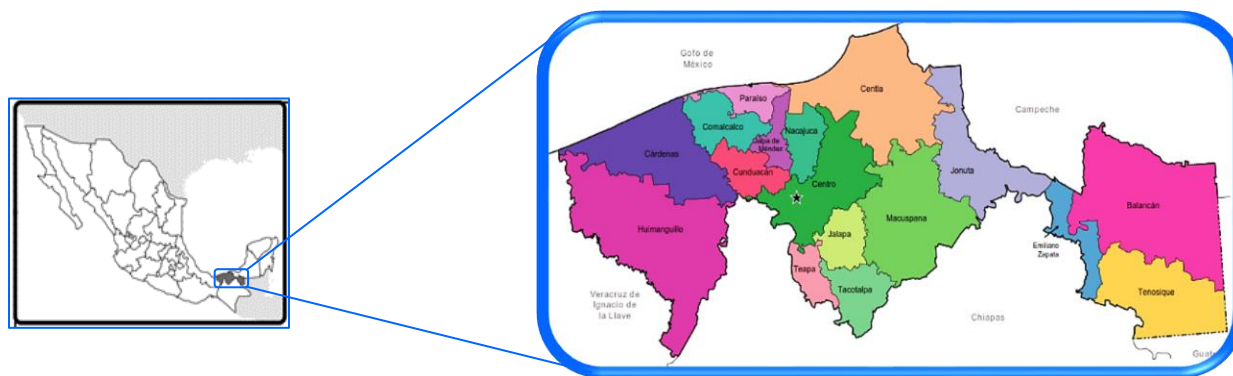


Figura 14. Municipios de Tabasco (INEGI, 2020).

3.1.2 Paraíso

El área de estudio se encuentra inmerso dentro del municipio de Paraíso, uno de los municipios que conforman el estado de Tabasco. Paraíso se encuentra ubicado en la región del río Grijalva en la subregión conocida como Chontalpa, situado a una altitud promedio de 10 metros sobre el nivel del mar (msnm) y tiene una superficie territorial de aproximadamente 377.55 kilómetros cuadrados. El municipio de Paraíso posee una colindancia territorial al norte con el Golfo de México y el municipio de Centla, al sur con Jalpa de Méndez, Comalcalco y Cárdenas, al este una vez más con los municipios de Centla y Jalpa de Méndez y al oeste nuevamente con Cárdenas y con el Golfo de México (SAIG, 2020).

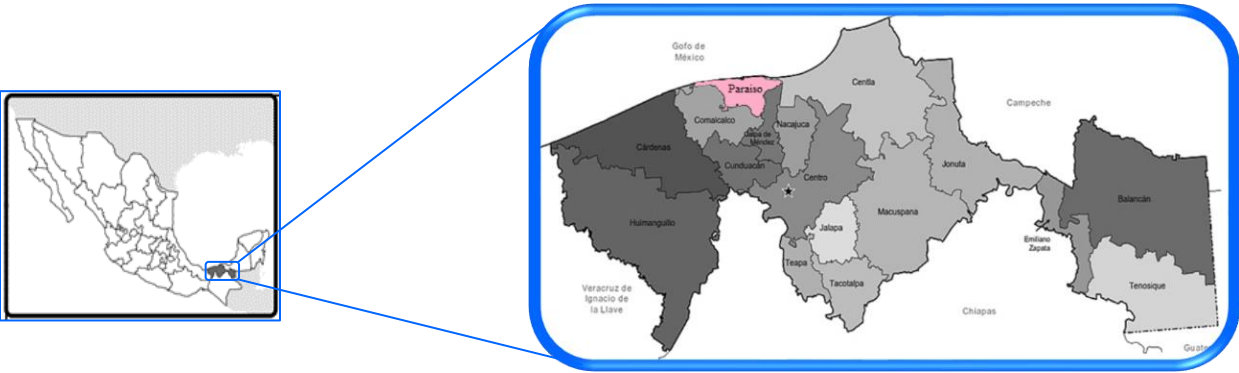


Figura 15. Paraíso, Tabasco (INEGI, 2020).

3.1.2.1 Hidrografía

Paraíso cuenta con una importante zona lacustre, destacando la laguna de Mecoacán, la cual se erige como una de las primeras productoras nacionales de ostión. Se hallan también otras de menor importancia, como las lagunas de Tupilco, Puente de Ostión, La Encerrada o

Amatillo, Tres Palmas, El Estero, El Zorro, Arrastradero, Las Flores, Lagartera, Tilapa, Manatí y El Eslabón (SAIG, 2020).

3.1.2.2 Clima

El Clima predominante en Paraíso es cálido-húmedo con abundantes lluvias en el periodo de verano y los meses más calurosos son los que oscilan de mayo a agosto con temperaturas que sobrepasan los 34 grados centígrados (SAIG, 2020).

3.1.3 Rio Seco

Se localiza dentro del cauce del Rio Seco y se comprende de un tramo de 19.56 kilómetros, que van desde la laguna “El Arrastradero” hasta su desembocadura en “Playa Paraíso (La Barra)”. Sus coordenadas geográficas son en el cadenamamiento 0+000 de 18°26'24.08"N y 93° 8'5.77"O, mientras que del cadenamamiento 19+569.63 son 18°22'54.81"N y 93°14'0.22"O.



Figura 16. Localización del cauce (Elaboración propia).

CAPÍTULO 4: TOPOGRAFIA

En este capítulo, se presentará la planimetría y altimetría del cauce del río Seco del kilómetro 0+000 al 19+569.63 con el fin de obtener la información necesaria a través de las secciones transversales generadas en cada estación de monitoreo.

4.1 Estaciones de monitoreo

Se tomaron las seis estaciones de monitoreo existentes a lo largo del tramo en estudio, como se puede observar en la ilustración 9.



Figura 17. Estaciones de monitoreo (Elaboración propia).

Estas estaciones son SC-09, SC-10, SC-11, DLTAB2470, SC-15 y DLTAB2472 y sus características de localización se muestran en la tabla siguiente.

Estación	Clave	Longitud	Latitud
1	REF1 (SC-09)	-93.2072	18.4124
2	REF2 (SC-10)	-93.1904	18.4288
3	REF3 (SC-11)	-93.1823	18.4154
4	BELLOTE (DLTAB2470)	-93.1639	18.434
5	BELLOTE1 (SC-15)	-93.1446	18.4268
6	MECOACAN (DLTAB2472)	-93.1309	18.4353

Tabla 2. Localización de estaciones de monitoreo (Elaboración propia).

4.2 Eje y secciones

De la topografía trazada en el cauce del tramo en estudio, se obtienen las coordenadas X, Y, Z, las cuales se descargan como datos crudos en formato SDR y con ayuda de un software denominado Sokkia IO se procede a pasarlas en formato TXT, el cual es un formato que admite CivilCad. Una vez importado los puntos, se procede a efectuar la triangulación y verificación de la misma. Al finalizar, se inicia con el trazo del eje principal del tramo con 19.56 kilómetros, que me será útil para seccionar y marcar las estaciones de aguas abajo hacia aguas arriba.

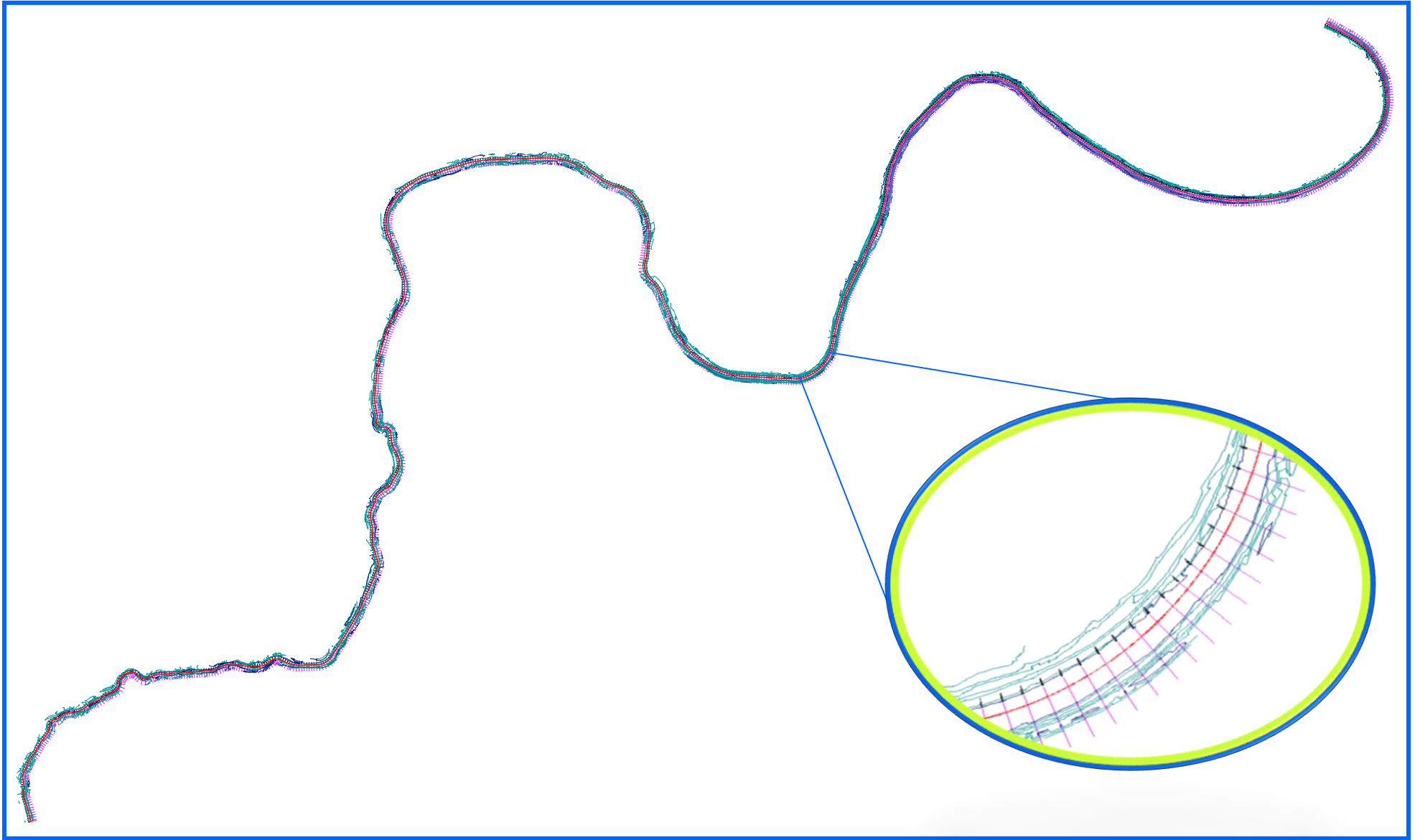


Figura 18. Eje principal del cauce, cadenamientos y curvas de nivel (Elaboración propia).

4.2.1 Estación SC-09

Esta es la primera estación de monitoreo de la calidad del agua en el cauce del tramo en estudio, de acuerdo al sentido del flujo. Su localización corresponde al cadenamiento 13+880 y presenta la siguiente sección topográfica.

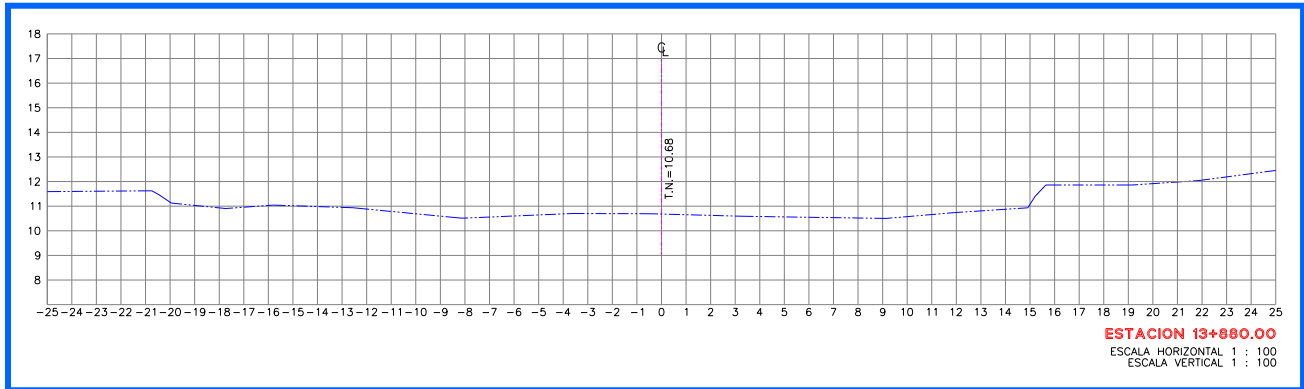


Figura 19. Sección 13+880 de la estación SE-09 (Elaboración propia).

4.2.2 Estación SC-10

Esta es la segunda estación de monitoreo de la calidad del agua en el cauce del tramo en estudio, de acuerdo con el sentido del flujo. Su localización corresponde al cadenamiento 10+420 y presenta la siguiente sección topográfica.

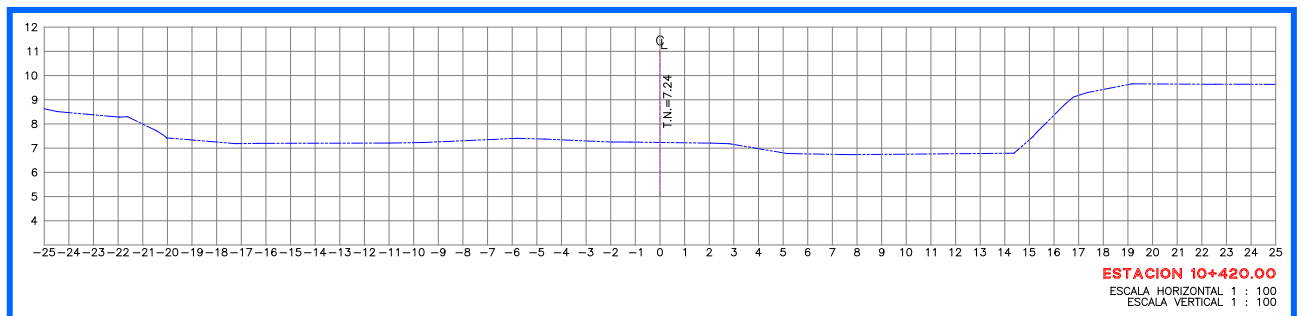


Figura 20. Sección 10+420 de la estación SE-10 (Elaboración propia).

4.2.3 Estación SC-11

Esta es la tercera estación de monitoreo de la calidad del agua en el cauce del tramo en estudio, de acuerdo con el sentido del flujo. Su localización corresponde al cadenamiento 8+560 y presenta la siguiente sección topográfica.

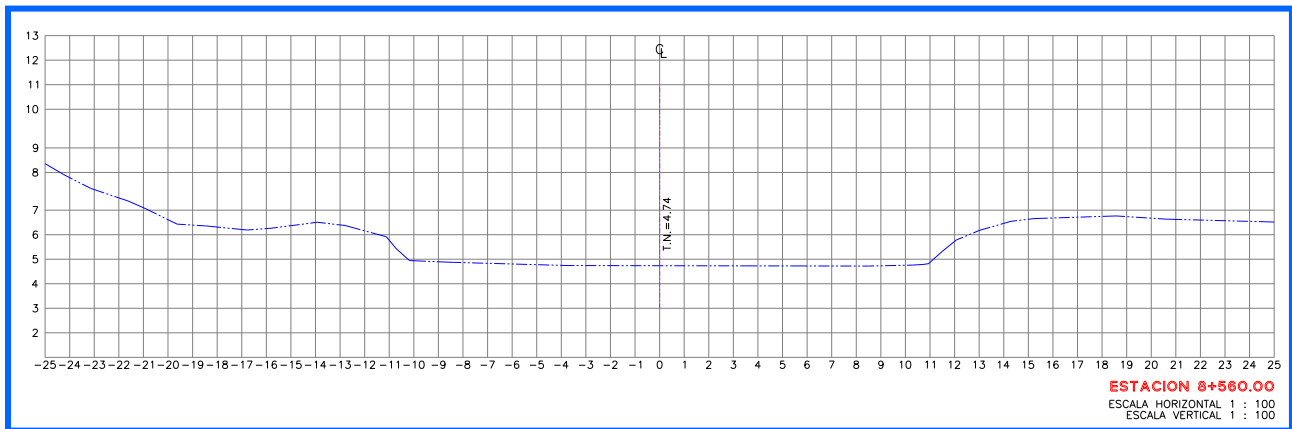


Figura 21. Sección 8+560 de la estación SE-11 (Elaboración propia).

4.2.4 Estación DLTAB2470

Esta es la cuarta estación de monitoreo de la calidad del agua en el cauce del tramo en estudio, de acuerdo con el sentido del flujo. Su localización corresponde al cadenamiento 5+160 y presenta la siguiente sección topográfica.

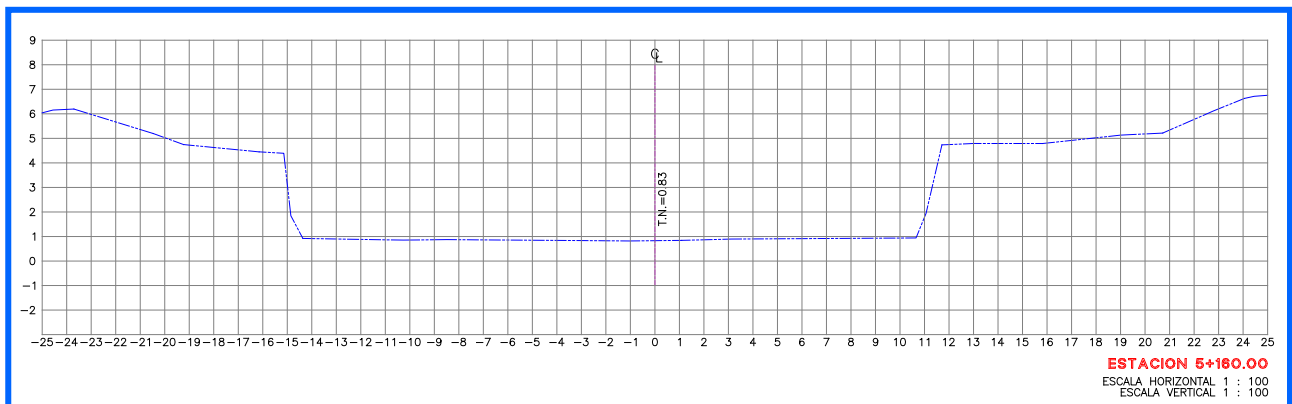


Figura 22. Sección 5+160 de la estación DLTAB2470 (Elaboración propia).

4.2.5 Estación SC-15

Esta es la quinta estación de monitoreo de la calidad del agua en el cauce del tramo en estudio, de acuerdo con el sentido del flujo. Su localización corresponde al cadenamiento 2+720 y presenta la siguiente sección topográfica.

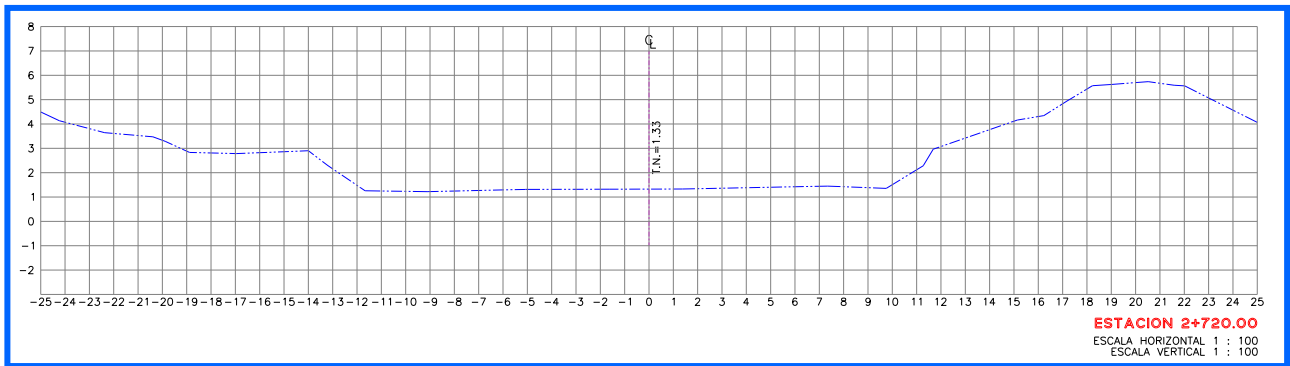


Figura 23. Sección 2+720 de la estación SC-15 (Elaboración propia).

4.2.6 Estación DLTAB2472

Esta es la sexta estación de monitoreo de la calidad del agua en el cauce del tramo en estudio, de acuerdo con el sentido del flujo. Su localización corresponde al cadenamiento 0+740 y presenta la siguiente sección topográfica.

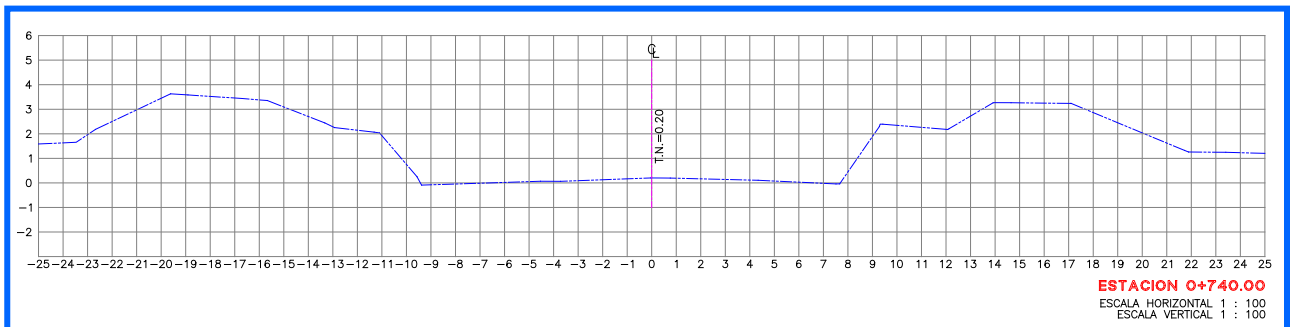


Figura 24. Sección 0+740 de la estación DLTAB2472 (Elaboración propia).

CAPITULO 5: COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

En este capítulo, se efectuará la recolección de información necesaria de los parámetros de calidad del agua determinados por el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) y otras fuentes, con el fin de llevar a cabo la modelación del tramo.

5.1 Puntos de muestreo

La constituyen los seis puntos de monitoreo en el rio Seco en función a las estaciones registradas por el SINA, la CNA y la topografía de la zona.

CLAVE SITIO	NOMBRE DEL SITIO	CUENCA	ORGANISMO CUENCA	ESTADO	MUNICIPIO	CUERPO DE AGUA	TIPO DE CUERPO DE AGUA	SUBTIPO CUERPO AGUA
SC-09	PM SITIO 2 REF 1	CAXCUCHAPA	FRONTERA SUR	TABASCO	PARAISO	RÍO SECO	LÓTICO Y SEDIMENTOS	RÍO
SC-10	PM SITIO 2 REF 2	CAXCUCHAPA	FRONTERA SUR	TABASCO	PARAISO	RÍO SECO	COSTERO Y SEDIMENTOS	RÍO
SC-11	PM SITIO 2 REF 3	CAXCUCHAPA	FRONTERA SUR	TABASCO	PARAISO	RÍO SECO	COSTERO Y SEDIMENTOS	RÍO
DLTAB2 470	BELLOTE	CAXCUCHAPA	FRONTERA SUR	TABASCO	PARAÍSO	RIO SECO	COSTERO	LAGUNA
SC-15	PM BELLOTE 1	EL CARRIZAL	FRONTERA SUR	TABASCO	PARAÍSO	LAGUNA MECOACÁN	COSTERO	LAGUNA
DLTAB2 472	LAGUNA DE MECOACAN 3	EL CARRIZAL	FRONTERA SUR	TABASCO	PARAÍSO	LAGUNA DE MECOACAN	COSTERO (HUMEDAL)	LAGUNA

Tabla 3. Puntos de monitoreo y ubicación (CNA, 2021).

5.2 Variables

Caudal (Q), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DB05), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Potencial de hidrógeno (pH), Temperatura (T°C), Oxígeno Disuelto (OD), Coliformes Fecales y Coliformes Totales.

5.3 Caudal

Esta información se obtuvo de los registros de los seis sitios de monitoreo de calidad del agua, que lleva a cabo la CONAGUA, a través de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua. La información se encuentra integrada en un solo archivo y clasificada por tipo de cuerpo de agua y por estado.

UBICACIÓN	CLAVE SITIO	FECHA		CAUDAL (M3/S)
13+880.00	SC-09	12-Sep-20	12-Oct-20	4.88
10+420.00	SC-10	28-Apr-15	24-Aug-20	6.35
8+560.00	SC-11	19-Feb-15	24-Aug-20	13.62
5+160.00	DLTAB2470	9-Apr-14	24-Aug-20	27.44
2+720.00	SC-15	9-Mar-17	8-Sep-20	61.88
0+740.00	DLTAB2472	15-Aug-14	24-Aug-20	46.71

Tabla 4. Caudal (Elaboración propia).

5.4 Batimetría

La información generada se obtuvo de la topografía levantada con estación total marca Sokkia modelo CX-105, nivel fijo de la marca Sokkia modelo B40 y GPS.

CLAVE	UBICACIÓN	ELEVACION	PENDIENTE	ANCHO DE FONDO	PENDIENTE L/ IZQUIERDO	PENDIENTE L/DERECHO
SC-09	13+880.00	10.68	0.0010	33.26	1.72	0.90
SC-10	10+420.00	7.24	0.0013	33.66	1.11	1.65
SC-11	8+560.00	4.74	0.0012	32.08	2.05	1.21
DLTAB2470	5+160.00	0.83	0.0002	39.72	0.89	0.88
SC-15	2+720.00	1.33	0.0006	36.84	1.62	0.94
DLTAB2472	0+740.00	0.20	0.0011	29.34	1.10	0.89
Desembocadura	0+000.00	-1.02	0.0011	34.15	0.33	0.67

Tabla 5. Datos de secciones topográficas (Elaboración propia) ver anexo.

5.5 Temperatura de rocío y velocidad del viento

Se obtiene de la base de datos de la Estación Meteorológica Automática (EMAS) de la CONAGUA más cercana al tramo en estudio, la cual registra velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación (CONAGUA, 2021).

HORA	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura de rocío	28.37	28.33	28.14	28.06	27.54	27.13	26.83	26.83	27.47	27.94	28.55	28.23	27.74	27.33	27.40	27.17	27.79	27.54	27.21	27.12	27.63	27.78	28.21	28.22
Velocidad del viento	2.75	2.47	2.42	2.20	2.56	2.50	3.14	3.30	3.54	3.72	3.00	2.90	2.55	2.62	2.14	2.94	3.07	2.82	2.31	2.13	2.30	2.05	2.52	2.58

Tabla 6. temperatura de rocío y velocidad de viento (Elaboración propia) ver anexo.

5.6 Parámetros de calidad del agua

Se obtiene de toda la recopilación de datos proporcionados por los historiales de los registros de las seis estaciones de monitoreo del río Seco a cargo de la CONAGUA y el SINA, de donde se obtiene lo siguiente:

SC-09	Medio	min	max
Temperatura (oC)	27.9	24.0	32.0
OD (mg/L)	3.2	1.8	4.3
pH (U)	7.6	7.5	7.6
Clorofila a (ug/L)	27.5	27.5	27.5
Nitrógeno total (ug/L)		2313.4	
N amoniacal (ug/L)		143.6	
Nitrito (ug/L)		21.0	
Nitrato (ug/L)		27.7	
Fósforo total (ug/L)		639.4	
Fosfato (ug/L)		637.7	
DBO5 FNU (mg/L)		37.4	
DBOu FNU (mg/L)		68.07	
SST (mg/L)		10.00	
Alcalinidad total (mg/L)		150.00	

Tabla 7. Calidad del agua estación SC-09 (Elaboración propia).

SC-10	Medio	min	max
Temperatura (oC)	29.0	25.4	32.1
OD (mg/L)	5.8	3.5	7.5
pH (U)	7.8	6.8	8.5
Clorofila a (ug/L)	20.2	20.2	20.2
Nitrógeno total (ug/L)		912.80	
N amoniacal (ug/L)		159.42	
Nitrito (ug/L)		153.17	
Nitrato (ug/L)		335.96	
Fósforo total (ug/L)		133.57	
Fosfato (ug/L)		29.84	
DBO5 FNU (mg/L)		30.77	
DBOu FNU (mg/L)		55.95	
SST (mg/L)		31.14	
Alcalinidad total (mg/L)		142.50	

Tabla 8. Calidad del agua estación SC-10 (Elaboración propia).

SC-11	Medio	min	max
Temperatura (oC)	28.7	25.4	31.1
OD (mg/L)	6.3	3.0	8.8
pH (U)	7.6	7.0	8.1
Clorofila a (ug/L)	37.9	37.9	37.9
Nitrógeno total (ug/L)		1184.7	
N amoniacal (ug/L)		137.7	
Nitrito (ug/L)		40.9	
Nitrato (ug/L)		337.0	
Fósforo total (ug/L)		162.3	
Fosfato (ug/L)		36.7	
DBO5 FNU (mg/L)		28.2	
DBOu FNU (mg/L)		51.4	
SST (mg/L)		51.8	
Alcalinidad total (mg/L)		140.1	

Tabla 9. Calidad del agua estación SC-11 (Elaboración propia).

DLTAB2470	Medio	min	max
Temperatura (oC)	28.8	25.5	30.6
OD (mg/L)	6.6	4.1	8.4
pH (U)	8.2	8.2	8.2
Clorofila a (ug/L)	12.2	12.2	12.2
Nitrógeno total (ug/L)		1223.90	
N amoniacal (ug/L)		168.60	
Nitrito (ug/L)		64.71	
Nitrato (ug/L)		337.49	
Fósforo total (ug/L)		448.50	
Fosfato (ug/L)		29.05	
DBO5 FNU (mg/L)		26.45	
DBOu FNU (mg/L)		48.08	
SST (mg/L)		55.53	
Alcalinidad total (mg/L)		137.70	

Tabla 10. Calidad del agua estación DLTAB2470 (Elaboración propia).

SC-15	Medio	min	max
Temperatura (oC)	28.5	24.7	31.6
OD (mg/L)	6.2	3.1	8.7
pH (U)	7.8	7.0	8.5
Clorofila a (ug/L)	10.0	10.0	10.0
Nitrógeno total (ug/L)		930.01	
N amoniacal (ug/L)		100.40	
Nitrito (ug/L)		21.00	
Nitrato (ug/L)		187.83	
Fósforo total (ug/L)		83.81	
Fosfato (ug/L)		43.56	
DBO5 FNU (mg/L)		34.81	
DBOu FNU (mg/L)		63.29	
SST (mg/L)		55.64	
Alcalinidad total (mg/L)		135.00	

Tabla 11. Calidad del agua estación SC-15 (Elaboración propia).

DLTAB2472	Medio	min	max
Temperatura (oC)	28.6	25.5	30.6
OD (mg/L)	6.6	4.1	8.4
pH (U)		6.7	8.2
Clorofila a (ug/L)		7.0	7.0
Nitrógeno total (ug/L)		1223.90	
N amoniacal (ug/L)		168.61	
Nitrito (ug/L)		64.71	
Nitrato (ug/L)		353.17	
Fósforo total (ug/L)		463.00	
Fosfato (ug/L)		29.05	
DBO5 FNU (mg/L)		27.25	
DBOu FNU (mg/L)		49.55	
SST (mg/L)		58.00	
Alcalinidad total (mg/L)		141.06	

Tabla 12. Calidad del agua estación DLTAB2472 (Elaboración propia).

Variable	Valor
Norganico (dead) (ug/L)	1923.1
Fósforo orgánico (dead) (ug/L)	-25.8
SSI (mg/L)	1.5
SSV (mg/L)	8.5
MOP (mg/L)	5.7
DBO SLOW	30.6

Variable	Valor
Norganico (dead) (ug/L)	118.8
Fósforo orgánico (dead) (ug/L)	83.5
SSI (mg/L)	4.7
SSV (mg/L)	26.5
MOP (mg/L)	24.4
DBO SLOW	25.2

Variable	Valor
Norganico (dead) (ug/L)	396.2
Fósforo orgánico (dead) (ug/L)	87.7
SSI (mg/L)	7.8
SSV (mg/L)	44.0
MOP (mg/L)	40.2
DBO SLOW	23.1

Variable	Valor
Norganico (dead) (ug/L)	565.5
Fósforo orgánico (dead) (ug/L)	407.3
SSI (mg/L)	8.3
SSV (mg/L)	47.2
MOP (mg/L)	46.0
DBO SLOW	21.6

Variable	Valor
Norganico (dead) (ug/L)	549.1
Fósforo orgánico (dead) (ug/L)	30.3
SSI (mg/L)	8.3
SSV (mg/L)	47.3
MOP (mg/L)	46.3
DBO SLOW	28.5

Variable	Valor
Norganico (dead) (ug/L)	587.0
Fósforo orgánico (dead) (ug/L)	426.9
SSI (mg/L)	8.7
SSV (mg/L)	49.3
MOP (mg/L)	48.6
DBO SLOW	22.3

Tabla 13. Variables de calidad calculadas a partir de las mediciones registradas (Elaboración propia).

Consideraciones de cálculo y supuestos para la modelación del Rio Seco en el QUAL2K:

- La relación entre fracciones de SSF (solidos suspendidos fijos) y SSV (solidos suspendidos volátiles) es 15% y 85%.
- DBO rápida es igual a la DBO5
- DBO lenta es igual a la DBO ultima menos la DBO5
- Se consideran constantes en el tiempo, los valores de los parámetros que solo cuentan con un registro.
- Para variables no medidas se aplican las siguientes ecuaciones

$$N_{\text{orgánico (inerte)}} = N_{\text{total}} - N_{\text{amoniaco}} - \text{nitritos} - \text{nitratos} - A * r_{N:A} \text{ en Ug/L}$$

$$P_{\text{orgánico (inerte)}} = P_{\text{total}} - \text{fosfatos} - A * r_{P:A} \text{ en Ug/L}$$

$$SSI = 0.15 * SST \text{ en mg/L}$$

$$SSV = 0.85 * SST \text{ en mg/L}$$

$$MOP = SSV - A * r_{D:A} \text{ en mg/L}$$

Donde

A = Clorofila

Estequiometria del fitoplancton 100g D : 40g C : 7200mg N : 1000mg P : 1000mg A

C = carbono

N = nitrógeno

P = fosforo

r = relación estequiométrica

CAPITULO 6: APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2K

6.1 Esquematización

La esquematización del HW y enumerar los tramos en orden ascendente a partir de la cabecera del cauce principal del río coadyuvan a un mejor manejo y entendimiento de la modelación que se debe generar en el QUAL2K.

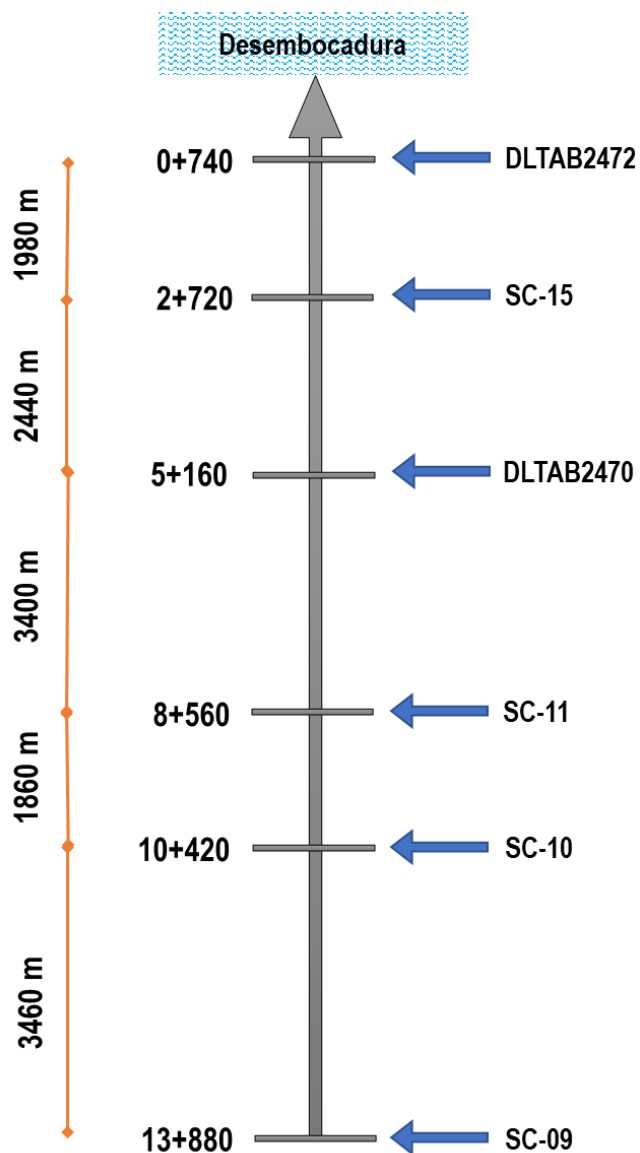



Figura 25. Diagrama de puntos de muestreo del río Seco (Elaboración propia).

6.2 Configuración inicial

Con la información recolectada y procesada del Rio Seco, se da inicio a la configuración del Qual2k, ingresamos el nombre del rio, evitando los acentos por seguridad de la corrida, el nombre con el que será guardado, la ruta, fechas y zona de tiempo, el Daylight savings time solo aplica para lugares alejados de la línea ecuatorial.

QUAL2K FORTRAN Stream Water Quality Model Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier Version 2.07		
		
System ID:		
River name	Rio Seco	
Saved file name	Rio_Seco	
Directory where file saved	D:\2_07\DataFiles	
Month	10	
Day	12	
Year	2020	
Time zone	Central	
Daylight savings time	No	
Calculation:		
Calculation step	0.03	hours
Final time	4	day
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Bisection	
Program determined calc step	0.023438	hours
Time of last calculation	0.13	minutes
Time of sunrise	4:41 AM	
Time of solar noon	10:34 AM	
Time of sunset	4:27 PM	
Photoperiod	11.77	hours

Open Old File

Run Fortran

Figura 26. Interfaz inicial QUAL2K (Elaboración propia).

La zona de tiempo se definió de acuerdo a la clasificación SENER donde cada estado de la República Mexicana se clasifica de la siguiente manera:

1. **Centro** (Meridiano 90°): Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Chihuahua, Ciudad de México, Coahuila, Colima, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla,

Querétaro, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán y Zacatecas (SENER, 2023).

- Pacífico** (Meridiano 105°): Baja California Sur, Nayarit (con excepción de Bahía de Banderas, que va a la zona centro), Sinaloa y Sonora (SENER, 2023).
- Noreste** (Meridiano 120°): Baja California (SENER, 2023).
- Sureste** (Meridiano 75°): Quintana Roo (SENER, 2023).

Los métodos matemáticos para realizar la simulación usados son el de Euler y Bisection por su eficiencia.

La configuración inicial de Headwater y Reach del QUAL2K son con los datos obtenidos de la topografía y adecuados a los requisitos que el modelo necesita.

Figura 27. Interfaz de Headwater del Qual2k (Elaboración propia).

Figura 28. Interfaz de Reach del Qual2k (Elaboración propia).

6.3 Parámetros de calidad del agua del Río Seco y el Qual2k

Estos parámetros generados se obtuvieron y organizaron de acuerdo a las necesidades del QUAL2K, cabe señalar que se obtuvieron de los datos históricos recolectados por la CONAGUA y el SINA en los seis puntos de monitoreo que se marcaron en el río Seco.

ID	Number of Headwaters*	Headwater Name	Flow Rate	Elevation	Weir				Rating Curves				Manning Formula				Prescrib			
No. 1	Reach No.*		(m ³ /s)	(m)	Height	Width	adam	bdam	Velocity		Depth		Channel	Manning	Bot Width	Side	Side	Dispersi		
					(m)	(m)			Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slope	n	m	Slope	Slope	m2/s		
	1	SC-09	4.890	10.680			1.2500	0.9000					0.001	0.0250	33.26	1.72		0.90		
		Headwater Water Quality	Units		12:00 a. m.	01:00 a. m.	02:00 a. m.	03:00 a. m.	04:00 a. m.	05:00 a. m.	06:00 a. m.	07:00 a. m.	08:00 a. m.	09:00 a. m.	10:00 a. m.	11:00 a. m.	12:00 p. m.	01:00 p. m.	02:00 p. m.	03:00 p. m.
		Temperature	C	25.70	25.00	24.00	24.30	25.00	25.40	27.00	27.50	28.10	28.70	27.90	29.00	31.00	31.50	32.00	31	
		Conductivity	umhos																	
		Inorganic Solids	mg/DL	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	
		Dissolved Oxygen	mg/L	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4	
		CBODslow	mgO2/L	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30.63	30	
		CBODfast	mgO2/L	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37	
		Organic Nitrogen	ugN/L	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923.06	1923	
		NH4-Nitrogen	ugN/L	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143.55	143	
		NO3-Nitrogen	ugN/L	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	27	
		Organic Phosphorus	ugP/L	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25.84	-25	
		Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637.71	637	
		Phytoplankton	ugA/L	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27	
		Detritus (POM)	mgD/L	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14.13	14	
		Pathogen	cfu/100 mL																	
		Alkalinity	mgCaCO3/L	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150	
		pH	s.u.	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7	

Figura 29. Head Water con parámetros de calidad del agua del río Seco SC-09 (Elaboración propia).

Headwater ID	Distance km	Cond (umhos)	TSS (mg/DL)	DO (mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	BODs (mgO2/L)	Yorg	NH4 (ugN/L)	NO3 (ugN/L)	Potg (ugN/L)	Yorg P (ugP/L)	Yphoto (ugP/L)	Detr (mg/DL)	Pathogens (cfu/100 mL)	Alk (mgCaCO3/L)
1	13.88	10.00		3.21	30.63	37.44	1923.06	143.55	27.68	-25.84	637.71		5.75		150.00
1	10.42	31.14		5.77	25.18	30.77	118.79	15.9	335.96	83.53	23.84		24.45		142.50
1	8.56	51.76		6.29	23.11	28.25	336.22	138	336.96	87.65	36.74		40.20		140.10
1	5.16	55.53		6.56	21.64	26.45	565.53	169	337.49	407.29	29.05		45.98		137.70
1	2.72	55.64		6.24	28.48	34.81	549.13	100	187.83	30.30	43.56		46.30		135.00
1	0.74	58.00		6.56	22.30	27.25	586.97	169	353.17	426.95	29.05		48.60		141.06

Figura 30. WQ Data con parámetros de calidad del agua del río Seco SC-09, SEC-10, SC-11,

DLTAB2470, SC-15 y DLTAB2472 (Elaboración propia).

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Sugar River (8/17/2004)
Water Quality Data Minimum:

Open Old File Run Fortran

Headwater ID	Distance km	Minimum cond-data	Minimum ISS-data	Minimum DO-data	Minimum CBODs-data	Minimum CBODF-data	Minimum No-data	Minimum NH4-data	Minimum NO3-data	Minimum Phyto-data	Minimum Detritus-data	Minimum athogen-dat	Minimum Alk-data	Minimum pH-data	Minimum Bot Alg (g)
1	13.88			1.82						27.52				7.50	
1	10.42			3.53						20.20				6.80	
1	8.56			3.00						37.92				7.00	
1	5.16			4.12						12.16				8.20	
1	2.72			3.09						9.95				7.00	
1	0.74			4.12						7.00				6.70	

WQ Data WQ Data Min WQ Data Max Diel Data Source Summary Hydraulics Summary

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Sugar River (8/17/2004)
Water Quality Data Maximum:

Open Old File Run Fortran

Headwater ID	Distance km	Maximum cond-data	Maximum ISS-data	Maximum DO-data	Maximum CBODs-data	Maximum CBODF-data	Maximum No-data	Maximum NH4-data	Maximum NO3-data	Maximum Phyto-data	Maximum Detritus-data	Maximum athogen-dat	Maximum Alk-data	Maximum pH-data	Maximum Bot Alg (g)
1	13.88			4.28						27.52				7.60	
1	10.42			7.50						20.20				8.50	
1	8.56			8.82						37.92				8.10	
1	5.16			8.43						12.16				8.20	
1	2.72			8.67						9.95				8.50	
1	0.74			8.43						7.00				8.20	

WQ Data WQ Data Min WQ Data Max Diel Data Source Summary Hydraulics Summary

Figura 31. WQ Data min y max con parámetros de calidad del agua del río Seco SC-09, SEC-10, SC-11, DLTAB2470, SC-15 y DLTAB2472 (Elaboración propia).

Los datos ingresados en las celdas y hojas amarillas del QUAL2K no son utilizados por el modelo para simular, sino son denominados datos esperados que sirven para comparar los resultados simulados.

6.4 Corrida del modelo con los parámetros de calidad del Río Seco

Configurando adecuadamente las pestañas que requieren de la información de los parámetros de calidad del Río Seco, se corre el modelo.

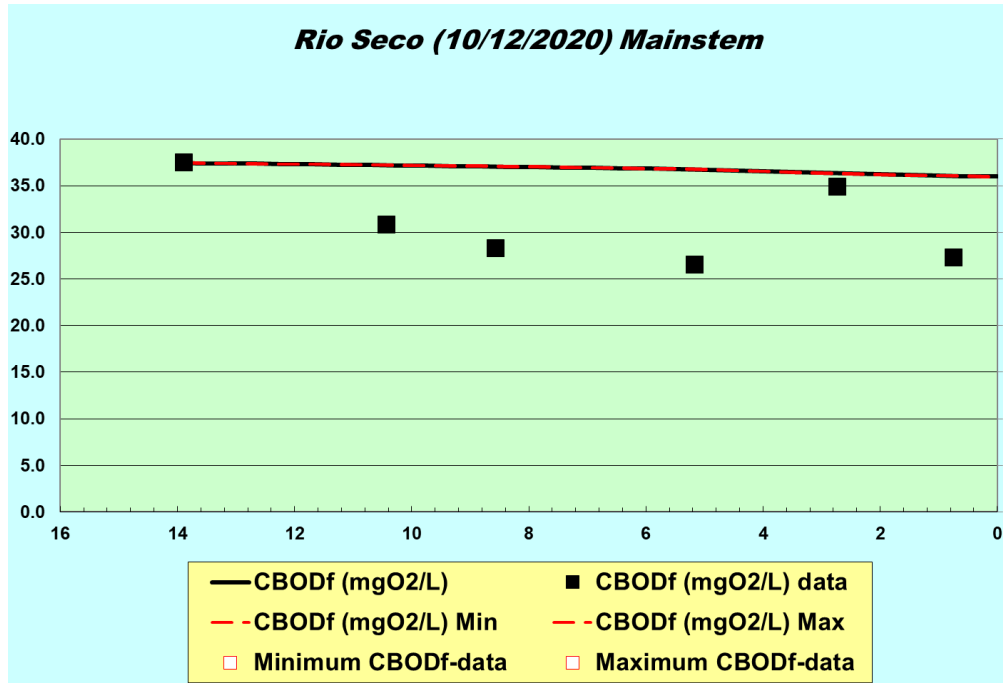


Figura 32. Graficas de DBO5 simulada (Elaboración propia).

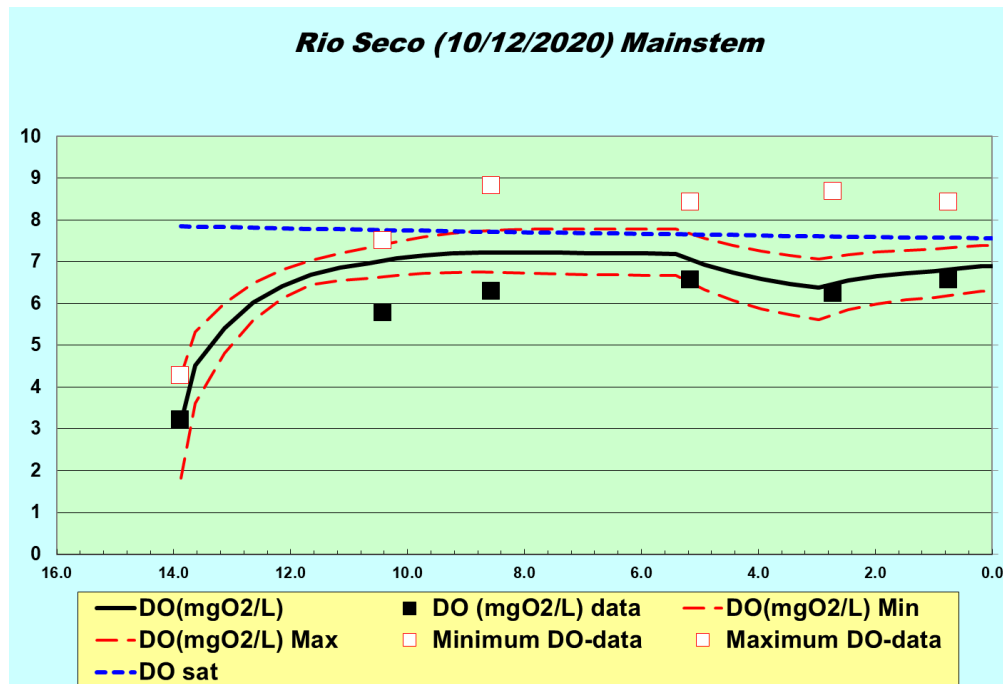


Figura 33. Oxígeno disuelto simulado (Elaboración propia)

Las líneas están separadas de los puntos lo cual indica que falta calibrar las hojas Hydraulics Data y WQ Data, oxidar y aumentar las tasas de degradación.

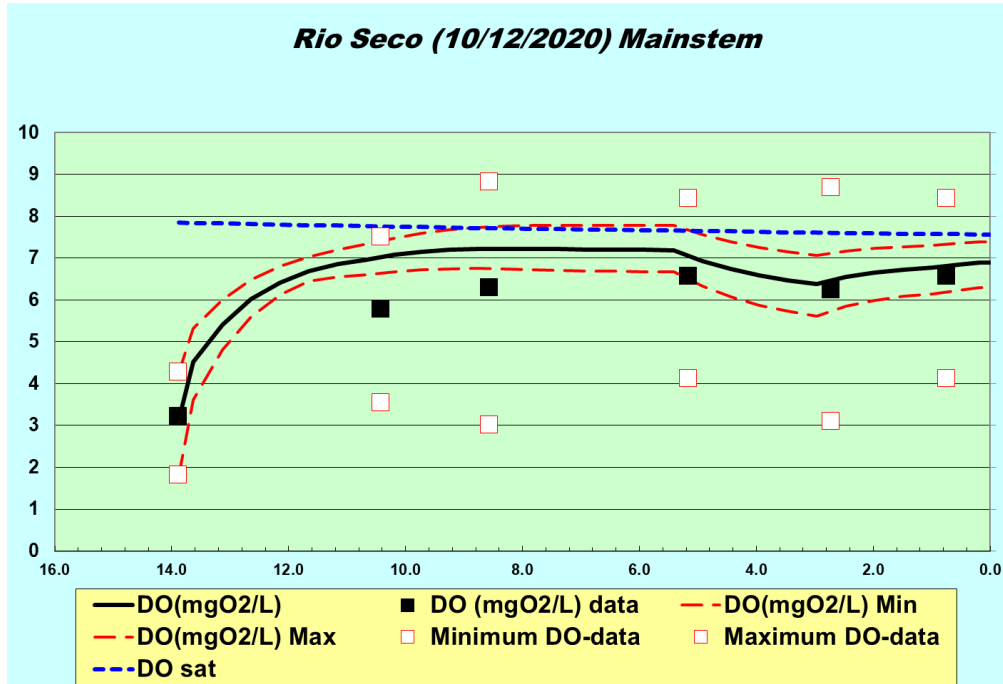


Figura 35. Oxígeno disuelto simulado (Elaboración propia)

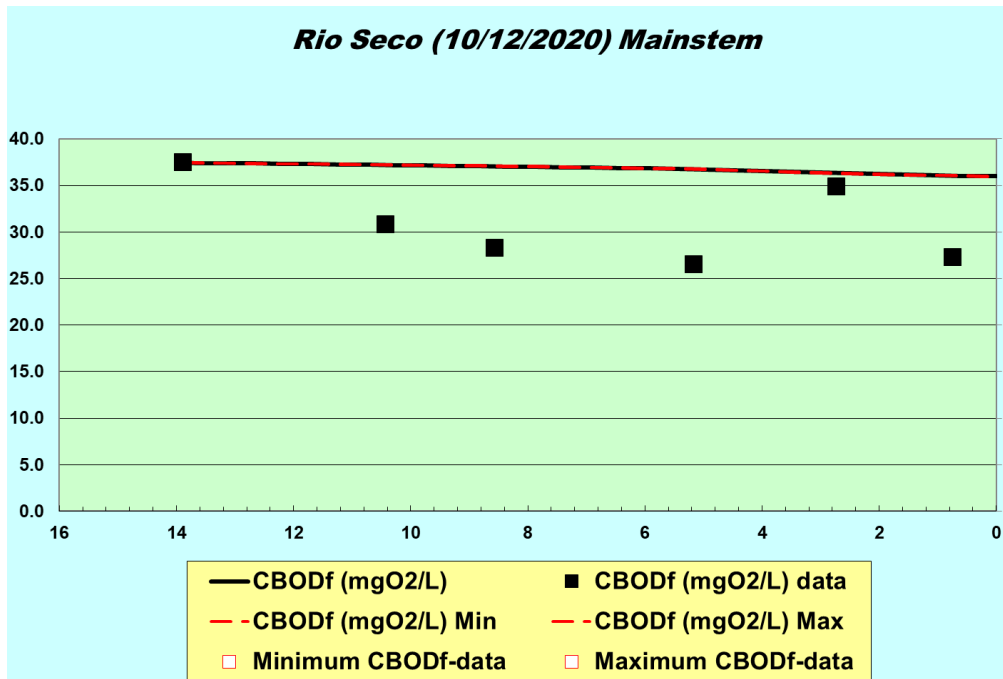


Figura 34. Graficas de DBO5 simulada (Elaboración propia).

Para el caso de estudio, se encontró que sobre el cauce del río Seco se presentan dos puntos críticos de acuerdo al oxígeno disuelto y a la DBO presentes a lo largo de todo su recorrido, estos puntos críticos se encuentran ubicados uno cerca de la cabecera de Paraíso y el otro del Bellote, lugares donde se concentra la sobrepoblación actual y se están efectuando cambios de suelo. Y se observa que, en la modelación del oxígeno disuelto, este componente se aumenta a causa del proceso de fotosíntesis de las plantas, la biomasa de las algas de fondo y el fitoplancton. Así mismo, se observa que la concentración del oxígeno decrece debido al proceso de oxidación de la DBO rápida, por la respiración de las plantas y por los procesos de nitrificación.

CAPITULO 7: CONCLUSION

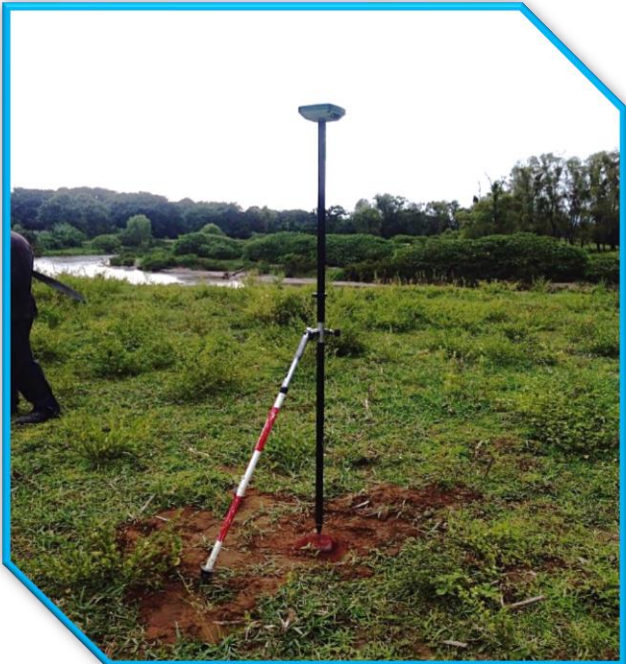
Para la evaluación de la calidad del agua del modelo QUAL2K, se toman dos elementos como principales indicadores de contaminación, la DBO y Oxígeno disuelto. La DBO es uno de los indicadores más relevantes de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, su presencia denota que entre mayor sea su presencia, mayor es el grado de contaminación del cuerpo de agua; debido a ellos, se evidencia que existe dos tramos críticos sobre la corriente, el cual tiene problemas de contaminación debido a las dos manchas urbanas existentes, a las construcciones simultaneas que se ejecutan en esa zona, a la reducción del cauce del río, la deforestación y cambio de suelo, lo cual está incrementando considerablemente el deterioro del río Seco.

La implementación del QUAL2K en el municipio de Paraíso, Tabasco, representa una línea base en términos de modelación de la calidad del agua, puesto que no existen experiencias previas de modelación. Este modelo generado, puede ser ajustado y calibrado con datos de muestras actuales y generar nuevos escenarios del comportamiento de la calidad del agua.

Finalmente, y aunque la información existente registrada por la CNA y el SINA, permitieron contar con los datos de campo necesarios para implementar del modelo, algunos parámetros solo contaban con un dato puntual y la recopilación de campo no se llevó a cabo debido a las restricciones existentes por la pandemia, lo cual influye en la correcta implementación y en el resultado generado por el modelo QUAL2K.

Anexo 1. Evidencia visual

Posicionamiento G.P.S.



Control horizontal topográfica con estación total marca Sokkia modelo CX-105.



Control horizontal topográfica con nivel fijo de la marca Sokkia modelo B40.



Levantamiento de Secciones Transversales Estación Sokkia cx-105.

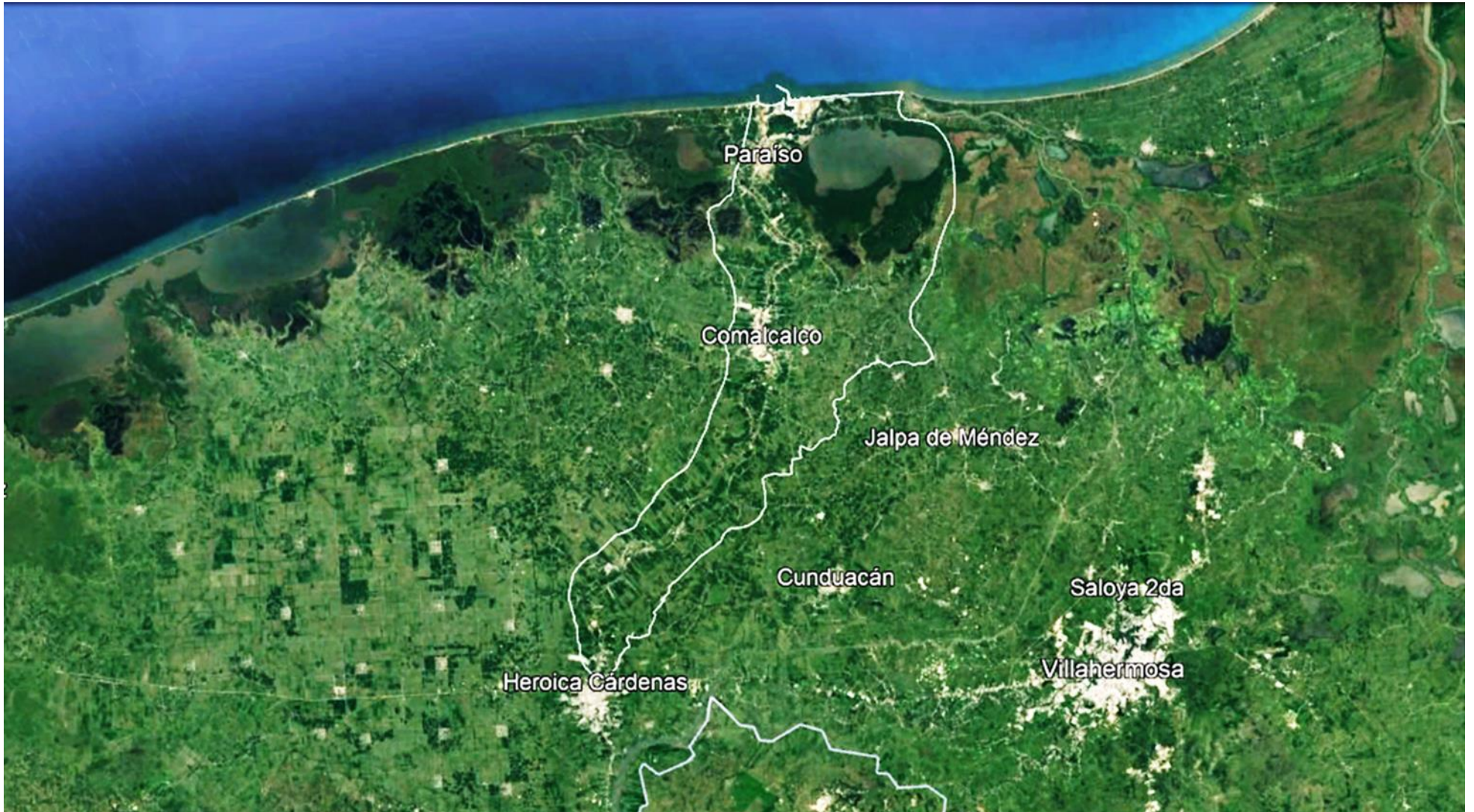




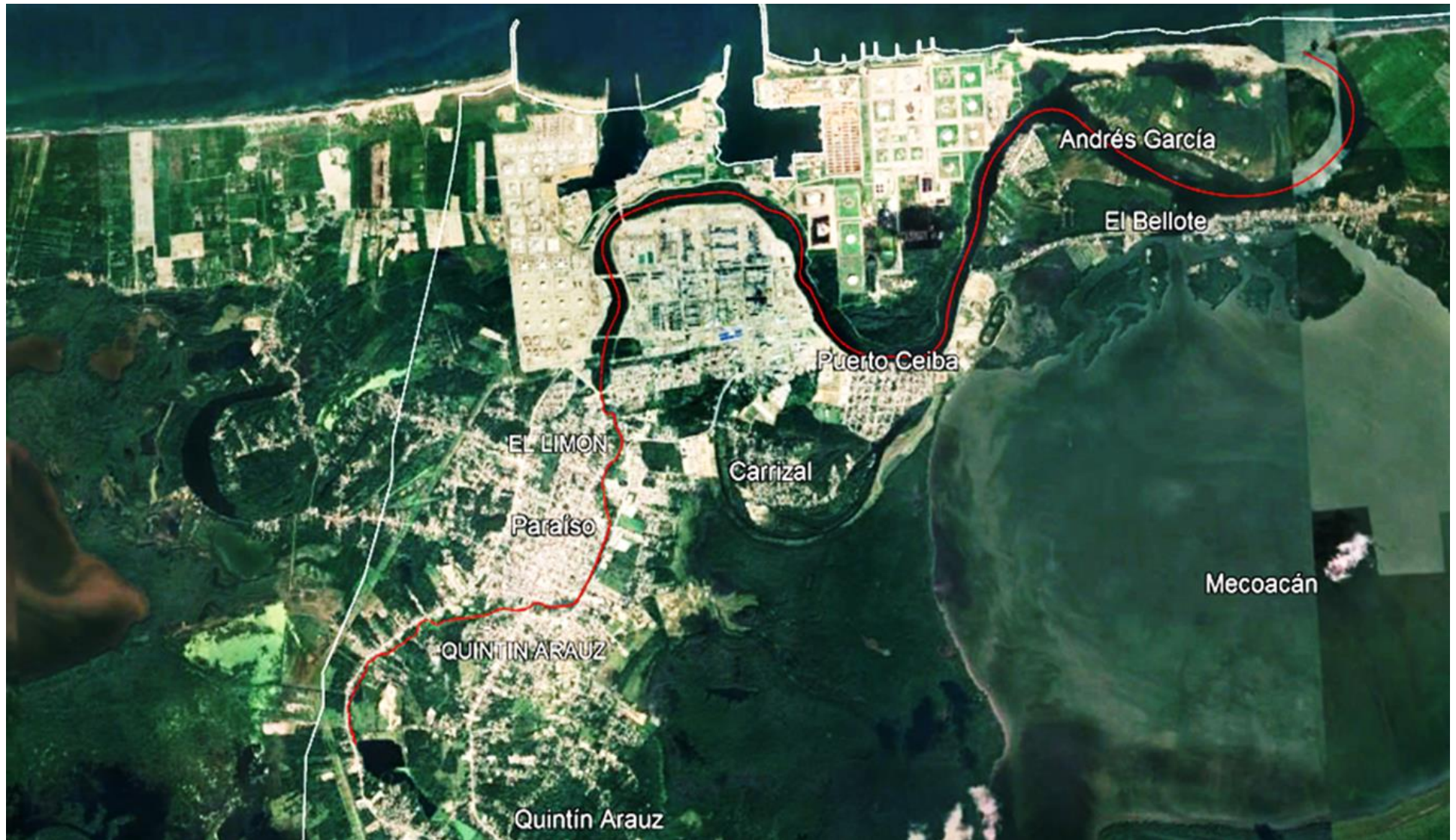
Vista aérea



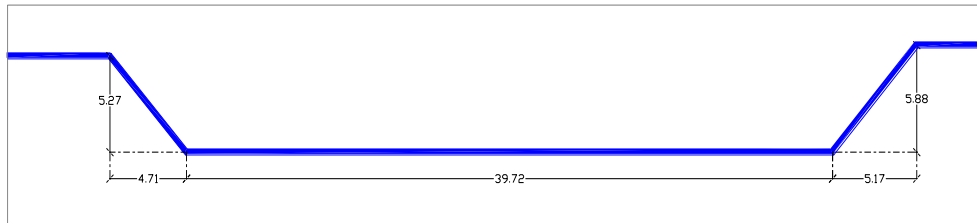
Anexo 2. Cuenca Hidrográfica



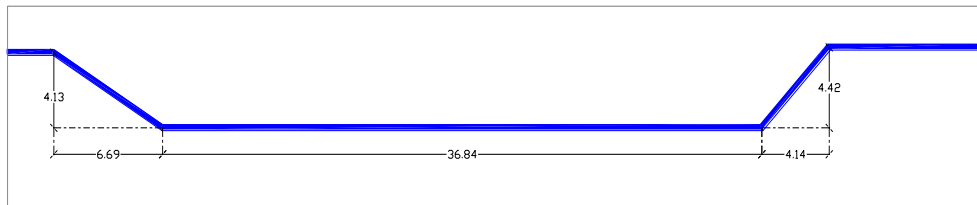
Anexo 3. Trayectoria longitudinal



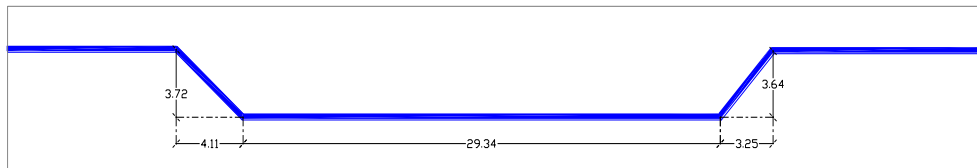
Anexo 4. Secciones trapezoidales equivalentes



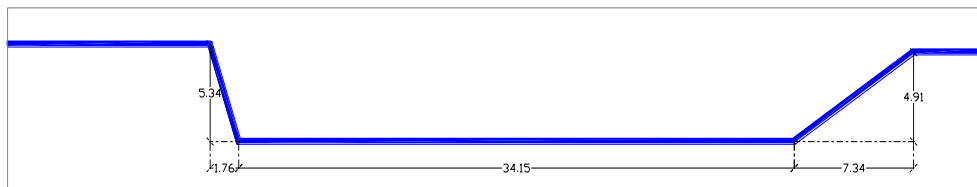
ESTACION 5+160.00



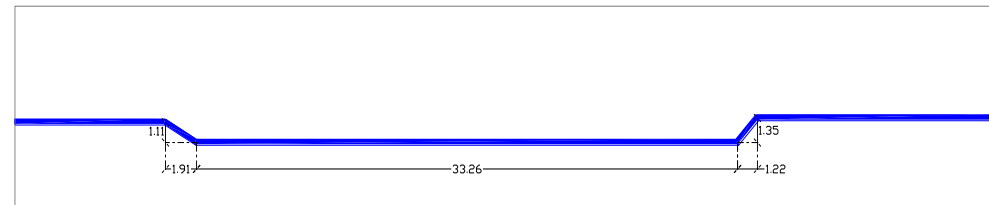
ESTACION 2+720.00



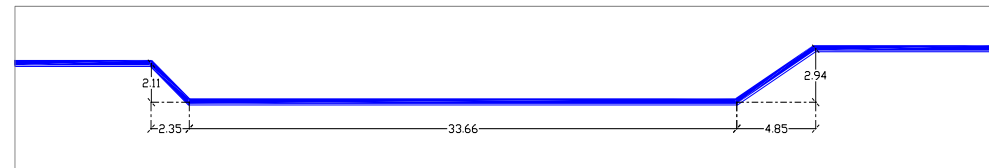
ESTACION 0+740.00



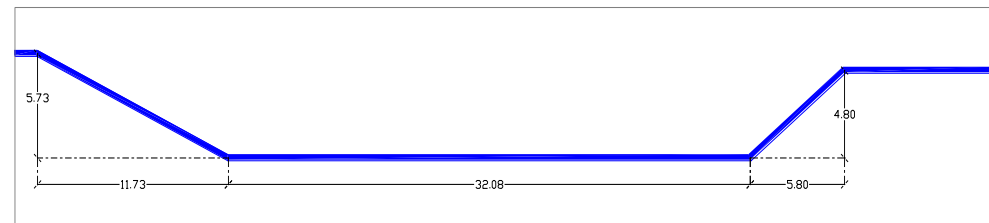
ESTACION 0+000.00



ESTACION 13+880.00



ESTACION 10+420.00



ESTACION 8+580.00

Anexo 5. Temperatura de rocío y velocidad del viento

$$e^0(T) = 0.6108 * e^{\frac{17.27 \times T}{T+237.3}} \quad e_a = e^0(T) \times \frac{HR}{100} \quad T_{Rocío} = \frac{116.91 + 273.3 \times \ln e_a}{16.78 - \ln e_a} \quad V(h) = V(h_{ref}) \times \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_{ref}}{z_0}}$$

PROMEDIO			eo(T)	ea(T)	Trocío (oC)	Coeficiente (zo)	
TEMPERATURA DEL AIRE	HUMEDAD RELATIVA	VELOCIDAD VIENTO				Velocidad del viento ²	
						A	B
28.13	86.33	10.73	3.81	3.29	28.4	10.73	2.75
27.83	87.67	9.63	3.74	3.28	28.3	9.63	2.47
27.60	88.00	9.43	3.69	3.25	28.1	9.43	2.42
27.47	88.33	8.60	3.66	3.24	28.1	8.60	2.20
27.33	86.67	10.00	3.64	3.15	27.5	10.00	2.56
27.10	86.00	9.77	3.59	3.08	27.1	9.77	2.50
26.90	85.67	12.27	3.54	3.04	26.8	12.27	3.14
27.30	83.67	12.87	3.63	3.04	26.8	12.87	3.30
28.57	80.33	13.80	3.91	3.14	27.5	13.80	3.54
30.03	75.67	14.53	4.25	3.22	27.9	14.53	3.72
31.87	70.33	11.70	4.72	3.32	28.5	11.70	3.00
33.07	64.67	11.30	5.05	3.27	28.2	11.30	2.90
34.57	58.00	9.97	5.49	3.18	27.7	9.97	2.55
35.70	53.33	10.23	5.84	3.12	27.3	10.23	2.62
36.70	50.67	8.37	6.17	3.13	27.4	8.37	2.14
34.77	55.67	11.47	5.55	3.09	27.2	11.47	2.94
33.80	60.67	11.97	5.26	3.19	27.8	11.97	3.07
32.07	66.00	11.00	4.77	3.15	27.5	11.00	2.82
30.73	70.00	9.03	4.42	3.10	27.2	9.03	2.31
29.37	75.33	8.30	4.09	3.08	27.1	8.30	2.13
29.00	79.00	8.97	4.01	3.16	27.6	8.97	2.30
28.57	81.67	8.00	3.91	3.19	27.8	8.00	2.05
28.47	84.00	9.83	3.88	3.26	28.2	9.83	2.52
28.27	85.00	10.07	3.84	3.26	28.2	10.07	2.58

²Del grupo "A" son datos a una altura de referencia de 10 metros sobre el nivel del suelo y en Km*h⁻¹, las del grupo "B" son las calculadas a partir de "A" para una altura de 7 metros y en metros*s⁻¹

Anexo 6. Parámetros de calidad del agua

SC-09	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura (oC)	25.70	25.00	24.0	24.3	25.0	25.4	27.0	27.5	28.1	28.7	27.9	29.0	31.0	31.5	32.0	31.2	31.4	29.8	28.8	28.0	27.7	26.9	26.0	25.8
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OD (mg/L)	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82
pH (U)	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
Clorofila a (ug/L)	27.52	27.52	27.5	27.5	27.5	27.5	27.52	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.52	27.5	27.52
			2	2	2	2		2	2	2	2	2											2	
Nitrógeno total (ug/L)												2,313.43												
N amoniacal (ug/L)												143.55												
Nitrito (ug/L)												21.00												
Nitrato (ug/L)												27.68												
Fósforo total (ug/L)												639.39												
Fosfato (ug/L)												637.71												
DBO5 FNU (mg/L)												37.44												
DBOu FNU (mg/L)												68.07												
SST (mg/L)												10.00												
Alcalinidad total (mg/L)												150.00												

SC-10	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura (oC)	28.5	30.90	28.9	27.3	29.9	29.5	30.7	32.1	31.5	29.0	28.4	31.1	30.8	29.5	30.4	25.4	25.6	28.9	27.4	28.8	25.8	26.7	28.9	28.9
	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OD (mg/L)	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53
pH (U)	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
Clorofila a (ug/L)	20.20	20.203	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
			2																					
Nitrógeno total (ug/L)												912.80												
N amoniacal (ug/L)												159.42												
Nitrito (ug/L)												153.17												
Nitrato (ug/L)												335.96												
Fósforo total (ug/L)												133.57												
Fosfato (ug/L)												29.84												
DBO5 FNU (mg/L)												30.77												
DBOu FNU (mg/L)												55.95												
SST (mg/L)												31.14												
Alcalinidad total												142.5												

SC-11	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura (oC)	28.20	28.60	28.90	27.10	27.50	30.80	26.60	27.70	29.90	29.60	30.80	29.50	28.60	28.60	30.10	30.40	30.20	31.10	25.40	25.90	29.30	27.20	28.90	26.80
OD (mg/L)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
pH (U)	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Clorofila a (ug/L)	37.91	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
Nitrógeno total (ug/L)											1,184.70													
N amoniacal (ug/L)											137.65													
Nitrito (ug/L)											40.86													
Nitrato (ug/L)											336.96													
Fósforo total (ug/L)											162.30													
Fosfato (ug/L)											36.74													
DBO5 FNU (mg/L)											28.25													
DBOu FNU (mg/L)											51.36													
SST (mg/L)											51.76													
Alcalinidad total (mg/L)											140.10													

DLTAB2470	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura (oC)	27.40	30.30	29.50	27.10	27.70	28.20	28.00	28.50	29.30	29.90	26.50	27.70	29.80	29.60	30.60	29.40	28.60	28.50	30.00	30.40	29.90	30.60	25.70	25.50
OD (mg/L)	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12
pH (U)											8.20													
Clorofila a (ug/L)	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16
Nitrógeno total (ug/L)											1,223.90													
N amoniacal (ug/L)											168.60													
Nitrito (ug/L)											64.71													
Nitrato (ug/L)											337.49													
Fósforo total (ug/L)											448.50													
Fosfato (ug/L)											29.05													
DBO5 FNU (mg/L)											26.45													
DBOu FNU (mg/L)											48.08													
SST (mg/L)											55.53													
Alcalinidad total (mg/L)											137.7													

SC-15	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura (oC)	27.6 0	29.5 0	31.6 0	29.3 0	29.3 0	26.6 0	25.6 0	28.3 0	29.3 0	30.5 0	28.9 0	24.7 0	25.6 0	29.7 0	31.6 0	30.5 0	29.5 0	29.7 0	29.5 0	29.3 0	28.9 0	26.6 0	25.6 0	25.6 0
OD (mg/L)	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
pH (U)	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Clorofila a (ug/L)	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95
Nitrógeno total (ug/L)												930.01												
N amoniacal (ug/L)												100.40												
Nitrito (ug/L)												21.00												
Nitrato (ug/L)												187.83												
Fósforo total (ug/L)												83.81												
Fosfato (ug/L)												43.56												
DBO5 FNU (mg/L)												34.81												
DBOu FNU (mg/L)												63.29												
SST (mg/L)												55.64												
Alcalinidad total (mg/L)												135.00												

DLTAB2472	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
Temperatura (oC)	29.5 0	27.1 0	27.7 0	28.2 0	28.0 0	28.5 0	29.3 0	29.9 0	26.5 0	27.7 0	29.8 0	29.6 0	30.6 0	29.4 0	28.6 0	28.5 0	30.0 0	30.4 0	29.9 0	30.6 0	25.7 0	25.5 0	29.0 0	27.2 0
OD (mg/L)	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12
pH (U)	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20	6.70	6.70	6.70	6.70
Clorofila a (ug/L)	7.00	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Nitrógeno total (ug/L)												1,223.90												
N amoniacal (ug/L)												168.61												
Nitrito (ug/L)												64.71												
Nitrato (ug/L)												353.17												
Fósforo total (ug/L)												463.00												
Fosfato (ug/L)												29.05												
DBO5 FNU (mg/L)												27.25												
DBOu FNU (mg/L)												49.55												
SST (mg/L)												58												
Alcalinidad total (mg/L)												141.06												

BIBLIOGRAFIA

Bracho L., Angulo L. y Díaz L. (2016). Evaluación del software qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar (Colombia) impactados por actividad minera. *Multiciencias*, 16(1), 5-13.

Castro M. (2015). Aplicación del qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de caldas, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. 2015.

Chapra, S.C., Pelletier, G.J. y Tao, H. (2008). QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and User's Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.

Curso QUAL2K (2021). Curso taller de modelación de la calidad del agua con QUAL2K. Agosto 2021.

González L., Torres F., Rodríguez H., y Rivera N. (2013). Modelación de la Calidad del Agua en el Dren El Burrión del Distrito de Riego 063, Guasave, Sinaloa, México. Cancún, México. Agosto 2013.

QUAL2K (Nº de versión 2.07). (2012). Microsoft Windows. Steve Chapra.

Villalobos H. (2008). Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua para el caso de un río específico en Costa Rica. San José, Costa Rica. Agosto 2008.

León L. (1991). Índice de calidad del agua, ICA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. 1991.

Torres F., Ramírez H., Rodríguez C., Tejera M. & Vásquez M. (2015). Validación de un modelo hidrodinámico y calidad del agua para el Río Magdalena, en el tramo adyacente a Barranquilla, Colombia. *Hidrobiológica*. 2015, 25 (1): 7-23.

Vega X. (2020). Diferentes soluciones para la delimitación y codificación de cuencas superficiales cubanas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2020, 41(2), 75-84.

Portales de internet

Agua (2002). Semarnat - Calidad del agua. https://paot.org.mx/centro/informacion/semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.6_Calidad/index.htm.

Fecha de consulta 23 de noviembre.

CA (2017). Calidad del agua. <https://water.usgs.gov/gotita/waterquality.html>. Fecha de consulta 23 de noviembre.

CNA (2021). Calidad del agua en México. [Calidad del agua en México | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](https://www.gob.mx/comision-nacional-del-agua). Fecha de consulta 1 de diciembre.

CONAGUA (2021). Estaciones Meteorológicas Automáticas. [Servicio Meteorológico Nacional \(conagua.gob.mx\)](https://www.conagua.gob.mx). Fecha de consulta 1 de febrero.

INEGI (2020). División municipal. Tabasco.

https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=27. Consulta 24 de noviembre.

SAIG (2020). Paraíso, Tabasco. <https://tabasco.gob.mx/paraiso>. Consulta 24 de noviembre.

SENER (2023). Zona horaria. <https://www.gob.mx/sener>. Consulta 24 de noviembre.