



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE CAPACIDAD DE
AUTODEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN
EL RÍO COATA, PROVINCIA DE SAN ROMÁN, 2022-2023**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. RODRIGO LUIS VILCA ÑAUPA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO - PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN EL RÍO COAT

AUTOR

RODRIGO LUIS VILCA ÑAUPA

RECuento de palabras

32787 Words

RECuento de caracteres

171289 Characters

RECuento de páginas

182 Pages

Tamaño del archivo

7.7MB

Fecha de entrega

Jun 17, 2024 10:09 PM GMT-5

Fecha del informe

Jun 17, 2024 10:12 PM GMT-5

● **13% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)



Firmado digitalmente por PALOMINO
CUELA Gregorio FAU 20145496170
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 18.06.2024 08:09:25 -06:00



Firmado digitalmente por QUILLE
CALIZAYA German FAU
20145496170 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17.06.2024 22:15:14 -05:00

Resumen



DEDICATORIA

A mis padres, Raúl Genaro Vilca Escobedo y Dora Irene Ñaupá Sucari, así como a mis hermanas Doris y Paola, por su apoyo incondicional, por guiarme en la vida y motivarme constantemente a conseguir mis metas dándome el impulso para seguir adelante. Que este logro refleje mi más sincero agradecimiento con ellos y reconocer su importante presencia en mi crecimiento y futuro éxito.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano – por brindarme la oportunidad de ser parte de su casa de estudio superior y formarme como profesional.

A la facultad de Ingeniería Química de la UNAP y los catedráticos por compartir sus conocimientos y experiencias formando profesionales de éxito.

A mi asesor Dr. Gregorio Palomino Cuela, por su experiencia, conocimientos, sugerencias y recomendaciones en el proceso de esta investigación.

Al Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca (PEBLT) por permitirme desenvolverme profesionalmente en sus ambientes y ser el punto de partida para iniciar esta investigación, a cada uno de los profesionales de esta institución del que fui parte y me motivaron a cumplir con este objetivo.

A mis amigos y personas que estuvieron presentes durante el proceso de esta investigación y brindarme sus constantes ánimos para culminar el proyecto.

Y principalmente a mi familia quienes, sin su constante apoyo, no sería la persona ni el profesional que soy ahora y me guían por el camino de la vida.

Rodrigo Luis Vilca Ñaupá



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.1.1. Objetivo general	20
1.1.2. Objetivos específicos.....	20
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.2. MARCO TEÓRICO	27
2.2.1. Contaminación de aguas superficiales	27
2.2.2. Calidad de agua	28
2.2.3. Parámetros de calidad de agua	29
2.2.4. Parámetros hidrológicos.....	34
2.2.5. Aguas residuales.....	35
2.2.6. Fuentes de contaminación	37



2.2.7. Proceso de autodepuración de ríos	38
2.2.8. Zonas de autodepuración.....	40
2.2.9. Modelos de calidad del agua	42
2.2.10. Modelo Streeter-Phelps.....	43
2.2.10.1. Tiempo de viaje.....	43
2.2.10.2. Distancia de Homogenización	44
2.2.10.3. Modelo de mezcla o balance de masas.	44
2.2.10.4. Análisis del oxígeno de saturación a temperatura de mezcla....	46
2.2.10.5. Análisis del déficit de oxígeno en el punto mezcla:.....	47
2.2.10.6. Análisis de las constantes cinéticas de autodepuración.	48
2.2.10.7. Análisis del punto crítico mediante las ecuaciones de Streeter- Phelps:	52
2.2.10.8. Modelamiento de Streeter Phelps en función a la distancia.....	54

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO	56
3.1.1. Ubicación geográfica y demarcación política	58
3.1.2. Fuente contaminante	58
3.1.2.1. Río Torococha.....	59
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	60
3.2.1. Toma de muestra y análisis fisico-químico:.....	60
3.2.1.1. Equipo de campo.....	60
3.2.1.2. Equipo de laboratorio:.....	60
3.2.1.3. Material	61
3.2.1.4. Reactivos.....	61



3.2.2.	Determinación de caudal.....	62
3.2.2.1.	Equipos y Materiales.....	62
3.3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	62
3.3.1.	Puntos de muestreo.....	62
3.4.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA	64
3.4.1.	Determinación de parámetros de campo	64
3.4.1.1.	Determinación de parámetros fisicoquímicos.....	67
3.4.1.2.	Determinación de la turbidez.....	67
3.4.2.	Determinación de nutrientes en laboratorio	67
3.4.2.1.	Determinación de nitratos (NO_3^-)	69
3.4.2.2.	Determinación de nitritos (NO_2^-)	69
3.4.2.3.	Determinación de nitrógeno amoniacal (NH_4^+)	70
3.4.2.4.	Determinación de fosfato (PO_4^{-3}).....	70
3.4.2.5.	Determinación de Sulfato (SO_4^{2-})	71
3.4.3.	Determinación de DBO_5 y Coliformes fecales	71
3.5.	METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CONDICIÓN HIDROGRÁFICA	72
3.5.1.	Medición de caudal	72
3.5.1.1.	Aforo por el método del correntómetro	73
3.5.1.2.	Aforo por el método del flotador	76

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	CARACTERIZACIÓN DE CALIDAD DE AGUA E HIDROLÓGICA DEL RÍO COATA.....	77
4.1.1.	Caracterización física, química y biológica del río Coata.....	77
4.1.1.1.	Punto de monitoreo N° 01 – Puente Unocolla	79



4.1.1.2.	Punto de monitoreo N° 02 – Puente Churi.....	81
4.1.1.3.	Punto de monitoreo N° 03 – Puente Canchi Chico.....	83
4.1.1.4.	Punto de monitoreo N° 04 – Punto Intermedio.....	85
4.1.1.5.	Punto de monitoreo N° 05 – Puente Coata	87
4.1.1.6.	Punto de monitoreo N° 06 – Desembocadura.....	89
4.1.1.7.	Punto de monitoreo N° 07 – Río Torococha (Aguas residuales)	91
4.1.2.	Caracterización hidrológica del río Coata.....	93
4.1.2.1.	Caracterización hidrológica del Puente Churi (Punto Inicial) ..	94
4.1.2.2.	Caracterización hidrológica del punto intermedio	96
4.1.2.3.	Caracterización hidrológica del puente Coata (Punto final)	97
4.1.2.4.	Caracterización hidrológica del Río Torococha.....	99
4.1.2.5.	Caudal mensual de la estación Unocolla – Senamhi.....	100
4.2.	DESARROLLO DEL MODELO DE STREETER PHELPS.....	101
4.2.1.	Tramos de modelación	102
4.2.2.	Análisis de variables del primer tramo.....	103
4.2.2.1.	Modelamiento del comportamiento de asimilación tras la descarga inicial en función de la distancia: Tramo I.....	106
4.2.3.	Análisis de variables del segundo tramo	109
4.2.3.1.	Modelamiento del comportamiento de asimilación tras la descarga inicial en función de la distancia: Tramo II	111
4.2.4.	Análisis de variables del tercer tramo	113
4.2.4.1.	Modelamiento del comportamiento de asimilación tras la descarga inicial en función de la distancia: Tramo III	116
4.2.5.	Representación gráfica del modelo de Streeter Phelps en el río Coata.	118



4.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS POR LA ACCIÓN AUTO PURIFICADORA DEL RÍO COATA	122
4.3.1. Temperatura	122
4.3.2. pH.....	124
4.3.3. Conductividad	126
4.3.4. Salinidad.....	129
4.3.5. Oxígeno disuelto	131
4.3.6. Nitratos.....	133
4.3.7. Turbiedad	136
4.3.8. Nitritos.....	138
4.3.9. Nitrógeno amoniacal	140
4.3.10. Fosfatos.....	142
4.3.11. Sulfatos.....	144
4.3.12. Demanda bioquímica de oxígeno.....	146
4.3.13. Coliformes fecales.....	148
4.4. DISCUSIONES.....	150
V. CONCLUSIONES.....	153
VI. RECOMENDACIONES	155
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156
ANEXOS.....	160

ÁREA: Medio ambiente

TEMA: Modelamiento matemático de capacidad de autodepuración de aguas residuales
domésticas en el río Coata, provincia de San Román, 2022-2023

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 21 de junio del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Ecuaciones de reaireación para ríos en terreno llano.....	49
Tabla 2 Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo.....	63
Tabla 3 Partes del correntómetro OTT MF Pro	73
Tabla 4 Caracterización física, química y microbiológica – Puente Unocolla	79
Tabla 5 Caracterización física, química y microbiológica – Puente Churi.....	81
Tabla 6 Caracterización física, química y microbiológica – Puente Canchi Chico..	83
Tabla 7 Caracterización física, química y microbiológica – Punto Intermedio.....	85
Tabla 8 Caracterización física, química y microbiológica – Puente Coata.....	87
Tabla 9 Caracterización física, química y microbiológica – Desembocadura.....	89
Tabla 10 Caracterización física, química y microbiológica – Río Torococha.....	91
Tabla 11 Caracterización hidrológica del puente Churi (Punto Inicial)	94
Tabla 12 Caracterización hidrológica del punto intermedio.....	96
Tabla 13 Caracterización hidrológica del puente Coata (Punto final)	97
Tabla 14 Medición de parámetros del efluente del río Torococha	99
Tabla 15 Cálculo de parámetros hidrológicos del río Torococha	99
Tabla 16 Caracterización Hidrológica del efluente del río Torococha	99
Tabla 17 Estadístico caudal mensual promedio de la estación Unocolla - Senamhi	101
Tabla 18 Datos para la aplicación del modelo de Streeter Phelps del río Coata.....	103
Tabla 19 Cálculo de las variables de modelamiento para el tramo I del río Coata...	104
Tabla 20 Cálculo de modelamiento de asimilación del río Coata para el tramo I	108
Tabla 21 Cálculo de las variables de modelamiento para el tramo II del río Coata .	109
Tabla 22 Cálculo de modelamiento de asimilación del río Coata para el tramo II...	113
Tabla 23 Cálculo de las variables de modelamiento para el tramo III del río Coata	114
Tabla 24 Cálculo de modelamiento de asimilación del río Coata para el tramo III..	117



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Fases de autodepuración de un río	42
Figura 2 Concentración de oxígeno en aguas de ríos	48
Figura 3 Mapa hidrográfico de la cuenca Coata.....	57
Figura 4 Mapa satelital de la laguna de estabilización de la ciudad de Juliaca.....	60
Figura 5 Puntos de monitoreo del río Coata.....	63
Figura 6 Diagrama de flujo de muestreo y análisis de calidad de agua	64
Figura 7 Equipo correntómetro OTT MF Pro y sus componentes	72
Figura 8 Caudal aforo volumétrico fuente de agua superficial	75
Figura 9 Sección transversal del puente Churi	95
Figura 10 Sección transversal del punto Intermedio	96
Figura 11 Sección transversal del puente Coata.....	98
Figura 12 Histograma de caudal mensual promedio 2021-2023.....	101
Figura 13 Tramos de estudio del río Coata: Estaciones y condiciones	103
Figura 14 Curvas del comportamiento del OD en la fuente respecto a la DBO del río Coata	118
Figura 15 Comportamiento espacio-temporal de la temperatura del río Coata.....	122
Figura 16 Temperatura del río Coata a mayor caudal	123
Figura 17 Temperatura del río Coata a menor caudal	123
Figura 18 Comportamiento espacio-temporal del pH del río Coata.....	124
Figura 19 pH del río Coata a mayor caudal.....	125
Figura 20 pH del río Coata a menor caudal.....	126
Figura 21 Comportamiento espacio-temporal de la conductividad del río Coata	126
Figura 22 Conductividad del río Coata a mayor caudal	128



Figura 23	Conductividad del río Coata a menor caudal	128
Figura 24	Comportamiento espacio-temporal de la salinidad del río Coata	129
Figura 25	Salinidad del río Coata a mayor caudal	130
Figura 26	Salinidad del río Coata a menor caudal	130
Figura 27	Comportamiento espacio-temporal del oxígeno disuelto del río Coata.....	131
Figura 28	Oxígeno disuelto del río Coata a mayor caudal	132
Figura 29	Oxígeno disuelto del río Coata a menor caudal	133
Figura 30	Comportamiento espacio-temporal de los nitratos del río Coata.....	133
Figura 31	Nitratos del río Coata a mayor caudal.....	135
Figura 32	Nitratos del río Coata a menor caudal.....	135
Figura 33	Comportamiento espacio-temporal de la turbiedad del río Coata.....	136
Figura 34	Turbiedad del río Coata a mayor caudal	137
Figura 35	Turbiedad del río Coata a menor caudal	137
Figura 36	Comportamiento espacio-temporal de los nitritos del río Coata.....	138
Figura 37	Nitritos del río Coata a mayor caudal	139
Figura 38	Nitritos del río Coata a menor caudal	139
Figura 39	Comportamiento espacio-temporal del nitrógeno amoniacal del río Coata	140
Figura 40	Nitrógeno amoniacal del río Coata a mayor caudal.....	141
Figura 41	Nitrógeno Amoniacal del río Coata a menor caudal.....	141
Figura 42	Comportamiento espacio-temporal de los fosfatos del río Coata	142
Figura 43	Fosfatos del río Coata a mayor caudal	143
Figura 44	Fosfatos del río Coata a menor caudal	143
Figura 45	Comportamiento espacio-temporal de los sulfatos del río Coata	144
Figura 46	Sulfatos del río Coata a mayor caudal	145



Figura 47	Sulfatos del río Coata a menor caudal	145
Figura 48	Comportamiento de la DBO ₅ del río Coata	146
Figura 49	Demanda bioquímica de oxígeno del río Coata a menor caudal.....	147
Figura 50	Comportamiento de los coliformes fecales en el río Coata	148
Figura 51	Coliformes Fecales del río Coata a menor caudal	149



ACRÓNIMOS

APHA	: American Public Health Association
AWWA	: American Water Works Association
°C	: Grado centígrado
CCME–WQI	: Canadian Council of Ministers of the Environment - Water Quality Index
CF	: Coliformes fecales
D₀	: Déficit de oxígeno
D_c	: Déficit crítico de oxígeno
D_x	: Déficit de oxígeno en función a la distancia
DBO	: Demanda bioquímica de oxígeno
DBO₅ (mezcla)	: Demanda bioquímica de oxígeno de la mezcla
DIRESA	: Dirección regional de salud
DQO	: Demanda química de oxígeno
DS	: Decreto supremo
ECA	: Estándares de calidad ambiental
FIQ	: Facultad de Ingeniería Química
Ft/s	: pie por segundo
H	: Profundidad
ICA – PE	: Índice de calidad de agua
IPC – MS	: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
K	: Constante
K_a	: Constante de reaireación
K_d	: Constante de desoxigenación
Km	: Kilómetros
K_R	: Constante global de desoxigenación



K(T)	: Corrección de la constante en función a la temperatura
L	: Distancia
LCD	: Liquid Crystal Display
L_m	: Distancia de Homogenización
L_x	: DBO en función de la distancia
LMP	: Límites máximos permisibles
m	: Metros
m/s	: Metros por segundo
m²	: Metros cuadrados
m³/s	: Metro cubico por segundo
mg/L	: miligramo por litro
MINAM	: Ministerio del ambiente
mL	: mililitro
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar
NMP	: Número más probable
NO₂⁻	: Nitrito
NO₃⁻	: Nitrato
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
O₂ (c)	: Oxígeno disuelto crítico
OD	: Oxígeno disuelto
OD (mezcla)	: Oxígeno disuelto de la mezcla
OD_{sc}	: Corrección de oxígeno de saturación
O_{sat}	: Oxígeno de saturación
P	: Presión de trabajo
PEBLT	: Proyecto Especial Binacional del Lago Titicaca



pH	: Potencial de hidrógeno
PO₄⁻³	: Fosfatos
Q	: Caudal
Qual2K	: Software para modelar la calidad de agua de ríos
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SO₄²⁻	: Sulfatos
SST	: Sólidos suspendidos totales
t	: Tiempo de viaje
T_c	: Tiempo crítico
T (mezcla)	: Temperatura de la mezcla
U	: Velocidad
UNA	: Universidad Nacional del Altiplano
uS/cm	: MicroSiemens por centímetro
UTM	: Universal Transverse Mercator
UV-VIS	: Espectroscopia ultravioleta-visible
WPCF	: World Print & Communication Forum
X_c	: Distancia Crítica
σ	: Desviación estándar



RESUMEN

La cuenca Coata en la provincia San Román es la cuenca con mayor problemática de contaminación de carácter antrópico vertidos directamente sin ningún tratamiento previo. El objetivo del estudio fue aplicar un modelo matemático para determinar la capacidad autodepurativa del río Coata afectada por aguas residuales domésticas entre 2022 y 2023, para ello se tomó siete puntos para análisis de calidad de agua desde puente Unocolla hasta su desembocadura, la caracterización hidrológica se usó los métodos del correntómetro y flotador, el modelamiento matemático se aplicó el modelo de Streeter Phelps para tres tramos. Los resultados indicaron que el primer tramo es de mayor relevancia dando una distancia de homogenización de 755,14 metros, oxígeno de saturación de 5,909 mg/L, déficit de oxígeno de -0,356 mg/L, constante reaireación de 0,112, constante desoxigenación de 0,782, distancia crítica de 2,9 Km, tiempo crítico de 1,99 h, en tanto la simulación de DBO tiene relación con datos reales de 15,05 a 8,085 mg/L simulados a 14 y 7 mg/L analizados en laboratorio, mientras los parámetros con mayor significancia son: el nitrógeno amoniacal de 0 a 12,47 mg/L en C-2; nitritos de 0,0080 a 0,3582 mg/L en C-3; nitratos de 1,8 a 7,3 mg/L en C-3; fosfatos de 0,450 a 1,870 mg/L en C-2; DBO₅ de 5 a 12,6 mg/L en C-2; coliformes fecales de 49 a 1 300 NMP/100 mL en C-2, en todos los casos disminuyen su concentración progresivamente. Finalmente se concluye, que el modelamiento sí puede ser aplicado para el río Coata, ya que reúne las condiciones necesarias para su evaluación, siendo la DBO el parámetro con mayor aproximación a la realidad, por otra parte, se considera que el río Coata no tiene la distancia ni las condiciones necesarias para autodepurarse naturalmente.

Palabras Clave: autodepuración, calidad, demanda bioquímica de oxígeno, modelamiento, oxígeno disuelto



ABSTRACT

The Coata basin in San Román province is the basin with the greatest anthropogenic pollution problem discharged directly without any prior treatment. The research objective was to apply a mathematical model to determine the self-purification capacity of Coata River affected by domestic wastewater between 2022 and 2023, for these seven points were taken for water quality analysis from Unocolla bridge to its river mouth, the hydrological characterization was used the current meter and float methods, the mathematical modeling was applied to the Streeter Phelps model for three sections. The results indicated that the first section is of greater relevance giving a homogenization distance of 755,14 meters, saturation oxygen of 5,909 mg/L, oxygen deficit of -0,356 mg/L, constant re-aeration of 0,112, constant deoxygenation of 0,782 , critical distance of 2,9 km, critical time of 1,99 h, while the BOD5 simulation is related to real data of 15,05 to 8,085 mg/L simulated at 14 and 7 mg/L analyzed in the laboratory, while The most significant parameters are: ammoniacal nitrogen from 0 to 12,47 mg/L in C-2; nitrites from 0,0080 to 0,3582 mg/L in C-3; nitrates from 1,8 to 7,3 mg/L in C-3; phosphates from 0,450 to 1,870 mg/L in C-2; BOD5 from 5 to 12,6 mg/L in C-2; fecal coliforms from 49 to 1 300 NMP/100 mL in C-2, in all cases their concentration progressively decreased. Finally, it is concluded that the modeling can be applied to Coata River, since it meets the necessary conditions for its evaluation, with the BOD5 being the parameter that most closely approximates reality. On the other hand, it is considered that the Coata River does not have the distance nor the conditions necessary to naturally self-purify.

Keywords: self-purification, quality, biochemical oxygen demand, modeling, dissolved oxygen, dissolved oxygen



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, conforme avanza el tiempo, las poblaciones se han visto incrementadas en la cantidad de habitantes lo que consecuentemente también se acelera el desarrollo de actividades como agrícola, ganadera, industrial, minera, etc. que generan grandes cantidades de aguas residuales de difícil manejo, lo que provoca conflictos ambientales y sociales en las zonas afectadas. No obstante, esta afectación no solo se ve reflejada a las grandes ciudades, sino que también a comunidades aledañas. (Díaz, 2018).

Uno de los problemas que se vive constantemente es el abastecimiento de agua que padecen las zonas rurales, ya que estos se abastecen con fuentes de agua natural como manantiales, pozos, arroyos, ríos y lagos, sin embargo, producto de la contaminación, estas fuentes se han visto afectadas disminuyendo su calidad, perjudicando el desarrollo sustentable de estas poblaciones. Los ríos cercanos a zonas urbanas presentan altos niveles de carga contaminante principalmente de contenido orgánico y nutrientes, esto se debe a la descarga de aguas residuales vertidas directamente al cuerpo de agua sin ningún tratamiento transportando la carga contaminante a través de su cauce. (Cajas, 2015).

En la región Puno, la cuenca Coata es la cuenca con mayor problemática de contaminación de sus recursos hídricos que está relacionada con los procesos de procedencia antrópica en mayor medida, considerando también actividades industriales, agropecuarias, construcción, comercio, entre otros. Estas descargas de aguas residuales producidas por ciudades, principalmente la ciudad de Juliaca, tienen la capacidad de asimilarse por el cauce del río Coata como cuerpo de agua receptor, por medio de procesos de autodepuración natural que presentan los ríos a través del tiempo y espacio,



logrando por sí mismo conseguir sus propiedades originales con características aceptables para diversas utilidades. Sin embargo, influyen otros aspectos que interfieren los procesos de autodepuración tales como las condiciones hidrográficas y calidad de agua del río y los vertimientos que imposibilitan este proceso natural. (Condori y Parillo, 2018)

El presente estudio examinó el estado actual del río Coata mediante el proceso de auto depuración del agua propuesta por Streeter Phelps, para describir y evaluar la afectación producto de los vertimientos del río Torococha y explicar su comportamiento con el soporte de los datos recopilados de parámetros físicos, químicos, bacteriológicos y mediciones hidrológicas que permitirán diagnosticar los niveles de contaminación.

1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. Objetivo general

Determinar mediante un modelo matemático la capacidad de autodepuración del río Coata afectada por vertimientos de aguas residuales domesticas en la provincia de San Román entre los años 2022 al 2023.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de calidad de agua y de las propiedades hidrológicas del río Coata en el tramo que comprende entre el vertimiento de la laguna de oxidación hacia su desemboque al lago Titicaca
- Aplicar el modelamiento matemático de Streeter Phelps, para establecer la capacidad cinética autodepurativa del río Coata
- Evaluar la variación de los parámetros, físicos, químicos y biológicos de las aguas contaminadas del río Coata por su acción autopurificadora a través del curso.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Angarita (2019) aplicó dos modelos de simulación unidimensional para estimar la capacidad de auto-depuración del río Algodonal, los modelos que tomó en cuenta son: Streeter-Phelps para dos tramos (tramo 1 y 4) que son puntos de descarga de efluentes que afecta directamente al río y Qual2k (software) que se manejó para determinar el poder de asimilación del río mediante la variación de ciertos parámetros seleccionados de calidad de agua en todo el recorrido del río considerando el recorrido desde la descarga de la laguna de estabilización de la municipalidad de Abrego hasta la bocatoma del canal de la municipalidad de Ocaña, Departamento de norte de Santander. El recorrido se fraccionó en 5 puntos de monitoreo y 4 tramos. Con estos modelos facilitan la evaluación de capacidad de autodepuración en los diferentes tramos realizando un balance de OD verificando la eliminación de materia orgánica a través de la evolución de la DBO₅ y caída de patógenos.

Coila (2022) tuvo como finalidad evaluar la calidad de las aguas del río Coata afectada por el río Torococha, por lo que determinó los parámetros fisicoquímicos, la carga orgánica existente que afectan en la calidad del agua y metales pesados. La metodología aplicada que utilizó está basada en las Normas y D.S. del MINAM, el estudio es de carácter cuantitativo de tipo descriptivo-experimental, los análisis se realizaron en el laboratorio por ICP-MS, se hizo una comparación con los LMP y D.S. N° 004-2017 MINAM. Según los resultados que obtuvo, los que superan los LMP son los DBO (M₂), 98 mg/L, coliformes termotolerantes (M₂), 49 000 NMP/100mL, DQO (M₂), 216 mg/L, SST (M₂), 29 mg/L y aceites (M₂), 10,3 mg/L, por lo que estas aguas no son idóneas para



su consumo humano. Según los análisis químico realizados por metales pesados son: Arsénico (As) M₃, 0,02782 mg/L, Cadmio (Cd) M₁, 0,00005 mg/L, Cobre (Cu) M₂, 0,002 mg/L, Mercurio (Hg) M₂ 0,0005 mg/L, Plomo (Pb) M₃, 0,0009 mg/L, Cromo (Cr) M₂, 0,00054 mg/L, Zinc (Zn) M₂, 0,016 mg/L, están dentro de los ECA.

Díaz (2018) tuvo como objetivo diagnosticar la calidad de las aguas del río Naranjos calculando coeficientes cinéticos de auto-depuración, por lo que tomó en cuenta ciertos parámetros físico, químicos y biológicos considerando 3 puntos de monitoreo, también caracterizó las propiedades hidrológicas del río, mediante estos dos parámetros lo relacionó para obtener las constantes cinéticas a través de cálculos obteniendo los siguientes resultados: tasa de desoxigenación, tramo 1 ($K_d=0,370 \text{ día}^{-1}$), tramo 2 ($K_r=0,598 \text{ día}^{-1}$); tasa de reoxigenación, tramo 1 ($K_r=0,5980 \text{ día}^{-1}$), tramo 2 ($K_r=0,610 \text{ día}^{-1}$), en setiembre, mientras que en diciembre obtuvo: tramo 1 ($K_d=0,310 \text{ día}^{-1}$), tramo 2 ($K_d=0,320 \text{ día}^{-1}$); tramo 1 ($K_r=0,5980 \text{ día}^{-1}$), tramos 2 ($K_r=0,550 \text{ día}^{-1}$). Finalmente concluye que el río contiene oxígeno crítico con datos aceptables, no obstante, el punto 3 obtuvo datos negativos a causa de la contaminación constante de carga orgánica, produciendo que las aguas del río Naranjo no pueda autodepurarse desde los vertimientos de aguas negras.

Condori y Parillo (2018) tuvo como objeto evaluar la afectación que tienen la calidad del aguas del río Coata por los efluentes que descarga el río Torococha, el método Dinus fue utilizado para evaluar la alteración de la calidad, los parámetros que tomó en cuenta fueron, OD, DBO, temperatura, pH, alcalinidad, dureza, cloruros, conductividad eléctrica, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales, se realizó mediante métodos estandarizados para análisis en laboratorio de aguas negras (APHA-AWWA-WPCF, 1992). Los datos que obtuvo fueron en el punto (DT-1) antes del vertimiento del río Torococha: calidad de agua con puntaje: 58 puntos; viéndose la afectación directa en el



punto aguas abajo (PM-2) con 47 puntos, el puntaje más bajo del resto de puntos; mientras que los puntos finales (DM-3), (DM-4) y (DM-5) obtuvieron puntajes de 58, 56 y 54 puntos respectivamente. Finalmente saca la conclusión que las aguas superficiales del río Coata presentan una calidad de categoría contaminada, tanto antes como después de la descarga de aguas negras al cuerpo natural de agua.

Gutiérrez (2018) calculó y evaluó el ICA-PE “Índice de Calidad de Agua de Recursos Hídricos en Perú” y los CCME-WQI “Índices de Calidad de Agua Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente” de las aguas del río Coata por afectación a la confluencia al río Torococha, en la cual, el autor tomó 2 puntos de monitoreo para su evaluación (M1 y M2) ubicados estratégicamente según el Protocolo Nacional para el Monitoreo de los Recursos Hídricos Superficiales. Seleccionó puntos de muestreo y realizó el monitoreo en setiembre, octubre y noviembre en el 2018 para ser llevados al laboratorio para su posterior análisis de parámetros fisicoquímicos y metales pesados. Finalmente, los resultados indicaron que el punto M1 está catalogada como buena con un valor de 80 según el CCME-WQI, mientras que el punto M2 está catalogada como marginal con 57 punto de valor; caso opuesto que indica los valores del ICA-PE donde los resultados indicaron un valor sobresaliente con resultados de 99 y 90 respectivamente. Concluyendo que la afectación del río Torococha si influye de manera negativa las condiciones necesarias de calidad del río Coata.

Menéndez et al. (2022) tuvo como objetivo estimar la capacidad de auto-depuración que posee el río Carrizal respecto a la materia orgánica, ya que esta afecta directamente en su calidad; el tramo de evaluación estuvo comprendido desde el efluente de aguas residuales de la laguna de estabilización de Calceta hasta la PTAP “La Estancilla”. Para esta investigación consideró 4 puntos de monitoreo, un punto blanco antes de la afectación tomado como referencia y tres puntos: en la descarga como también



antes y después de los vertimientos de aguas negras, el monitoreo lo realizó según el procedimiento del Protocolos para Monitoreos de los Recursos Hidrológicos del Perú y se consideró los siguientes parámetros: caudal, pH, OD, temperatura y materia orgánica, se desarrolló en las fechas seguidas de septiembre octubre y noviembre del 2019 en época sin lluvias. Los análisis se realizaron en el laboratorio de química-ambiental ESPAM (MFL) se utilizó un oxímetro Milwaukee MI-605 y un potenciómetro Martini pH modelo 55. Los resultados se sintetizaron en Excel v14,0 y aplicó el modelo de Streeter-Phelps indicando que el río Carrizal tiene un porcentaje de materia orgánica (DBO) de 23,76% y se reduce a 9 Km hasta 7,28 a 5,52 mg/L.

Limas (2022) tuvo por objetivo determinar cuál es la facultad de auto-depuración del río Higuera, a través de la evaluación de coliformes termotolerantes presentes en el agua, su investigación tiene un nivel descriptivo-longitudinal no experimental. Para su determinación tomó en consideración 4 puntos de monitoreo ubicado entre el recorrido de la ciudad de Huancapallac hasta el puente de Tingo en el distrito de Huánuco, los análisis fueron realizados en el laboratorio de DIRESA Huánuco obteniendo a continuación los resultados: R1 = 5523,5 NMP/100 mL, R2 = 6608,0 NMP/100 mL, R3 = 7007,50 NMP/100 mL y R4 = 7188,0 NMP/100 mL, según estos datos se observa que presenta una tendencia ascendente, finalizando en que el río Higuera tiene dificultad en su capacidad de auto-depuración respecto a los coliformes termotolerantes ya que los resultados no reducen su concentración conforme avanza su recorrido.

Tamara (2019) tuvo como objetivo evaluar la facultad de auto-depuración en un tramo del río Huallaga, la cual se basó en la metodología del balance de OD en el tramo determinando el valor del oxígeno in situ y su relación de la carga contaminante de DBO₅ y su transformación a través del río. Para la investigación se consideró tres puntos para la toma de muestra en un recorrido de 19 Km, realizó análisis fisicoquímicos en campo y



análisis biológicos en el laboratorio de biotecnología NSF Inassa. El autor aplicó la prueba de SHAPIRO-WILK, y se proyectó en el Software de SPSS V24, obteniendo un resultado de nivel de significancia de 5,0 % con un margen de error de 39,0 % concluyendo que en un tramo de 19 Km de recorrido no existe autodepuración de las aguas del río Huallaga

Toussaint (2019) desarrolló un modelo para evaluar de manera cuántica a nivel global la capacidad de asimilación que tienen los ríos provenientes de las alturas respecto a los contaminantes que ingresan a su cuerpo de agua mediante un índice que nos conceda la comparación directa entre los resultados obtenidos, lo cual se desarrolla mediante la correlación de la calidad del agua con las propiedades hidrográficas. Para la obtención del modelamiento realizó la recopilación de toma de muestras con 10 parámetros que afectan directamente en la autopurificación de un río, los datos recopilados fueron trabajados en un modelo conocido como sistema de información para la capacidad auto-depurativa en ríos (SINCAP), que facilitará en la creación de mapas de clasificación. Los resultados obtenidos indicaron que los tramos iniciales en la cuenca alta obtuvieron valores por encima de los índices globales de auto-depuración (IGAP), sin embargo, el río Tunjuelo, cuya superficie es llano, obtuvo datos bajos indicando un escaso poder asimilativo.

Sánchez (2016) tuvo como objetivo determinar los coeficientes cinéticos dentro del ámbito de los distritos de Pilcomarca donde se tomaron muestras en cuatro lugares, estas fueron analizadas en el laboratorio y comparadas con los ECA, este análisis realizado probó que respecto al pH, demanda química de oxígeno y conductividad eléctrica existe auto-depuración del cuerpo de agua mientras que para la oxígeno disuelto, DBO₅, coliformes totales y termotolerantes es más complicada su efectividad en la autodepuración.



Mera (2014) tuvo como propósito evaluar la contaminación que se provoca a raíz de las aguas residuales que generan las Piscifactorías de truchas vertiendo sus aguas en el río Las Piedras a lo largo de un tramo, para lograr este objetivo se propuso aplicar el modelo de Streeter Phelps correlacionando las variables físicas, químicas y biológicas y modelar la calidad del agua a lo largo del tramo, encontrando que el modelo fue óptima ya que se evidencia que concentraciones de oxígeno si tienen influencia por las aguas residuales con concentraciones bajas en comparación con el resto del tramo al igual que la DBO dando valores de 8 y 14 mg/L cuyos valores exceden los LMP, en el estudio no se pudo clasificar las zonas de autodepuración debido a que en los resultados no se halló diferencias significativas entre tramos lo que indicaría que el poder autopurificador del río es alto.

Clavijo y Ramírez (2021) tuvo por objeto determinar la contaminación de las aguas del río San Cristóbal mediante el uso del software QUAL-2K en función de los datos recopilados anuales que se desarrollan en la secretaria del ambiente de Bogotá y establecer escenarios de modelamiento clasificando la condición del río de acuerdo con la normativa vigente, dando como resultado que el río está siendo afectado por fuentes contaminantes ya que la DBO aumenta de 2 a 84 mg/L en la cuenca media y baja teniendo altos índices de contaminación, mientras que los valores de oxigenación presentan valores elevados por consecuencia de caudales mínimos y pendientes altas que favorecen óptimas condiciones de autodepuración, respecto al software QUAL-2K, examinó el comportamiento del río en su recorrido de 18 Km indicando que se cumple con los estándares establecidos.



2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Contaminación de aguas superficiales

Según Clavijo y Ramírez (2021) la contaminación de las aguas superficiales es definida por la presencia de cuerpos ajenos naturales en concentraciones de mayor o menor medida que se establece en las leyes vigentes y que estas a su vez perjudican en la calidad de los cuerpos de agua. Esta contaminación en parte es directamente consecuente por los vertimientos de aguas residuales e industriales, conocidas también como fuentes puntuales, como también puede ser afectado indirectamente por contaminación del suelo y aire, conocidas como fuentes difusas o no puntuales.

Uno de los factores más relevantes que alteran la calidad del agua son las actividades productivas que se realizan alrededor de las cuencas hidrográficas además del mal manejo que tienen los pobladores respecto a los residuos generados. Teniendo como mayor fuente contaminante las descargas de agua residual de tipo doméstico e industrial ya que como propiedad principal presenta grandes cantidades de materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas emitidas desde el sector agrícola cuyos productos contienen pesticidas, abonos, estiércol y herbicidas. (Angarita, 2019)

Una propiedad que tiene el agua es la capacidad de auto purificación que consiste en degradar, desaparecer o transformar sustancias contaminantes por medio de organismos y microorganismos capaces de metabolizar y reaccionar con estas sustancias. Sin embargo, estas sustancias que son lanzadas a los cuerpos de agua pueden ser biodegradables, las mismas que pueden ser descompuestas mediante estos microorganismos o reacciones químicas o biodegradables que



tiene mayor dificultad de degradación por su acción devastador que se mantiene a lo largo del tiempo y puede transmitir a lo largo de su recorrido. (Clavijo y Ramírez, 2021)

2.2.2. Calidad de agua

Según Diaz (2018) la calidad del agua se define como una serie entre concentración, especificación y partición física de varios compuestos orgánicos e inorgánicos, así mismo, está constituido por biota acuática dentro de la fuente de agua. Sin embargo, su calidad puede variar espacial o temporalmente de acuerdo a diversos factores ya sea de forma interna o externa.

Para Cajas (2015) su definición se basa en que forma de utilidad se puede destinar este recurso, donde la calidad de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas de las aguas superficiales (ríos, lagos y quebradas) como también las subterráneas deben de obedecer los estándares definidos para cada uso, ya sea de consumo humano, recreativo, agrícola, industrial, etc.

Sus propiedades deben evaluarse mediante monitoreos y verificar las condiciones del agua e indicar bases para registrar tendencias y determinar la relación entre propiedad en propiedad y determinar su causa y efecto. Para este objetivo es de importancia reconocer que actividades repercuten directa o indirectamente, de igual forma, se considera las cualidades geográficas de la zona como la utilidad de la tierra, hidrología, clima entre otros, como también la utilidad del agua como agrícola, industrial, canales, embalses, consumo humano, recreación. Y finalmente verificar las fuentes contaminantes principalmente de tipo doméstico, industrial y agrícola. (Clavijo y Ramírez, 2021)



2.2.3. Parámetros de calidad de agua

Para determinar la calidad del agua se considera los siguientes parámetros explicados de manera breve a continuación:

a. Color

Para Cajas (2015) el color nos indica indirectamente cuál es su procedencia y las características del agua. Generalmente se altera cuando tiene relación con algas, residuos orgánicos (madera, hojas, etc), con diferente estado de descomposición, también se considera existencia de óxidos metalizados.

En el cambio de coloración del agua pueden afectar otros agentes como la temperatura, el pH, la solubilidad de sustancias con color, materia y tiempo de contacto con el agua. El color aparente se consigue después de que el agua haya sido filtrada obteniendo un agua natural o cruda siendo este el color original. (Cajas, 2015)

b. Turbidez

Se conoce a la característica de traspasar la luz a través del agua y con qué dificultad la atraviesa por efecto del contenido de sólidos insolubles suspendidos, coloidales o finas tales como la arcilla, sedimento producto de la erosión, microorganismos, plancton, material orgánico e inorgánico fino, colorantes solubles orgánicos, etc. Su función es señalar la eficacia de filtración y la calidad del agua determinando presencia de organismos capaces de ocasionar enfermedades afectando la salud humana. (Mera, 2014)



c. Alcalinidad

Es la propiedad del agua capaz de neutralizar ácidos en unidades de medida. A causa primordial de presencia de sales de ácidos débiles, sin embargo, las bases ya sea fuerte o débil también puede aportar, estas sustancias cumplen la función de amortiguación ante la disminución del pH. Esta puede ser afectada por otras propiedades como la temperatura, el pH, la fuerza iónica y la composición total del agua. Sin embargo, esta propiedad tiene repercusión sobre el agua por su condición corrosiva e incrustante, además de que en cantidades elevadas afecta en su sabor. (Mera, 2014)

d. Temperatura

En el medio acuático es una característica muy importante, ya que repercute en el metabolismo de las especies, descomposición de materia orgánica, respiración de organismos y productividad primaria. Los vertimientos de aguas a diferentes temperaturas aceleran las reacciones químicas, afectan flora y fauna contenidas en las aguas del cuerpo receptor interfiriendo que las especies se reproduzcan, agiliza la eutroficación, disminuye niveles de oxígeno, aumenta el desarrollo de bacterias y diferentes microorganismos, logrando que el agua no esté apta para diferentes usos. La temperatura es importante ya que afecta directamente en la variabilidad de los demás indicadores como el pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, etc. (Cajas, 2015)

e. Conductividad eléctrica

Es la propiedad del agua capaz de transportar la corriente eléctrica. Esta característica se relaciona con la presencia de iones disueltos que contiene partículas cargadas eléctricamente en el agua. Mientras más cantidad de iones



disueltos, incrementará también la conductividad eléctrica del agua. En conclusión, la conductividad nos indicaría que su medida sería la misma que los sólidos disueltos en una misma muestra de agua. (Cajas, 2015)

f. Sólidos suspendidos totales

Los SST son partículas minúsculas que no se pueden obtener mediante la deposición, que tiene responsabilidad de la visibilidad de impurezas. Establece el color aparente del agua, sabor, olor y la capacidad de los rayos solares de penetrar la profundidad del cuerpo de agua, está relacionada con la turbidez y puede ser afectada por diferentes factores como presencia de partículas de tierra procedente de erosión o escorrentía superficial, restos vegetales, hojas, degradación de materiales tanto de animales y vegetales sedimentándose al fondo del río. (Mera, 2014)

g. pH (Índice de ión de hidrógeno)

El pH mide la cantidad de iones de hidrógeno presentes en el agua. Indica las sustancias de carácter ácido cuyos valores están por debajo de 7, neutros si equivale a 7 y básico si supera el valor de 7. Su medición es de suma importancia, ya que suministra bastante información referido a la calidad del agua. Las aguas naturales pueden variar su pH de 4,0 a 9,0. En otras ocasiones cuando se encuentran carbonatos y bicarbonatos tienen carácter alcalino, mientras que cuando se encuentra desechos industriales se pueden obtener pH muy alcalinos o muy ácidos. (Diaz, 2018)



h. Oxígeno disuelto

El OD es una sustancia imprescindible para el desarrollo animal como también diversos seres vivos principalmente acuáticos. Esta variable nos determina la medición de cantidad de OD en el agua. La cantidad de OD puede ser reducida por el contenido de materia orgánica, bacterias y microorganismos que señala la baja calidad del agua, incrementando el riesgo a la salud humana por presencia de estos microorganismos (Orduz, 2016).

i. Salinidad

La salinidad se mide por concentración de sales disueltas en el agua, esta varía de acuerdo a las propiedades del medio acuático, esta podría ser una variable importante como es el caso de los medios estuarinos en donde se producen cambios significativos de los recursos naturales acuáticos condicionando su evolución. La salinidad puede variar por diversos factores principalmente topográficos, aportes fluviales, climáticos, etc. La salinidad y la conductividad se relacionan directamente ante el incremento o descenso de iones disueltos. (Suarez, 2008)

j. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO es la concentración de oxígeno consumido producto de la reducción de la materia orgánica y alguna inorgánica presente en el agua, esto sucede por procesos biológicos aeróbicos. Esto determina la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos, alta concentración de DBO podría causar daños a la salud. (Diaz, 2018)



k. Nitratos, nitritos

Los iones nitratos y nítricos son iones de procedencia inorgánica y de forma natural, está incluida en el ciclo del nitrógeno. Los residuos que contienen nitrógeno orgánico son descompuestos naturalmente mediante la activación de los microorganismos formando así el amonio y amoniaco. Posteriormente es oxidado formando finalmente los iones nitritos que estos a su vez forman los nitratos. Se tiene investigación que niños con menos de 6 meses que consumen aguas con elevadas concentraciones de nitritos y nitratos sufren la enfermedad de metahemoglobinemia infantil. (Diaz, 2018)

l. Nitrógeno amoniacal

En condición normal el nitrógeno amoniacal se crea naturalmente por la degradación de la materia orgánica dentro de las fuentes de agua, se le conoce como compuesto transitorio porque está incluido en el ciclo del nitrógeno y varía de acuerdo a la actividad biológica. El nitrógeno amoniacal surge por la degradación bacteriana del nitrógeno orgánico y posteriormente se va oxidando a nitritos terminando en nitratos. (Cornejo, 2022)

m. Fosfatos

Los fosfatos son compuestos primordiales en el desarrollo de plantas y animales, es uno de los precursores en el crecimiento de algas que requieren fósforo. Los fosfatos se le conocen como nutrientes y su cantidad excesiva puede causar la eutrofización, el fosfato tiene un poder de fertilización equivalente a que una cantidad de 1 μg de fósforo es capaz de producir 1 mg de algas. Generalmente provienen de vertimientos de agua residual, que contienen algunos productos



como los detergentes con contenido de fósforo contribuyendo el aumento del mismo en los cuerpos receptores. (Cornejo, 2022).

n. Sulfatos

Estos se encuentran de forma natural en el agua ya que se producen mediante la dilución total o parcial de materiales del suelo por el que atraviesa mediante el escurrimiento (terrenos sulfatados o formaciones rocosas como el yeso), se pueden encontrar altas concentraciones de forma superficial como también subterránea. Sin embargo, se pueden elevar a valores significativos por el contacto con vertidos industriales o desechos. (Cornejo, 2022)

o. Coliformes fecales

Son indicadores biológicos con contenido orgánico, se encuentran incluidos en el grupo de los coliformes totales. Si se encuentran coliformes en el cuerpo de agua indica contaminación de carácter fecal, estos se originan de los excrementos humanos y animales de sangre caliente. Para realizar su proceso de metabolización dependerán de la concentración de oxígeno disuelto ya que estos organismos pueden ser facultativos o anaeróbicos. Su diferencia con los coliformes totales es que se reproducen a mayores temperaturas. (Cajas, 2015)

2.2.4. Parámetros hidrológicos

a. Caudal

Se define como la cantidad de agua que pasa por medio de una sección transversal, expresado en volumen por unidad de tiempo. Para obtener este valor se puede tomar diferentes métodos que dependerán de la condición del punto deseado. Para medir el caudal se pueden usar el método volumétrico o método



velocidad/superficie. Su valor es transitorio. No obstante, se puede considerar promedios dependiendo el periodo de tiempo, tales como diario, mensual o anual. (Burgos y Mera, 2022)

b. Profundidad

La profundidad es una variable inconstante ya que en el mismo cauce del río puede tener diferentes profundidades en el lecho del río a menores profundidades, mayor velocidad de flujo, y viceversa mientras mayor profundidad, disminuye la velocidad. (Burgos y Mera, 2022)

c. Velocidad

Se denomina velocidad como la distancia recorrida en un tiempo determinado, es una variable que se toma en cuenta para el movimiento de masas en un río, evaluando si hay arrastre de sedimentos. Es importante tomar la sección transversal dividiendo en bandas verticales por un número. Como fundamento se conoce que la velocidad mayor se encuentra en el centro del río, mientras más se acerca a la orilla, pierde velocidad por el rozamiento con la superficie frenando la corriente. (Burgos y Mera, 2022)

2.2.5. Aguas residuales

Zabaleta (2016) define a las aguas de carácter residual como aquellas que han sufrido una alteración en su composición por el uso de una comunidad poblacional o alguna industria y que dentro de su composición presente materiales orgánicos, inorgánicos como también de presencia de sólidos disueltos o suspendidos.



Suarez (2008) define como el producto de la diversidad de actividades antrópicas y que contienen materiales que no corresponden a un agua en condición normal, a estos materiales se le conoce como contaminantes, provocando la degeneración de los cuerpos de agua y la contaminación de aquellos que son vertidas sin aplicar ningún tratamiento preliminar.

Las propiedades físico, químico y microbiológico del agua residual de cada población son afectadas por diversos factores externos como: temperatura, origen de la captación de agua, localización, entre otros; como también por factores internos como: desarrollo socioeconómico, población, la dieta en los alimentos, el nivel industrial, buenas prácticas del uso eficiente del agua, entre otros. (Zabaleta, 2016)

a. Clasificación de las aguas residuales

Según Zabaleta (2016), las aguas residuales se clasifican de la siguiente manera:

- **Aguas residuales domesticas:** son las aguas que se originan de forma residencial o comercial y que predominan desechos de actividad humana las que deben ser dispuesto adecuadamente.
- **Aguas residuales industriales:** son las aguas que se producen en el desarrollo de procesos productivos, estas incluyen actividades mineras, agroindustriales, agrícolas, energéticas, entre otros.
- **Aguas residuales municipales:** son las aguas producto de la mezcla entre el agua de drenaje pluvial con las aguas residuales de origen industrial con un tratamiento previo, y que cumplan con las características para ser admitido en un sistema de alcantarillado de tipo combinado.



- **Aguas residuales no domésticas:** son las aguas producto de actividades comerciales, industriales y económicas diferentes a la que genera un usuario doméstico, ya que estos descargan aguas con presencia de restos de alimentos, desechos fisiológicos y aseo personal.

2.2.6. Fuentes de contaminación

a. Contaminación puntual

Es el punto o puntos en específico que descarga vertimientos, esta clase de contaminación se puede identificar fácilmente, como también tratarla y monitorearla. Las principales fuentes contaminantes del agua son vertimientos de agua doméstica, rellenos sanitarios, drenajes industriales, escorrentía de tierra labrada, etc. Estos puntos específicos vierten contaminantes en lugares determinados por medio de alcantarillas o tuberías a cuerpos de aguas naturales. Los más comunes son las descargas de planta de tratamiento de aguas residuales, planta de tratamiento industrial, etc. (Cajas, 2015)

b. Contaminación difusa

La contaminación no puntual o difusa es más difícil y compleja para evaluar y controlar, ya que interfieren otros factores como la variación de los desechos y la forma en que se transporta de diferentes medios como el manejo de un contaminante y la transformación que se producen en los suelos, deposición atmosférica, cambios dentro del agua, suelo y aire. (Suarez, 2008)

Es complicado la regulación directa de la emisión de fuentes contaminantes difusas, por lo que es necesario una evaluación e implementar actividades a lo largo de la cuenca. La forma más común de transportar



contaminantes de contaminación difusa es mediante la lluvia, promoviendo el escurrimiento, ya que a través de la erosión transporta sedimentos y parte del suelo conjuntamente con partículas contaminadas siendo destinado esta mezcla a los cuerpos de agua. Además, el hombre actúa indirectamente en la contaminación incluyendo en los suelos desechos orgánicos, aceites, fertilizantes, heces de trabajos pecuarios, actividades mineras, manejo de material tóxico, etc. (Cajas, 2015)

Según Suarez (2008) la contaminación no puntual se caracteriza por:

- Las fuentes individuales son cantidades menores, pero mientras se juntan a través de toda la cuenca tienen un valor significativo.
- Principalmente están relacionadas con actividades del suelo.
- Se forma mediante la escorrentía de las lluvias.
- Se evalúa el impacto de la cuenca mediante calidad de agua.
- Las fuentes no puntuales son afectadas y creadas por situaciones climáticas que no se pueden controlar, sin embargo, también interfiere la condición geológica y geográfica que varía de sitio a sitio a través del tiempo.
- Los contaminantes más importantes de la contaminación no puntual para su control y manejo son: nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos suspendidos, coliformes fecales y algunas sustancias tóxicas.

2.2.7. Proceso de autodepuración de ríos

Según Diaz (2018) se le denomina al conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que sufren los cuerpos de agua conocido también como ciclo integral del agua, que conforma desde la captación del agua para consumo humano de la población hasta regresar a su cuerpo natural de agua a través de



vertimientos habiendo sufrido alteraciones. Los cuerpos de agua tienen una propiedad conocida como autodepuración o auto purificación que les permite cambiar su composición o recuperar su calidad de agua suprimiendo contaminantes. Es precisamente donde la ciencia replica estos mecanismos de manera artificial, logrando reducir el grado contaminante de los ríos. Esta tecnología se viene implementándose a raíz de que la contaminación excedía superando la capacidad de auto purificación reduciendo su eficiencia. Sin embargo, en la actualidad, es necesario ante cualquier vertimiento residual, un tratamiento mínimo sin considerar la capacidad de auto purificación de los ríos, lagos, quebradas donde se depositen las aguas residuales.

La contaminación de las aguas generalmente proviene de actividades humanas de centros urbanos, actividades industriales, agrícola, forestal contaminando con materia orgánica e inorgánica. Para los procesos de autodepuración, necesitan procesos físicos, químicos y biológicos capaces de oxidar la materia orgánica por acción de microorganismos anaeróbicos, aeróbicos y facultativos, reduciendo el material orgánico en sustancias más sencillas. (Angarita, 2019)

Para evaluar en qué estado se encuentra un cuerpo receptor de aguas residuales, existe un parámetro de suma relevancia, siendo el oxígeno disuelto de gran relevancia para un ecosistema acuático que se alteran significativamente a causa de los vertidos. Para que los cuerpos de agua puedan cumplir adecuadamente su función autodepuradora de materia orgánica de aguas residuales, dependerá de las formas de oxigenación, el clima, condiciones hidrológicas, que tipo de material orgánico e inorgánico, especies de microorganismos. (Angarita, 2019)



Según Díaz (2018) para evaluar este proceso auto purificador se debe contar con los siguientes principios:

- La función de oxidar aguas residuales dependerá de sus formas de oxigenación
- Para el normal desarrollo de la auto purificación tiene que tener condición ideal.
- Para un correcto análisis del proceso autopurificador se necesita determinar una condición estable con flujo permanente.
- Para un estado de equilibrio puede ser establecida por dos formas, la condición momentánea y real, ya que varía constantemente.
- Durante el proceso se da un equilibrio entre las sustancias contaminantes y los procesos de degradación.

2.2.8. Zonas de autodepuración

Las condiciones regulares, los ecosistemas hídricos contienen oxígeno disuelto y alojan flora y fauna acuática incluido microorganismos como el plancton y bacterias, que pueden flotar o nadar libremente en las fuentes de agua natural. (Angarita, 2019)

Los ríos en su cauce presentan tramos rápidos y lentos que afectan directamente en la reaireación en mayor o menor medida, y depende del caudal puede ser capaz de diluir o absorber la carga de contaminantes al que este sujeto. Para describir esta situación, a estas condiciones regulares de un río que se vierten aguas residuales, ya sea doméstica o industrial sin tratamiento, se puede clasificar en 4 zonas: (Flores y Menéndez, 2018)



a. Zona de degradación o Polisaprobia

Se ubica específicamente en torno a la zona de descarga. Es precisamente en este punto donde los parámetros fisicoquímicas y biológicas son alteradas significativamente, siendo los microorganismos los que sustituyen a formas de vida más complejas. Este límite es considerado hasta una concentración de oxígeno disuelto menor al 45% en relación con la saturación. Para este punto, se incrementa la flora bacteriana, la vegetación es reemplazada por hongos y se origina sedimentos con elevados niveles de carga orgánica, reduciendo el oxígeno y aumentando el dióxido de carbono. (Angarita, 2019)

b. Zona séptica, descomposición activa o α – Mesosaprobia

Para esta zona se evidencia un déficit de oxígeno disuelto y condiciones sépticas, tiene una característica coloración oscura a gris, el olor es más notorio a putrefacción, adquiere deposición de lodos viscosos y genera burbujas gaseosas. El tipo de descomposición es anaeróbico, se eleva los niveles de CO₂, las bacterias aeróbicas son reemplazadas por las anaeróbicas y el amoníaco. Se considera esta zona hasta que los niveles de DBO se encuentran por debajo de la tasa de aeración. (Angarita, 2019)

c. Zona de recuperación o β – Mesosaprobia

Para este punto, las propiedades del agua son contrarias a la zona de descomposición, la claridad del agua es mayor, la concentración del oxígeno disuelto se eleva llegando al punto de saturación, se reduce los niveles de CO₂, a la vez que los nitratos y nitritos se elevan, ya no hay formación de burbujas, la cantidad de microorganismos se reduce conforme baja la carga orgánica como

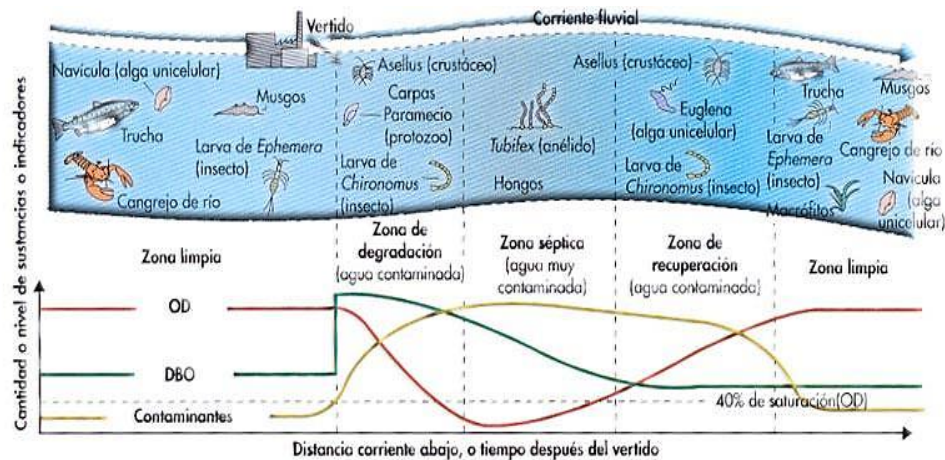
alimento, y crecen los crustáceos o protozoarios rotíferos. (Flores y Menéndez, 2018)

d. Zona de agua limpia, agua clara u Oligosaprobia

Para esta zona tiene la propiedad de ser muy parecida a las aguas naturales. En apariencia se puede notar más atractiva al ojo humano, contiene vida animal y vegetal, vuelven a aparecer las bacterias aeróbicas y aparecen algunas especies de peces, sin embargo, puede perdurar bacterias patógenas resistentes como también algunos compuestos metálicos, el oxígeno disuelto está más cercana al nivel de saturación. (Angarita, 2019)

Figura 1

Fases de autodepuración de un río



Fuente: Angarita (2019).

2.2.9. Modelos de calidad del agua

Son herramientas que nos asisten y facilitan en la evaluación del comportamiento de un río en su función de eliminación de contaminantes afectado por aguas residuales, no obstante, se busca que el río cuente con características con valores más realistas para que la simulación sea aceptable. De igual forma, se

tomará en cuenta que los modelos utilizados tienen cierta incertidumbre, ya que estima sus valores en base a ecuaciones matemáticas y físicas enfocadas en los procesos físicos, químicos y biológicos que sufren las aguas. (Burgos y Mera, 2022)

2.2.10. Modelo Streeter-Phelps.

El planteamiento de este modelo matemático fue enunciado por Streeter y Phelps que se fundamenta en dos variables relevantes como la descomposición de la materia orgánica y la reaireación del oxígeno, que tienen relación directa con la concentración de OD en los ríos. Para su aplicación, requiere de la medición de características hidráulicas en campo tales como el caudal, velocidad, profundidad y área, de igual forma se toman valores de calidad de agua, considerando el OD, DBO₅ y temperatura. El modelo sigue una secuencia de ecuaciones para obtener el déficit de oxígeno. (Clavijo y Ramírez, 2021)

2.2.10.1. Tiempo de viaje

Según Angarita (2019) el tiempo de viaje se calcula de la siguiente forma:

$$t = \frac{L}{V} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

- t = tiempo en horas
- L = Distancia de recorrido en metros
- V = velocidad media del río en m/h

2.2.10.2. Distancia de Homogenización

Según Angarita (2019), la distancia de homogenización se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$L_m = 0,12 * V * \frac{B^2}{H} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

- L_m = Distancia de mezclado entre la carga contaminante y el río en metros
- V = Velocidad media del río en m/s
- B = Ancho del río en metros
- H = Profundidad media del río en metros

2.2.10.3. Modelo de mezcla o balance de masas.

Según Diaz (2018) una de las bases para evaluar la contaminación que induce una descarga residual en un cauce es aplicar apropiadamente la ecuación de balance de masas. Para este estudio, se debe considerar empezando desde el punto de vertimiento.

Para seguir el planteamiento dispuesto por Streeter Phelps, debemos de suponer sobre el río en estudio que presenta características homogéneas a lo largo de su cauce afectado por un vertimiento, tanto vertical como lateralmente, lo que también suponemos que la homogeneidad de la calidad del agua también tiene el mismo comportamiento. Esta homogenización se produce a pocos metros aguas abajo desde el vertimiento, sin embargo, también depende de las propiedades hidráulicas del río. (Orduz, 2016)



El balance de masas de DBO, OD y temperatura de las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente para un cauce afectado por un solo vertimiento es planteado por Diaz (2018) de la siguiente forma:

a. Análisis de la DBO en el punto de mezcla.

$$DBO_{5\text{ Mezcla}} = \frac{Q_r * DBO_r + Q_v * DBO_v}{Q_r + Q_v} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

- Q_r : Caudal del río.
- DBO_r : Demanda bioquímica de oxígeno del río.
- Q_v : Caudal del vertimiento.
- DBO_v : Demanda bioquímica de oxígeno del vertimiento.

b. Análisis de la temperatura en el punto de mezcla.

$$T_{\text{Mezcla}} = \frac{Q_r * T_r + Q_v * T_v}{Q_r + Q_v} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

- Q_r : Caudal del río.
- T_r : Temperatura del río.
- Q_v : Caudal del vertimiento.
- T_v : Temperatura del vertimiento.

c. Análisis de la concentración de oxígeno en el punto de mezcla.

$$OD_{\text{Mezcla}} = \frac{Q_r * OD_r + Q_v * OD_v}{Q_r + Q_v} \dots \dots \dots (5)$$



Donde:

- Qr: Caudal del río.
- ODr: Oxígeno disuelto del río.
- Qv: Caudal del vertimiento.
- ODv: Oxígeno disuelto del vertimiento.

2.2.10.4. Análisis del oxígeno de saturación a temperatura de mezcla.

La estimación de este modelo nos permite valorar el nivel de tratamiento que un agua residual necesita, un método para su cálculo es mediante la dilución que es básica para retener una concentración específica de oxígeno disuelto en el agua.

Según Clavijo y Ramírez (2021) la siguiente ecuación nos permite determinar la concentración de saturación del oxígeno.

$$O_{sat} = 14,652 - 0,41022 * (T_m) + 0,007991 * (T_m^2) - 0,000077774 * (T_m^3) \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

- Tm: Temperatura de mezcla.
- Osat: Saturación de oxígeno a nivel del mar.

Corrección del oxígeno de saturación a la de presión de trabajo.

El oxígeno de saturación varía de acuerdo a la altitud, la ecuación anterior está definida para altitudes al nivel del mar, por lo que requiere la corrección en función de la presión de trabajo estimado por Diaz (2018) con la siguiente ecuación:



$$P = 760 * e^{\frac{-E}{8005}} \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

- P: Presión en mmHg.
- E: Altitud en m.s.n.m.

Según a Diaz (2018) la corrección de la saturación de oxígeno será:

$$OD_{SC} = O_{sat} * \frac{P}{760} \dots \dots \dots (8)$$

2.2.10.5. Análisis del déficit de oxígeno en el punto mezcla:

La concentración de oxígeno presente en el agua es consumido mucho rápido en comparación con la cantidad que produce absorbiéndose dentro del sistema, lo que produce una caída rápida de OD perjudicando los ecosistemas acuáticos.

Según Burgos y Mera (2022) la estimación se parte por medio de la resta entre la cantidad de saturación de OD y su déficit de OD.

$$D_0 = O_s - O_{mezcla} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

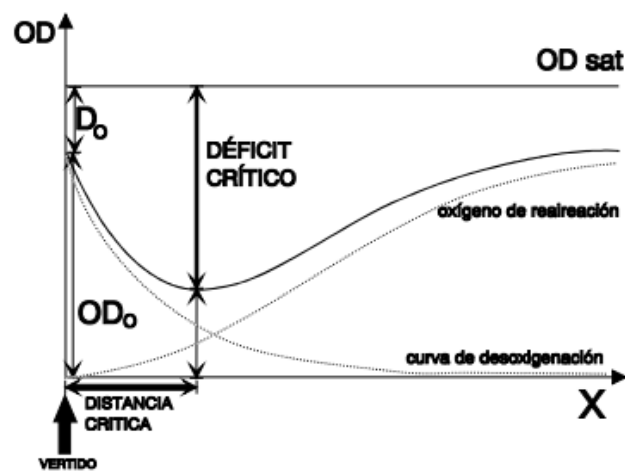
- D0: Déficit de oxígeno en el punto de mezcla.
- Os: Saturación de oxígeno.
- Omezcla: Oxigeno de mezcla.

2.2.10.6. Análisis de las constantes cinéticas de autodepuración.

Las constantes cinéticas dependerán de las condiciones específicas del río en estudio, las corrientes con mayor caudal, pero con niveles de profundidad bajo obtendrán constantes de reoxigenación mayor que las de poco caudal y más profundas. (Díaz, 2018)

Figura 2

Concentración de oxígeno en aguas de ríos



Fuente: Díaz (2018).

Donde:

- OD: Oxígeno disuelto
- OD sat: Oxígeno disuelto saturado
- OD0: Oxígeno disuelto inicial
- D0: Déficit de saturación de oxígeno

a. Constante de reaeración

Consiste en la acción de los cuerpos de agua de absorber el oxígeno del aire, siendo esta la principal fuente natural de oxígeno. Este proceso de aireación de los ríos se basa por su acción de aireación superficial.

Técnicamente si las concentraciones de OD se encuentran por debajo del oxígeno saturado, esas aguas serán consideradas contaminadas orgánicamente. (Orduz, 2016)

Para Diaz (2018) el cálculo del factor de reaireación se pueden tomar diferentes ecuaciones en función de las características hidrodinámicas del río y el tipo de corriente, ya que, mediante el movimiento del caudal del río, el oxígeno se renueva a través de la difusión del río con el aire.

Según Orduz (2016) la elección de ecuación que más se adecua a las características del río se tomará en cuenta como parámetros de velocidad media y profundidad que se encuentren dentro de este rango sobre la corriente:

Tabla 1

Ecuaciones de reaireación para ríos en terreno llano

Parámetros	O'Connor – Dobbins	Churchill	Owens - Gibbs
Profundidad (m)	0,30 – 9,14	0,31 – 3,35	0,12 – 0,73
Velocidad media (m/s)	0,15 – 0,49	0,55 – 1,52	0,03 – 0,55
Ecuaciones	$K_a = 3,93 * \frac{V^{0,5}}{H^{1,5}}$	$K_a = 5,026 * \frac{V}{H^{1,67}}$	$K_a = 5,032 * \frac{V^{0,67}}{H^{-1,85}}$

Fuente: Orduz (2016)

$$K_a = 5,032 * \frac{V^{0,67}}{H^{-1,85}} \dots \dots \dots (10)$$



Donde:

- K_a = Constante de reaireación, s-1
- V = Velocidad media del río, m/s
- H = Profundidad del río, m

b. Constante de desoxigenación

Según Diaz (2018) indica que cuando se incorpora material orgánico en un cuerpo de agua, por su acción natural empieza a biodegradarse, actuando las bacterias sobre los componentes orgánicos, usando como recurso el OD del agua para su metabolización, causando como consecuencia la reducción de la concentración de OD desde su saturación. La constante de desoxigenación tiene una aplicación para caudales entre 0,3 y 23 m³/s, algunos autores indican que la constante es independiente del caudal.

Según Diaz (2018) para la determinación la tasa de descomposición de DBO se puede tomar en cuenta la siguiente ecuación en función del caudal:

$$K_d = K_R = 1,796 * Q^{-0,49} \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

- K_d = Constante de desoxigenación, s-1
- K_R = Constante global de desoxigenación, s-1
- Q = Caudal de la corriente, m³/s



c. Correcciones de las constantes cinéticas por temperatura

La estimación de las constantes cinéticas, se considera como temperatura base de 20°C, sin embargo, en condiciones ambientales normales esta puede variar lo que requiere una corrección en función de la temperatura, de acuerdo a Diaz (2018) la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$K(T) = K_{20} * \theta^{(T-20)} \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

- $K(T)$ = Corrección de temperatura.
- K_{20} =Factor de corrección.
- T = Temperatura de la mezcla.

Para Burgos y Mera (2022) la constante de desoxigenación (K_d) el factor de temperatura θ puede variar entre 1,010 y 1,060 sin embargo, se usa comúnmente el valor de 1,047. Este valor nos indica que la velocidad de oxidación se incrementa un 4,7% por cada grado de temperatura.

De igual forma para Burgos y Mera (2022) la constante de reaeración (K_a) se considera un factor de $\theta = 1,024$. El coeficiente de reaeración K_a y el valor de la concentración del OD saturado es afectado por la temperatura.

2.2.10.7. Análisis del punto crítico mediante las ecuaciones de Streeter-Phelps:

a. Distancia crítica.

En el recorrido de un río se pueden establecer diversas situaciones, por ejemplo, el punto crítico que se encuentra directamente relacionado con la distancia desde el punto de vertido, también se debe de evaluar el tiempo crítico definido en días. Según Angarita (2019) la distancia crítica se expresa de la siguiente forma:

$$X_c = \frac{1}{k_a - k_d} * \ln \left(\frac{k_a}{k_d} * \left(1 - D_0 * \frac{k_a - k_d}{k_a * DBO_5 \text{ mezcla}} \right) \right) \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

- X_c : Distancia crítica
- K_a : Constante de reaeración.
- K_d : Constante de desoxigenación.
- D_0 : Déficit de oxígeno en el punto de mezcla.
- DBO_5 mezcla: DBO en el punto de mezcla.

b. Tiempo crítico

Según Angarita (2019) el tiempo crítico se expresa de la siguiente forma:

$$T_c = \frac{X_c}{v} \dots \dots \dots (14)$$



Donde:

- V: Velocidad media del río.
- Tc: Tiempo crítico.

c. Déficit de oxígeno crítico.

Según Angarita (2019) el déficit de oxígeno crítico se expresa de la siguiente forma:

$$D_c = \frac{k_d}{k_a} * DBO_{5m} * e^{(-k_d * t_c)} \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

- Kd: Constante de desoxigenación.
- Ka: Constante de reaireación.
- DBO5 m: DBO en el punto de mezcla.

d. Oxígeno crítico

Para Flores y Menéndez (2020) la concentración de saturación de oxígeno se puede obtener con la siguiente ecuación.

$$[O_2]_c = [O_2]_{sat} - D_c \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

- Dc: Déficit crítico.
- O2 sat: Saturación de oxígeno a temperatura de mezcla.

e. La concentración de materia orgánica o DBO₅ crítica:

Para la DBO crítica se tomará en cuenta la ecuación propuesta por Flores y Menéndez (2020)



$$DBO_{5 \text{ crítico}} = DBO_{5 m} * e^{(-k_d * t_c)} \dots \dots \dots (17)$$

Donde:

- DBO5 m: DBO en el punto de mezcla.
- Kd: Constante de desoxigenación.
- Tc: Tiempo crítico.

2.2.10.8. Modelamiento de Streeter Phelps en función a la distancia

a. Ecuación para la DBO en x distancia

Según Angarita (2019), para calcular la variación de la DBO en función de la distancia se puede considerar la siguiente ecuación:

$$L_x = L_0 * e^{-K_R * (\frac{x}{v})} \dots \dots \dots (18)$$

Donde:

- Lx = DBO en función a la distancia en mg/L
- Lo = DBO inicial de la mezcla en mg/L
- KR = Constante global de desoxigenación (KR = Kd)
- x = distancia en metros.
- V = velocidad media en m/d.

b. Ecuación para el déficit de oxígeno en x distancia

Para el cálculo del déficit de oxígeno se tomará en cuenta la ecuación propuesta por Angarita (2019):

$$D_x = D_0 * e^{-k_a * (\frac{x}{v})} + \frac{k_d * L_0}{k_a - k_R} * \left(e^{-k_R * (\frac{x}{v})} - e^{-k_a * (\frac{x}{v})} \right) \dots \dots \dots (19)$$

Donde:



- D = Déficit de oxígeno disuelto en mg/L.
- L_0 = DBO inicial de la mezcla en mg/L.
- D_0 = Déficit inicial de oxígeno disuelto.
- K_d = Constante de desoxigenación.
- K_a = Constante de reaireación.
- K_R = Constante global de desoxigenación ($K_d = K_R$)
- x = Distancia en metros.
- V = Velocidad media en m/d.

c. Ecuación para el oxígeno disuelto en x distancia

Según Angarita (2019), para el cálculo del oxígeno disuelto se tomará la resta de los siguientes parámetros:

$$OD = O_s - D \dots \dots (20)$$

Donde:

- OD = Oxígeno disuelto en el agua en mg/L
- O_s = Oxígeno de saturación en mg/L
- D = Déficit de oxígeno en mg/L



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

La investigación fue desarrollada a lo largo del cauce del río Coata, específicamente en la subcuenca Bajo Coata, donde intervienen tres distritos; en el distrito de Juliaca donde inicia la investigación desde el puente Unocolla (unión de los ríos Cabanillas y Lampa), además en este distrito donde se producen las aguas residuales que se depositan en una laguna de oxidación que se vierten al río Torococha. Seguidamente se considera un punto de mezcla y un punto intermedio desde la descarga que se ubican en el distrito de Caracoto dentro de la provincia de San Román. Se considera también la zona de afectación directa en la ciudad de Coata, lugar donde se tienen conflictos sociales producto de la contaminación del río, culminando en el punto más cercano a la desembocadura al Lago Titicaca ubicado en el distrito de Coata en la provincia de Puno.

La cuenca Coata cuenta con un área de 4 908,44 Km², y aproximadamente con una longitud de 141 Km, la altitud mayor se encuentra en la parte alta en el nevado Huayquera con 5 575 m.s.n.m. y una mínima de 3 830 m.s.n.m. en la desembocadura al lago, una altitud media de 4 336,12 m.s.n.m. y una pendiente de 1,13% según el Senamhi (2007).

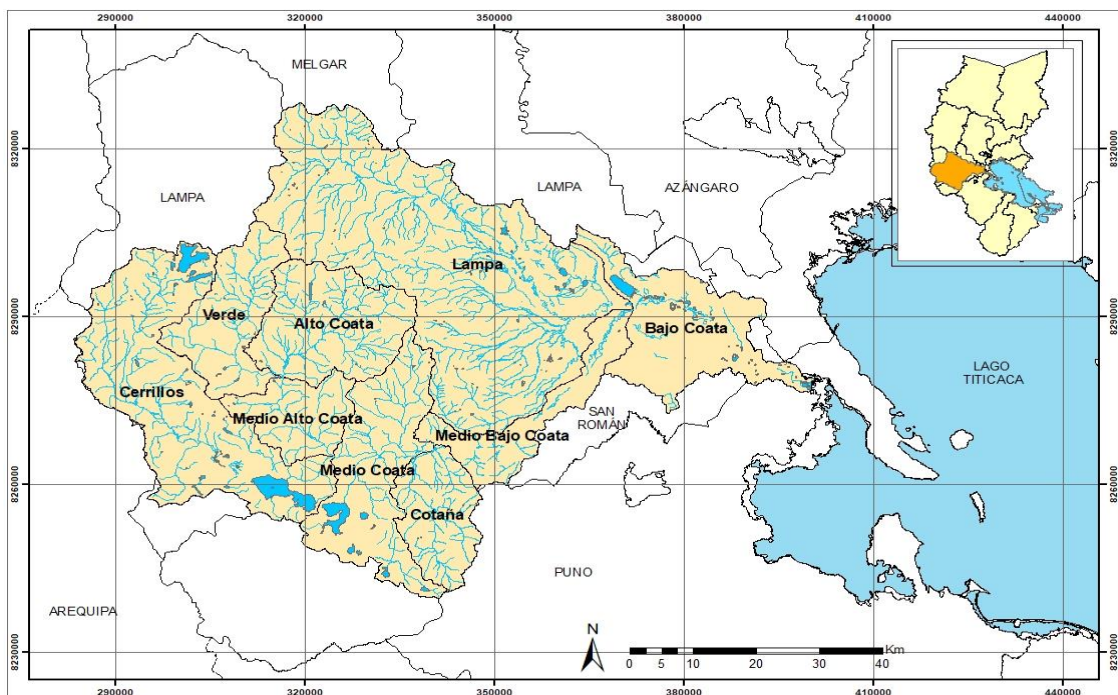
La cuenca a nivel pluviómetro tiene buen rendimiento hídrico, con una precipitación total promedio de 595,5 mm, las temperaturas más bajas se dan en el mes de julio y las más elevadas entre los meses de noviembre a marzo. Cuenta con 9 subcuencas descritas a continuación:

- Subcuenca del Río Paratía
- Subcuenca Jarpaña
- Subcuenca Medio Alto Coata
- Subcuenca Cerrillos
- Subcuenca e Intercuenca del Medio Coata
- Subcuenca Cotaña
- Subcuenca Medio Bajo Cojata
- Subcuenta Lampa
- Subcuenca Bajo Coata

Subcuenca Bajo Coata: Consta de 459,9 km², equivale el 9,2 % del total de la cuenca del río Cabanillas (2888,6 km²). Los ríos Lampa y Cabanillas son los importantes contribuyentes de río Coata, desembocando en el lago Titicaca.

Figura 3

Mapa hidrográfico de la cuenca Coata



Fuente: Elaboración propia



3.1.1. Ubicación geográfica y demarcación política

La cuenca del río Coata presenta la siguiente ubicación geográfica:

- **Coordenadas Geográficas**

- Latitud Sur : 15°06'36" - 15°55'12"
- Longitud Oeste : 71°12'00" - 69°55'12"

- **Coordenadas UTM (WGS84)**

- Norte : 8 328,509 – 8 239,696
- Este : 282,907 – 401,525
- Variación altitudinal : 5,300 – 3,800 m.s.n.m.

- **Límites Hidrográficos**

- Norte : Cuenca Ramis
- Sur : Cuenca Illpa y cuenca Alto Tambo
- Este : Lago Titicaca
- Oeste : Cuenca Chili y cuenca Colca Sigwas

3.1.2. Fuente contaminante

Los recursos hídricos son afectados por fuentes contaminantes que pueden ser de tipo sólido o líquido, su incorporación al cuerpo de agua puede ser directa o indirectamente alterando su condición natural, la principal fuente de contaminación del río Coata es el río Torococha, que, por la cantidad de población de Juliaca, genera grandes cantidades de aguas residuales transportadas a través de su cauce.



3.1.2.1. Río Torococha

El río Torococha es un lecho natural de dimensiones pequeñas que nace en la microcuenca Chullunquiari, ubicada al noroeste de la ciudad de Juliaca. Su longitud es de 18 Km aproximadamente, espacialmente no se visualiza ya que sus aguas recorren por debajo de la ciudad de Juliaca por unos 3 Km cubiertos, para desembocar, ya con un cauce abierto, en el río Coata.

El cauce de este río a través de los años ha sido usado de manera inadecuada por la población juliaqueña que viven cercanas al cauce, ya que la utilizan como fuente receptora de aguas residuales, generalmente por medio de conexiones clandestinas, además de residuos sólidos que se acumulan constantemente, generando malos olores y propenso a plagas que incrementan el riesgo a la salud humana.

Este río es la principal fuente contaminante del río Coata, ya que también en este río se vierten las aguas residuales de la laguna de oxidación atravesando densos totorales de 35 000 m² que cumplen el rol de filtros naturales, sin embargo, por la elevada concentración de contaminantes, le imposibilita la remoción de nutrientes (fósforo y nitrógeno) lo que consecuentemente produce la eutrofización del río Coata.

Figura 4

Mapa satelital de la laguna de estabilización de la ciudad de Juliaca



Fuente: Elaboración propia

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. Toma de muestra y análisis fisico-químico:

3.2.1.1. Equipo de campo

- Multiparámetro Horiba U50
- Multiparámetro HACH HQ30D
- Turbidímetro HACH 2100Q

3.2.1.2. Equipo de laboratorio:

- Espectrofotómetro HACH DR-4000 UV/VIS
- Espectrofotómetro HACH DR-5000 UV/VIS
- Refrigeradora
- Destilador de agua



3.2.1.3. Material

- Celdas de vidrio de 25 mL para el DR – 4000
- Pipetas de 1 mL, 5 mL, 10 mL
- Pissetas
- Botellas de polietileno de 500 mL (recolección de muestras)
- Baldes de plástico
- Cooler (transporte y preservación de muestras)
- Escobillas para lavado de materiales
- Vasos precipitados
- Probeta graduada de 25 mL clase A
- Papel filtro
- Varilla de vidrio
- Papel tisú
- Papel toalla
- Guantes de Nitrilo

3.2.1.4. Reactivos

- Sachet Hach Nitriver 5 reactivo en polvo para determinación de Nitrato (método por reducción de cadmio para rango de 0,3 a 30,0 mg/L y de 0,1 a 10,0 mg/L)
- Sachet Hach de Nitriver 3 reactivo en polvo para determinación de Nitrito (método de diazotización para rango de 0,002 - 0,300 mg/L)
- Sachet Hach PhoVer 3 reactivo en polvo para determinación de Fosfato (método de ácido ascórbico para un rango de 0,02 – 2,50 mg/L)



- Sachet Hach SulfaVer 4 reactivo en polvo para determinación de Sulfato (método turbidimétrico para un rango de 2 - 70 mg/L)
- Sachet Hach de cianuro de amonio (NH_4CN) reactivo en polvo para determinación de Nitrógeno amoniacal (método de salicilato para un rango de 0,01 a 0,50 mg/L)
- Sachet Hach de salicilato de amoniaco ($\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_3$) reactivo en polvo para determinación de Nitrógeno amoniacal (método de salicilato para un rango de 0,01 a 0,50 mg/L)
- Ácido sulfúrico H_2SO_4 (preservante)

3.2.2. Determinación de caudal

3.2.2.1. Equipos y Materiales

- Correntómetro OTT MF Pro
- Cronómetro
- Wincha flexómetro
- Pelota de Tecnopor

3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.3.1. Puntos de muestreo

Las estaciones de muestreo están constituidas por seis puntos de monitoreo dentro del cauce del río Coata comprendido entre el puente Unocolla, hasta la desembocadura al lago Titicaca, para determinar su acción autodepuradora antes de llegar al lago y evaluar el comportamiento de la carga contaminante que transporta el río producto de las aguas residuales del río.

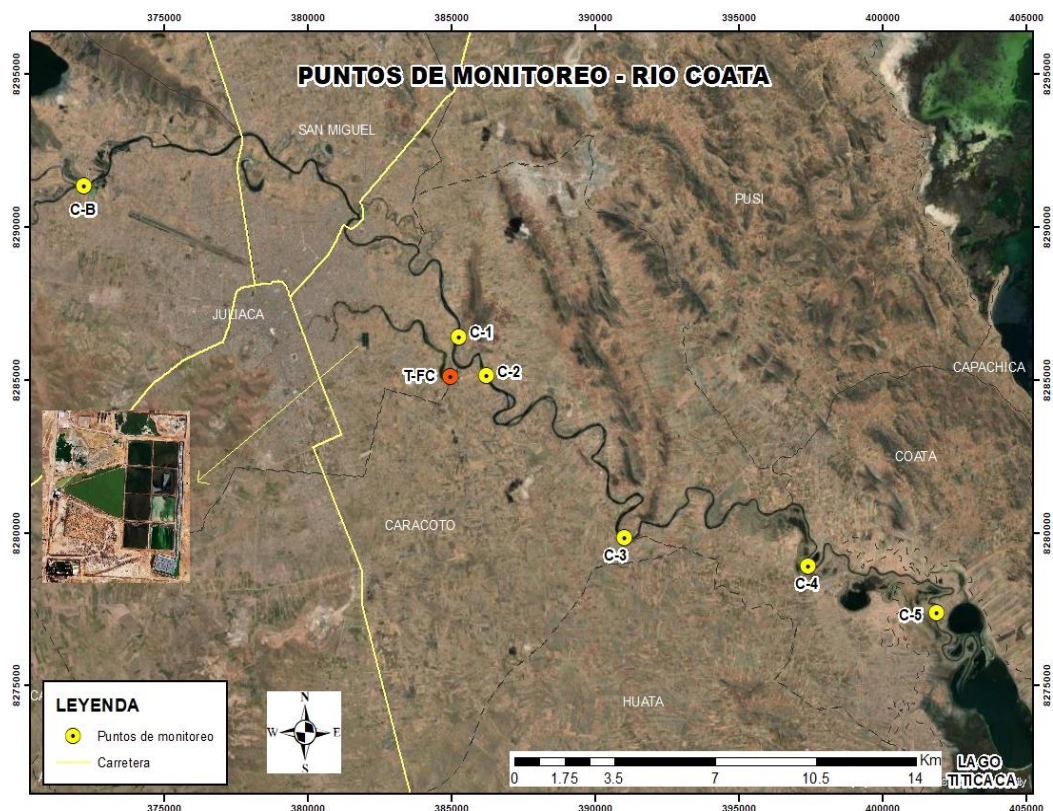
Tabla 2

Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo

N°	Código	Referencia	Criterio	Coordenadas UTM 19S		
				Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
1	C-B	Puente Unocolla	Punto Inicial - Blanco	372183,2	8291407,8	3833
2	C-1	Puente Churi	Punto antes de la afectación	385205,8	8286564,3	3832
3	T-FC	Río Torococha – Agua residual	Fuente Contaminante – vertimiento	385131,5	8285217,6	3832
4	C-2	Puente Canchis Chico	Punto de mezcla después del vertimiento	386009,1	8285670,9	3832
5	C-3	Punto Intermedio	Punto intermedio	390796,0	8279983,8	3829
6	C-4	Puente Coata	Control ambiental y social	397438,7	8278918,6	3826
7	C-5	Desembocadura al Lago Titicaca	Punto Final – Control	402469,3	8278057,1	3822

Figura 5

Puntos de monitoreo del río Coata



Fuente: Elaboración propia

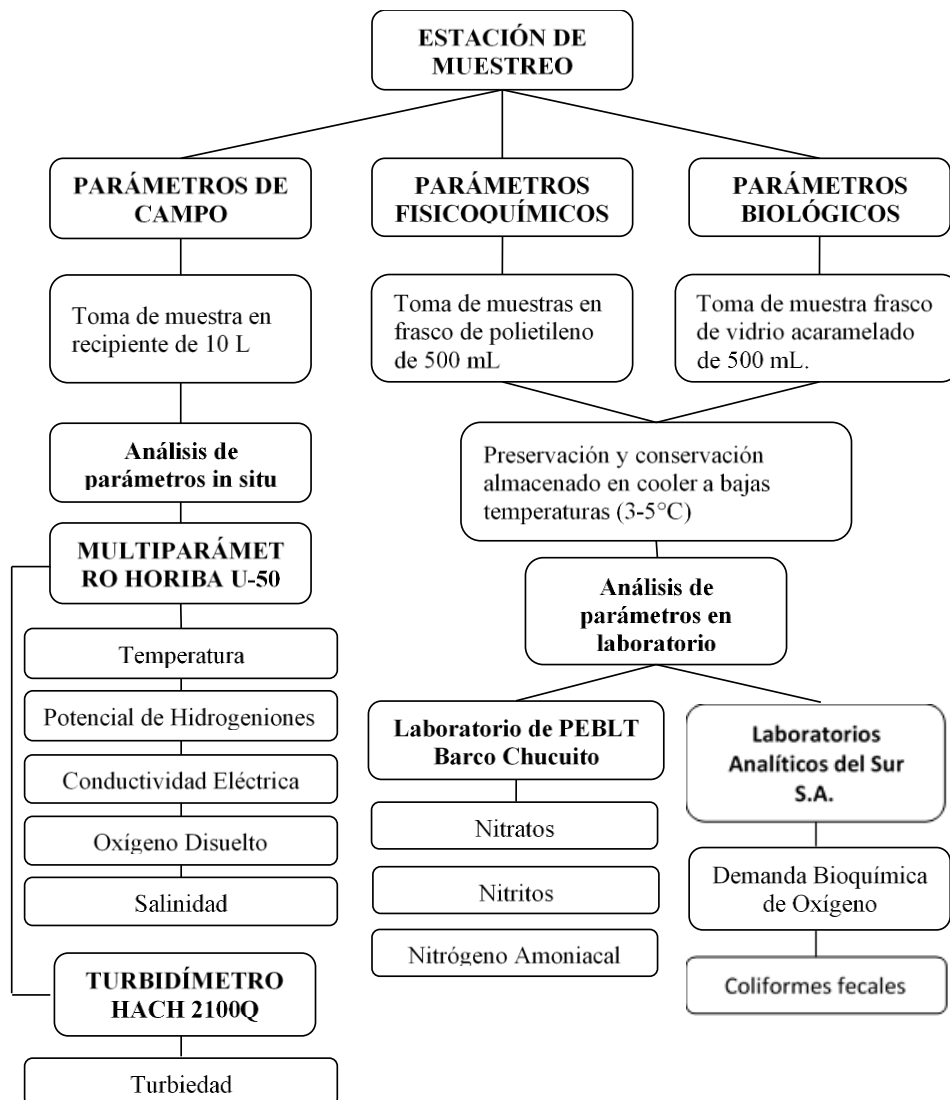
3.4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

3.4.1. Determinación de parámetros de campo

La metodología que se utilizó para el análisis y recolección de muestras para calidad de agua fue guiada por el “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales” de la Resolución Jefatural N°010-2016-ANA.

Figura 6

Diagrama de flujo de muestreo y análisis de calidad de agua



Fuente: Elaboración propia



Protocolos y Procedimientos de monitoreo de calidad de agua

Según el ANA (2016), recomienda la siguiente metodología para la medición y toma de muestras en cuerpos de agua loticos (ríos).

a. Reconocimiento del entorno

Una vez ubicado la zona de muestreo se procede a reconocer el entorno y anotar en el registro de campo las observaciones como características atípicas del río como una coloración anormal del agua, presencia de residuos, presencia de animales, gran cantidad de vegetación acuática o algas, actividades antrópicas u otros factores que puedan alterar las propiedades naturales del cuerpo de agua.

b. Rotulado y etiquetado

Los recipientes para los diferentes parámetros deben de ser rotulados con etiquetas autoadhesivas conteniendo el nombre del cliente, código del punto de monitoreo, tipo del cuerpo de agua, hora y fecha de muestreo, nombre del responsable de la toma de muestra, tipo de análisis requerido y la preservación.

c. Georreferenciación del punto de monitoreo

Una vez aprobado el punto de monitoreo, se procede a identificar el área mediante sus coordenadas utilizando un equipo GPS registrando esta información en el registro de campo.

d. Medición de parámetros de campo

Para el caso del tramo con condición accesible y bajo caudal, es recomendable tomar los parámetros de campo en el cuerpo de agua, caso contrario, tomar una muestra representativa en un balde de agua limpio. Para los



parámetros OD, pH, CE y temperatura la medición debe ser de forma inmediata luego de tomar la muestra. Es necesario calibrar el equipo en caso de que exista variación significativa entre dos muestras. Las mediciones se deben registrar inmediatamente en el registro de datos de campo. Una vez terminado el monitoreo, limpiar los equipos y materiales de muestreo inmediatamente después de su uso, con el objetivo de evitar posible deterioro o contaminación.

e. Procedimiento para la toma de muestra

- Antes de la toma de muestra, el personal debe utilizar guantes descartables y mascarilla para la manipulación de equipos.
- Posicionarse en el punto medio de la corriente, donde sea homogénea, evitando aguas poco profundas y estancadas.
- Tomar medición de los parámetros de campo directamente del río o tomar una muestra en un balde limpio sin remover sedimento y registrar las mediciones en el formato de datos de campo.
- Tomar un recipiente, sacar la tapa y contratapa sin tocar el interior del frasco.
- Antes de tomar la muestra, enjuagar los frascos por lo menos en dos ocasiones, a excepción de los frascos para análisis microbiológico.
- Tomar la botella por el cuello y sumergirla en dirección opuesta a la corriente del río.
- Evitar coleccionar suciedad, sedimentos del fondo o películas de la superficie.
- Para las muestras microbiológicas, dejar al menos un espacio del 10% de su capacidad máxima, de esta manera se asegura un adecuado suministro de oxígeno para las bacterias.
- Para muestras de DBO, llenar el frasco completamente y lentamente evitando formar burbujas en su interior.



f. Almacenamiento, conservación y transporte de muestras

Los frascos muestreados se almacenan dentro de coolers en forma vertical para evitar derrames además de evitar el contacto con la luz solar. Es recomendable embalar los recipientes de vidrio con bolsas poliburbujas para evitar roturas durante el transporte. Para su conservación, los coolers deben acondicionarse mediante un sistema de enfriamiento como el uso de hielo, ice pack o similares. Las muestras se deben de transportar inmediatamente al laboratorio cumpliendo el tiempo de almacenamiento máximo. (ANA, 2016)

3.4.1.1. Determinación de parámetros fisicoquímicos

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos: Temperatura, pH, conductividad eléctrica, salinidad, oxígeno disuelto, fueron medidos in situ directamente en campo con el Multiparámetro HORIBA Serie U-50, previamente calibrado en laboratorio.

3.4.1.2. Determinación de la turbidez.

La metodología utilizada fue espectrofotométrica, su principio consta en la propiedad óptica para muestras de agua resultante por la desviación y absorción de la luz emitida a través de partículas suspendidas presentes en la muestra. La concentración de turbiedad depende de varios factores como forma, tamaño y propiedad de refracción de partículas. Se expresa en unidades nefelométricas (NTU), para la medición de turbiedad del río Coata se utilizó el turbidímetro HACH 2100Q.

3.4.2. Determinación de nutrientes en laboratorio

Para la determinación de nutrientes, previamente recolectada la muestra, es trasladada al Laboratorio de Análisis de Calidad de Agua del Proyecto Especial



del Lago Titicaca ubicada en Barco-Chucuito, para su medición se utilizó el Espectrofotómetro HACH DR4000 UV/VIS mediante la disolución de la muestra con polvos estándares de la misma marca para cada parámetro, colocadas en celdas de cuarzo en un tiempo determinado de reposo para su posterior lectura.

Fundamento del espectrofotómetro UV/VIS

Los espectrofotómetros son equipos ópticos en la que emite una luz sobre una muestra con rayos electromagnéticos a diversa longitud de onda dentro del rango ultravioleta (UV) y visible (VIS). La muestra absorberá de forma parcial los rayos UV o VIS dependiendo a la sustancia. Mientras que la luz restante (luz transmitida) es detectada como una función de la longitud de onda. El detector genera el espectro UV/VIS exclusivo de cada muestra (denominado también como espectro de absorción). (Martínez y Pérez, 2019). Cuando un objeto es incidido por una luz, este tiene la capacidad de absorberla debida a que la longitud de onda de esta luz absorbida sufre una excitación electrónica del objeto, mientras que la luz restante se transmite atravesando el objeto.

La absorbancia (A) es la cantidad de luz absorbida por un objeto, se expresa de la siguiente manera:

$$A = -\log(T) \dots \dots \dots (21)$$

La transmitancia se expresa entre el espectro de intensidad de luz que viene de la muestra (I) dividida entre el espectro de intensidad del rayo incidente (I_0).

$$T = \frac{I}{I_0} \dots \dots \dots (22)$$



Según Martínez y Pérez (2019), la ley de Beer-Lambert fundamenta en que la cantidad de energía que una solución absorbe es proporcional al paso de luz y a la concentración. Por ejemplo, una muestra con mayor concentración absorbería más luz que una más diluida. Se expresa de la siguiente manera donde e es la absortividad molar, d es el paso de la luz y c es la concentración:

$$A = \epsilon * d * c \dots \dots \dots (23)$$

3.4.2.1. Determinación de nitratos (NO_3^-)

Método reducción de cadmio, su principio se basa en la reducción del nitrato (NO_3^-) por medio del Cadmio metálico. En medio ácido sulfamílico el nitrato reacciona formando una sal de diazono intermedia que se une con el ácido gentésico. Esta reacción produce una coloración gris, a mayor coloración, mayor concentración.

Para el desarrollo de este método se usó el sachet reactivo en polvo NITRAVER 5 Nitrato $\text{NO}_3\text{-N}$ de 10 mg para un rango de 0,1 a 10 mg/L, se mezcla para una muestra de 25 mL, se somete a agitación por 1 minuto seguido de un reposo de 5 minutos hasta que los sólidos sedimenten para luego ser medido con el espectrofotómetro HACH DR/ 4000 y una longitud de onda de $\lambda = 500 \text{ nm}$, se tomó como blanco agua desionizada en una celda de cuarzo.

3.4.2.2. Determinación de nitritos (NO_2^-)

Método del sulfato ferroso, para reducir el nitrito óxido nitroso en medio ácido, donde los iones ferrosos forman un complejo de color amarillo para concentraciones bajas y coloración naranja para concentraciones altas.



Para el desarrollo de este método se usó el sachet de reactivo en polvo NITRIVER 3 NO₂-N de 10mg para un rango de 0,002 a 0,300 mg/L, se mezcla para una muestra de 25 mL, se somete a agitación hasta que el reactivo se disuelva y se deja en reposo por 20 minutos para luego ser medido con el espectrofotómetro HACH DR/ 4000 a una longitud de onda de $\lambda = 507$ nm.

3.4.2.3. Determinación de nitrógeno amoniacal (NH₄⁺)

Para el desarrollo de este método se usó dos sachet de reactivo en polvo AMMONIA CYANURATE y AMMONIA SALICYLATE para un rango de 0,01 a 5,0 mg/L, se mezcla para una muestra de 25 mL, se somete a agitación hasta que ambos reactivos se disuelvan y se deja en reposo por 20 minutos para luego ser medido con el espectrofotómetro HACH DR/ 4000 a una longitud de onda de $\lambda = 655$ nm.

3.4.2.4. Determinación de fosfato (PO₄⁻³)

Método: del orto fosfato, el orto fosfato reacciona en medio ácido con el molibdato formando un complejo fosfololibdico. El ácido ascórbico reduce el complejo formando un color azul de molibdeno el cual está relacionado con la cantidad de fósforo.

Para el desarrollo de este método se usó el sachet de reactivo en polvo PHOSVER 3 de 10mg para un rango de 0,1 a 5,0 mg/L, se mezcla para una muestra de 25 mL, se somete a agitación hasta que el reactivo se disuelva y se deja en reposo por 2 minutos para luego ser medido con el espectrofotómetro HACH DR/ 4000 a una longitud de onda de $\lambda = 890$ nm.



3.4.2.5. Determinación de Sulfato (SO_4^{2-})

Método Nefelométrico, el ion sulfato precipita en medio ácido acético, con ion Ba^{2+} formando cristales de sulfato de Bario con similar tamaño manteniéndose en suspensión homogénea durante un periodo de tiempo resultando necesario para medir la absorbancia espectral de la suspensión del sulfato de bario. Para el desarrollo de este método se usó el sachet de reactivo en polvo SULFAVER 4 de 10mg para un rango de 2 a 70 mg/L, se mezcla para una muestra de 25 mL, se somete a agitación hasta que el reactivo se disuelva y se deja en reposo por 5 minutos para luego ser medido con el espectrofotómetro HACH DR/ 4000 a una longitud de onda de $\lambda = 450 \text{ nm}$.

3.4.3. Determinación de DBO_5 y Coliformes fecales

Para la toma de muestra para ambos parámetros se basó en la metodología de Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales que indica para la DBO_5 el uso de un recipiente de polietileno de 1 L cuyo contenido debe de llenarse completamente sin presencia de burbujas en su interior, mientras que para los coliformes fecales se requiere de frascos de vidrio acaramelado previamente esterilizado llenando la botella dejando 1/3 del espacio total. Para ambos casos se requiere el almacenaje refrigerado a $< 6^\circ\text{C}$ y el tiempo máximo de análisis en laboratorio es de 24 horas.

Para la determinación de la DBO_5 y Coliformes fecales de esta investigación, las muestras fueron trasladadas a los Laboratorios Analíticos del Sur S.A. cuyo laboratorio se encuentra acreditado asegurando la validez de los resultados para llegar a los objetivos.

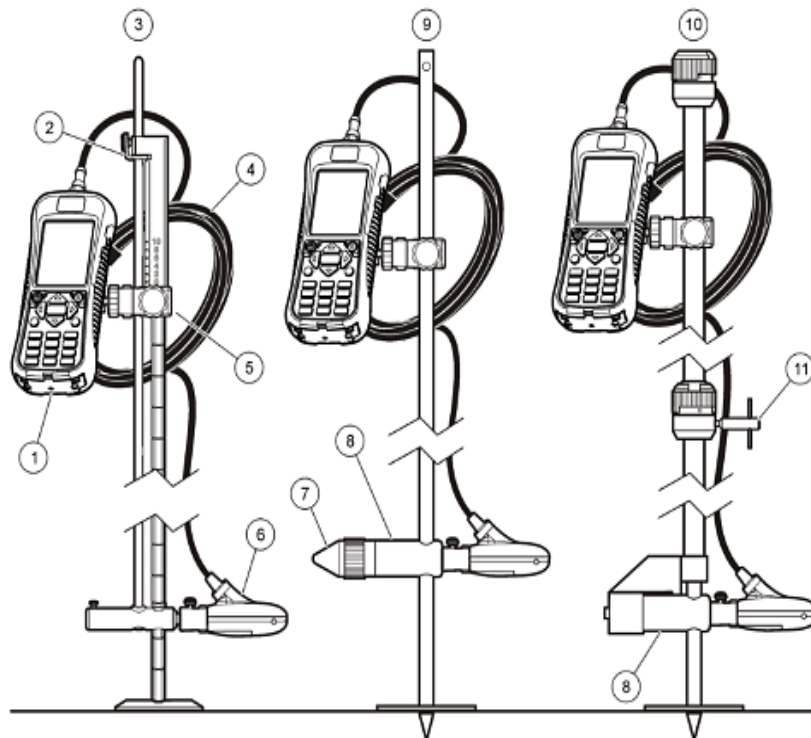
3.5. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CONDICIÓN HIDROGRÁFICA

3.5.1. Medición de caudal

Para la medición del caudal del río Coata existen diferentes métodos, sin embargo, para el caudal promedio anual de este río se recomienda utilizar el método del correntómetro donde también se requerirá determinar el área de la sección transversal, mientras que en el caso del río Torococha cuyo caudal es mucho menor se recomienda el método del flotador, adicionalmente para ambos casos, se medirá tanto la velocidad en m/s y la profundidad en metros que serán necesarias para la aplicación del modelo de Streeter Phelps. Así mismo, se contará con la data histórica de los reportes mensuales promedio del Senamhi que cuenta con una estación en la cuenca Coata ubicada en el puente Unocolla.

Figura 7

Equipo correntómetro OTT MF Pro y sus componentes



Fuente: Ortega (2014).

Tabla 3

Partes del correntómetro OTT MF Pro

CORRENTOMETRO OTT MF Pro	
1. Medidor portátil	7. Tornillo de bloqueo/liberación de altura del sensor (accesorio)
2. Dispositivo de bloqueo/liberación de altura del sensor	8. Adaptador de varilla de vadeo 20 mm/ HERES (accesorio)
3. Varilla de vadeo de configuración superior (accesorio)	9. Varilla de vadeo de 20 mm (accesorio)
4. Cable del sensor	10. Varilla de vadeo HERES (accesorio)
5. Montaje ajustable para el medidor portátil	11. Tornillo de bloqueo/liberación de altura del sensor
6. Conjunto del sensor	

Fuente: Ortega (2014).

3.5.1.1. Aforo por el método del correntómetro

El correntómetro es un equipo utilizado para determinar diferentes características de un río, esta tiene un dispositivo además de una hélice o un sensor al final del equipo, para el sondeo de la rapidez que lleva el agua, en la parte superior presenta un medidor portátil con una pantalla LCD, mientras que para un mejor manejo tiene adaptado un mango a la sonda. Para verificar la medición de flujo en unidades de pies por segundo se requiere que el equipo pueda determinar una velocidad real que se calcula al promediar las mediciones, con estos resultados se puede convertir en unidades de metros por segundo.

Mientras utilizamos el equipo, la pantalla estará encendida indicándonos de manera instantánea la velocidad del río, la cual se actualizará cada segundo que pasa. El correntómetro tiene funciones como



el restablecimiento permitiendo que las mediciones den valores medios, mínimos y máximos de velocidad; también puede restaurar el temporizador a 0. Se puede realizar hasta treinta mediciones.

Metodología de manejo del equipo:

- Dirigir el sensor del correntómetro directamente a favor del curso de agua que se quiera medir. Con la flecha dentro del armazón del propulsor aguas hacia abajo. El mástil de la sonda es una caña de 2 piezas incrementable de hasta 1 a 2 m.
- Si esta pantalla se queda en blanco, apretar cualquier botón para reiniciar el equipo.
- Después se acomoda la hélice en el punto de medición que se desea y apretar la tecla RESET para iniciar a medir las velocidades nuevas medio, máximo y mínimo.
- Las lecturas de velocidad se conseguirán simultáneamente con las mediciones de profundidad. Luego de obtener las profundidades en cada tramo, serán medidas las velocidades a 0,2 H y 0,8 H desde lo hondo, este criterio será considerado para profundidades de más de 0,6 m. Para profundidades menores o iguales a 0,6 m, la velocidad se medirá a 0,4 H desde lo hondo (donde H es profundidad).
- Las actualizaciones de las mediciones se realizan una vez por segundo
- Se debe presionar REINICIAR antes de iniciar una nueva medición, esto es necesario para una mejor medición y precisión.
- Si la hélice se detiene, mientras se realiza la medición de flujo, limpiar hasta que la hélice gire sin problemas y empezar de nuevo.

Descripción del cálculo del caudal.

- Se utilizó una hoja de campo donde se anotó el número de tramos, número de mediciones, ancho del cauce, profundidad del lecho, velocidad tanto al medio como los costados, las mediciones pueden ser n medidas que dependerá del ancho del río.
- Ya obtenida los datos requeridos, se procedió a digitar los valores en un formato de medición de caudal diseñados en una hoja de cálculo de Excel.

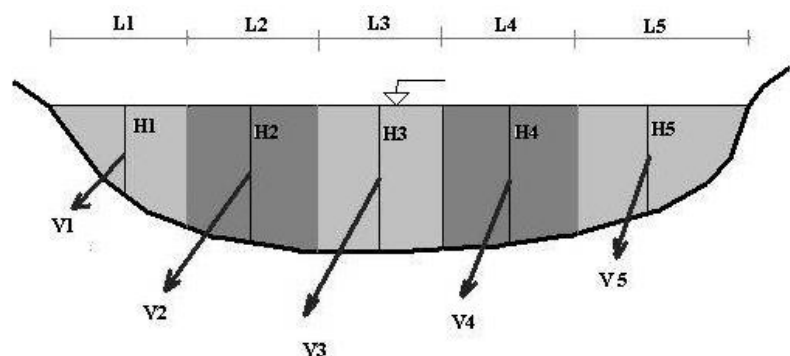
$$Q_1 = A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3 + \dots + A_nV_n \quad (24)$$

Donde:

- Q_1 = Caudal en m^3/s
- A_n = Área Transversal en m^2
- V_n = Velocidad de flujo en m/s

Figura 8

Caudal aforo volumétrico fuente de agua superficial



Fuente: Ortega (2014).

3.5.1.2. Aforo por el método del flotador

El método del flotador se utiliza en caso no se cuente con un equipo de medición, además pueden influir en otros factores, para la determinación del caudal se requerirá la medición de la anchura extendiendo una cuerda entre ambas orillas y profundidad tanto en el medio como a las orillas para determinar el área transversal, para la medición de la velocidad, se sigue el siguiente procedimiento:

- Ubicar el tramo más homogéneo.
- Se estima la longitud adecuada por el que el flotador recorrerá entre una distancia de 30 a 100 metros, de acuerdo al tamaño y caudal del río.
- Se usó un flotador de fácil visibilidad (pelota de Tecnopor)
- Comienza la operación tirando el flotador donde comienza el tramo.
- Tomar el tiempo con un cronómetro hasta culminar el tramo.
- Se realizó varias mediciones para tomar el valor promedio y descartar valores fuera del límite que pudieron errarse durante el recorrido.

Descripción del cálculo del caudal.

- Para el cálculo del caudal se utilizará el producto de la multiplicación del área transversal con la velocidad registrada en promedio.

$$V = \frac{d}{t} \quad (25)$$

Donde:

- V = Velocidad en m/s.
- d = Distancia recorrida en m.
- t = tiempo de llegada en s.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se dará a conocer los datos recopilados y resultados necesarios para conseguir los objetivos del trabajo de investigación, por medio de fundamentos, figuras, tablas, mapas, interpretándolas con una posterior discusión del estudio, en función del marco teórico además del manejo de los antecedentes.

El objetivo principal se enfoca en realizar el cálculo de la capacidad de autodepuración del río Coata por la descarga de materia orgánica en las aguas del río Coata tomando como referencia los datos de calidad de agua registrados por el laboratorio del PEBLT que son necesarios para el cálculo del modelo de Streeter Phelps como también de evaluar el comportamiento de sus aguas a lo largo de su recorrido hasta su desembocadura al Lago Titicaca, lo que nos permitirá evaluar con una percepción espacio temporal los niveles de afectación a lo largo de diferentes tramos.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE CALIDAD DE AGUA E HIDROLÓGICA DEL RÍO COATA

4.1.1. Caracterización física, química y biológica del río Coata

En las siguientes tablas se presentan los resultados de las mediciones en campo y ensayos de laboratorio de muestras colectadas para diversos parámetros llevados a cabo en los diferentes periodos para esta investigación.

Se tomaron en consideración los parámetros fisicoquímicos tomados *in situ* con el manejo del multiparámetro Horiba y el turbidímetro Hach, mientras que los nutrientes fueron analizados en el laboratorio de calidad de agua del PEBLT mediante el uso de la técnica instrumental de lectura del



Espectrofotómetro UV DR-4000, utilizando sachet de la marca HACH para muestras de 25 mL para cada nutriente.

Para el caso de los parámetros biológicos, tanto la DBO₅ como los coliformes fecales solo se tomaron en cuenta el último periodo llevando las muestras correspondientes a un laboratorio acreditado para obtener los resultados más confiables en los Laboratorios Analíticos del Sur S.A. necesarios para los objetivos.

Los datos obtenidos para la caracterización de calidad de las aguas del río Coata fueron extraídos de la data del estudio de “Monitoreo y evaluación de carga contaminante del río Coata” realizado por el PEBLT, esta se puede observar en el anexo D.

4.1.1.1. Punto de monitoreo N° 01 – Puente Unocolla

Tabla 4

Caracterización física, química y microbiológica – Puente Unocolla

Punto de monitoreo N°01 – Puente Unocolla (C-B)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio- 22	Septiembre- 22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	10,60	10,10	10,97	14,47	10,10	14,47	11,54	1,722
pH	8,23	8,28	8,71	8,29	8,23	8,71	8,38	0,193
Conductivi dad (uS/cm)	1110	1360	1550	1670	1110	1670	1422,5	211,5
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6,42	6,56	6,80	5,54	5,54	6,80	6,33	0,476
Salinidad (%)	0,05	0,07	0,08	0,08	0,05	0,08	0,07	0,012
Turbiedad (NTU)	2,33	1,94	3,71	3,56	1,94	3,71	2,89	0,764
Nitratos (mg/L)	2,6	2,9	3,5	1,6	1,60	3,50	2,65	0,687
Nitritos (mg/L)	0,0135	0,0153	0,0120	0,0053	0,0053	0,0153	0,0115	0,004
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	0,02	0,0	0,01	0,04	0,00	0,04	0,02	0,015
Fosfatos (mg/L)	0,506	-	0,273	0,200	0,20	0,51	0,33	0,130
Sulfato (mg/L)	73,8	90,8	82,0	97,6	73,8	97,6	86,0	8,978
DBO5 (mg/L)	-	-	-	5,0	5,0	5,0	5,0	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	79,0	79,0	79,0	79,0	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 4, los resultados que se obtuvieron en el puente Unocolla, cuyo punto de monitoreo es considerado como blanco, ya que se encuentra antes del ingreso a la ciudad de Juliaca, fueron con una temperatura entre 10,10 a 14,47°C con una variación estándar (σ) media de 1,722, un pH entre 8,23 a 8,71 cuya variación es reducida con un promedio de 8,38, una conductividad entre 1110 a 1670 uS/cm siendo la dispersión mucho mayor para este parámetro con una desviación estándar de 211,5, el oxígeno disuelto entre 5,54 a 6,80 mg/L tiene una variación reducida con un promedio de 6,33 mg/L, salinidad entre 0,05 a 0,08% con una dispersión reducida con un promedio de 0,07%, la turbiedad entre 1,94 a 3,71 NTU con dispersión media con una σ de 0,764, los nitratos entre 1,6 a 3,5 mg/L con dispersión media con una σ de 0,687, nitritos entre 0,0053 a 0,0153 mg/L, tienen poca dispersión con un promedio de 0,0115 mg/L, nitrógeno amoniacal entre 0 a 0,04 mg/L, para este punto el nitrógeno amoniacal no sufre grandes alteraciones, fosfatos entre 0,2 a 0,51 mg/L con una dispersión media con una σ de 0,130, sulfatos entre 73,8 a 97,6 mg/L cuya dispersión es mayor con una σ de 8,978, y finalmente una DBO de 5 mg/L y coliformes fecales con 79 NMP/100mL que se analizaron en un solo mes.

En general, los resultados de los diferentes parámetros en el puente Unocolla tienen concentraciones muy bajas debido a que no tiene contacto con alguna fuente contaminante, dándonos resultados similares entre los máximos y mínimos provocando una desviación estándar muy baja, ya que no varía significativamente a lo largo de los meses.

4.1.1.2. Punto de monitoreo N° 02 – Puente Churi

Tabla 5

Caracterización física, química y microbiológica – Puente Churi

Punto de monitoreo N°02 – Puente Churi (C-1)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio-22	Septiembre-22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	12,73	11,60	13,25	17,27	11,60	17,27	13,71	2,139
pH	8,27	8,32	8,69	8,75	8,27	8,75	8,51	0,214
Conductividad (uS/cm)	1080	1390	1550	1670	1080	1670	1422	221,3
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6,23	7,01	6,83	6,69	6,23	7,01	6,69	0,289
Salinidad (%)	0,05	0,07	0,08	0,08	0,05	0,08	0,07	0,012
Turbiedad (NTU)	1,97	1,59	1,61	1,63	1,59	1,97	1,70	0,157
Nitratos (mg/L)	2,9	2,8	3,2	1,8	1,80	3,20	2,68	0,526
Nitritos (mg/L)	0,0132	0,0142	0,0080	0,0080	0,008	0,014	0,011	0,003
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	0,0	0,0	0,03	0,78	0,0	0,78	0,20	0,334
Fosfatos (mg/L)	0,237	-	0,167	0,450	0,167	0,450	0,28	0,120
Sulfato (mg/L)	75,6	87,2	80,0	97,2	75,6	97,2	85,0	8,171
DBO5 (mg/L)	-	-	-	5,0	5,0	5,0	5,0	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	49,0	49,0	49,0	49,0	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 5, los resultados que se obtuvieron en el puente Churi, cuyo punto de monitoreo es considerado como punto inicial, ya que se encuentra 1 Km antes del contacto con las aguas residuales nos dieron resultados de una temperatura entre 11,60 a 17,27°C variando significativamente con una desviación estándar (σ) de 2,139, un pH entre 8,27 a 8,75 con una σ media de 0,214, una conductividad entre 1080 a 1670 uS/cm cuya dispersión es la más alta teniendo una σ de 221,3, un oxígeno disuelto entre 6,23 a 7,01 mg/L con una dispersión media con σ de 0,289, una salinidad entre 0,05 a 0,08% con poca dispersión con un promedio de 0,07%, la turbiedad entre 1,59 a 1,97 NTU con poca dispersión, tiene un promedio de 1,7 NTU, nitratos entre 1,8 a 3,2 mg/L con una dispersión media con σ de 0,526, nitritos entre 0,008 a 0,014 mg/L con una dispersión baja con un promedio de 0,011 mg/L, nitrógeno amoniacal entre 0 a 0,78 mg/L con una dispersión media con σ de 0,334, fosfatos entre 0,167 a 0,45 mg/L con una σ de 0,120, sulfatos entre 75,6 a 97,2 mg/L con mayor σ de 8.171 y una DBO de 5 mg/L y coliformes fecales con 49 NMP/100mL que se midieron en un solo mes.

En general, los resultados en el puente Churi no sufren gran alteración en comparación con el punto de monitoreo del puente Unocolla, ya que al igual que esta, no tiene contacto con la fuente contaminante, sin embargo, por su trayecto que pasa a través de la ciudad de Juliaca, hay fuentes contaminantes en menor escala por los vertimientos clandestinos que alteran ligeramente su calidad, pero de acuerdo a los resultados, no es tan significativo.

4.1.1.3. Punto de monitoreo N° 03 – Puente Canchi Chico

Tabla 6

Caracterización física, química y microbiológica – Puente Canchi Chico

Punto de monitoreo N°03 – Puente Canchi Chico (C-2)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio- 22	Septiembre-22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	11,69	10,67	13,18	16,35	10,67	16,35	12,97	2,145
pH	8,11	8,07	8,37	8,15	8,07	8,37	8,18	0,116
Conductivi dad (uS/cm)	1260	1580	1680	1830	1260	1830	1588	209,0
Oxígeno Disuelto (mg/L)	5,31	5,48	4,03	4,68	4,03	5,48	4,88	0,572
Salinidad (%)	0,06	0,08	0,08	0,09	0,06	0,09	0,08	0,011
Turbiedad (NTU)	3,16	2,07	10,80	17,70	2,07	17,70	8,43	6,320
Nitratos (mg/L)	3,5	3,6	4,9	3,9	3,50	4,90	3,98	0,554
Nitritos (mg/L)	0,0150	0,0212	0,0150	0,0211	0,0150	0,0212	0,0181	0,0031
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	1,35	3,73	4,75	12,47	1,35	12,47	5,58	4,168
Fosfatos (mg/L)	0,996	-	1,751	1,870	0,996	1,87	1,54	0,387
Sulfato (mg/L)	89,0	89,8	76,0	93,8	76,0	93,8	87,1	6,689
DBO5 (mg/L)	-	-	-	12,6	12,6	12,6	12,6	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	1300	1300	1300	1300	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 6, los resultados que se obtuvieron en el puente Canchi Chico, cuyo punto de monitoreo es considerado como punto de mezcla, ya que este punto se encuentra a 1 Km aguas abajo entre la unión entre el río Coata y el río Torococha (fuente contaminante), dándonos los siguiente resultados: una temperatura entre 10,67 a 16,35°C con una desviación estándar (σ) alta de 2,145, un pH entre 8,07 a 8,37 cuya dispersión es media con σ de 0,116, una conductividad entre 1260 a 1830 uS/cm siendo el parámetro con mayor dispersión con σ de 209, un oxígeno disuelto entre 4,03 a 5,48 mg/L con una dispersión media de 0,572, salinidad entre 0,06 a 0,09% con dispersión baja dando un promedio de 0,08%, turbiedad entre 2,07 a 17,7 NTU obteniendo una dispersión alta con una σ de 6,32, ya que la cantidad de sólidos presentes en el agua se incrementa significativamente, nitratos entre 3,5 a 7,9 mg/L con una dispersión media con una σ de 0,554, nitritos entre 0,0150 a 0,0212 mg/L cuya dispersión es reducida con un promedio de 0,0181 ya que su aparición se da kilómetros más arriba, nitrógeno amoniacal entre 1,35 a 12,47 mg/L cuya afectación se visualiza en este punto con una σ de 4,168, fosfatos entre 0,996 a 1,87 mg/L, de igual forma tiene una afectación alta con una σ de 0,387, sulfatos entre 76 a 93,8 mg/L con una σ media de 6,689 y una DBO de 12,6 mg/L y coliformes fecales con 1300 NMP/100mL que se midieron en un solo mes.

En general, el puente Churi es quien sufre las mayores afectaciones en los diferentes parámetros a través de los meses, siendo los parámetros más afectados la conductividad, oxígeno disuelto, turbiedad, nitrógeno amoniacal y fosfatos.

4.1.1.4. Punto de monitoreo N° 04 – Punto Intermedio

Tabla 7

Caracterización física, química y microbiológica – Punto Intermedio

Punto de monitoreo N°04 – Punto intermedio (C-3)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio- 22	Septiembre-22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	12,85	12,16	16,04	17,73	12,16	17,73	14,70	2,283
pH	8,40	8,21	8,82	8,31	8,21	8,82	8,44	0,232
Conductivi dad (uS/cm)	1280	1590	1680	1830	1280	1830	1595	201,1
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6,65	6,32	7,53	6,75	6,32	7,53	6,81	0,444
Salinidad (%)	0,06	0,08	0,08	0,09	0,06	0,09	0,08	0,011
Turbiedad (NTU)	3,13	1,68	1,77	19,70	1,68	19,70	6,57	7,602
Nitratos (mg/L)	3,4	4,2	5,3	7,3	3,40	7,30	5,05	1,464
Nitritos (mg/L)	0,0366	0,0349	0,4750	0,3582	0,0349	0,4750	0,2262	0,1949
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	2,17	3,34	0,46	4,1	0,46	4,10	2,52	1,372
Fosfatos (mg/L)	1,053	-	1,776	1,240	1,053	1,78	1,36	0,306
Sulfato (mg/L)	71,0	83,2	74,0	96,0	71,0	96,0	81,05	9,732
DBO5 (mg/L)	-	-	-	8,0	8,0	8,0	8,0	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	23,0	23,0	23,0	23,0	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 7, los resultados que se obtuvieron en el punto intermedio, cuyo punto de monitoreo se encuentra en medio del río Coata al estar ubicado a 16 Km aguas abajo del vertimiento se obtuvieron los siguientes resultados: una temperatura entre 12,16 a 17,73°C cuya desviación estándar (σ) fue de 2,283, un pH entre 8,21 a 8,82 cuya dispersión es media con un σ de 0,232, una conductividad entre 1280 a 1830 uS/cm cuya desviación es la más alta con un σ de 201,1, oxígeno disuelto entre 6,32 a 7,53 mg/L con una dispersión media con σ de 0,444, salinidad entre 0,06 a 0,09% con una dispersión baja con un promedio de 0,08%, turbiedad entre 1,68 a 19,7 NTU cuya dispersión es muy alta con una σ de 7,602 por el transporte de material particulado, nitratos entre 3,4 a 7,3 mg/L cuya dispersión es muy alta con un σ de 1,464 por la oxidación de compuestos nitrogenados, nitritos entre 0,0349 a 0,4750 mg/L cuya dispersión también es la más alta con un σ de 0,1949, nitrógeno amoniacal entre 0,46 a 4,1 mg/L con dispersión alta con un σ de 1,372, fosfatos entre 1,053 a 1,78 mg/L con dispersión más reducida con un σ de 0,306, sulfatos entre 71 a 96 mg/L con dispersión media con σ de 9,732 y una DBO de 8 mg/L y coliformes fecales con 23 NMP/100mL que se midieron en el último mes. En general, los parámetros de mayor relevancia son la conductividad, turbiedad, nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal.

4.1.1.5. Punto de monitoreo N° 05 – Puente Coata

Tabla 8

Caracterización física, química y microbiológica – Puente Coata

Punto de monitoreo N°05 – Puente Coata (C-4)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio-22	Septiembre-22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	11,58	11,00	14,72	15,93	11,0	15,93	13,31	2,073
pH	8,11	8,09	8,73	8,34	8,09	8,73	8,32	0,258
Conductividad (uS/cm)	1270	1580	1670	1860	1270	1860	1595	213,1
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6,86	5,72	5,88	4,13	4,13	6,86	5,65	0,979
Salinidad (%)	0,06	0,08	0,08	0,09	0,06	0,09	0,08	0,011
Turbiedad (NTU)	2,50	2,26	2,83	1,76	1,76	2,83	2,34	0,390
Nitratos (mg/L)	3,8	3,3	5,8	4,6	3,30	5,8	4,38	0,944
Nitritos (mg/L)	0,0395	0,0435	0,2960	0,3154	0,0395	0,3154	0,0173	0,132
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	1,8	3,34	0,09	2,09	0,09	3,34	1,83	1,159
Fosfatos (mg/L)	0,991	-	1,796	1,350	0,991	1,796	1,38	0,329
Sulfato (mg/L)	74,4	83,0	74,0	92,6	74,0	92,6	81,0	7,601
DBO5 (mg/L)	-	-	-	7,0	7,0	7,0	7,0	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	11,0	11,0	11,0	11,0	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 8, los resultados que se obtuvieron en el puente Coata, cuyo punto de monitoreo es considerado como punto crítico por el problema social y ambiental sobre este distrito, ya que consumen estas aguas, se obtuvieron los siguientes resultados: fueron una temperatura entre 11,0 a 15,93°C con una desviación estándar (σ) fue de 2,073, un pH entre 8,09 a 8,73 con una dispersión baja con una σ de 0,258, una conductividad entre 1270 a 1860 uS/cm cuya dispersión es la más alta con un σ de 213,1, oxígeno disuelto entre 4,13 a 6,86 mg/L con una dispersión alta con un σ de 0,979, salinidad entre 0,06 a 0,09% con un promedio de 0,008%, turbiedad entre 1,76 a 2,83 NTU con una dispersión baja por la reducción de material particulado con un promedio de 0,39 NTU, nitratos entre 3,3 a 5,8 mg/L con una dispersión media con un σ de 0,944, nitritos entre 0,0395 a 0,3154 mg/L con una dispersión muy alta con una σ de 0,132, nitrógeno amoniacal entre 0,09 a 3,34 mg/L con una dispersión alta con una σ de 1,159, fosfatos entre 0,991 a 1,796 mg/L con una dispersión media de 0,329, sulfatos entre 74 a 92,6 mg/L con una dispersión media con un σ de 7,601 y una DBO de 7 mg/L y coliformes fecales con 11 NMP/100mL que se midieron en un mes.

En general, la concentración de los diferentes parámetros va reduciendo la dispersión entre datos, teniendo los parámetros más relevantes a la conductividad, oxígeno disuelto, nitritos y nitrógeno amoniacal.

4.1.1.6. Punto de monitoreo N° 06 – Desembocadura**Tabla 9***Caracterización física, química y microbiológica – Desembocadura*

Punto de monitoreo N°06 – Desembocadura (C-5)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio- 22	Septiembre-22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	12,17	13,06	14,93	15,36	12,17	15,36	13,88	1,312
pH	8,27	8,16	8,82	8,36	8,16	8,82	8,40	0,251
Conductividad (uS/cm)	1250	1600	1670	1870	1250	1870	1598	223,8
Oxígeno Disuelto (mg/L)	7,55	5,91	6,77	4,57	4,57	7,55	6,20	1,105
Salinidad (%)	0,06	0,08	0,08	0,09	0,06	0,09	0,08	0,011
Turbiedad (NTU)	3,54	4,20	4,31	3,57	3,54	4,31	3,91	0,352
Nitratos (mg/L)	4,1	3,4	4,3	3,8	3,40	4,30	3,90	0,339
Nitritos (mg/L)	0,0374	0,0452	0,2940	0,1959	0,0374	0,2940	0,143	0,107
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	1,47	3,41	0,13	0,78	0,13	3,41	1,45	1,228
Fosfatos (mg/L)	0,890	-	1,747	1,380	0,890	1,747	1,34	0,351
Sulfato (mg/L)	71,6	83,2	78,0	91,8	71,6	91,8	81,15	7,395
DBO5 (mg/L)	-	-	-	7,0	7,0	7,0	7,0	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	4,5	4,5	4,5	4,5	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 9, los resultados que se obtuvieron en la desembocadura del río Coata al Lago Titicaca, se obtuvieron los siguientes resultados: una temperatura entre 12,17 a 15,36°C con una desviación estándar (σ) de 1,312, un pH entre 8,16 a 8,82 con un promedio de 8,4, una conductividad entre 1250 a 1870 uS/cm con la dispersión más alta con un σ de 223,8, oxígeno disuelto entre 4,57 a 7,55 mg/L con una dispersión alta con un σ de 1,105, salinidad entre 0,06 a 0,09% con un promedio de 0,08%, turbiedad entre 3,54 a 4,31 NTU con una dispersión baja con un σ de 0,352, nitratos entre 3,4 a 4,3 mg/L con una dispersión baja con un σ de 0,339, nitritos entre 0,0374 a 0,2940 mg/L con una dispersión alta con σ de 0,107, nitrógeno amoniacal entre 0,13 a 3,41 mg/L con dispersión media con un σ de 1,228, fosfatos entre 0,89 a 1,747 mg/L con dispersión media con un σ de 0,351, sulfatos entre 71,6 a 91,8 mg/L con un σ de 7,395 y una DBO de 7 mg/L y coliformes fecales con 4,5 NMP/100mL que se midieron en un mes.

En general, la mayoría de los parámetros se encuentran estabilizados, siendo los parámetros con mayor relevancia a la conductividad, oxígeno disuelto y nitritos.

4.1.1.7. Punto de monitoreo N° 07 – Río Torococha (Aguas residuales)

Tabla 10

Caracterización física, química y microbiológica – Río Torococha

Punto de monitoreo N°07 – Río Torococha (RT-AR)								
Parámetros/ unidad	Mayo-22	Julio- 22	Septiembre-22	Junio-23	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura (°C)	13,14	12,07	14,92	18,09	12,07	18,09	14,56	2,281
pH	7,53	7,65	7,68	7,65	7,53	7,68	7,63	0,058
Conductivi dad (uS/cm)	2810	2950	3230	3130	2810	3230	3030	161,9
Oxígeno Disuelto (mg/L)	1,07	1,29	0,95	0,85	0,85	1,29	1,04	0,164
Salinidad (%)	0,14	0,15	0,17	0,16	0,14	0,17	0,16	0,011
Turbiedad (NTU)	162,0	120,0	188,0	186,0	120,0	188,0	164,0	27,386
Nitratos (mg/L)	97,5	80,0	80,0	72,5	72,5	97,5	82,5	9,186
Nitritos (mg/L)	0,1832	0,2086	0,1880	0,1700	0,1700	0,2086	0,1875	0,0139
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	74,0	97,0	82,5	89,4	74,0	97,0	85,73	8,493
Fosfatos (mg/L)	32,44	-	33,80	41,20	32,44	41,20	35,81	3,849
Sulfato (mg/L)	120,8	140,0	135,0	69,8	69,8	140,0	116,4	27,811
DBO5 (mg/L)	-	-	-	143,4	143,4	143,4	143,4	0
Coliformes Fecales (NMP/ 100mL)	-	-	-	49x10 ⁴	49x10 ⁴	49x10 ⁴	49x10 ⁴	0

Fuente: Monitoreo y evaluación de carga contaminante del PEBLT – 2022



De acuerdo a la tabla 10, los resultados que se obtuvieron en las aguas del río Torococha que contienen aguas residuales obtuvieron los siguientes resultados: una temperatura entre 12,07 a 18,09°C con una desviación estándar (σ) de 2,281, un pH entre 7,53 a 7,68 con un promedio de 7,63 conteniendo aguas con características acidas en comparación con el río Coata con características alcalinas, una conductividad entre 2810 a 3230 uS/cm con una σ alta de 161,9, oxígeno disuelto entre 0,85 a 1,29 mg/L con una σ media de 0,164, salinidad entre 0,14 a 0,17% con un promedio de 0,16%, turbiedad entre 120 a 188 NTU cuyos resultados son excesivamente altos por la cantidad de contaminantes que llevan sus aguas, nitratos entre 72,5 a 97,5 mg/L, de igual forma con altas concentraciones cuyo σ es de 9,186, nitritos entre 0,170 a 0,2086 mg/L con una σ de 0,0139, nitrógeno amoniacal entre 0,74 a 0,97 mg/L con una σ de 8,493, fosfatos entre 32,44 a 41,20 mg/L con concentraciones altas con una σ de 3,849, sulfatos entre 69,8 a 140 mg/L con una σ de 27,811 y una DBO de 143,4 mg/L y coliformes fecales con 49×10^4 NMP/100mL que se midieron en un mes. En general, al contener aguas residuales, los parámetros varían considerablemente, siendo los parámetros de mayor relevancia al pH, oxígeno disuelto, conductividad, salinidad, turbiedad, nitratos, nitrógeno amoniacal, DBO y coliformes fecales.

Los datos de las tablas 4 al 10 son los resultados obtenidos durante cuatro periodos sobre siete puntos de monitoreo donde seis de ellos son del río Coata para su análisis como agua superficial y uno en el río Torococha para su análisis como agua residual, en ambos casos se tomó en consideración los mismos parámetros fisicoquímicos que serán necesarios



para desarrollar cada uno de los objetivos. Con estas tablas se cumplen con el primer objetivo de caracterizar física, química y biológica cada punto establecido en la investigación.

Para realizar el segundo objetivo de la aplicación del modelamiento matemático, se consideró los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno del último periodo que será expresado en el apartado 5.2 de la presente investigación, esto solo para el caso de cuatro puntos de monitoreo (puente Churi, punto intermedio, puente Coata y río Torococha) en conexión con los datos del apartado 5.1.2.

Para realizar el tercer objetivo, se consideró, además de los parámetros ya mencionados, el pH, conductividad eléctrica, salinidad, turbiedad, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, fosfatos, sulfatos y coliformes termotolerantes de los cuatro periodos. Con todos estos parámetros se realizó la evaluación del comportamiento espacio temporal de los parámetros físicos, químicos y biológicos por la acción autopurificadora del río Coata en función de los caudales mensuales a la vez que las tablas del 4 al 9 serán interpretadas en la sección 5.3 del presente informe mediante el manejo de gráficos y mapas para un mejor diagnóstico.

4.1.2. Caracterización hidrológica del río Coata

Para determinar las características hidrológicas del río Coata, considerando las condiciones de la corriente del agua, se utilizó el método del correntómetro en tres puntos de aforo para verificar la diferencia entre diversos tramos, tomando en cuenta también su accesibilidad y la prioridad de su medición,

mientras que para el caso de las aguas residuales del río Torococha, se consideró utilizar el método del flotador, por las características mismas de sus aguas, ya que no cumplen con las especificaciones para el manejo del correntómetro además de su difícil acceso, para ambos casos se dispuso el producto del área por velocidad de pequeños tramos dependiendo al ancho del río, con el cual se determinó el caudal y velocidad del flujo.

Los resultados obtenidos para cada punto de monitoreo fueron calculados según la recopilación de datos que genera el correntómetro, estas se pueden visualizar en los anexos E, F y G utilizando el promedio de cada parámetro sintetizado en las tablas 11, 12 y 13 para cada tramo.

4.1.2.1. Caracterización hidrológica del Puente Churi (Punto Inicial)

Tabla 11

Caracterización hidrológica del puente Churi (Punto Inicial)


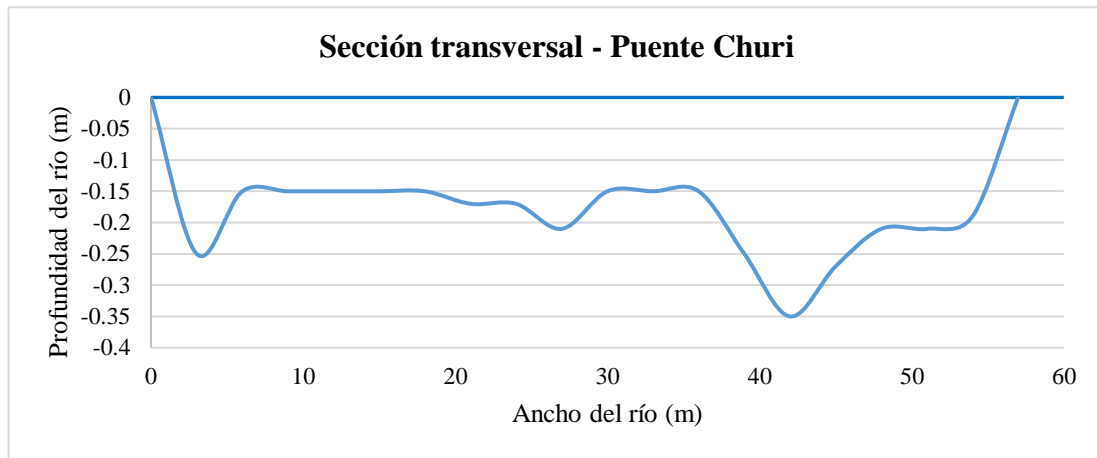
Puntos de Monitoreo		Punto Inicial		
Este	385205,8 m			
Norte	8286564,3 m			
Altitud	3832 m.s.n.m.			
Distancia	0 Km			
Temperatura agua	17,27°C			
Parámetros Hidrológicos				
Área total (m ²)	Velocidad promedio(m/s)	Profundidad promedio (m)	Caudal (m ³ /s)	Ancho (m)
10,44	0,368	0,19	4,239	57,0
Sección de Aforo				

Figura 9

Sección transversal del puente Churi



Fuente: Elaboración propia

La primera caracterización hidrológica para el modelamiento matemático de autodepuración del río Coata será definido por el puente Churi, punto libre de contaminación de carga orgánica, para este punto se utilizó el método del correntómetro por las características mismas del río. Según la tabla 11, se considera una distancia de 0 Km por ser el punto de partida, la temperatura del agua alcanza un valor de 17,27°C.

Para el cálculo del área se usó la sumatoria total del área transversal de cada medición de velocidad por sección, dando un total de 10,44 m², para el cálculo de la velocidad se usó el promedio de cada sección dando un valor de 0,348 m/s, la profundidad promedio es de 0,19 m, mientras que la profundidad máxima reportada fue de 0,35 m según la figura 9, el ancho total del río es de 57 metros de distancia y el caudal promedio de toda la sección usando los datos anteriores fue de 4,239 m³/s

4.1.2.2. Caracterización hidrológica del punto intermedio

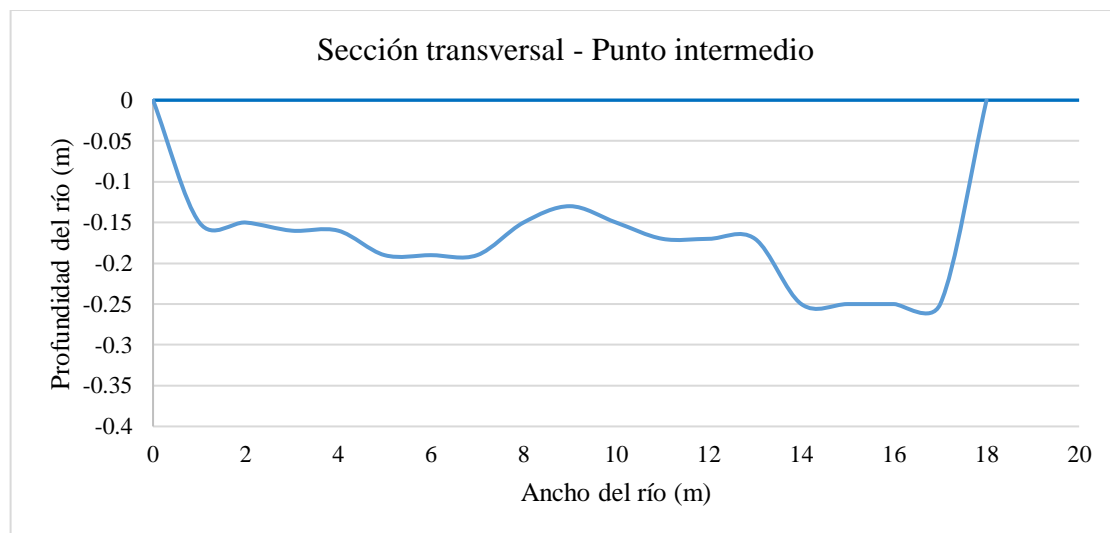
Tabla 12

Caracterización hidrológica del punto intermedio

Puntos de Monitoreo		Punto intermedio		
Este	390796,0 m			
Norte	8279983,8 m			
Altitud	3829 m.s.n.m.			
Distancia	16 Km			
Temperatura agua	17,73°C			
Parámetros Hidrológicos				
Área total (m ²)	Velocidad prom. (m/s)	Profundidad promedio (m)	Caudal (m ³ /s)	Ancho (m)
3,13	0,703	0,18	2,249	18,0
Sección de Aforo				

Figura 10

Sección transversal del punto Intermedio



Fuente: Elaboración propia

La segunda caracterización se realizó en el punto intermedio del río Coata, punto donde varios de los parámetros fisicoquímicos ya sufren

alteraciones conforme avanza su recorrido, para este punto también se realizó el método del correntómetro por las características del río mismo.

Para el cálculo del área se usó la sumatoria total del área transversal por sección, dando un total de $3,13 \text{ m}^2$, un área muy baja en relación del puente Churi debido al corto ancho que tiene el río para este punto con 18 metros de distancia, para el cálculo de la velocidad se usó el promedio de cada sección dando un valor de $0,703 \text{ m}^2/\text{s}$, este valor se incrementa hasta en un doble, la profundidad promedio es de 0,18 m, mientras que la profundidad máxima reportada fue de 0,25 m según la figura 10, el caudal promedio de toda la sección usando los datos anteriores fue de $2,249 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1.2.3. Caracterización hidrológica del puente Coata (Punto final)

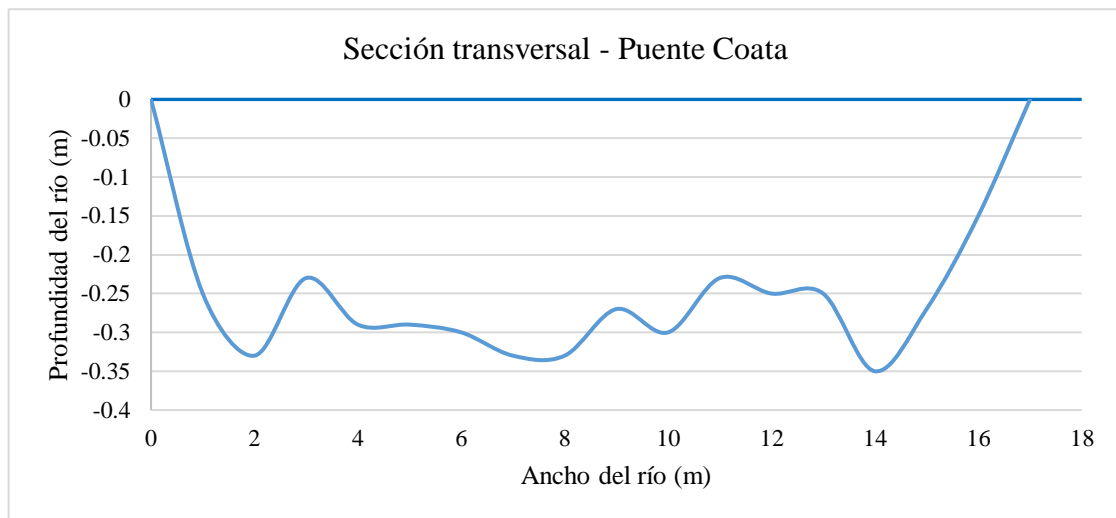
Tabla 13

Caracterización hidrológica del puente Coata (Punto final)

Puntos de Monitoreo		Punto final		
Este	397438,7 m			
Norte	8278918,6 m			
Altitud	3826 m			
Distancia	12 Km			
Temperatura agua	15,93°C			
Parámetros Hidrológicos				
Área total (m ²)	Velocidad promedio (m/s)	Profundidad promedio (m)	Caudal (m ³ /s)	Ancho (m)
4,42	0,416	0,28	1,866	17,0
Sección de Aforo				

Figura 11

Sección transversal del puente Coata



Fuente: Elaboración propia

La tercera caracterización se realizó en el puente Coata, punto de mayores concentraciones de contaminantes y bajos caudales, para este punto también se realizó el método del correntómetro por las características del río mismo.

Para el cálculo del área se usó la sumatoria total del área transversal por sección, dando un total de 4,42 m², un área similar al punto intermedio por poseer características similares, para el cálculo de la velocidad se usó el promedio de cada sección dando un valor de 0,416 m/s, este valor se reduce a casi la mitad pero se compensa con la profundidad de 0,28 m en promedio, siendo esta casi el doble y profundidad máxima de 0,35 m según la figura 11, el caudal promedio de toda la sección fue de 1,866 m³/s.

4.1.2.4. Caracterización hidrológica del Río Torococha

Tabla 14

Medición de parámetros del efluente del río Torococha

Parámetro	Unidad	Sigla	1ra medición	2da medición	3ra medición	Promedio
Ancho	m	a	2,5	2,47	2,52	2,497
Profundidad	m	h	0,35	0,36	0,36	0,357
Tiempo	s	t	27,5	26,8	26,1	26,8
Distancia	m	L	10			

Tabla 15

Cálculo de parámetros hidrológicos del río Torococha

Parámetro	Unidad	Sigla	Ecuación	Resultado
Área	m ²	A	a*h	0,890
Velocidad	m/s	V	L/t	0,373
Caudal	m ³ /s	Q	A*V	0,332

Tabla 16

Caracterización Hidrológica del efluente del río Torococha

Puntos de Monitoreo		Punto Final		
Este	385131,5			
Norte	8285217,6			
Altitud	3832			
Distancia desde el punto inicial	1,2 Km			
T°C agua	18,09			
Parámetros Hidrológicos				
Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Caudal (m ³ /s)	Ancho (m)
0,89	0,373	0,357	0,332	2,497



Para el cálculo del caudal del río Torococha se usó el método del flotador debido a que las aguas a ser medidas no son adecuadas para el manejo del correntómetro pudiendo causar daños al equipo.

Según la tabla 14, se observa que para este cálculo se tomó en consideración tres mediciones de ancho, profundidad y tiempo dando un promedio de 2,497 m, 0,357 m y 26,8 segundos respectivamente. Obteniendo estos resultados se calcula las características hidrológicas dando un área de $0,89 \text{ m}^2$, una velocidad de $0,373 \text{ m/s}$, una profundidad de $0,357$ y un ancho de $2,497 \text{ m}$, con estos resultados se calculó el caudal de $0,332 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1.2.5. Caudal mensual de la estación Unocolla – Senamhi

Considerando que cada año, la época de lluvia es diferente además que en los últimos años se ha venido dando un déficit de lluvias, principalmente en el presente año, ya de acuerdo con el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), enero fue el más seco de los últimos 59 años, y según el SENAMHI el altiplano puneño tuvo déficit de lluvias entre el 30 hasta el 100%. Estas condiciones repercuten en la capacidad auto depurativa de los ríos frente a fuentes contaminantes. Para una mejor evaluación del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, tomando en cuenta que se tiene datos de cuatro periodos diferentes en dos años, se solicitó los datos de Hidrología de pronóstico de caudales PHISIS de la estación Pte. Coata-Unocolla que registra sus datos de forma diaria, esto nos permitió una mejor evaluación a través del promedio mensual de sus datos. La tabla 17 nos muestra los caudales mensuales de los últimos dos años.

Tabla 17

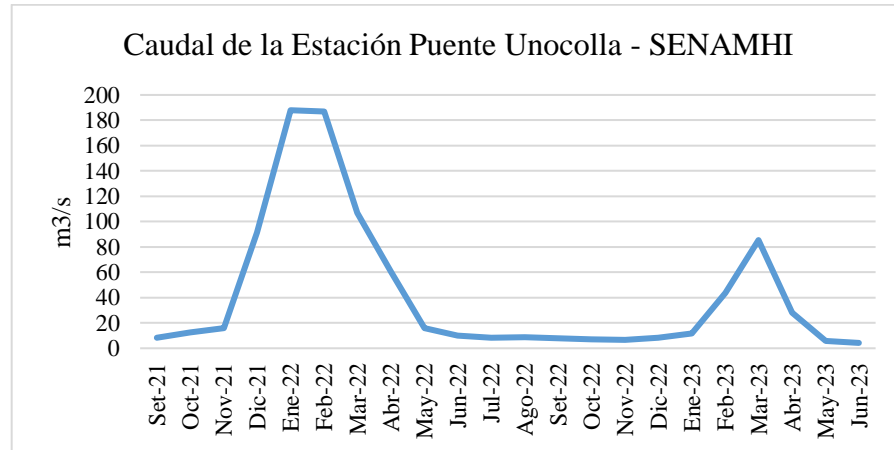
Estadístico caudal mensual promedio de la estación Unocolla - Senamhi

MES/AÑO	2021	2022	2023
Enero	-	187,92	11,76
Febrero	-	187,07	43,69
Marzo	-	106,94	85,45
Abril	-	60,59	28,31
Mayo	-	15,93	5,92
Junio	-	9,98	4,24
Julio	-	8,47	-
Agosto	-	8,82	-
Setiembre	8,26	7,7	-
Octubre	12,45	7,11	-
Noviembre	15,92	6,59	-
Diciembre	91,39	8,4	-

Fuente: Pronostico Hidrológico de la estación Unocolla – SENAMHI

Figura 12

Histograma de caudal mensual promedio 2021-2023



Fuente: Elaboración propia

4.2. DESARROLLO DEL MODELO DE STREETER PHELPS

Para el análisis de la capacidad autodepurativa del río Coata por afectación de las aguas residuales del río Torococha se consideró el modelo de Streeter y Phelps por medio de los coeficientes cinéticos de autodepuración, que ha sido validado por diversos trabajos de investigación que tienen que ver con la calidad del agua.



4.2.1. Tramos de modelación

Para el modelamiento del río Coata, tomando en cuenta que el río presenta diferentes características hidrológicas (velocidad, ancho, profundidad y caudal) a lo largo de su recorrido, se tomó en consideración la división del río en tres partes llamadas tramos para una mejor evaluación e identificar si existe variación entre ellas, por lo que se consideró de la siguiente manera:

- El primer tramo inicia en el punto denominado Puente Churi, punto donde se encuentra libre de contaminación, seguido de la fuente contaminante proveniente del río Torococha a 1 Km de distancia, que descarga aguas residuales con altas concentraciones de carga orgánica, terminando su recorrido en el punto intermedio dando un total de 16 Km de recorrido.
- El segundo tramo inicia en el punto intermedio, durante su recorrido no se tiene más fuentes contaminantes, terminando el tramo en el puente Coata sumando una distancia de 12 Km.
- El tercer tramo inicia en el puente Coata, de igual forma, ya no cuenta con fuentes contaminantes, terminando su recorrido en la desembocadura del Lago Titicaca, terminando con una distancia de 14 Km.

Para la aplicación del modelo de Streeter Phelps, se tomará en cuenta parámetros de calidad de agua y características hidrológicas de cada tramo.

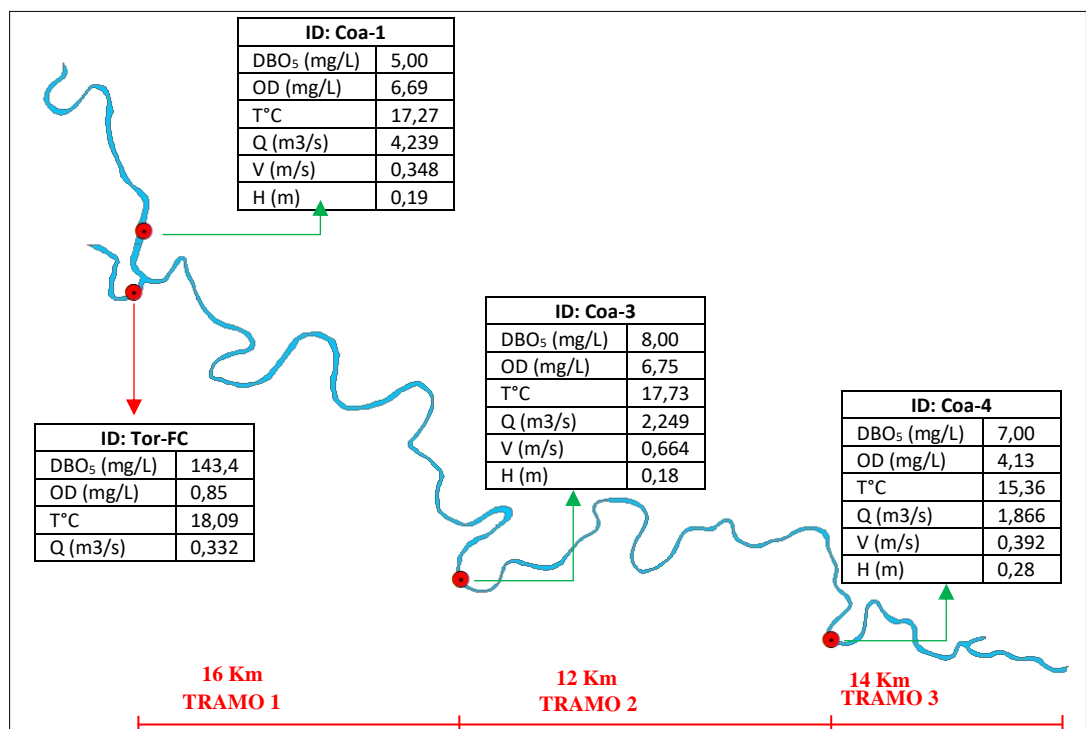
Tabla 18

Datos para la aplicación del modelo de Streeter Phelps del río Coata

Parámetro	Tramo I	Tramo II	Tramo III	Fuente Contam.	Unidad
OD	5,69	6,75	4,13	0,85	mg/L
DBO5	5,00	8,00	7,00	143,4	mg/L
Temperatura	17,27	17,73	15,93	18,09	°C
Caudal	4,239	2,249	1,866	0,332	m ³ /s
Velocidad	0,348	0,664	0,392	0,373	m ² /s
Profundidad	0,19	0,18	0,28	0,357	m
Distancia	16	12	14	-	Km

Figura 13

Tramos de estudio del río Coata: Estaciones y condiciones



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Análisis de variables del primer tramo

Conociendo los valores hidrológicos y calidad de agua necesarios para la aplicación del modelo de Streeter Phelps tanto del río Coata como de la fuente

contaminante se aplicó las siguientes ecuaciones mostradas en la tabla 19 dando como resultado los siguientes valores:

Tabla 19

Cálculo de las variables de modelamiento para el tramo I del río Coata

PARÁMETRO/ VARIABLE	ECUACIÓN	RESULTADO
Duración de trayecto	$t = \frac{L}{V}$	12,08 h
Distancia de Homogenización	$L_m = 0,12 * V \frac{B^2}{H}$	755,1 m
Balance de OD	$OD_0 = \frac{OD_R * Q_R + OD_V * Q}{Q_R + Q_V}$	6,266 mg/L
Balance de DBO	$DBO_0 = \frac{DBO_R * Q + DBO_V * Q_V}{Q_R + Q_V}$	15,052 mg/L
Balance de temperatura	$t_0 = \frac{t^{\circ}_R * Q_R + t^{\circ}_V * Q_V}{Q_R + Q_V}$	17,329°C
Oxígeno de saturación	$O_{sat} = 14,652 - 0,41022 * (T_m) + 0,007991 * (T_m^2) - 0,000077774 * (T_m^3)$	9,538 mg/L
Corrección del Oxígeno de saturación	$P = 760 * e^{\frac{-E}{8005}}$ $O_s = O_{sat} * \frac{P}{760}$	5,909 mg/L
Déficit de oxígeno inicial	$D_0 = C_s - OD$	-0,356 mg/L
Constante de reaireación	$K_r = 5,032 \frac{V^{0,67}}{H^{-1,85}}$	0,119 s ⁻¹
Constante de desoxigenación	$K_d = 0,3 * \left(\frac{H}{8}\right)^{-0,434}$	0,885 s ⁻¹
Corrección de Ka vs temperatura	$K_{a(t)} = K_{20} * \theta^{t^{\circ}-20}$	0,112 s ⁻¹
Corrección de Kd vs temperatura	$K_{d(t)} = K_{20} * \theta^{t^{\circ}-20}$	0,782 s ⁻¹
Factor de autopurificación	$f = \frac{K_a}{K_d}$	0,143
Distancia crítica	$X_c = \frac{1}{K_a - K_d} * \ln \left[\frac{K_a}{K_d} \left(1 - \frac{D_0 * (K_a - K_d)}{K_d * L_0} \right) \right]$	2,9 Km
Tiempo crítico	$T_c = \frac{X_c}{v}$	1,99 h
Déficit crítico de oxígeno	$D_c = \frac{K_d}{K_a} * DBO_0 * e^{-K_d * t_c}$	98,624 mg/L
Oxígeno disuelto crítico	$OD_c = O_s - D_c$	-92,714 mg/L
DBO Crítico	$DBO_c = DBO_0 * e^{-K_d * t_c}$	14,104 mg/L

Según los resultados obtenidos, se determinó que el tiempo de llegada de los contaminantes desde el puente Churi hasta el punto intermedio del río Coata toma un tiempo de 12,08 horas considerando las características hidrológicas del río, mientras que, para que la carga contaminante se homogenice con las aguas del



río le toma aproximadamente un recorrido de 755,1 metros de distancia (distancia en la cual se tomó en consideración para la selección del punto de muestreo del puente Canchi Chico).

También se calculó el balance de masas de DBO, OD y temperatura entre el cuerpo natural de agua y el vertimiento dando como resultado 6,266 mg/L, 15,052 mg/L y 17,329°C respectivamente, se halló el oxígeno de saturación del agua en función de la temperatura y se corrigió a la altitud de la zona de estudio dando como resultado 5,909 mg/L, la cual es el oxígeno óptimo que puede llegar bajo estas condiciones, mientras que el déficit de oxígeno del agua al contacto con las aguas residuales dio una caída máxima de -0,356 mg/L.

Se determinó los factores de reaireación y desoxigenación realizando la corrección en función del balance de temperatura con valores de 0,112 y 0,782 s⁻¹ respectivamente, lo cual nos demuestra que bajo las condiciones hidrológicas del río, para el caso de reaireación, su valor es muy bajo, ya que el caudal que se obtuvo es muy pequeño por la falta de precipitaciones lo que provoca menores corrientes de agua que favorecen en la oxigenación del agua y por la falta de fluidez en la misma, ya que el oxígeno se renueva a través de la difusión del río con el aire, mientras que en el factor de desoxigenación da un valor mucho más elevado, ya que es este tramo el más crítico por el vertimiento directo de carga orgánica requiriendo la mayor concentración de oxígeno para realizar su proceso de degradación. En función de estas dos constantes se obtienen el factor de auto purificación con un valor de 0,143.

Con los valores anteriores, se puede calcular las variables más delicadas, como el caso de la distancia crítica que nos indica que a 2,9 Km se tienen los



niveles más bajos de oxígeno disuelto que requieren las aguas del río para realizar la degradación de materia orgánica además donde se obtienen los mayores niveles de DBO₅, el tiempo que requiere para alcanzar esta distancia es de 1,99 horas, para este punto se obtendrá un déficit crítico de oxígeno de 98,624 mg/L, la cual es una cantidad bastante alejada a la realidad por las condiciones mismas del río, al igual que el oxígeno disuelto crítico que obtiene un valor de -92,714 mg/L, mientras que la DBO crítica da un valor de 14,104 mg/L cuyo resultado se relaciona más a los valores obtenidos en laboratorio de 12,6 mg/L, lo que nos indica que para esta variable, la ecuación se adapta mejor para la DBO que a los valores de oxígeno disuelto.

4.2.2.1. Modelamiento del comportamiento de asimilación tras la descarga inicial en función de la distancia: Tramo I

Para realizar el modelamiento del comportamiento de asimilación del río Coata respecto a la carga contaminante del río Torococha, se consideraron los datos calculados en la tabla 19, estos datos nos sirven como constantes cinéticas de autodepuración según las ecuaciones 18, 19 y 20 para valorar el comportamiento de DBO, OD y déficit de oxígeno a lo largo del tramo I, que consta de 16 Km de distancia, lo que nos permitirá estimar la evolución de cada parámetro en función de la distancia recorrida.

a. Perfil de la DBO para el tramo I ($X_1 < 16 \text{ Km} = 16\ 000 \text{ m}$)

Para estimar la DBO se tomó en cuenta la siguiente ecuación reemplazando sus variables con las constantes cinéticas de autodepuración obteniendo la ecuación 23:

$$DBO_x = DBO_{5m} * e^{(-k_d * \frac{x_1}{v})}$$

$$DBO_x = 15,052 * e^{(-0,783 * \frac{x_{i>16km}}{0,368*86400})} \dots \dots \dots (23)$$

b. Perfil del déficit de oxígeno (D) para el tramo I (X₁ < 16 Km=16 000 m)

Para el Déficit de oxígeno se tomó en cuenta la siguiente ecuación reemplazando sus variables con las constantes cinéticas de autodepuración obteniendo la ecuación 24:

$$D = D_0 * e^{-k_r * (\frac{x_1}{v})} + \frac{k_d * L_0}{k_r - k_d} * (e^{-k_d * (\frac{x_1}{v})} - e^{-k_r * (\frac{x_1}{v})})$$

$$D = -0,356 * e^{-0,112 * (\frac{x_1}{0,368*86400})} + \frac{0,783 * 15,052}{0,112 - 0,783} * (e^{-0,783 * (\frac{x_1}{0,368*86400})} - e^{0,112 * (\frac{x_1}{0,368*86400})}) \dots \dots \dots (24)$$

c. Perfil del oxígeno disuelto para el tramo I (X₁ < 16 Km=16 000 m)

Para estimar el Oxígeno disuelto, se tomó en cuenta la diferencia entre el oxígeno de saturación calculado y el déficit de oxígeno de acuerdo a la distancia.

$$OD_c = O_s - D \dots \dots \dots (25)$$



d. Simulación de ecuaciones de autodepuración del tramo I

Conociendo las ecuaciones de autodepuración de las aguas del río Coata para el tramo I se procede a realizar la simulación, se utilizó las ecuaciones modeladas 23, 24 y 25 para simular el comportamiento de estos parámetros en función de la distancia recorrida.

Tabla 20

Cálculo de modelamiento de asimilación del río Coata para el tramo I

Distancia X en metros	DBO (mg/L) en la distancia X	Dx Déficit de oxígeno (mg/L)	OD presente en la fuente (mg/L)
0	15,052	-0,356	6,266
2 000	14,329	0,367	5,543
2 929	14,005	0,689	5,220
4 000	13,640	1,051	4,859
6 000	12,985	1,696	4,213
8 000	12,361	2,306	3,604
10 000	11,767	2,882	3,028
12 000	11,202	3,425	2,485
14 000	10,663	3,937	1,972
16 000	10,151	4,420	1,489

Los datos calculados corresponden al comportamiento de las variables de DBO, OD y déficit de oxígeno, según a estos resultados se puede analizar que en el primer tramo donde se vierte la carga contaminante al contacto con las aguas naturales tienen una carga de DBO máxima de 15,052 mg/L, un déficit de oxígeno de -0,356 mg/L y un OD presente de 6,266 mg/L, mientras que considerando la distancia crítica calculada según la tabla 19 de 2 900 metros (2,9 Km) por interpolación en la tabla 20, nos da valores de 14,005 mg/L de DBO, un déficit de 0,689

mg/L y un OD de 5,22 mg/L, siendo la DBO la que más se aproxima al valor real analizado en laboratorio de 12,6 mg/L mientras que el oxígeno real nos marca un valor de 4,88 mg/L, ambos valores se encuentran a 100 metros del vertimiento.

4.2.3. Análisis de variables del segundo tramo

Para el segundo tramo, se siguió con el desarrollo de las ecuaciones del tramo I, sin embargo, esta vez se consideró los datos calculados de la DBO, OD y déficit de oxígeno del término del tramo I para el cálculo de las variables del tramo II.

Tabla 21

Cálculo de las variables de modelamiento para el tramo II del río Coata

PARÁMETRO/ VARIABLE	ECUACIÓN	RESULTADO
Duración de trayecto	$t = \frac{L}{V}$	5,02 h
Distancia de Homogenización	$L_m = 0,12 * V \frac{B^2}{H}$	143,4 m
Balance de OD	$OD_{0(tramo II)} = OD_{16Km (tramo I)}$	1,489 mg/L
Balance de DBO	$DBO_{0 (tramo II)} = DBO_{16Km (tramo I)}$	10,151 mg/L
Balance de temperatura	$t_{16Km} = Valor real$	17,73°C
Déficit de oxígeno inicial del tramo	$D_0 (tramo II) = D_{16Km (tramo I)}$	4,42 mg/L
Constante de reaeración	$K_a = 5,032 \frac{V^{0,67}}{H^{-1,85}}$	0,160 s ⁻¹
Constante de desoxigenación	$K_d = 0,3 * \left(\frac{H}{8}\right)^{-0,434}$	1,207 s ⁻¹
Corrección de Ka vs temperatura	$K(t) = K_{20} * \theta^{t^{\circ}-20}$	0,152 s ⁻¹
Corrección de Kd vs temperatura	$K(t) = K_{20} * \theta^{t^{\circ}-20}$	1,088 s ⁻¹
Factor de autpurificación	$f = \frac{K_a}{K_d}$	0,139

Distancia crítica	$X_c = \frac{1}{K_a - K_d} * \ln \left[\frac{K_a}{K_d} \left(1 - \frac{D_0 * (K_a - K_d)}{K_d * L_0} \right) \right]$	1,8 Km
Tiempo crítico	$T_c = \frac{X_c}{v}$	0,651 h
Déficit crítico de oxígeno	$D_c = \frac{K_d}{K_a} * DBO_0 * e^{-K_d * t_c}$	70,609 mg/L
Oxígeno disuelto crítico	$OD_c = O_s - D_c$	-64,699 mg/L
DBO Crítico	$DBO_c = DBO_0 * e^{-K_d * t_c}$	9,857 mg/L

Según los resultados obtenidos, se determinó que el tiempo de llegada de los contaminantes del tramo I desde el punto intermedio hasta el puente Coata toma un tiempo de 5,02 horas considerando las características hidrológicas del tramo II, mientras que, para que la carga contaminante restante se homogenice le toma aproximadamente un recorrido de 143,4 metros de distancia, mientras que el déficit de oxígeno del agua al contacto con las aguas residuales dio un incremento de 4,42 mg/L, la cual se deduce que para este punto se viene recuperando el oxígeno disuelto en el agua.

Los factores de reaireación y desoxigenación dio valores de 0,152 y 1,088 s⁻¹ respectivamente realizando la corrección en función del balance de temperatura, dando un incremento en el factor de reaireación en comparación con el tramo I debido a que en este punto se incrementa la velocidad de flujo, lo que favorece en la oxigenación del agua con el aire, mientras que el factor de desoxigenación también se incrementa, en este caso, debido a que el caudal disminuye casi en un 50%, requiriendo mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua para continuar con su proceso de degradación. En función de estas dos constantes se obtienen el factor de auto purificación con un valor de 0,139.

Con los valores anteriores se calcula el resto de variables, en el caso de la distancia crítica nos indica que a 1,8 Km las condiciones hidráulicas cambian significativamente, lo que produciría una alteración en el normal desarrollo autopurificador del agua, esto de producirá a los 0,651 h (40 min) según el tiempo crítico. El déficit crítico para este punto es de 70,609 mg/L y el oxígeno crítico es de -64,699 mg/L, como en el caso del tramo I, estos valores se alejan de la realidad dificultando su análisis a diferencia de la DBO que nos da un valor calculado de 9,857 mg/L mientras que los datos reales analizados en laboratorio nos dan un valor de 8 mg/L, con un margen de error de $\pm 1,85$ siendo un valor relativamente cercano lo que demostraría que para el caso de la DBO aún se adapta a las condiciones del río Coata en esta investigación.

4.2.3.1. Modelamiento del comportamiento de asimilación tras la descarga inicial en función de la distancia: Tramo II

Para el tramo II se realizó el modelamiento del comportamiento de asimilación del río Coata respecto a la variación de las condiciones hidráulicas en este punto considerando los valores calculados de la tabla 21, para valorar el comportamiento de DBO, OD y déficit de oxígeno a lo largo del tramo II, que consta de 12 Km de distancia, que permite estimar la variación en la evolución de cada parámetro.

a. Perfil de la DBO para el tramo II (16 Km < X < 28 Km)

Para estimar la DBO se tomó en cuenta la siguiente ecuación considerando la diferencia de la distancia final del tramo I, reemplazando sus variables con las constantes cinéticas de autodepuración calculados del tramo II obteniendo la ecuación 26:

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = DBO_{5 m} * e^{(-k_1 * \frac{X_2 - X_1}{v})}$$

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = 7,893 * e^{(-1,088 * \frac{X_2 - 16000}{0,662 * 86400})} \dots \dots \dots (26)$$

b. Perfil del déficit de oxígeno (D) para el tramo II (16 Km < X < 28 Km)

Para el déficit de oxígeno se tomó en cuenta la siguiente ecuación, de igual forma se considera la diferencia de la distancia del tramo I reemplazando sus variables con las constantes cinéticas de autodepuración calculados del tramo II obteniendo la ecuación 27:

$$D = D_0 * e^{-k_2 * (\frac{X_2 - X_1}{v})} + \frac{k_1 * L_0}{k_2 - k_1} * (e^{-k_1 * (\frac{X_2 - X_1}{v})} - e^{-k_2 * (\frac{X_2 - X_1}{v})})$$

$$D = 7,894 * e^{-0,152 * (\frac{X_2 - 16000}{0,664 * 86400})} + \frac{0,783 * 15,052}{0,112 - 0,783} * (e^{-0,783 * (\frac{X_2 - 16000}{0,368 * 86400})} - e^{0,112 * (\frac{X_2 - 16000}{0,368 * 86400})}) \dots \dots \dots (27)$$

c. Perfil del oxígeno disuelto para el tramo II (16 Km < X < 28 Km)

Para estimar el oxígeno disuelto, se tomó en cuenta la diferencia entre el oxígeno de saturación calculado y el déficit de oxígeno de acuerdo a la distancia.

$$OD_C = O_S - D \dots \dots \dots (28)$$

d. Simulación de ecuaciones de autodepuración del tramo II

Se procede a realizar la simulación en el tramo II a partir de los 16 Km de distancia, se utilizó las ecuaciones modeladas 26, 27 y 28 para

simular el comportamiento de estos parámetros en función de la distancia recorrida hasta los 28 Km.

Tabla 22

Cálculo de modelamiento de asimilación del río Coata para el tramo II

Distancia X en metros	DBO (mg/L) en la distancia X	Dx Déficit de	
		oxígeno (mg/L)	OD presente en la fuente (mg/L)
16 000	10,151	4,420	1,489
18 000	9,773	4,774	1,136
20 000	9,410	5,111	0,798
22 000	9,059	5,433	0,476
24 000	8,722	5,741	0,169
26 000	8,398	6,034	-0,125
28 000	8,085	6,314	-0,405

Los datos calculados corresponden al comportamiento de las variables de DBO, OD y déficit de oxígeno para el tramo II, según a estos resultados se puede analizar que la variación de estos parámetros no se altera significativamente continuando su progresión de forma casi lineal. Para la distancia crítica de 1,8 Km se obtuvo un déficit de oxígeno de 4,733 mg/L, un OD de 1,177 mg/L que, como el primer tramo, no concuerda con los datos reales, mientras que para la DBO se calculó un valor de 9,817 mg/L, cercano al valor real de 8 mg/L analizado en laboratorio.

4.2.4. Análisis de variables del tercer tramo

Para el tercer tramo, se sigue con el desarrollo de las ecuaciones del tramo I, sin embargo, se considera los datos calculados de la DBO, OD y déficit de oxígeno del término del tramo II para el cálculo de las variables del tramo III.

Tabla 23

Cálculo de las variables de modelamiento para el tramo III del río Coata

PARÁMETRO/ VARIABLE	ECUACIÓN	RESULTADO
Duración de trayecto	$t = \frac{L}{V}$	9,92 h
Distancia de Homogenización	$L_m = 0,12 * V \frac{B^2}{H}$	48,55 m
Balance de OD	$OD_{0(tramo III)} = OD_{28Km (tramo II)}$	-0,405 mg/L
Balance de DBO	$DBO_{0 (tramo III)} = DBO_{28Km (tramo II)}$	8,085 mg/L
Balance de temperatura	$t_{16Km} = Valor real$	15,93°C
Déficit de oxígeno inicial del tramo	$D_{28/Km} = C_s - OD$	6,314 mg/L
Constante de reaireación	$K_a = 5,032 \frac{V^{0,67}}{H^{-1,85}}$	0,255 s ⁻¹
Constante de desoxigenación	$K_d = 0,3 * \left(\frac{H}{8}\right)^{-0,434}$	1,323 s ⁻¹
Corrección de Ka vs temperatura	$K(t) = K_{20} * \theta^{t-20}$	0,232 s ⁻¹
Corrección de Kd vs temperatura	$K(t) = K_{20} * \theta^{t-20}$	1,097 s ⁻¹
Factor de autopurificación	$f = \frac{K_a}{K_d}$	0,211
Distancia crítica	$X_c = \frac{1}{K_a - K_d} * \ln \left[\frac{K_a}{K_d} \left(1 - \frac{D_0 * (K_a - K_d)}{K_d * L_0} \right) \right]$	1,2 Km
Tiempo crítico	$T_c = \frac{X_c}{v}$	0,729 h
Déficit crítico de oxígeno	$D_c = \frac{K_d}{K_a} * DBO_0 * e^{-K_d * t_c}$	37,087 mg/L
Oxígeno disuelto crítico	$OD_c = O_s - D_c$	-31,177 mg/L
DBO Crítico	$DBO_c = DBO_0 * e^{-K_d * t_c}$	7,823 mg/L

Según los resultados obtenidos, se determinó que el tiempo de llegada de los contaminantes del tramo II desde el puente Coata hasta la desembocadura al Lago Titicaca toma un tiempo de 9,92 horas considerando las características hidrológicas del tramo III, mientras que, para que la carga contaminante restante



se homogenice le toma aproximadamente un recorrido de 48,6 metros de distancia, en tanto, el déficit de oxígeno del agua se incrementa a 6,314 mg/L, la cual se deduce que para este punto aún se viene recuperando el oxígeno disuelto en el agua.

Los factores de reaeración y desoxigenación dio valores de 0,232 y 1,097 s^{-1} respectivamente realizando la corrección en función del balance de temperatura, dando un incremento en el factor de reaeración en comparación con el tramo I y II, en este caso debido a que en este punto se incrementa la profundidad, incrementando en mayores cantidades de oxigenación del agua, mientras que el factor de desoxigenación se incrementa ligeramente, debido a que el caudal es similar para el tramo I y II. En función de estas dos constantes se obtienen el factor de auto purificación con un valor de 0,211.

Para el caso de la distancia crítica nos indica que a 1,2 Km debe de comenzar la alteración en el poder autopurificador del agua, sin embargo, por tener características hidrológicas similares al tramo II, esta variación no será tan notoria, para esta distancia requerirá un tiempo de 0,729 h (43,7 min). El déficit crítico para este punto es de 37,087 mg/L y el oxígeno crítico es de -31,077 mg/L, como en el caso del tramo I y II, estos valores se alejan de la realidad dificultando su análisis a diferencia de la DBO que nos da un valor calculado de 7,832 mg/L mientras que los datos reales analizados en laboratorio nos dan un valor de 7 mg/L, con un margen de error de $\pm 0,83$ siendo un valor relativamente cercano lo que demostraría que para el caso de la DBO aún se adapta a las condiciones del río Coata hasta su desembocadura.

4.2.4.1. Modelamiento del comportamiento de asimilación tras la descarga inicial en función de la distancia: Tramo III

Para el tramo III se realizó el modelamiento del comportamiento de asimilación del río Coata con las nuevas condiciones hidrológicas en este punto considerando los valores calculados de la tabla 23, para valorar el comportamiento de DBO, OD y déficit de oxígeno a lo largo del tramo III, que consta de 14 Km de distancia.

a. Perfil de la DBO para el tramo III (28 Km < X < 42 Km)

Para estimar la DBO se tomó en cuenta la siguiente ecuación, considerando la diferencia de la distancia hasta el término del tramo II, reemplazando sus variables con las constantes cinéticas de autodepuración calculados del tramo III:

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = DBO_{5m} * e^{\left(-k_1 * \frac{X_3 - X_2}{v}\right)}$$

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = 8,085 * e^{\left(-1,097 * \frac{X_3 - 28000}{0,392 * 86400}\right)} \dots \dots \dots (29)$$

b. Perfil del déficit de oxígeno (D) para el tramo III (28 Km < X < 42 Km)

Para el déficit de oxígeno se tomó en cuenta la siguiente ecuación, de igual forma se considera la diferencia de la distancia final del tramo II reemplazando sus variables con las constantes cinéticas de autodepuración calculados del tramo III:

$$D = D_0 * e^{-k_2 * \left(\frac{X_3 - X_2}{V}\right)} + \frac{k_1 * L_0}{k_2 - k_1} * \left(e^{-k_1 * \left(\frac{X_3 - X_2}{V}\right)} - e^{-k_2 * \left(\frac{X_3 - X_2}{V}\right)} \right)$$

$$D = 9,679 * e^{-0,232 * \left(\frac{X_3 - 28000}{0,392 * 86400}\right)} + \frac{1,097 * 8,085}{0,232 - 1,097} * \left(e^{-1,097 * \left(\frac{X_3 - 28000}{0,392 * 86400}\right)} - e^{-0,232 * \left(\frac{X_3 - 28000}{0,392 * 86400}\right)} \right) \dots \dots \dots (30)$$

c. Perfil del oxígeno disuelto para el tramo III (28 Km < X < 42 Km)

Para estimar el oxígeno disuelto, se tomó en cuenta la diferencia entre el oxígeno de saturación calculado y el déficit de oxígeno de acuerdo a la distancia.

$$OD_C = O_S - D \dots \dots \dots (31)$$

d. Simulación de ecuaciones de autodepuración del tramo III

Se procede a realizar la simulación en el tramo III a partir de los 28 Km de distancia, se utilizó las ecuaciones modeladas 29, 30 y 31 para simular el comportamiento de estos parámetros en función de la distancia recorrida hasta los 42 Km.

Tabla 24

Cálculo de modelamiento de asimilación del río Coata para el tramo III

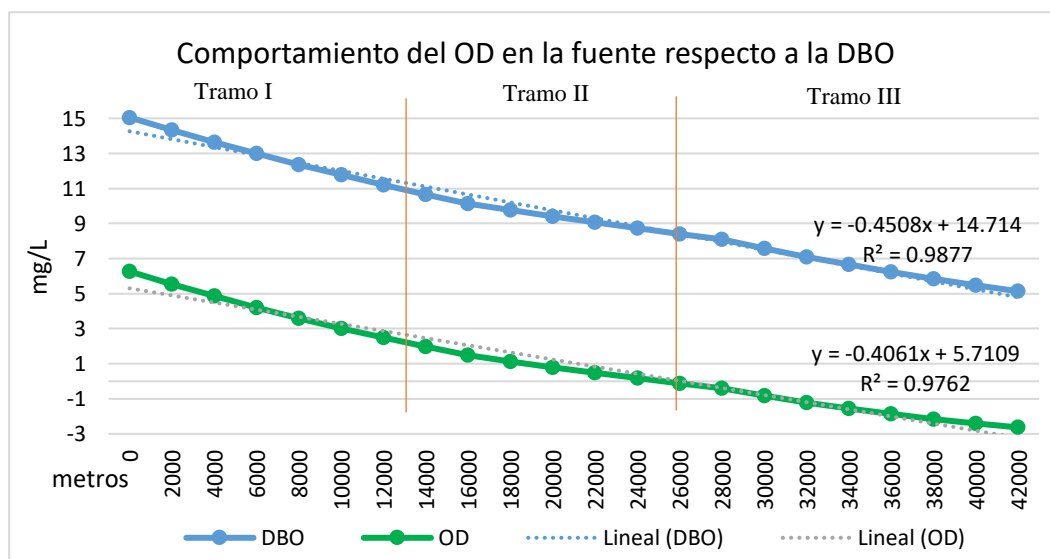
Distancia X en metros	DBO (mg/L) en la distancia X	Dx Déficit de oxígeno (mg/L)	OD presente en la fuente (mg/L)
28 000	8,085	9,679	-0,095
30 000	7,578	10,051	-0,467
32 000	7,102	10,387	-0,803
34 000	6,657	10,689	-1,104
36 000	6,239	10,959	-1,374
38 000	5,847	11,199	-1,614
40 000	5,480	11,411	-1,827
42 000	5,137	11,598	-2,013

4.2.5. Representación gráfica del modelo de Streeter Phelps en el río Coata

En la figura 13, se puede observar el comportamiento que tienen el oxígeno disuelto y la DBO en el agua en función de la distancia recorrida, esto se realiza por acción del balance de masas con el vertimiento de carga contaminante al río Coata, realizando una simulación con las fórmulas matemáticas desarrolladas previamente, ya con los datos obtenidos en las tablas 20, 22 y 24 para cada parámetro, juntando los tres tramos desde el vertimiento hasta su desembocadura obteniendo como resultado la siguiente figura.

Figura 14

Curvas del comportamiento del OD en la fuente respecto a la DBO del río Coata



Según la figura 14 podemos analizar que, para ambos parámetros, su comportamiento tiene características similares, considerando que ambos tienen una tendencia negativa y sus valores forman una ecuación casi lineal, esto se comprueba con el valor del R-cuadrado con un valor de 0,9877 para el caso de la DBO y 0,9762 para el OD. Analizando estos valores, podemos concluir que las

ecuaciones de Streeter Phelps desarrolladas para los tres tramos no tienen una diferencia significativa a lo largo de su recorrido para el río Coata, este fenómeno puede deberse a que el estudio fue desarrollado en una época de sequía obteniendo caudales muy bajos, lo que dificulta un mejor desempeño en el análisis de los resultados, lo recomendable es desarrollarlo en época de lluvias, que favorecen en la determinación del factor de desoxigenación y reaeración.

En la figura 14 se observa que para el tramo I, la tendencia negativa es más pronunciada por ser el punto más crítico donde se produce la mezcla del río con el vertimiento, además de que presenta el mayor caudal y mejores condiciones hidrológicas, en el tramo II para el punto intermedio, la tendencia se levanta debido a que el caudal disminuye en un 53%, haciendo que las variables no sufran cambios significativos, terminando en el tramo III que vuelve a tener una tendencia ligeramente pronunciada, lo que nos permite concluir en la división de tramos que la diferencia entre el tramo II y III no tienen cambios significativos sugiriendo una unión entre estos tramos.

En el caso de la DBO, según el modelamiento de Streeter Phelps, se obtuvieron los resultados más cercanos a la realidad, indicando que la mayor concentración de DBO en el agua tendría un valor de 15,05 mg/L, este valor se encontraría en la distancia de homogenización de 755 m, al realizar la comparación con datos reales se verifica cierto grado de similitud, ya que el resultado de laboratorio es de 12 mg/L a 1,1 Km del vertimiento, según las etapas de capacidad de auto purificación, esta distancia se puede considerar como zona de degradación, donde los niveles de contaminación son más altas, y requieren altas concentraciones de oxígeno disuelto para realizar su proceso de degradación



natural mientras que oxígeno denota una caída desde 6,266 mg/L y va disminuyendo conforme el cuerpo de agua lo requiera.

La siguiente etapa es la zona séptica, que según el gráfico puede considerarse desde la distancia crítica inicial de 2,9 Km hasta el final del recorrido en la desembocadura, ya que al final del recorrido termina con una DBO de 5,137 mg/L, casi llegando a lo recomendado por los ECA categoría 4 que indica valores menores a 5 mg/L, ya que el dato de laboratorio en el puente Coata ubicada a 28 Km desde el vertimiento tiene una DBO de 7 mg/L mientras que para este punto, se calculó un valor de 8,085 mg/L, de igual forma tiene cierto grado de similitud. Caso contrario sucede con el OD que si bien es cierto el oxígeno sigue disminuyendo constantemente por la carga orgánica presente hasta su desembocadura, este parámetro también es influida por otros aspectos como la turbulencia, incremento de caudal, presencia de micro y macrofitas entre otros que favorecen en la oxigenación del agua recuperando de esta forma sus condiciones iniciales, para el modelo de Streeter Phelps, no considera estos factores, lo que se puede observar en el gráfico 12 como la concentración del oxígeno disminuye hasta la desembocadura, sin embargo para condiciones normales, el oxígeno debería recuperarse progresivamente, esto se evidencia con los valores reales tomados en campo donde para el punto intermedio el oxígeno ya recupero su valor inicial de 6,75 mg/L, pero disminuye consecuentemente a 4,13 mg/L en el puente Coata por disminución del caudal.

Según estos resultados, nos indicaría que el río Coata cuenta con zona de degradación hasta los 2,9 Km, seguido de la zona séptica que consta desde esa distancia hasta la desembocadura, concluyendo que el río Coata no es capaz de autopurificarse naturalmente por la carga contaminante vertida, ya que la distancia



es insuficiente para obtener la zona de degradación y conseguir finalmente la zona limpia, para el caso de esta investigación, la causa principal estaría dada por el caudal insuficiente del río Coata en comparación con el caudal del vertido, dificultando la autodepuración de sus aguas.

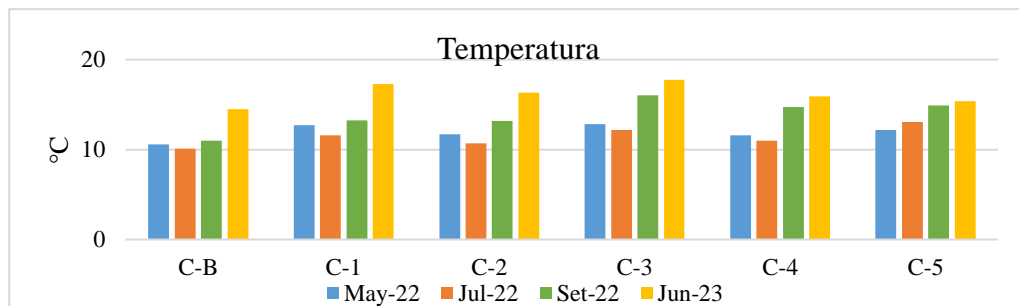
En comparación con Angarita (2019) quien utilizó cinco tramos para evaluar el comportamiento de las variables DBO, OD y déficit de oxígeno del río Algodonal en Colombia en concordancia con la distancia recorrida, para este caso, la curva del comportamiento de DBO y OD generada igual a la figura 14 tuvo mejores resultados al dividir en 5 tramos, sin embargo, lo que favorece el cálculo de esta se basa en las condiciones hidrológicas de este río, ya que presentan mayores caudales, como el caso del OD quien se reduce drásticamente al contacto con el vertimiento inicialmente por mayor cantidad de turbidez y sólidos suspendidos dificultando el proceso fotosintético de las plantas acuáticas, además del consumo excesivo de OD para degradar la materia orgánica y aguas abajo, su concentración incrementa a partir de los 100 metros, también sugiere que la recuperación del OD es favorecida por la alta velocidad del río que provoca turbulencia que permite mejorar la dilución y recupera la concentración de OD.

4.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS POR LA ACCIÓN AUTO PURIFICADORA DEL RÍO COATA

4.3.1. Temperatura

Figura 15

Comportamiento espacio-temporal de la temperatura del río Coata



La temperatura es uno de los parámetros más relevantes, pues en general afecta en la aceleración o retardo de los procesos químicos y la actividad biológica. Sin embargo, su valor también depende de otros factores, tales como la hora de muestreo, la profundidad de toma de muestra o la estación del año. Lo mismo que se aprecia en la figura 15, donde las mayores temperaturas se encuentran en el mes de junio del 2023 por la época de sequía donde los ríos bajan su nivel de agua con una temperatura promedio de 16,2°C, siendo el punto C-3 (punto intermedio) el más alto registrado con 17,73°C por tener las profundidades más pequeñas mientras que las temperaturas más bajas se registraron en el mes de julio del 2022 con un promedio de 11,4°C por época de helada siendo el punto C-B con 10,67°C la más baja. Según la figura 16, se observa que las temperaturas con caudal de 15,9 m³/s son más bajas a comparación de la figura 17 con caudal de 4,2 m³/s cuyas temperaturas se elevan, esto debido a la profundidad de sus aguas, ya que los rayos de sol calientan más rápido las aguas poco profundas.

Figura 16

Temperatura del río Coata a mayor caudal

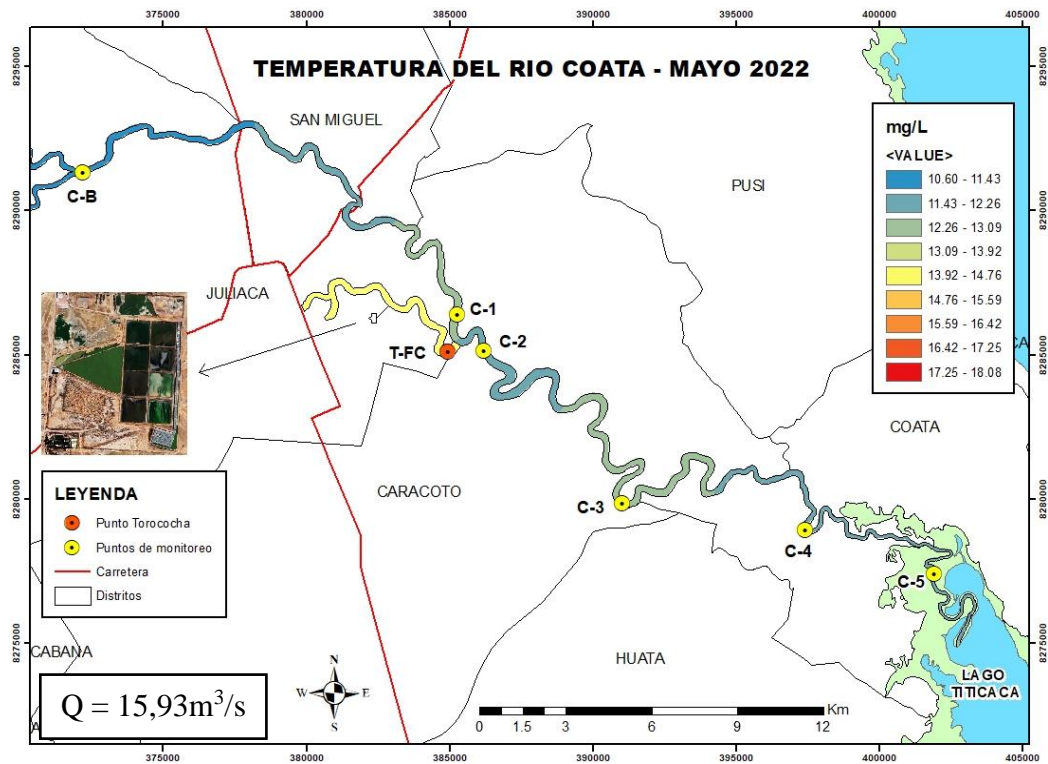
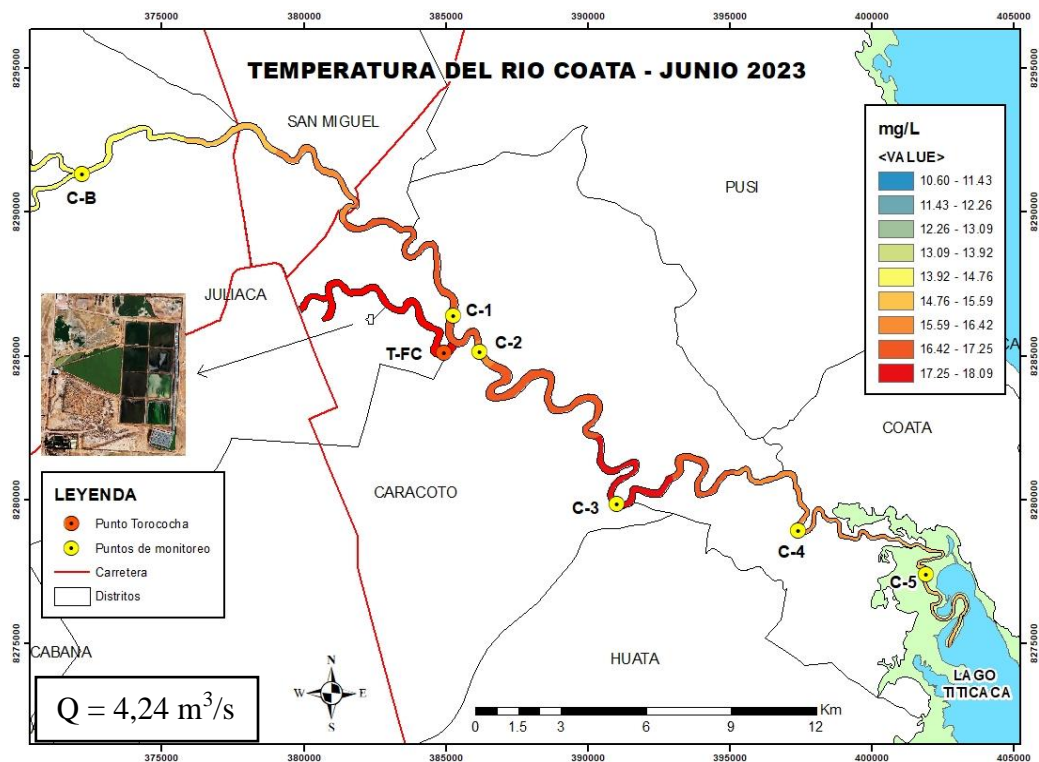


Figura 17

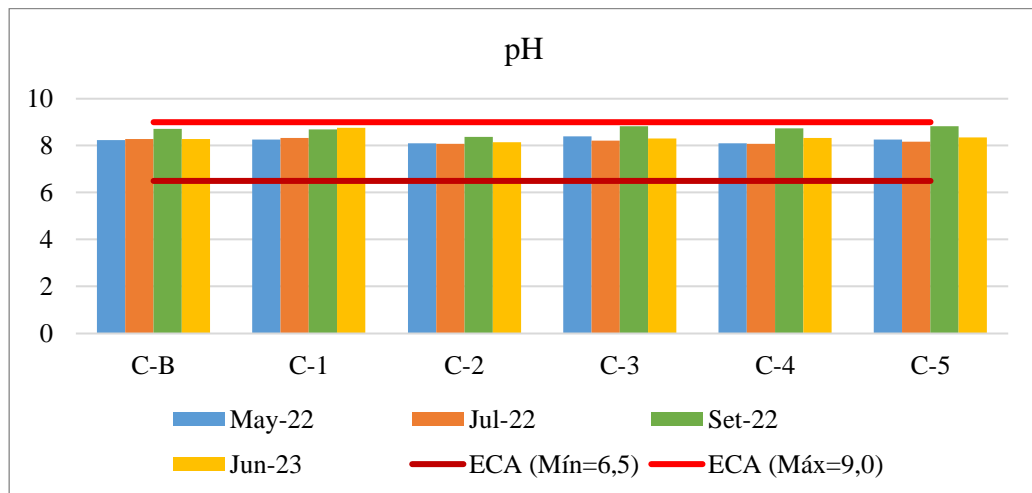
Temperatura del río Coata a menor caudal



4.3.2. pH

Figura 18

Comportamiento espacio-temporal del pH del río Coata



El pH es un parámetro importante, ya que ciertos procesos químicos solo pueden tener lugar a cierto pH, el pH de la región de Puno en general es alcalino la cual es un indicador de contaminación por degradación de residuos orgánicos. Lo mismo que se evidencia en la figura 18, donde las aguas inician su recorrido con un pH alcalino promedio de 8,38 y 8,51 en los puntos C-B y C-1, sin embargo, el río Torococha (con carga contaminante), tienen un pH más bajo promedio de lo que correspondería a presencia de aguas ácidas producto de desechos de ciertas sustancias utilizadas en pequeñas industrias y actividades comerciales, lo que provoca una reducción de pH en el río Coata con 8,18 en el punto C-2 (Pte. Canchi chico), recuperando el pH inicial en los puntos finales para terminar con 8,4 en el punto final. Los pH más altos registrados fueron en el mes de setiembre con un promedio de 8,69 a lo largo del río Coata. Según el ECA de la categoría 4 (D.S. N°004-2017-MINAM) (6,5 - 9), todos los puntos del río se encuentran dentro del rango establecido incluidos los puntos posteriores al efluente del Torococha,

mientras que según los LMP (D.S. N°003-2010-MINAM), las aguas residuales se encuentran dentro del rango de 6,5-8,5 de pH.

En comparación con otras investigaciones, se tiene que Callasaca et al. (2022) obtuvo un pH inicial en el puente Churi con 7,54 y terminó en el puente Coata con 7,90; Menéndez (2018), obtuvo un pH promedio de 7,51 en el puente Churi y 7,53 en el puente Canchi Chico; Gutiérrez (2018) obtuvo 8,14 en el puente Churi y 7,97 en el puente Canchi Chico y Condori y Parillo (2018) obtuvo un pH promedio de 8 en todas sus estaciones. Estos resultados tienen una valoración más neutra en comparación de los resultados de la presente investigación, que se obtuvo valores con tendencias alcalinas, esta variación se debe a que cada investigador utilizó un equipo diferente del resto.

Figura 19

pH del río Coata a mayor caudal

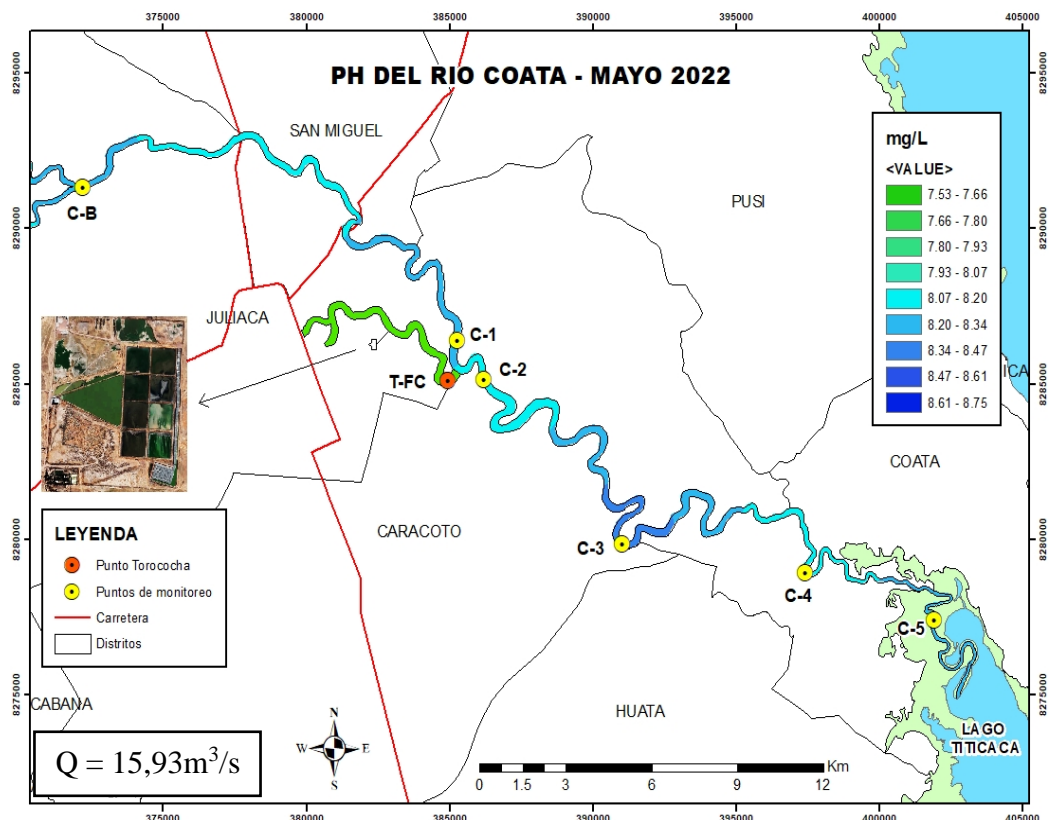
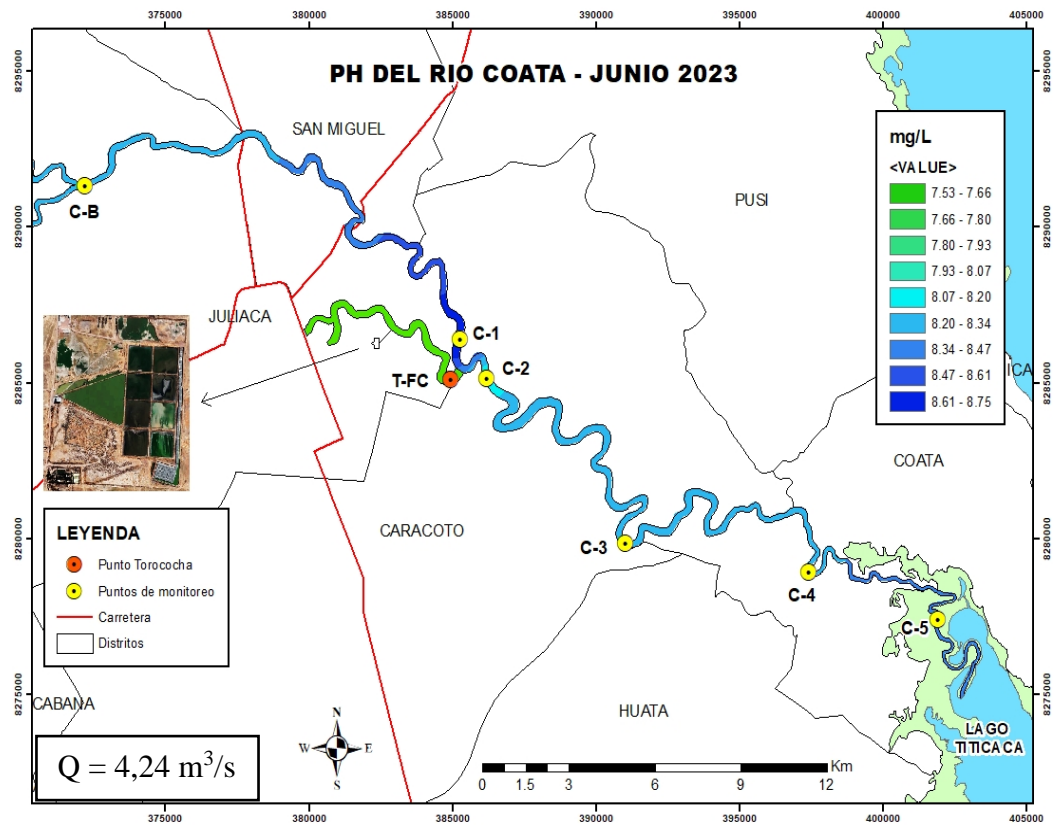


Figura 20

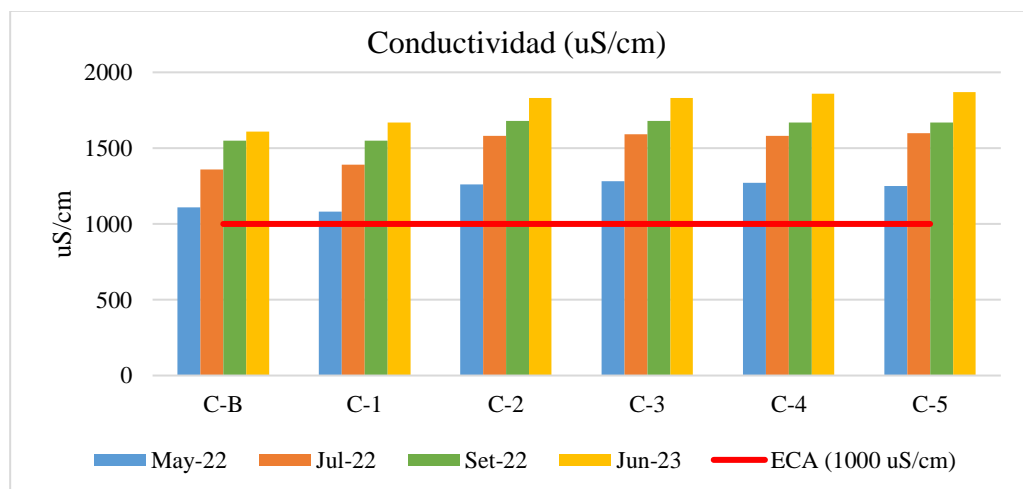
pH del río Coata a menor caudal



4.3.3. Conductividad

Figura 21

Comportamiento espacio-temporal de la conductividad del río Coata





La conductividad Eléctrica (CE) nos indica la concentración total de iones disueltos presentes en el agua, además es una característica que se usa constantemente para indicar el grado de mineralización del agua. Según la figura 21, se observa que la conductividad en los primeros meses el más bajo siendo el mes de mayo 2022 con 1 208 uS/cm en promedio, sin embargo, conforme avanza los meses termina la temporada de lluvia generando la disminución del nivel del agua incrementando los iones disueltos hasta un máximo de 1 778 uS/cm en junio 2023. Según la figura 22, se observa que a mayor caudal la conductividad antes de la descarga es de 1 080 uS/cm y al pasar por el vertimiento se incrementa a 1 260 uS/cm hasta un valor de 1 280 uS/cm reduciéndose progresivamente hasta su desembocadura, mientras que la figura 23, a menor caudal, tiene un comportamiento similar iniciando con 1 670 uS/cm incrementándose a 1 830 uS/cm, sin embargo, este no decrece y termina con un valor de 1 870 uS/cm. De acuerdo a los resultados obtenidos según los ECA de la categoría 4 (D.S. N°004-2017-MINAM) (1 000 uS/cm), todos los puntos de monitoreo del río Coata se encuentran ligeramente por encima de este valor mientras que el río Torococha supera en un triple su valor.

En comparación con otros resultados, se recopiló que Callasaca et al. (2022) obtuvo una conductividad de 1360 uS/cm en el puente Churi y 1320 uS/cm en el puente Coata; Menéndez (2018) obtuvo en promedio 1120 uS/cm en Puente Churi, 1112 uS/cm en el punto intermedio y 1118 uS/cm en el puente Coata; Gutiérrez (2018) obtuvo 1154 uS/cm en el puente Churi y 1493 uS/cm en el puente Canchi Chico y Condori y Parillo (2018) obtuvieron 171 uS/cm en el puente Churi, 177 uS/cm en puente Canchi Chico y 277 uS/cm en el puente Coata. De

acuerdo a estos resultados, se asemejan mejor a los resultados de la presente investigación excluyendo a Condori y Parillo (2018).

Figura 22

Conductividad del río Coata a mayor caudal

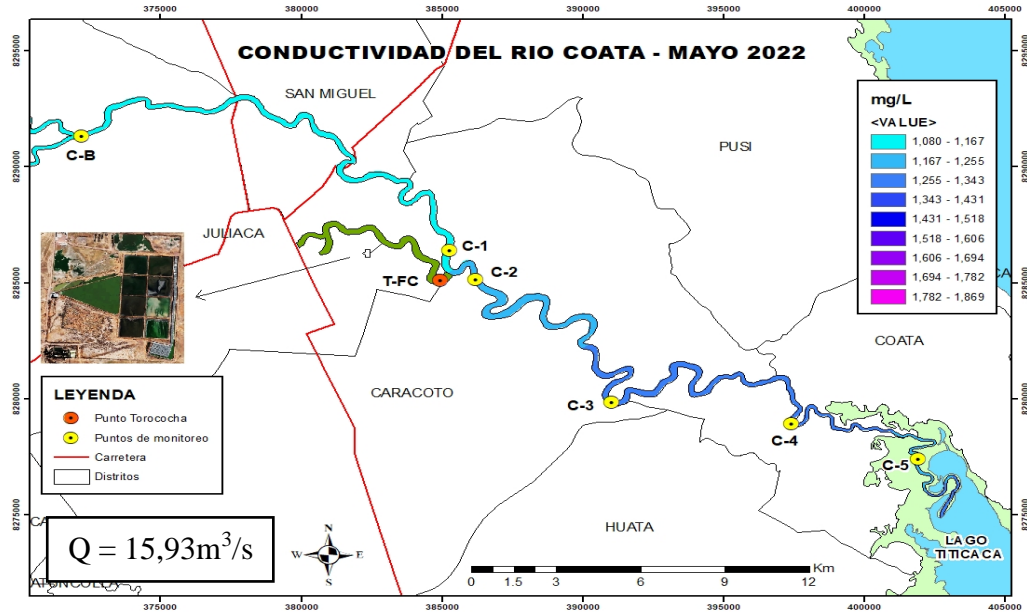
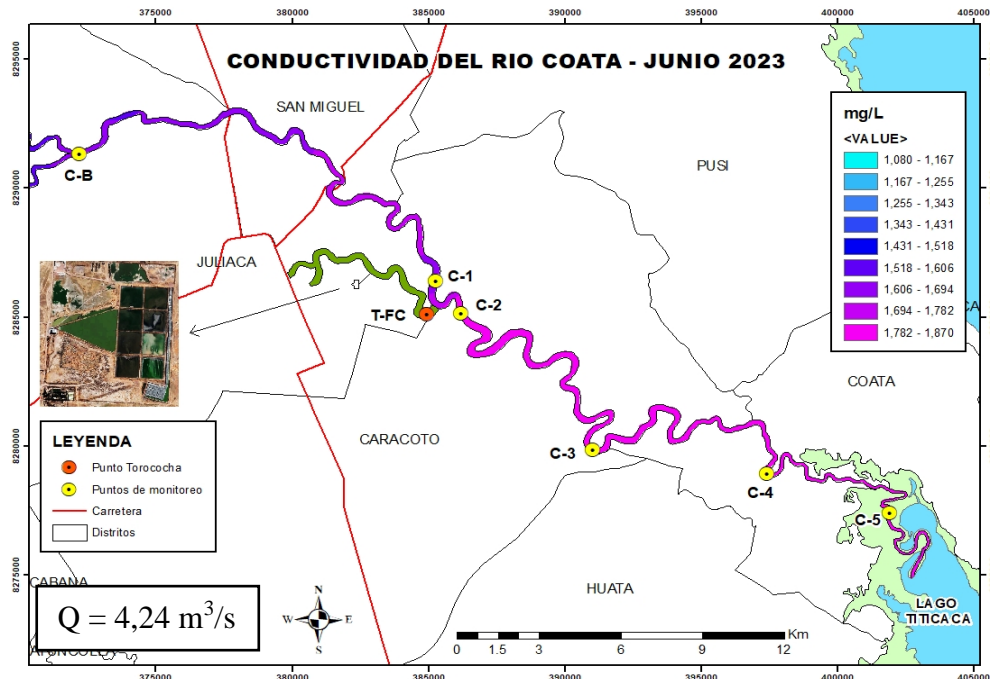


Figura 23

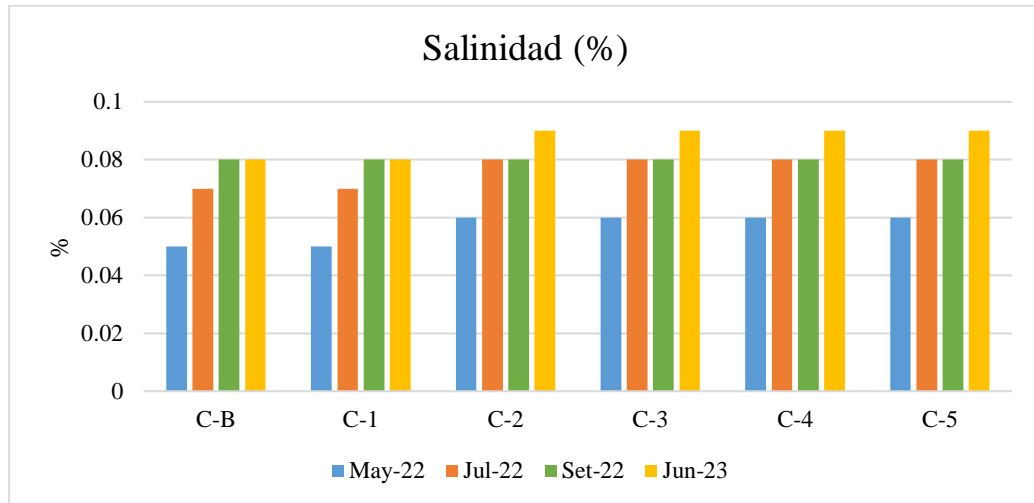
Conductividad del río Coata a menor caudal



4.3.4. Salinidad

Figura 24

Comportamiento espacio-temporal de la salinidad del río Coata



La salinidad es la cantidad de sales minerales que se encuentran disueltas dentro del agua, y esta es afectada por efectos de evaporación, según a esta denominación, la salinidad también guarda relación con la conductividad por la presencia de sales disueltas. Según la figura 24 se observa que los valores más bajos se registraron en el mes de mayo 2022 con 0,05% elevándose a 0,06% después del vertimiento y se incrementa progresivamente conforme avanza los meses por la disminución del nivel de agua, obteniendo los valores más altos en el mes de junio 2023 con 0,08 hasta 0,09% en su desembocadura.

Según la figura 25 y 26 se puede notar la diferencia de la salinidad a diferentes caudales, sin embargo, también se observa que ambos casos tienen comportamientos similares, concluyendo que las aguas del río Coata no reducen sus concentraciones de salinidad a lo largo de su trayecto manteniéndose hasta su desembocadura con la misma concentración sin importar el caudal.

Figura 25

Salinidad del río Coata a mayor caudal

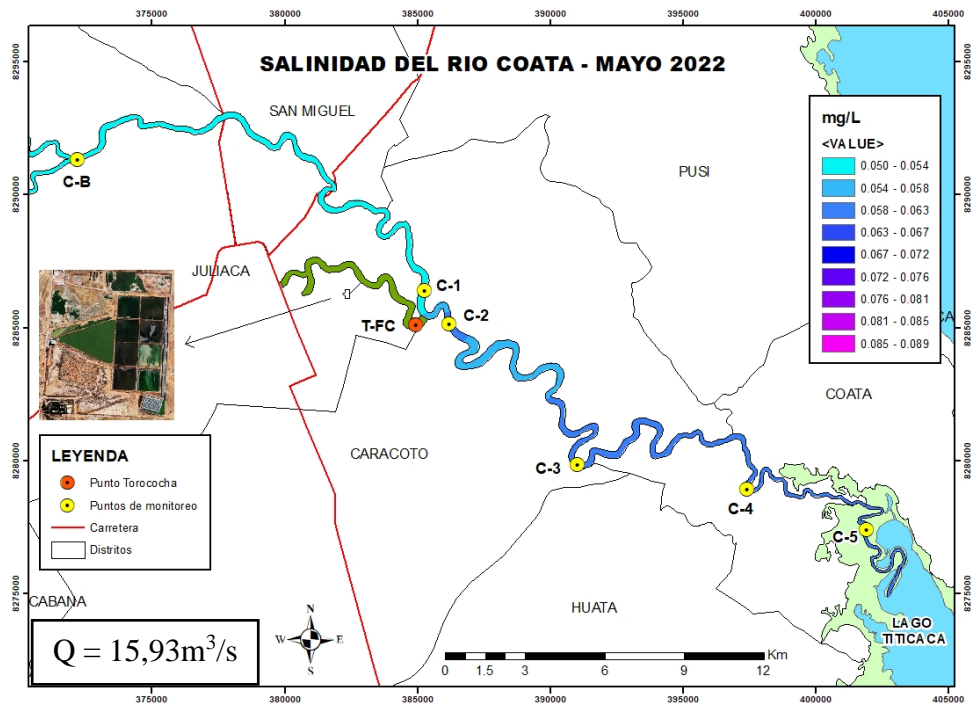
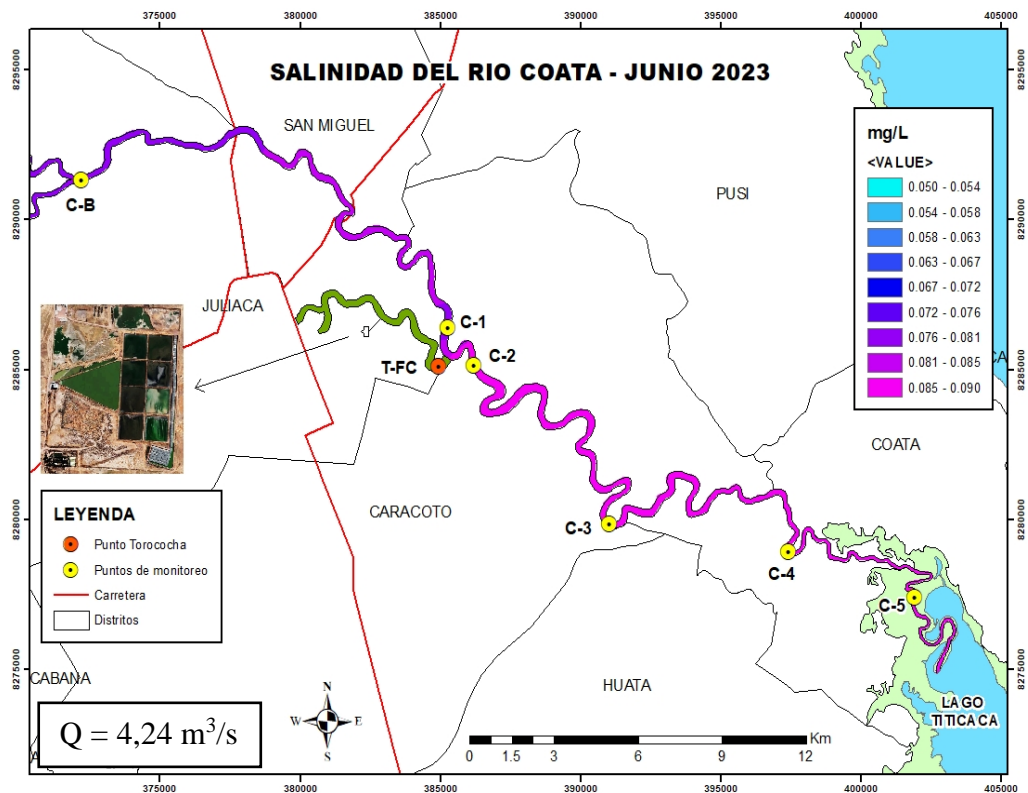


Figura 26

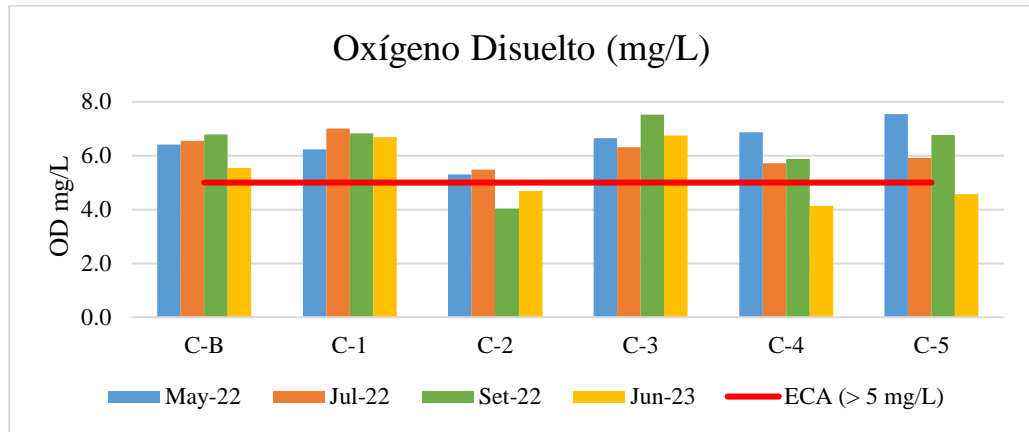
Salinidad del río Coata a menor caudal



4.3.5. Oxígeno disuelto

Figura 27

Comportamiento espacio-temporal del oxígeno disuelto del río Coata



El oxígeno disuelto (OD) se logra por diferentes factores como la difusión del aire del entorno, la aireación del agua por efectos de rápidos o saltos o como resultado de la fotosíntesis, por lo tanto, es importante un adecuado nivel de oxígeno para una buena calidad del agua, ya que es necesario para todas las formas de vida. De acuerdo a los resultados obtenidos según los ECA de la categoría 4 (D.S. N°004-2017-MINAM) (>5) según la figura 27, se observa que en su mayoría se encuentra por encima del ECA mínimo, siendo los puntos más bajos en el mes de junio 2023 principalmente en los últimos puntos C-4 y C-5 con 4,13 y 4,57 mg/L. Según la figura 28 a alto caudal las aguas inician con un OD en C-1 de 6,23 mg/L encontrándose con el Torococha con 1,07 mg/L disminuyendo su concentración a 5,31 mg/L en C-2 y recupera su concentración progresivamente hasta un valor de 7,55 mg/L en su desembocadura, caso contrario pasa a caudales bajos que inician con 6,69 mg/L en C-1 recibiendo aguas residuales con 0,85 mg/L disminuyendo su concentración a 4,68 en C-2 recuperando su concentración a 6,75 mg/L por acción de la corriente del agua, sin embargo, más adelante no logra

mantener esta concentración disminuyendo significativamente hasta 4,75 mg/L en su desembocadura por la aún presencia de carga contaminante y bajos caudales.

En comparación a la recopilación de resultados, se tiene que Callasaca et al. (2022) obtuvo un OD de 2,95 mg/L en el puente Churi y 3,45 mg/L en el puente Coata; Condori y Parillo (2018) obtuvieron un OD de 4 mg/L en el puente Churi, 5 mg/L en el puente Canchi Chico e intermedio y 4 mg/L en el puente Coata y Gutiérrez (2018) obtuvo un OD de 4,32 mg/L en el puente Churi y 3,05 mg/L en el puente Canchi Chico. Se puede concluir que los OD de estas investigaciones son inferiores a los resultados que se obtuvo en esta investigación, de igual forma, esto se debe al equipo utilizado ya que el OD es uno de los parámetros más sensibles de medir, la cual requiere de un equipo calibrado.

Figura 28

Oxígeno disuelto del río Coata a mayor caudal

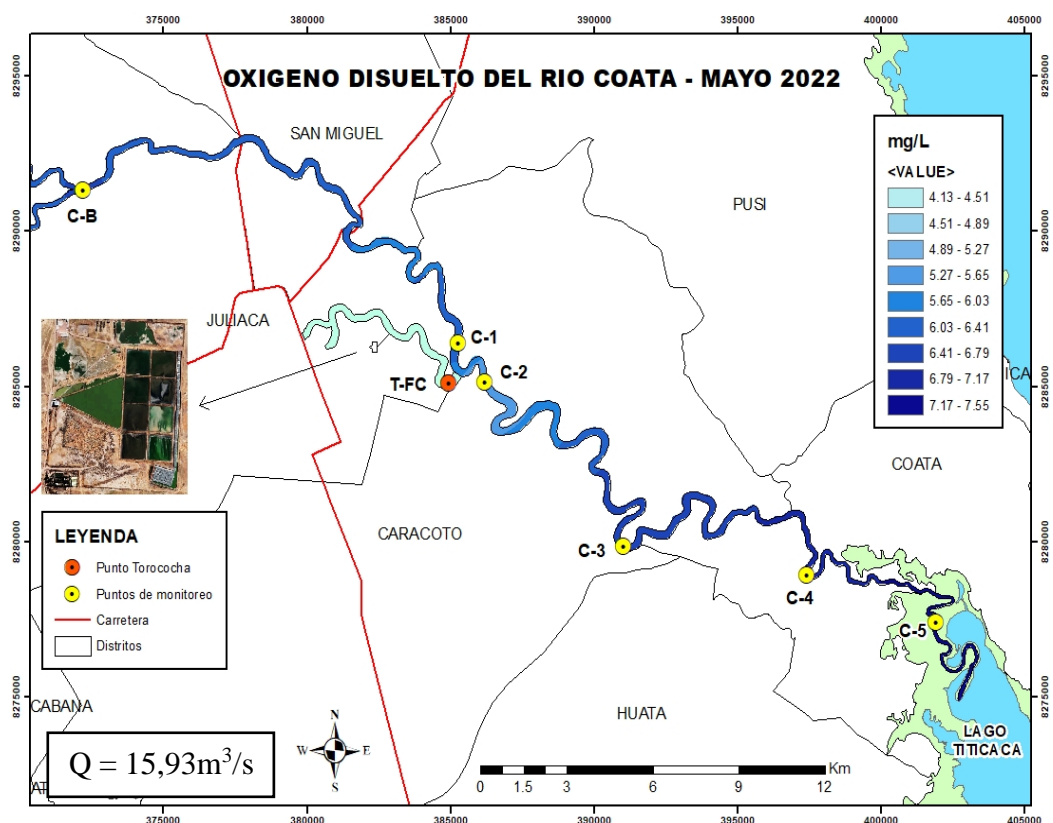
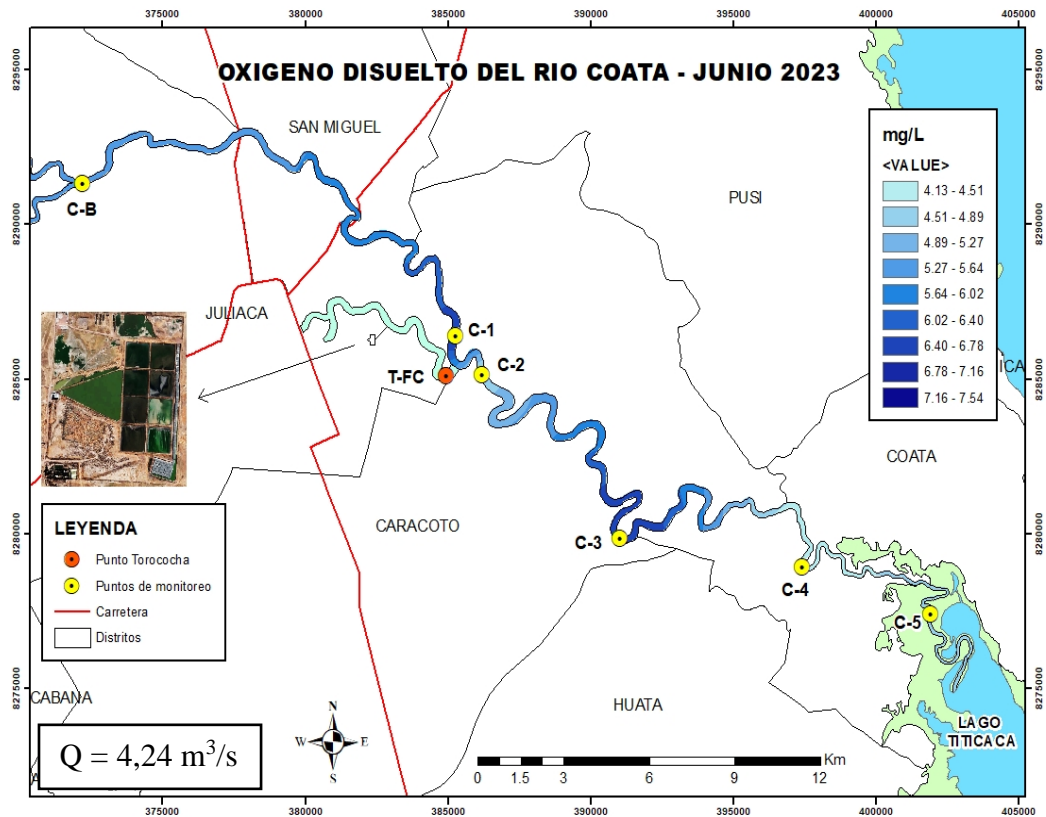


Figura 29

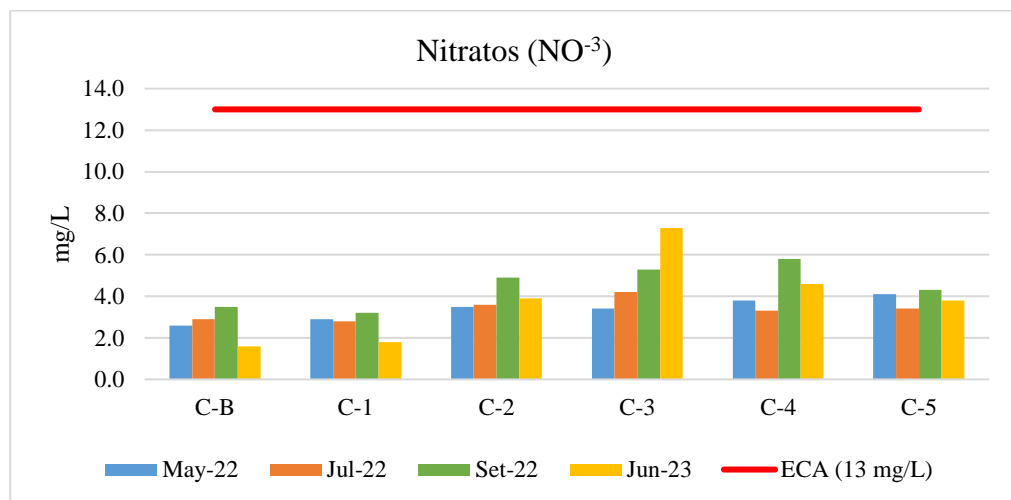
Oxígeno disuelto del río Coata a menor caudal



4.3.6. Nitratos

Figura 30

Comportamiento espacio-temporal de los nitratos del río Coata



La presencia de nitratos en el agua es producto de la contaminación de las aguas naturales por compuestos nitrogenados y su aumento en su concentración se debe fundamentalmente por el uso excesivo de abonos nitrogenados arrastrándose por las aguas de lluvia o riego. De acuerdo a los resultados obtenidos según los ECA de la categoría 4 (D.S. N°004-2017-MINAM) (13 mg/L).

Según la figura 30, todos los puntos de monitoreo se encuentran por debajo de este valor con un valor máximo 7,3 mg/L en C-3 en junio 2023, mientras que en setiembre se dieron los resultados más altos con 4,5 mg/L en promedio.

Según la figura 31 a altos caudales, los nitratos no sufren grandes cambios ya que inicia con un valor de 2,9 mg/L en C-1 y se incrementa ligeramente a 3,5 mg/L en C-2 hasta un máximo de 4,1 mg/L en su desembocadura, sin embargo, en la figura 32 si se puede observar una alteración significativa, ya que inicia con un valor de 1,8 mg/L en C-1, se incrementa 3,9 mg/L en la homogenización, y esta crece potencialmente en el punto intermedio hasta 7,3 mg/L y a partir de este punto reduce su valor hasta 3,8 mg/L en la desembocadura. La razón por la que su concentración se acumule en el punto intermedio es porque para el nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno, y requiere la oxidación de los nitritos demorando así su aparición.

En comparación con los resultados recopilados, Menéndez (2018) obtuvo 0,09 mg/L en el puente Churi y 0,10 mg/L en el puente Coata; mientras que Condori y Parillo (2018) obtuvieron una concentración de 1 mg/L en el puente Churi y el puente Canchi Chico y una concentración de 2 mg/L en el punto intermedio y puente Coata. Según estos resultados, estos valores son muy bajos a

los obtenidos en esta investigación, esta diferencia varía de acuerdo al método de obtención, ya que la metodología que se usó fue la de espectrofotometría UV-VIS.

Figura 31

Nitratos del río Coata a mayor caudal

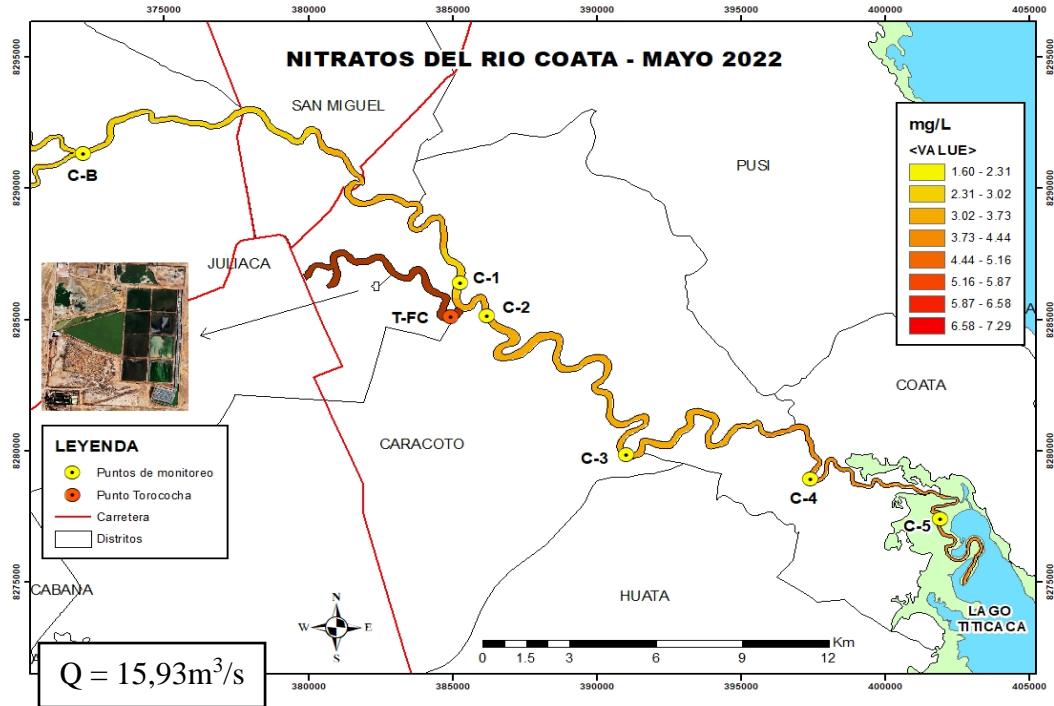
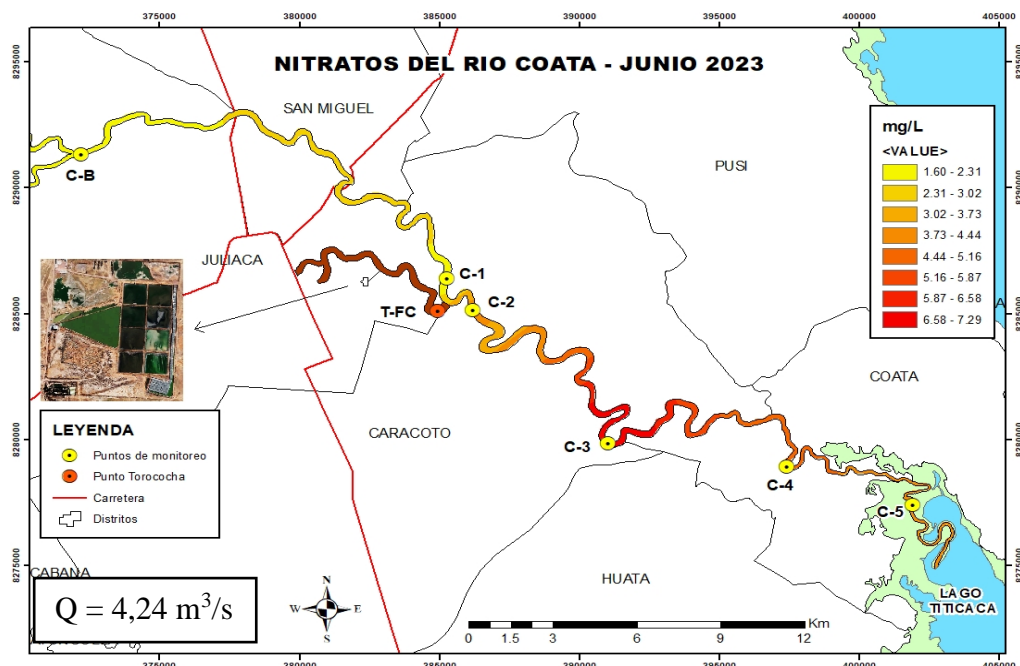


Figura 32

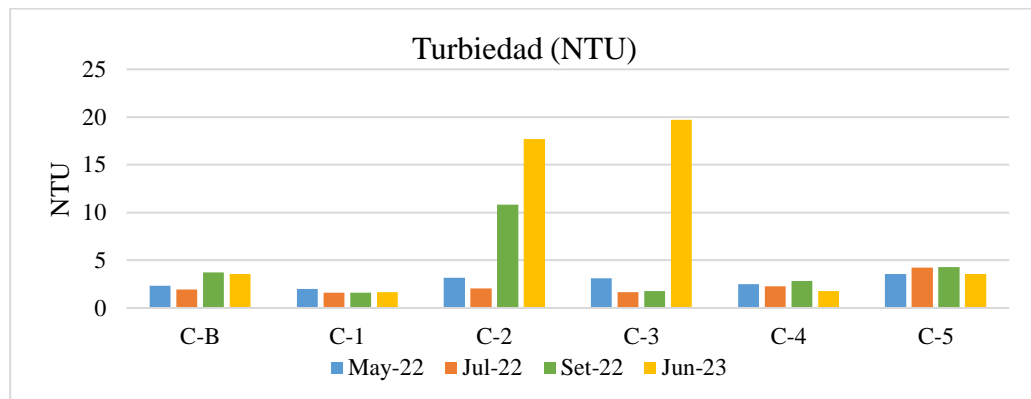
Nitratos del río Coata a menor caudal



4.3.7. Turbiedad

Figura 33

Comportamiento espacio-temporal de la turbiedad del río Coata



La turbidez se determinó in situ mediante un equipo Turbidímetro marca HACH, que nos indica numéricamente en unidades NTU la presencia de partículas en suspensión perdiendo el grado de transparencia. Mientras mayor presencia de sólidos suspendidos en el agua, mayores niveles de turbidez. Según la figura 33, los valores más altos se registraron en los puntos siguientes al Torococha en el mes de junio 2023 con 17,7 y 19,7 NTU en los puntos C-2 y C-3, mientras que en el resto de meses no se visualiza grandes cambios significativos. Según la figura 34 se evidencia que las aguas inician su recorrido con valores bajos de 1,97 NTU en C-1, que combinado con las aguas del Torococha se incrementa a 3,16 NTU en C-2 disminuyendo por dilución hasta 2,50 NTU en C-4, en el mapa se observa que no tiene cambios significativos en su recorrido, precisamente es el caudal el que permite que los sólidos tengan menor grado de concentración en relación a la masa de agua, razón por la cual en la figura 35 si se visualiza, ya que inicia con una turbiedad de 1,63 NTU en C-1 y se incrementa en los puntos siguientes hasta 17,7 y 19,7 NTU en el punto intermedio, sin embargo, va disminuye progresivamente

hasta su valor inicial de 1,79 en el puente Coata, esto se da principalmente por la presencia de micro y micrfitos presentes por la carga orgánica,

Figura 34

Turbiedad del río Coata a mayor caudal

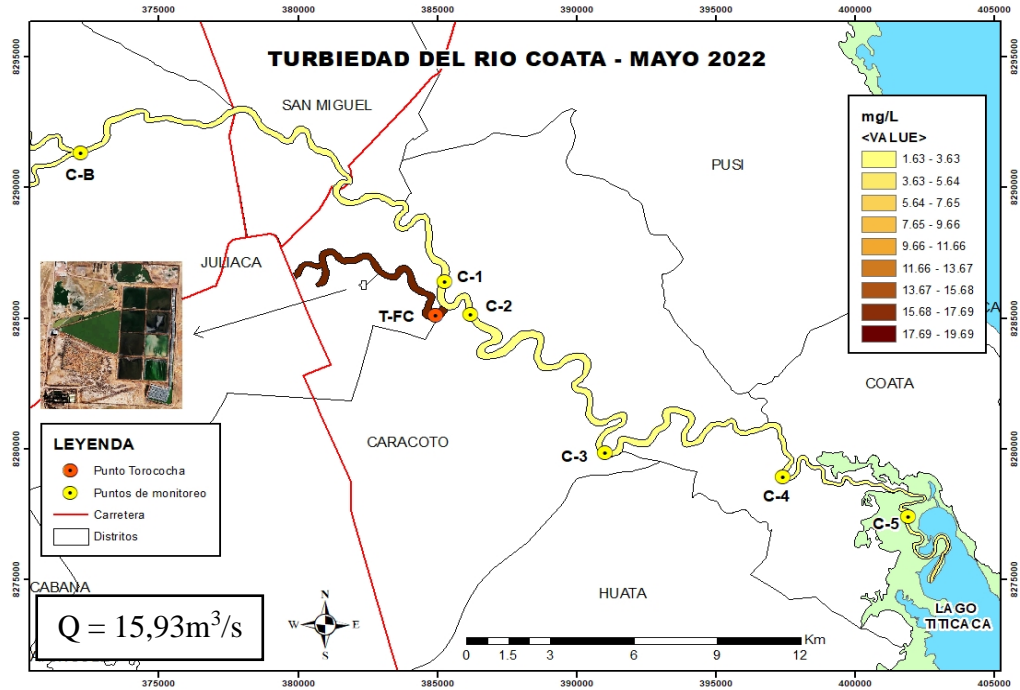
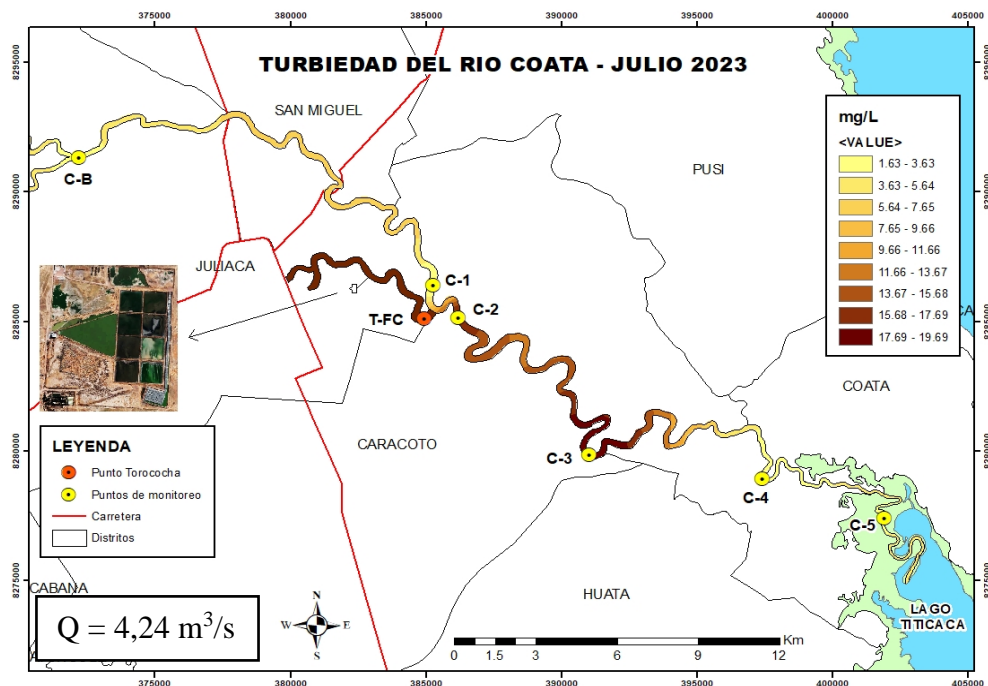


Figura 35

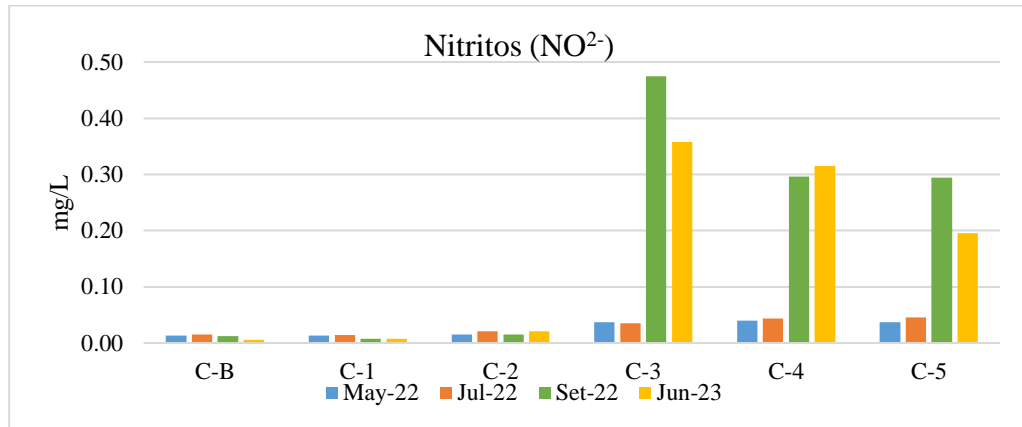
Turbiedad del río Coata a menor caudal



4.3.8. Nitritos

Figura 36

Comportamiento espacio-temporal de los nitritos del río Coata



Los nitritos al igual que los nitratos es debida a la contaminación por compuestos nitrogenados tales como fertilizantes, sin embargo, también es indicativo de contaminación con presencia fecal reciente, es importante indicar que el nitrito se encuentra en un estado de oxidación intermedio entre el nitrógeno amoniacal y el nitrato. Estas altas concentraciones son indicativos de contaminación industrial y de aguas residuales domésticas. Según la figura 36, se observa que las mayores concentraciones se registraron en los meses de setiembre 2022 y junio 2023 con 0,4750 mg/L y 0,3582 mg/L en el punto intermedio. Según la figura 37, a altos caudales no sufre grandes cambios significativos ya que inicia su recorrido con 0,0132 mg/L, y crece hasta un valor de 0,0395 mg/L en el puente Coata, sin embargo, en la figura 38 a bajo caudal si se puede apreciar este fenómeno, iniciando con 0,0080 mg/L, en el punto de mezcla y crece ligeramente a 0,0150 mg/L incrementándose considerablemente hasta 0,4750 mg/L en el punto intermedio disminuyendo ligeramente su valor hasta su desembocadura. La razón por la que en el punto de mezcla no se visualice presencia de nitritos, es porque

su aparición se da por la oxidación del nitrógeno amoniacal, apareciendo kilómetros más arriba en grandes concentraciones y se va oxidando conforme siga su recorrido.

Figura 37

Nitritos del río Coata a mayor caudal

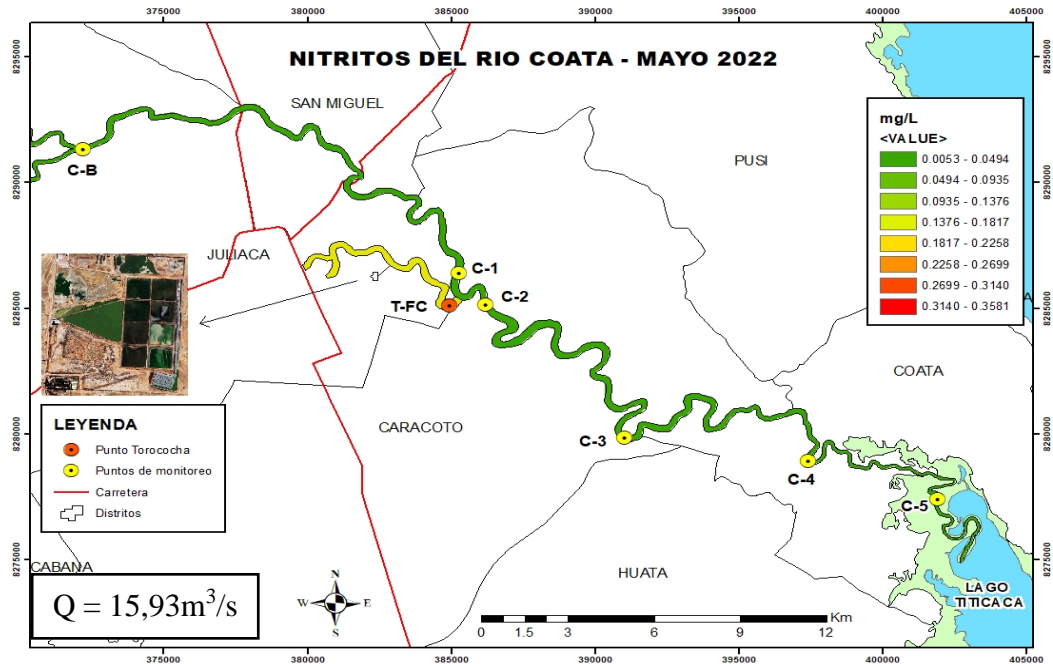
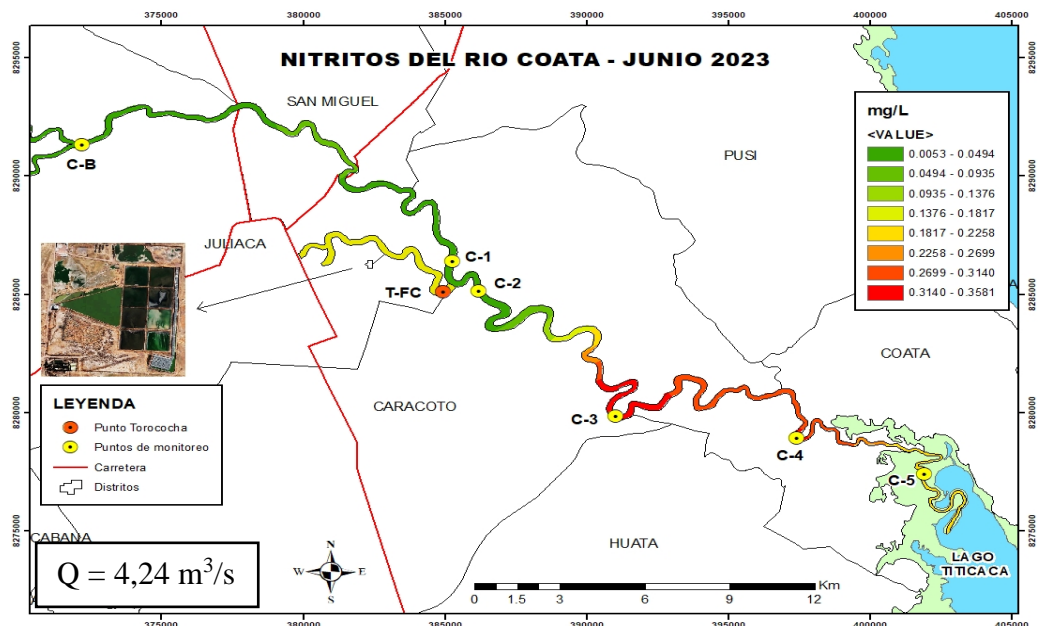


Figura 38

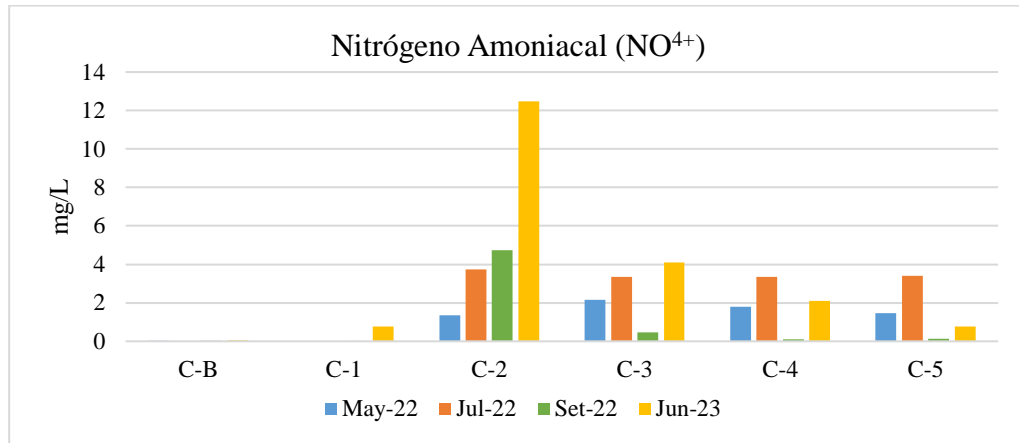
Nitritos del río Coata a menor caudal



4.3.9. Nitrógeno amoniacal

Figura 39

Comportamiento espacio-temporal del nitrógeno amoniacal del río Coata



El nitrógeno amoniacal está presente de forma natural en las aguas como producto de la degradación de compuestos orgánicos, resultante de la reducción del nitrógeno, también se encuentra en las descargas de efluentes domésticos. Estos efluentes por lo general son vertidos a los cuerpos de agua cercanos, como es el caso del río Coata. Según la figura 39 la concentración más alta se dio en el mes de junio 2023 con 12,47 mg/L, además es en este punto donde se visualiza las mayores concentraciones, siendo el punto de mezcla. Según la figura 40, como el caso de los nitritos, no se observa cambios significativos, ya que inicia su valor con una concentración de 0 mg/L y se incrementa hasta un valor de 2,17 mg/L en el punto intermedio, sin embargo, en la figura 41 a bajos caudales si se puede observar este fenómeno, ya que inicia con un valor de 0,78 mg/L y en la zona de contacto incrementa potencialmente hasta 12,47 mg/L, esto se da por ser el primer nivel de ciclo del nitrógeno después del nitrógeno orgánico, consecuentemente se va oxidando y perdiendo su concentración conforme avanza en su recorrido

transformándose en nitritos dando una concentración final de 0,78 mg/L en su desembocadura.

Figura 40

Nitrógeno amoniaco del río Coata a mayor caudal

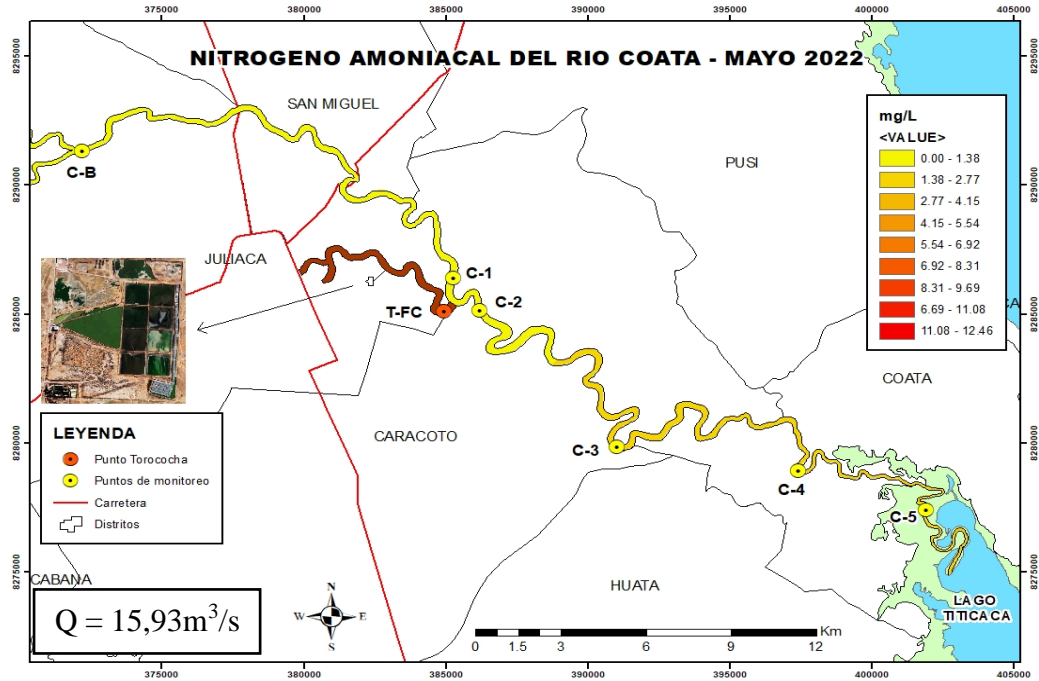
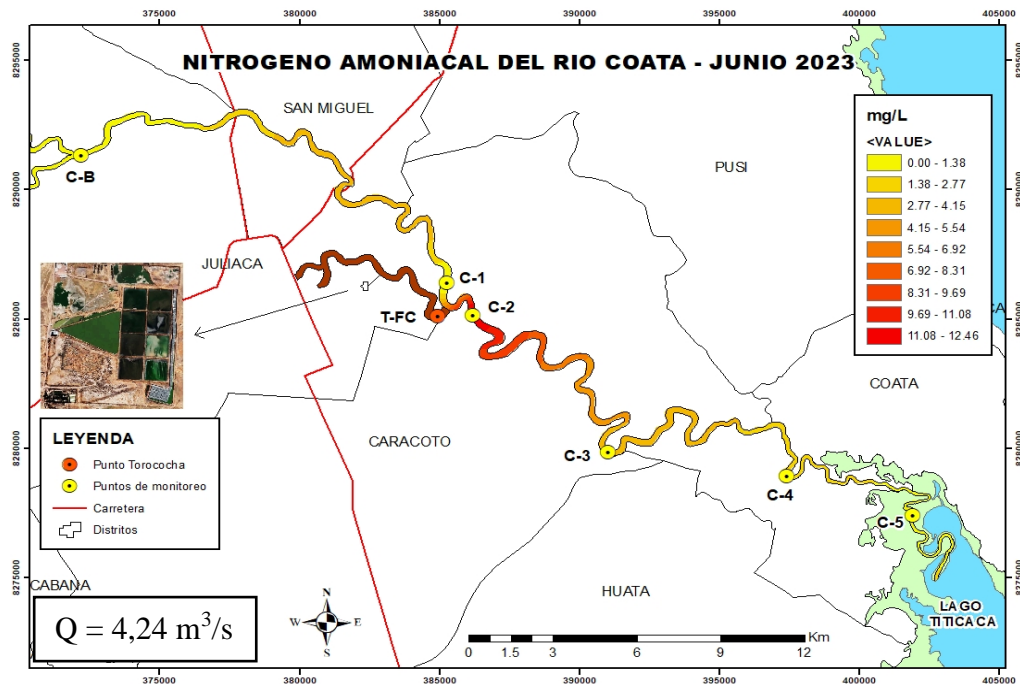


Figura 41

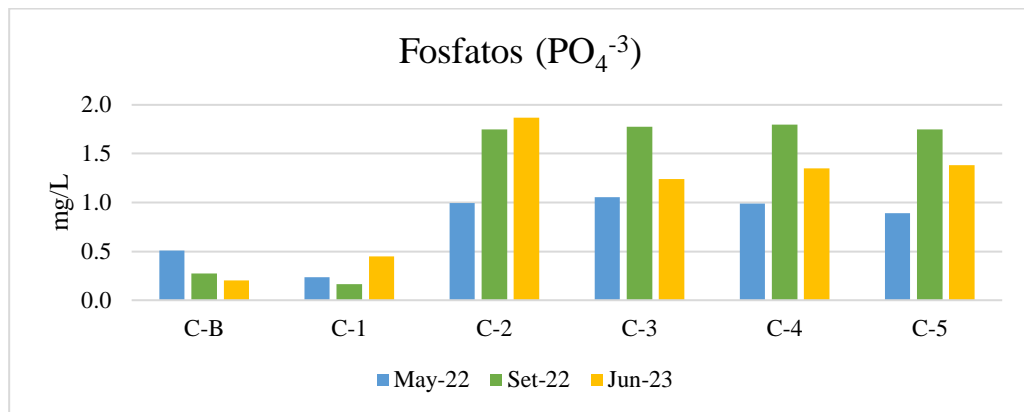
Nitrógeno Amoniaco del río Coata a menor caudal



4.3.10. Fosfatos

Figura 42

Comportamiento espacio-temporal de los fosfatos del río Coata



Los fosfatos también son indicadores de contaminación producto de actividades agrícolas en la aplicación de fertilizantes, también en el uso de detergente en zonas urbanas, además de otros aportes como la erosión de suelos o la descomposición de materia orgánica, sin embargo, también indica de contaminación de carácter fecal producto de las aguas residuales domésticas. Según la figura 42, se observa que la concentración más alta se da en junio 2023 con 1,87 mg/L, mientras que el mes con mayores concentraciones se dan en setiembre con 1,768 mg/L en promedio. Según la figura 43 a altos caudales se observa que el río inicia su recorrido con 0,237 mg/L y se incrementa hasta un valor de 0,996 mg/L manteniéndose en este rango hasta 0,890 mg/L en su desembocadura, mientras que en la figura 44 a bajo caudal, se observa un incremento mucho mayor de 0,450 mg/L incrementándose en el punto de mezcla en 1,870 mg/L disminuyendo hasta valores de 1,380 mg/L en su desembocadura. En ambos casos, los fosfatos aumentan su concentración de manera inmediata al contacto con las aguas residuales, y esta decrece ligeramente conforme avanza en su recorrido.

Figura 43

Fosfatos del río Coata a mayor caudal

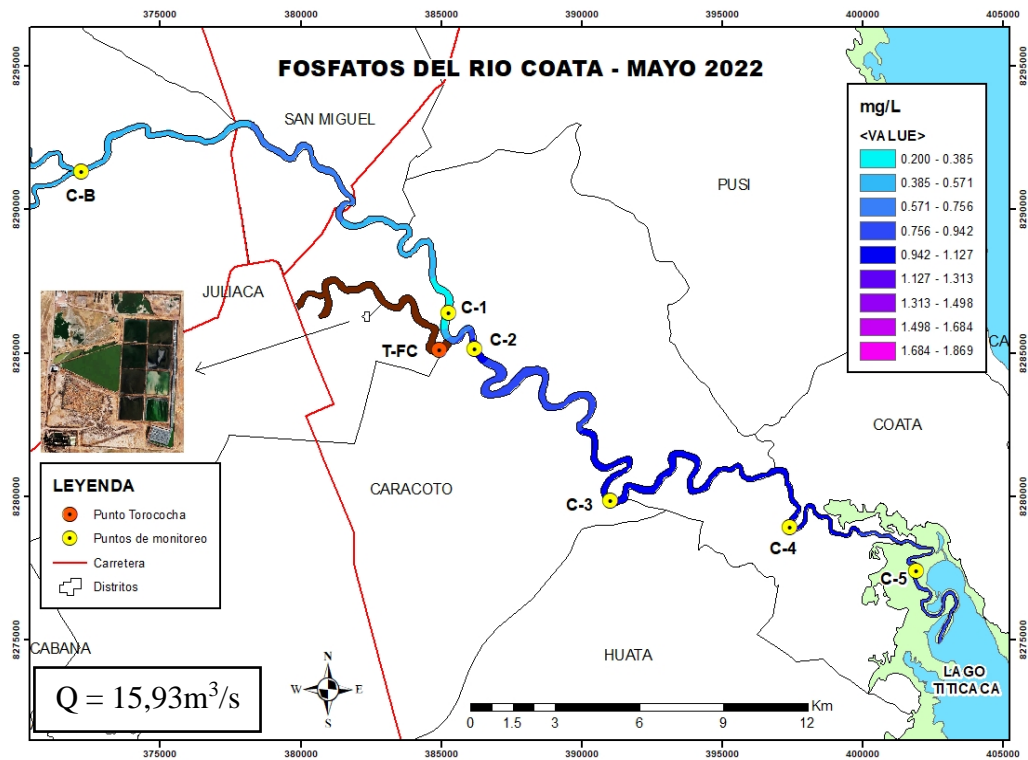
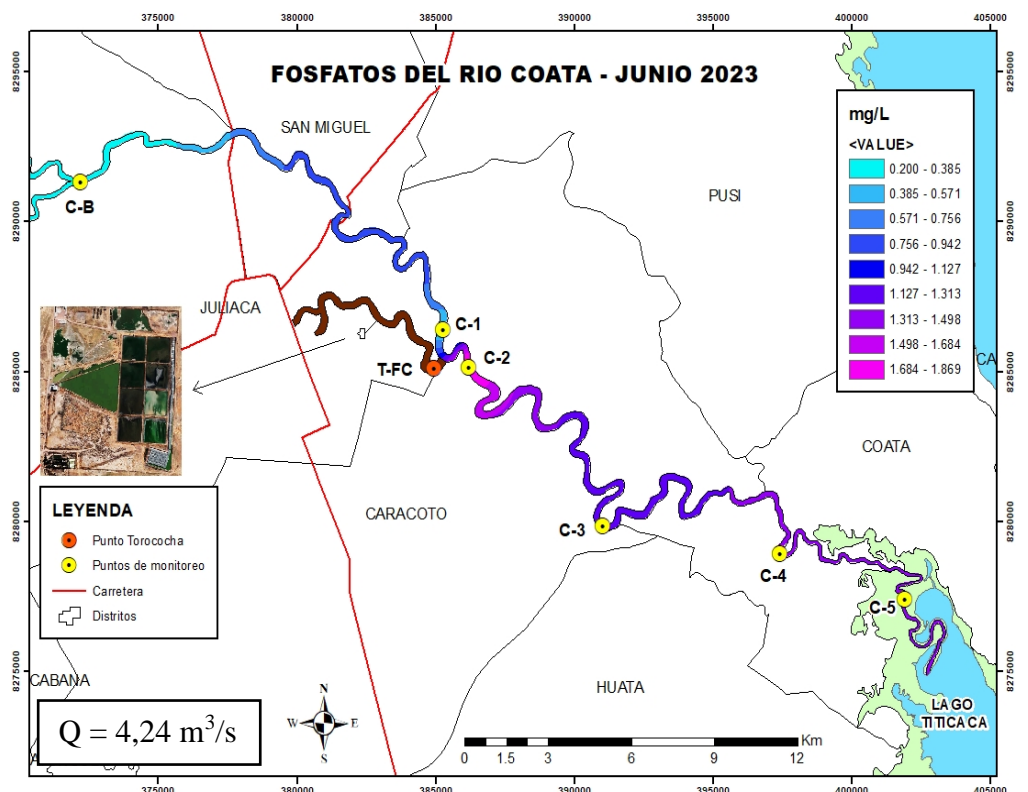


Figura 44

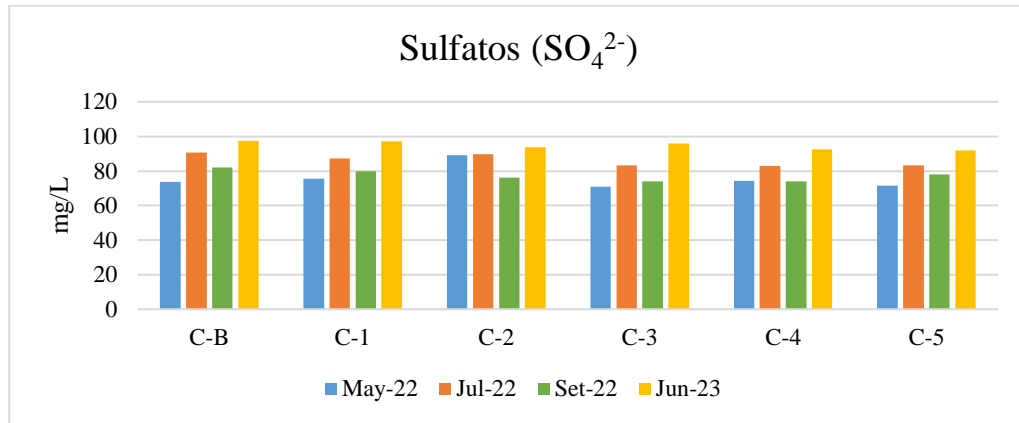
Fosfatos del río Coata a menor caudal



4.3.11. Sulfatos

Figura 45

Comportamiento espacio-temporal de los sulfatos del río Coata



Los sulfatos son compuestos que pueden ser encontrados naturalmente en el agua, por la disolución parcial de materiales del suelo y su lavado, siendo las más importantes rocas formadas con suelos sulfatados o yeso, aunque sus niveles elevados de concentración pueden afectar las características organolépticas y provocar un efecto laxante en los consumidores. Según la figura 45 se observa que las concentraciones más altas se registraron en junio 2023 con 94,8 mg/L en promedio. En general, sus valores después de la mezcla con la carga contaminante, tiene un fenómeno inverso al resto de nutrientes, ya que, en vez de incrementarse esta se reduce, sin embargo, este fenómeno se observa ligeramente al no tener gran afectación. Según la figura 46 y 47 se observa que a lo largo del río Coata la variación que existe desde el inicio de su recorrido hasta la desembocadura al Lago Titicaca se mantiene homogéneo con ligeras variaciones a causa de la mezcla con el Torococha. A pesar de ello, su incremento no representa un valor muy significativo. En comparación con la recopilación de datos, Menéndez (2018) obtuvo en promedio 78,46 mg/L en el puente Churi, 75,61 mg/L en el punto

intermedio y 75,48 mg/L en el puente Coata. Estos valores son más bajos, pero no se alejan tanto de esta investigación.

Figura 46

Sulfatos del río Coata a mayor caudal

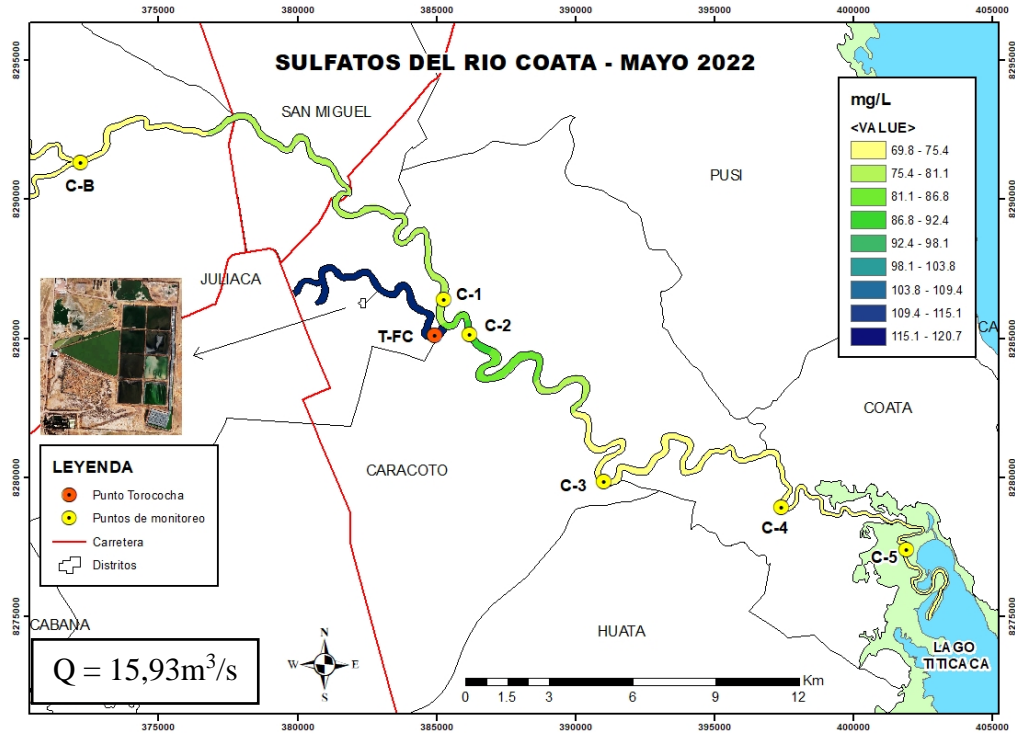
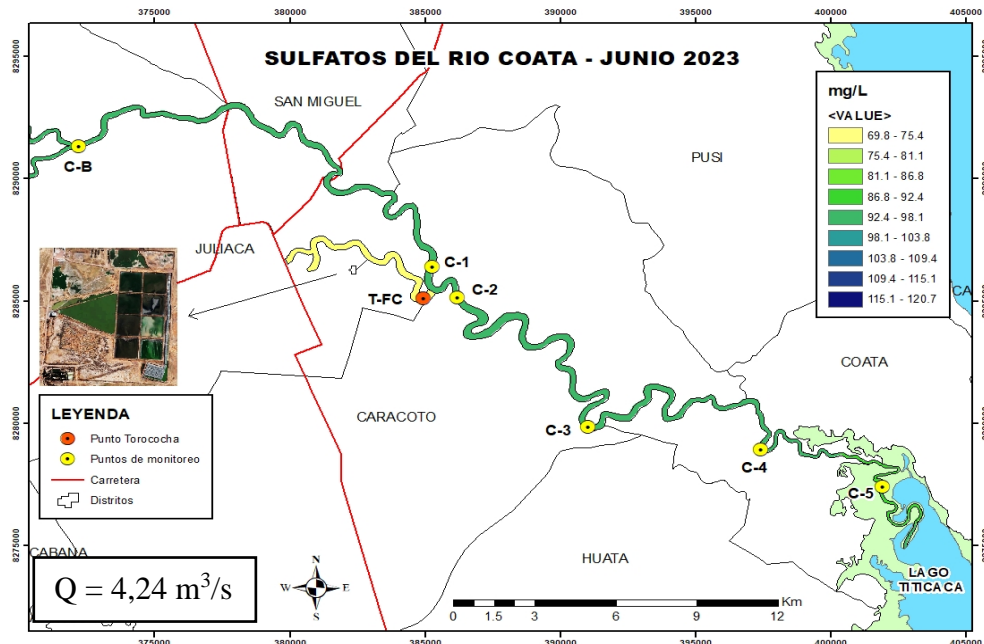


Figura 47

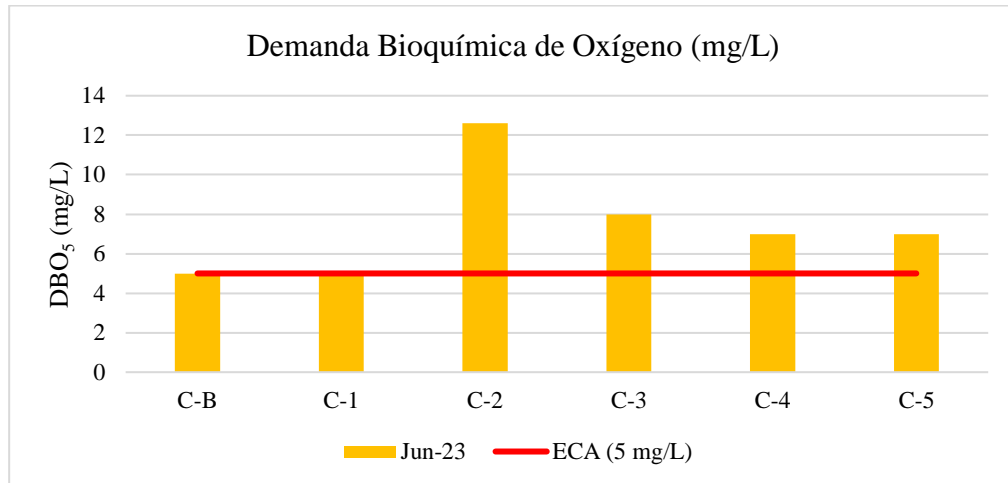
Sulfatos del río Coata a menor caudal



4.3.12. Demanda bioquímica de oxígeno

Figura 48

Comportamiento de la DBO₅ del río Coata



La demanda bioquímica de oxígeno es un indicador de la calidad del agua, que mide el oxígeno que se consume en la degradación de materia orgánica por parte de los microorganismos, además es utilizado para medir la eficiencia de los tratamientos de las aguas residuales.

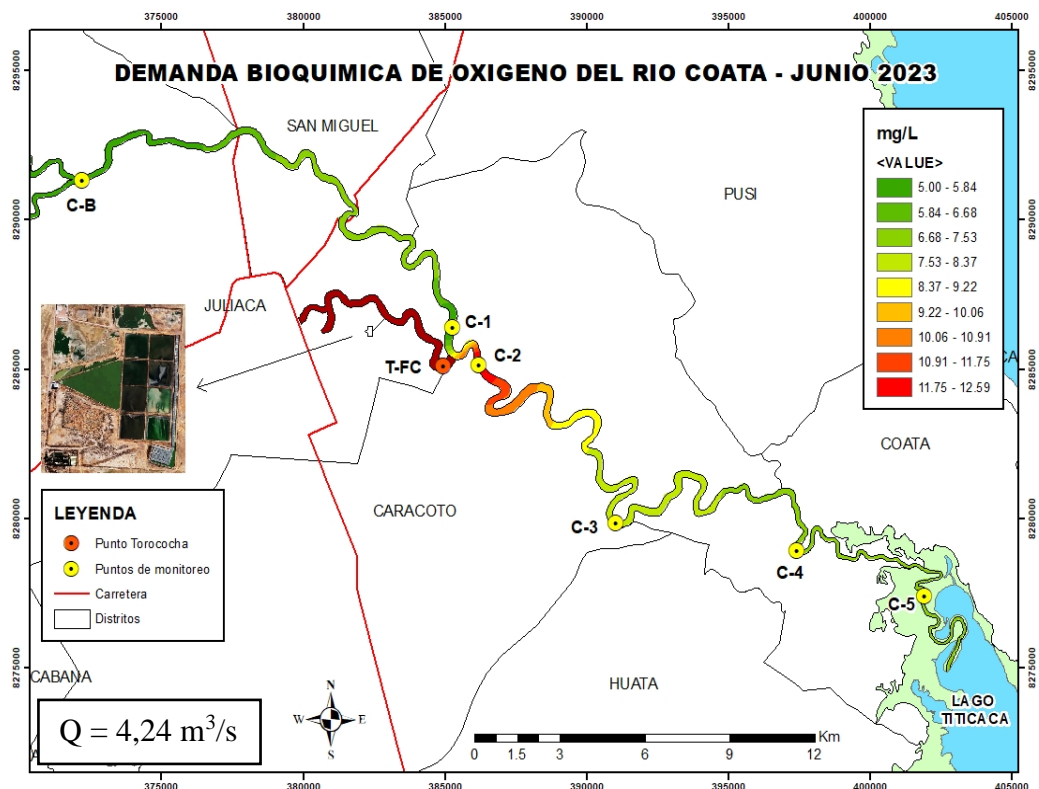
Para el caso de la DBO solo se tiene registro del último dato del presente año, donde se puede visualizar en la figura 48 el comportamiento que tiene a lo largo de su recorrido. De acuerdo a los resultados obtenidos según los ECA de la categoría 4 (D.S. N°004-2017-MINAM) (<5 mg/L), la DBO inicial cumple con el ECA dando un resultado de 5 mg/L, mientras que al contacto con la carga contaminante, esta si incrementa significativamente a 12,6 mg/L, y por su acción autodepuradora esta se va reduciendo progresivamente a 8 y 7 mg/L en los puntos finales, lo mismo que se observa en la figura 49, donde el punto crítico se da en el punto de mezcla del puente Canchi chico disminuyendo su concentración hasta el término de su recorrido, sin embargo, no consigue cumplir el ECA por debajo de

5 mg/L, concluyendo que las aguas del río Coata no son capaces de auto purificarse naturalmente.

En comparación con los resultados recopilados se tiene que Callasaca et al. (2022) obtuvo 840 mg/L en el puente Churi y 560 mg/L en el puente Coata; Menéndez (2018) obtuvo 30,56 mg/L en el puente Churi, 30,92 en el punto intermedio y 21,37 mg/L en el puente Coata; Gutiérrez (2018) obtuvo 2,2 mg/L en el puente Churi y 27 mg/L en el puente Canchi Chico, mientras que Condori y Parillo (2018) obtuvo 160 mg/L en el puente Churi, 353 mg/L en el puente Canchi Chico, 255 mg/L en el punto intermedio y 315 mg/L en el puente Coata. Según a estos datos, los resultados de Gutiérrez (2018) se acercan más a los resultados de esta investigación además de ser analizados en un laboratorio acreditado.

Figura 49

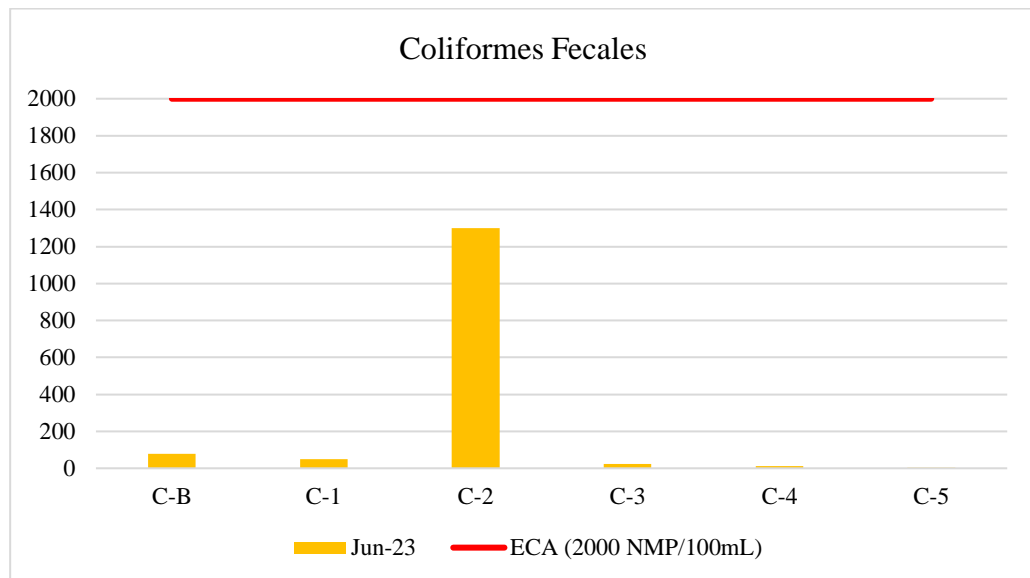
Demanda bioquímica de oxígeno del río Coata a menor caudal



4.3.13. Coliformes fecales

Figura 50

Comportamiento de los coliformes fecales en el río Coata



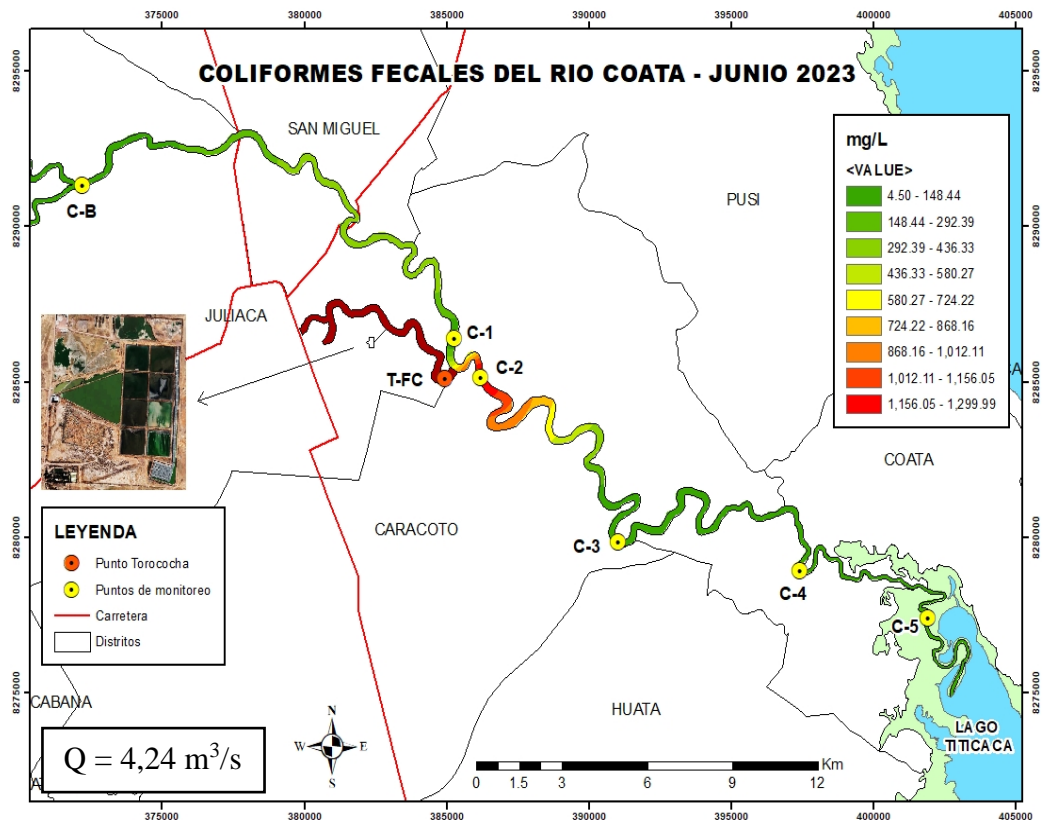
Los coliformes termotolerantes son indicadores de contaminación de origen fecal ya que estas bacterias se encuentran en el tracto intestinal de los hombres y animales de sangre caliente, su presencia en los cuerpos de agua generalmente es debido a descargas de aguas residuales. Para este parámetro, de igual forma solo se tomó datos del presente año, donde se puede observar en la imagen 48 su evolución donde inicia su recorrido con 49 NMP/100 mL y se incrementa drásticamente hasta un valor de 1 300 NMP/100 mL, sin embargo, decae considerablemente en el punto intermedio con 22 NMP/100 mL dando un valor final de 4,5 NMP/100 mL. De acuerdo a los resultados obtenidos según los ECA de la categoría 4 (D.S. N°004-2017-MINAM) (<2000 NMP/100 mL), ninguno de los valores supera el ECA establecido, cumpliendo con la normativa.

En comparación con los resultados recopilados, Callasaca et al. (2022) obtuvo resultados de <3 en todos sus puntos de monitoreo; Menéndez (2018)

obtuvo 48 NMP/100 mL en el puente Churi, 574 NMP/100 mL en el punto intermedio y 88 NMP/100 mL en el puente Coata; Gutiérrez (2018) obtuvo 460 NMP/100 mL en el puente Churi y 2400 NMP/100 mL en el puente Canchi Chico; mientras que Condori y Parillo (2018) obtuvieron 63000 NMP/100 mL en el puente Canchi Chico, 23700 NMP/100 mL en el punto intermedio y 23700 NMP/100 mL en el puente Coata.

Figura 51

Coliformes Fecales del río Coata a menor caudal



4.4. DISCUSIONES

- Angarita (2019) en su investigación evalúa la capacidad de autodepuración del río Algodonal aplicando dos modelos matemáticos, la primera es el método de Streeter Phelps que recomienda utilizarla frente a la descarga de un vertimiento de aguas residuales a un río, él la utiliza en dos tramos frente al vertimiento de una laguna de oxidación y la otra en la bocatoma de un acueducto, considerados como puntos críticos, mientras que el segundo método es el Qual2k utilizada para evaluar la asimilación del río y su comportamiento frente a otros contaminantes que influyen en la calidad del agua, con esta recomendación, la investigación presente utilizó el método de Streeter Phelps para la descarga de aguas residuales del río Torococha, sin embargo, con los resultados obtenidos y las características hídricas del río, involucraría la aplicación del método en un solo tramo sin necesidad de dividirla en tres tramos, no obstante, para futuras investigaciones, se puede aplicar el método Qual2k aplicado por Angarita (2019) para evaluar otros parámetros.
- Diaz (2018) es su investigación obtuvo como constante de desoxigenación (K_d) de 0,37 en el tramo I y 0,38 en el tramo II y la constante de reaeración (K_a) de 0,598 en el tramo I y 0,61 en el tramo II, mientras que los resultados del estudio presente dieron como resultado la K_d de 0,782 en el tramo I y 1,088 en el tramo II, mientras que la K_a dio 0,112 en el tramo I y 0,152 en el tramo II, la comparación de estos resultados nos muestran que cada río tiene una característica diferente independientemente de la metodología utilizada, ya que estos resultados nos muestran que el río de la investigación de Diaz (2018) requiere poca pérdida de oxígeno y una mejor recuperación en la aireación facilitando el poder autodepurativo del río, mientras que el río Coata tiene un comportamiento inverso, ya que indica un mayor grado de pérdida



de oxígeno, mientras que las características del río mismo impiden una mejor reaeración dificultando su poder autodepurativo.

- Condori y Parillo (2018) en su investigación evaluaron la calidad del río Coata por la descarga de aguas residuales del río Torococha en el puente Churi (DM-1), Puente Canchi Chico (DM-3), punto intermedio (DM-4) y río Torococha (DM-5) dando como resultados una DBO₅ de 160, 353, 255 y 315 mg/L, coliformes fecales de 9 700, 37 200, 70 300 y 501 000 NMP/100 mL, nitratos de 1, 1, 2 y 2 mg/L, oxígeno disuelto de 4, 5, 5, 4 mg/L respectivamente en cada parámetro, mientras que los resultados de esta investigación nos dan una DBO₅ de 5, 12,6, 8 y 143,4 mg/L, CF con 49, 1 300, 22 y 490 000 NMP/100 mL, nitratos con 1,8, 3,9, 7,3 y 72,5 mg/L y OD con 4,13, 6,75, 4,68 y 0,85 mg/L, comparando ambos parámetros, existe una gran diferencia principalmente con la DBO₅ y CF siendo estos los parámetros más sensibles frente a factores externos como la metodología de análisis, logrando variación en los resultados, no obstante respecto a la DBO₅, nos muestra que también después del vertimiento la DBO disminuye por su acción autodepurador del río, mientras que los CF se incrementan conforme avanza, dando un resultado opuesto, respecto a los nitratos, esta aumenta conforme avanza al igual que nuestra investigación y el OD no sufre variación significativa, además Condori y Parillo (2018) concluyen que las aguas del río Coata se encuentran en categoría contaminada antes y después del río Torococha.
- Gutiérrez (2018) en su investigación evaluó la calidad del agua del río Coata antes y después del vertimiento aplicando dos métodos: los índices de calidad ambiental ICA-PE y CCME-WQI, donde los ICA-PE dan una calificación de 99 y 90 clasificados como excelentes, mientras que el CCME-WQI dan una calificación de 80 (buena) antes de la descarga y 57 (marginal) después de la descarga, los métodos antes



mencionados también sirven como medios de evaluación frente a la contaminación de un río, mientras que nuestra investigación, implica utilizar un modelo que nos permita estimar datos en todo el trayecto del río, sin la necesidad de tomar muestras de agua en diferentes puntos del río, y tomando en consideración solo la calidad del agua y las características hidrológicas del vertimiento y un punto antes de su contacto, reduciendo costos. Nuestra investigación concluye que la autodepuración del agua, el río Coata si cumple este rol, sin embargo, la falta de lluvias y las características del mismo, dificultan la recuperación del oxígeno del agua reduciendo su capacidad autopurificadora frente a otros parámetros, además de la distancia hasta su desembocadura no le permite recuperarse completamente contaminando de esta forma también las aguas del Lago Titicaca.

- Sánchez (2016) analizó las aguas del río Huallaga indicando que, respecto al pH, DQO y conductividad eléctrica si existe autodepuración, mientras que, para el OD, conductividad, DBO₅, coliformes totales y termotolerantes es dificultoso su efectividad, en nuestra investigación, los parámetros que no se autodepuran respecto a la distancia recorrida son el nitrato, nitrito, fosfatos y DBO₅, mientras los que si tienen mejor asimilación son el nitrógeno amoniacal, coliformes fecales y turbiedad.



V. CONCLUSIONES

- Se caracterizó la calidad del agua del río Coata siendo el OD y DBO los más relevantes para el modelamiento de autodepuración, dando como resultados al OD una concentración inicial antes del vertimiento de 6,69 mg/L reduciendo su valor a 4,68 mg/L y se recupera a 6,75 mg/L; para la DBO, antes del vertimiento tiene una concentración inicial de 5 mg/L, incrementándose a 12 mg/L reduciéndose progresivamente a 7 mg/L. Para el caso de la caracterización hidrológica en el río Coata para los tramos I, II y III tuvo un caudal de 4,239, 2,249 y 1,866 m³/s, una velocidad de 0,348, 0,664 y 0,392 m/s y una profundidad de 0,19, 0,18 y 0,28 m respectivamente, mientras que el caudal del vertimiento fue de 0,332 m³/s.
- El modelo de Streeter-Phelps para determinar la capacidad auto depurativa del río Coata estimando el comportamiento del OD y DBO en función de la distancia recorrida en tres tramos dieron resultados positivos en su aplicación principalmente para la DBO siendo el primer tramo el más relevante, obteniendo la distancia de homogenización en 755,14 m, oxígeno de saturación de 5,909 mg/L, déficit de oxígeno de -0,356 mg/L, constante de reaireación de 0,112, constante de desoxigenación de 0,782, distancia crítica de 2,9 Km y tiempo crítico de 1,99 h. En tanto, la simulación de la DBO guarda relevancia en la distancia crítica y puente Coata con 15,05 y 8,085 mg/L con los resultados de laboratorio de 14 y 7 mg/L, caso contrario en el caso del OD cuya simulación decrece sin considerar factores externos que favorecen su incremento alejándose de los datos reales.
- El comportamiento de cada parámetro del río Coata y su acción autopurificador es variable en función del caudal mensual, observando que a altos caudales (15,93 m³/s) el río tiene mayor facilidad autopurificadora que a bajo caudal de (4,24 m³/s) evaluando la afectación que ocasiona a lo largo de su recorrido siendo los parámetros



con mayor relevancia al nitrógeno amoniacal, de 0 a 12,47 mg/L en el punto de mezcla C-2; nitritos de 0,0080 a 0,3582 mg/L en el punto intermedio C-3; nitratos de 1,8 a 7,3 mg/L en C-3; fosfatos de 0,450 a 1,870 mg/L en C-2; turbiedad de 1,63 a 19,7 NTU en C-3; DBO5 de 5 a 12,6 mg/L en C-2; coliformes fecales de 49 a 1 300 NMP/100 mL en C-2, en todos los casos disminuyen su concentración progresivamente; OD de 6,69 a 4,68 mg/L, recuperando su concentración conforme avanza; el resto de parámetros no sufren cambios significativos.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a futuros investigadores realizar la misma investigación pero a diferentes caudales, principalmente en los meses de enero y febrero ya que son los meses con mayor presencia de lluvias según el Senamhi, ya que el presente estudio se realizó en una época de déficit hídrico, que nos impide analizar de manera eficiente el grado de contaminación que producen las aguas residuales de la ciudad de Juliaca de forma anual, sin embargo, ya teniendo un modelo matemático para caudales bajos, se requiere una investigación que nos permita estimar una diferencia entre ambas condiciones.
- Para un mejor análisis de contaminación, se recomienda adicionar otros parámetros con igual grado de relevancia, ya que los contaminantes que produce la ciudad de Juliaca se enfocan en diferentes vertimientos industriales, comerciales entre otras actividades además de las domésticas que contribuyen a la contaminación directa al río Coata, considerando la DQO, coliformes totales, aceites y grasas, fósforo total, Amoniac total, nitrógeno total, sulfuros y arsénico.
- Para las autoridades a un futuro en relación a la investigación, se recomienda implementar una estación hidrológica para determinar el caudal en el puente Churi ya que reúne las condiciones apropiadas en este punto, mientras que para Seda Juliaca, también se solicitaría realizar medición periódica del caudal de las aguas residuales que ingresan al río, en ambos puntos se requeriría implementar una medición mensual de análisis de DBO y OD para determinar el grado de autodepuración del agua, ya que no requiere el manejo de varios parámetros y de esta forma facilitar en la toma de decisiones para futuros proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales y solucionar el problema de la contaminación del agua que afecta a poblaciones aledañas aguas abajo.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angarita, W. (2019). *Determinación del grado de autodepuración del río Algodonal, mediante la utilización de modelos de simulación Streeter & Phelps y Qual2k* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]
- Autoridad Nacional del Agua (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales* [1ra edición], Grafica Industrial Alarcón S.R.L.
- Autoridad Nacional del Agua (2017). *Fuentes contaminantes en la cuenca del Lago Titicaca* [1ra edición], Edita Imprime tu Libro.
- Burgos, S. y Mera, Y. (2022). *Comportamiento del efluente de la Rallandería de yuca (manihot esculenta) para el cálculo de la presión ejercida sobre el río Tarugo* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí – Manuel Félix López]
- Cajas, V. (2015). *Estimación de valores de contaminación difusa para el río Tomebamba en zonas periféricas y urbanas – primera aproximación* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca - Ecuador]
- Callasaca, R., Larico, C., Fernandez, D., Cabana, R., Cahua, J. y Quiñonez, J. (2022) Variación de la calidad del agua del río Coata según el ICA-PE por fuentes contaminantes. *Catedra Villareal* 10(1). <https://doi.org/10.24039/cv20221011189>
- Clavijo, J. y Ramírez, I. (2021). *Cálculo de autodepuración del río San Cristóbal* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]
- Coila, J. (2022). *Evaluación de la calidad del agua en la zona de confluencia de los ríos Torococha y Coata* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]
- Condori, M. y Parillo, E. (2018). *Efecto del vertimiento de las aguas residuales del riachuelo Torococha en la calidad del agua del río Coata en periodo de avenidas*



- ciudad de Juliaca* [Tesis de pregrado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velázquez]
- Cornejo, A. (2022) *Caracterización espacio temporal de la contaminación por acuicultura en las aguas superficiales de la Laguna Lagunillas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]
- Diaz, G. (2018). *Determinación de la calidad del agua del río Naranjos mediante el uso de los coeficientes cinéticos de auto depuración, distrito de Pardo Miguel – San Martín, 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]
- Drolc, A., & Koncan, J. (1999). Calibration of QUAL2E model for the Sava River. *Water Science and Technology*, pág. 40(10), 111-118. Slovenia.
- Flores, J. y Menéndez, J. (2020). *Evaluación de la capacidad de autodepuración de materia orgánica del río carrizal sobre los efluentes de la laguna de oxidación de calceta* [Tesis de pregrado, ESPAMMFL]
- Gutiérrez, J (2015). *Evaluación de la cinética de oxidación y remoción de materia orgánica en la auto purificación de un río de montaña para el Área Metropolitana de Bucaramanga*. [tesis de pre grado, Universidad nacional de Colombia Cede Medellín, Facultad de Minas, Colombia]
- Gutierrez, V. (2018). *Evaluación de la calidad de agua del río Coata en la desembocadura del río Torococha utilizando el Índice de Calidad de Agua del Consejo Canadiense CCME–WQI y el ICA–PE, Puno – 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]
- Limas, J. (2022). *Análisis de la capacidad de autodepuración del río Higueras, mediante la determinación de coliformes termotolerantes, entre Huancapallac y el Puente Tingo del distrito de Huánuco – 2022* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]



- Martínez, F. y Pérez, I. (2019). *Calibración de un espectrofotómetro UV-Visible y evaluación de la incertidumbre* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Nicaragua (UNAM-León)]
- Menéndez (2018). *Evaluación de parámetros fisicoquímicos y calidad bacteriológica del río Coata – Región Puno 2015* [Tesis de maestría, Universidad José Carlos Mariategui, Perú]
- Menéndez, J., Flores, J., Noles, P., Menéndez, C. y Espinel, V. (2022). Capacidad auto depurativa del río Carrizal sobre efluentes de la laguna de oxidación. *Calceta. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 25(49), 65-72. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.19681>
- Mera, D. (2014). *Aplicación del modelo de Streeter Phelps para el estudio de autodepuración de aguas residuales de una piscifactoría de truchas en un tramo del río Las Piedras* [Tesis de pregrado, Universidad de Cauca, Colombia]
- Minam. (2017). *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua*, Recuperado de http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/DS-003-2017-MINAM.pdf
- Nadal, A., Cossavella, A., y Larrosa, N. (2014). *Determinación de la capacidad de autodepuración del río Tercero (Ctalamochita), provincia de Córdoba*. [tesis de maestría, Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales]
- Orduz, L. (2016). *Determinación y comparación de la tasa de reaireación de los ríos Molinos, Torca, Arzobispo y de la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá mediante la aplicación de ecuaciones empíricas*. [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas de Colombia]
- Ortega, G. (2014). *Instructivo de medición de caudal*. (1° Edición). [Documento de Sistema de Gestión de Calidad, Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo]



- Rivera, J. (2008). *Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la parte alta de la cuenca del río Naranjo, ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]
- Sánchez, J. (2016). *Coeficientes cinéticos de autodepuración del agua en el río Huallaga* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]
- Senamhi (2007). *Informe Técnico Evaluación Hidrológica Cuenca del Lago Titicaca 2006 – 2007*, [Dirección general de hidrología y recursos hídricos]
- Suárez, J. (2008). *Modelos de Calidad de Aguas: “Calidad de Aguas en Ríos Autodepuración*, Universidad de Coruña, Master en Ingeniería del Agua.
- Tamara, M. (2019). *Determinación de la capacidad de autodepuración, del río Huallaga; en el tramo que comprende el puente Joaquín Garay, hasta el Puente Rancho con base al balance de oxígeno disuelto - Amarilis - Huánuco, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]
- Toussaint, N. (2019). *Determinación de un índice global de autodepuración para ríos de montaña a partir de calidad de agua y características hidro-topográficas*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]
- Zabaleta, E. (2016). *Evaluación del porcentaje de remoción de materia orgánica en función a las características fisicoquímicas del río Grande – Distrito Celendín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]



ANEXOS

ANEXO A: Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias ds-004-2017-MINAM

18 **NORMAS LEGALES** Miércoles 7 de junio de 2017 / **El Peruano**

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
FÍSICOS- QUÍMICOS						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(μ S/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO ₃ ⁻) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoníaco Total (NH ₃)	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
INORGÁNICOS						
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081
ORGÁNICOS						
Compuestos Orgánicos Volátiles						
Hidrocarburos Totales de Petróleo	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
BTEX						
Benceno	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Hidrocarburos Aromáticos						
Benzo(a)Pireno	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Antraceno	mg/L	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Fluoranteno	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Bifenilos Policlorados						
Bifenilos Policlorados (PCB)	mg/L	0,000014	0,000014	0,000014	0,00003	0,00003
PLAGUICIDAS						
Organofosforados						
Malatión	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Paratión	mg/L	0,000013	0,000013	0,000013	**	**
Organoclorados						
Aldrín	mg/L	0,000004	0,000004	0,000004	**	**
Clordano	mg/L	0,0000043	0,0000043	0,0000043	0,000004	0,000004
DDT (Suma de 4,4'-DDD y 4,4'-DDE)	mg/L	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
Dieldrín	mg/L	0,000056	0,000056	0,000056	0,0000019	0,0000019
Endosulfán	mg/L	0,000056	0,000056	0,000056	0,0000087	0,0000087
Endrín	mg/L	0,000036	0,000036	0,000036	0,0000023	0,0000023
Heptacloro	mg/L	0,000038	0,000038	0,000038	0,0000036	0,0000036

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Heptacloro Epóxido	mg/L	0,0000038	0,0000038	0,0000038	0,0000036	0,0000036
Lindano	mg/L	0,00095	0,00095	0,00095	**	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Carbamato						
Aldicarb	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,00015	0,00015
MICROBIOLÓGICO						
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	2 000	1 000	2 000

(a) 100 (para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b) Después de la filtración simple.

(c) En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Nitratos-N ($\text{NO}_3\text{-N}$), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO_3^-).

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Nota 5:

- El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

(1) Aplicar la Tabla N° 1 sobre el estándar de calidad de concentración de Amoníaco Total en función del pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH_3) que se encuentra descrita en la Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales.

(2) Aplicar la Tabla N° 2 sobre Estándar de calidad de Amoníaco Total en función del pH, la temperatura y la salinidad para la protección de la vida acuática en agua de mar y estuarios (mg/L de NH_3).

Tabla N° 2: Estándar de calidad de Amoníaco Total en función del pH, la temperatura y la salinidad para la protección de la vida acuática en agua de mar y estuarios (mg/L de NH_3)

pH	Temperatura (°C)							
	0	5	10	15	20	25	30	35
Salinidad 10 g/kg								
7,0	41,00	29,00	20,00	14,00	9,40	6,60	4,40	3,10
7,2	26,00	18,00	12,00	8,70	5,90	4,10	2,80	2,00
7,4	17,00	12,00	7,80	5,30	3,70	2,60	1,80	1,20
7,6	10,00	7,20	5,00	3,40	2,40	1,70	1,20	0,84
7,8	6,60	4,70	3,10	2,20	1,50	1,10	0,75	0,53
8,0	4,10	2,90	2,00	1,40	0,97	0,69	0,47	0,34
8,2	2,70	1,80	1,30	0,87	0,62	0,44	0,31	0,23
8,4	1,70	1,20	0,81	0,56	0,41	0,29	0,21	0,16
8,6	1,10	0,75	0,53	0,37	0,27	0,20	0,15	0,11
8,8	0,69	0,50	0,34	0,25	0,18	0,14	0,11	0,08
9,0	0,44	0,31	0,23	0,17	0,13	0,10	0,08	0,07
Salinidad 20 g/kg								
7,0	44,00	30,00	21,00	14,00	9,70	6,60	4,70	3,10
7,2	27,00	19,00	13,00	9,00	6,20	4,40	3,00	2,10
7,4	18,00	12,00	8,10	5,60	4,10	2,70	1,90	1,30
7,6	11,00	7,50	5,30	3,40	2,50	1,70	1,20	0,84
7,8	6,90	4,70	3,40	2,30	1,60	1,10	0,78	0,53
8,0	4,40	3,00	2,10	1,50	1,00	0,72	0,50	0,34
8,2	2,80	1,90	1,30	0,94	0,66	0,47	0,31	0,24
8,4	1,80	1,20	0,84	0,59	0,44	0,30	0,22	0,16
8,6	1,10	0,78	0,56	0,41	0,28	0,20	0,15	0,12
8,8	0,72	0,50	0,37	0,26	0,19	0,14	0,11	0,08
9,0	0,47	0,34	0,24	0,18	0,13	0,10	0,08	0,07
Salinidad 30 g/kg								
7,0	47,00	31,00	22,00	15,00	11,00	7,20	5,00	3,40
7,2	29,00	20,00	14,00	9,70	6,60	4,70	3,10	2,20
7,4	19,00	13,00	8,70	5,90	4,10	2,90	2,00	1,40
7,6	12,00	8,10	5,60	3,70	3,10	1,80	1,30	0,90
7,8	7,50	5,00	3,40	2,40	1,70	1,20	0,81	0,56

pH	Temperatura (°C)							
	0	5	10	15	20	25	30	35
8,0	4,70	3,10	2,20	1,60	1,10	0,75	0,53	0,37
8,2	3,00	2,10	1,40	1,00	0,69	0,50	0,34	0,25
8,4	1,90	1,30	0,90	0,62	0,44	0,31	0,23	0,17
8,6	1,20	0,84	0,59	0,41	0,30	0,22	0,16	0,12
8,8	0,78	0,53	0,37	0,27	0,20	0,15	0,11	0,09
9,0	0,50	0,34	0,26	0,19	0,14	0,11	0,08	0,07

Notas:

(*)El estándar de calidad de Amoníaco Total en función del pH, la temperatura y la salinidad para la protección de la vida acuática en agua de mar y estuarios, presentan una tabla de valores para rangos de pH de 7,0 a 9,0, Temperatura de 0 a 35°C, y Salinidades de 10, 20 y 30 g/kg. Para comparar la Salinidad de las muestras de agua superficial, se deben tomar la salinidad próxima inferior (30, 20 o 10) al valor obtenido en la muestra, ya que la condición más extrema se da a menor salinidad. Asimismo, para comparar la temperatura y pH de las muestras de agua superficial, se deben tomar la temperatura y pH próximo superior al valor obtenido en campo, ya que la condición más extrema se da a mayor temperatura y pH. En tal sentido, no es necesario establecer rangos.

(**)En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Amoníaco-N ($\text{NH}_3\text{-N}$), multiplicar el resultado por el factor 1.22 para expresarlo en las unidades de Amoníaco (NH_3).

NOTA GENERAL:

- Para el parámetro de Temperatura el símbolo Δ significa variación y se determinará considerando la media histórica de la información disponible en los últimos 05 años como máximo y de 01 año como mínimo, considerando la estacionalidad.

- Los valores de los parámetros están referidos a la concentración máxima, salvo que se precise otra condición.

- Los reportes de laboratorio deberán contemplar como parte de sus informes de Ensayo los Límites de Cuantificación y el Límite de Detección.

1529835-2



ANEXO B: Reporte de análisis de DBO y coliformes fecales del río Coata

Clave generada: 3E102E69



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-23-00136

Fecha de emisión: 24/6/2023

Página 1 de 4

Señores : RODRIGO LUIS VILCA ÑAUPA
Dirección : JULIACA, SAN ROMÁN, PUNO
Atención : RODRIGO LUIS VILCA ÑAUPA **Proyecto**
: PROYECTO DE TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por: Cliente: RODRIGO LUIS VILCA ÑAUPA **Fecha de recepción:** 12/6/2023
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 096-23 **Fecha de ensayo** : 12/6/2023
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente **Nro de muestras** : 9

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG23000257	DESEMBOCADURA	Agua Natural - Superficial Agua de Río	DESEMBOCADURA / COATA / PUNO / PUNO	19S 402363.0 , 8277979.2	11/6/2023	14:41
AG23000258	PUENTE COATA	Agua Natural - Superficial Agua de Río	PUENTE COATA / COATA / PUNO / PUNO	19S 397408.1 , 8278961.9	11/6/2023	15:19
AG23000260	PUNTO - INTERMEDIO	Agua Natural - Superficial Agua de Río	SUCHES / CARACOTO / SAN ROMÁN / PUNO	19S 390786.9 , 8280069.1	11/6/2023	16:15
AG23000262	PUENRE CANCHI CHICO	Agua Natural - Superficial Agua de Río	CANCHI CHICO / CARACOTO / SAN ROMÁN / PUNO	19S 386013.2 , 8285539.3	11/6/2023	17:10
AG23000263	PUENTE CHURI	Agua Natural - Superficial Agua de Río	CHURI / JULIACA / SAN ROMÁN / PUNO	19S 385238.5 , 8286552.7	11/6/2023	17:35
AG23000264	RIO TOROCOCHA AGUA RESIDUAL	Agua Residual - Agua Residual Doméstica	TOROCOCHA / JULIACA / SAN ROMÁN / PUNO	19S 385172.8 , 8285347.8	11/6/2023	17:53
AG23000265	PUENTE UNOCOLLA	Agua Natural - Superficial Agua de Río	UNOCOLLA / JULIACA / SAN ROMÁN / PUNO	19S 372262.2 , 8291350.8	11/6/2023	19:17
Condiciones de recepción de la muestra						
Cooler refrigerado						
Observación						
-						

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, ">Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Clave generada: 3E102E69

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-23-00136

Fecha de emisión: 24/6/2023

Página 2 de 4

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	859
		DBO-5
		mg/L
AG23000257	DESEMBOCADURA	7
AG23000258	PUNTE COATA	7
AG23000260	PUNTO - INTERMEDIO	8
AG23000262	PUNTE CANCHI CHICO	12,6
AG23000263	PUNTE CHURI	5
AG23000264	RIO TOROCOCHA - AGUA RESIDUAL	143,40
AG23000265	PUNTE UNOCOLLA	5

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE, 24/6/2023 12:54:13

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
VIA WEB



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro N° LC-050

Clave generada: 3E102E69

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-23-00136

Fecha de emisión: 24/6/2023

Página 3 de 4

RESULTADOS DE ENSAYO MICROBIOLÓGICOS

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	872
		Coliformes Termotolerantes (Fecales) NMP/100 mL
AG23000257	DESEMBOCADURA	4,5
AG23000258	PUENTE COATA	11
AG23000260	PUNTO - INTERMEDIO	23
AG23000262	PUENRE CANCHI CHICO	13x10 ²
AG23000263	PUENTE CHURI	49
AG23000264	RIO TOROCOCHA - AGUA RESIDUAL	49x10 ⁴
AG23000265	PUENTE UNOCOLLA	79

Firmado por: JUÁREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M. Sc., Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado, LAMA.PE. 24/6/2023 12:54:13

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico"=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico"=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro N° LC - 050

Clave generada: 3E102E69

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-23-00136

Fecha de emisión: 24/6/2023

Página 4 de 4

MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
859	Demanda bioquímica de oxígeno. DBO SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23rd Ed Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test. (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[^a 0 - 20000] mg/L
872	Numeración de Coliformes Fecales (NMP). SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part-9221 E-1, 23rd Ed. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedures (EC Medium). (METODO DE ENSAYO ACREDITADO).	[^b 1.8 - 160000000000] NMP/100 mL

a : Límite detección

b : Límite de cuantificación

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc., Ingeniero Químico CIP-114426, Emisor de certificado: LAMMA, P.E. 24/6/2023 12:54:13

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"^a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "^b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



ANEXO C: Trámite y recepción de datos del senamhi

20/12/23, 21:37

Gmail - remito información solicitada // Re: Solicitud de datos de caudal para tesisista



Rodrigo Vilca <rodrigo.vn95@gmail.com>

remito información solicitada // Re: Solicitud de datos de caudal para tesisista

1 mensaje

dz13@senamhi.gob.pe <dz13@senamhi.gob.pe>
Para: Rodrigo Vilca <rodrigo.vn95@gmail.com>
CC: equispe <equispe@senamhi.gob.pe>

10 de julio de 2023, 3:06 p.m.

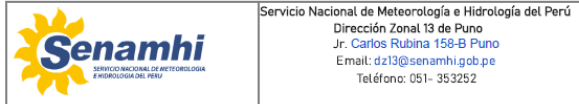
Estimado:
RODRIGO LUIS VILCA PAUPA
TESISTA

Un cordial saludo de la DIRECCION ZONAL 13 SENAMHI, el presente es para remitir lo solicitado:

En atención al documento presentado con **Expediente N° 2023-0005520**, se remite adjunto la información solicitada según la disponibilidad de datos a la fecha en SENAMHI Puno.

[* 01 DOC. EXCEL: Q COATA 22_23](#)

Atentamente,



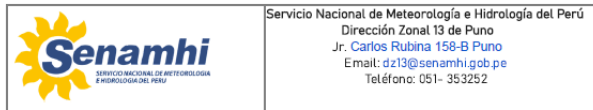
De: dz13@senamhi.gob.pe

Para: "Rodrigo Vilca" <rodrigo.vn95@gmail.com>

Enviados: Martes, 4 de Julio 2023 12:01:56

Asunto: Re: Solicitud de datos de caudal para tesisista

su tramite fue registrado con **EXPEDIENTE N° 2023-0005520**



De: "Rodrigo Vilca" <rodrigo.vn95@gmail.com>

Para: dz13@senamhi.gob.pe

Enviados: Martes, 4 de Julio 2023 10:10:45


Asunto: Solicitud de datos de caudal para tesisista

Buenos días señores del SENAMHI, ante ustedes me presento y expongo;

Que, solicito los datos históricos del año 2022 y datos del 2023 (hasta la fecha) del caudal de una de sus estaciones de monitoreo del Puente Unocolla, todo esto con el propósito para el desarrollo de una investigación de tesis para determinar el poder autodepurativo del agua del río Coata por afectación de efluentes de aguas residuales del río Torococha.

Adjunto los requisitos necesarios que cumplen con el perfil de tesisista para que me puedan brindar dicha información.

Atentamente
Rodrigo Luis Vilca Ñaupá
DNI: 70095089
Cel: 910278820

 Q_COATA 22_23.xlsx
3104K

ANEXO D: Datos de carga contaminante del río Coata - PEBLT**CUADRO D.1: TEMPERATURA DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA**

Código	Referencia	TEMPERATURA °C				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	10,60	10,10	10,97	14,47	11,54
T7	Pte. Churi	12,73	11,60	13,25	17,27	13,71
T6	Río Torococha	13,14	12,07	14,92	18,09	14,56
T4	Pte. Canchi Chico	11,69	10,67	13,18	16,35	12,97
T3	Punto Intermedio	12,85	12,16	16,04	17,73	14,70
T2	Pte. Coata	11,58	11,00	14,72	15,93	13,31
T1	Desembocadura	12,17	13,06	14,93	15,36	13,88

CUADRO D.2: PH DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	PH				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	8,23	8,28	8,71	8,29	8,38
T7	Pte. Churi	8,27	8,32	8,69	8,75	8,51
T6	Río Torococha	7,53	7,65	7,68	7,65	7,63
T4	Pte. Canchi Chico	8,11	8,07	8,37	8,15	8,18
T3	Punto Intermedio	8,40	8,21	8,82	8,31	8,44
T2	Pte. Coata	8,11	8,09	8,73	8,34	8,32
T1	Desembocadura	8,27	8,16	8,82	8,36	8,40

CUADRO D.3: CONDUCTIVIDAD DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	CONDUCTIVIDAD uS/cm				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	1 110	1 360	1 550	1 610	1 408
T7	Pte. Churi	1 080	1 390	1 550	1 670	1 423
T6	Río Torococha	2 810	2 950	3 230	3 130	3 030
T4	Pte. Canchi Chico	1 260	1 580	1 680	1 830	1 588
T3	Punto Intermedio	1 280	1 590	1 680	1 830	1 595
T2	Pte. Coata	1 270	1 580	1 670	1 860	1 595
T1	Desembocadura	1 250	1 600	1 670	1 870	1 598

CUADRO D.4: OXÍGENO DISUELTO DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	OXÍGENO DISUELTO mg/L				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	6,42	6,56	6,80	5,54	6,33
T7	Pte. Churi	6,23	7,01	6,83	6,69	6,69
T6	Río Torococha	1,07	1,29	0,95	0,85	1,04
T4	Pte. Canchi Chico	5,31	5,48	4,03	4,68	4,88
T3	Punto Intermedio	6,65	6,32	7,53	6,75	6,81
T2	Pte. Coata	6,86	5,72	5,88	4,13	5,65
T1	Desembocadura	7,55	5,91	6,77	4,57	6,20

CUADRO D.5: SALINIDAD DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	SALINIDAD %				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	0,05	0,07	0,08	0,08	0,07
T7	Pte. Churi	0,05	0,07	0,08	0,08	0,07
T6	Río Torococha	0,14	0,05	0,17	0,16	0,13
T4	Pte. Canchi Chico	0,06	0,08	0,08	0,09	0,08
T3	Punto Intermedio	0,06	0,08	0,08	0,09	0,08
T2	Pte. Coata	0,06	0,08	0,08	0,09	0,08
T1	Desembocadura	0,06	0,08	0,08	0,09	0,08

CUADRO D.6: TURBIEDAD DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	TURBIEDAD NTU				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	2,33	1,94	3,71	3,56	2,89
T7	Pte. Churi	1,97	1,59	1,61	1,63	1,70
T6	Río Torococha	162,00	120,00	188,00	186,00	164,00
T4	Pte. Canchi Chico	3,16	2,07	10,80	17,70	8,43
T3	Punto Intermedio	3,13	1,68	1,77	19,70	6,57
T2	Pte. Coata	2,50	2,26	2,83	1,76	2,34
T1	Desembocadura	3,54	4,20	4,31	3,57	3,91

CUADRO D.7: NITRATOS DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	NITRATOS mg/L				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	2,6	2,9	3,5	1,6	2,7
T7	Pte. Churi	2,9	2,8	3,2	1,8	2,7
T6	Río Torococha	97,5	80,0	80,0	72,5	82,5
T4	Pte. Canchi Chico	3,5	3,6	4,9	3,9	4,0
T3	Punto Intermedio	3,4	4,2	5,3	7,3	5,1
T2	Pte. Coata	3,8	3,3	5,8	4,6	6,1
T1	Desembocadura	4,1	3,4	4,3	3,8	5,7

CUADRO D.8: NITRITOS DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	NITRITOS mg/L				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	0,0135	0,0153	0,0120	0,0053	0,0115
T7	Pte. Churi	0,0132	0,0142	0,0080	0,0080	0,0109
T6	Río Torococha	0,1832	0,2086	0,1880	0,1700	0,1875
T4	Pte. Canchi Chico	0,0150	0,0212	0,0150	0,0211	0,0181
T3	Punto Intermedio	0,0366	0,0349	0,4750	0,3582	0,2262
T2	Pte. Coata	0,0395	0,0435	0,2960	0,3154	0,1736
T1	Desembocadura	0,0374	0,0452	0,2940	0,1959	0,1431

CUADRO D.9: NITRÓGENO AMONICAL DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	NITRÓGENO AMONICAL mg/L				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	0,02	0,0	0,01	0,04	0,0175
T7	Pte. Churi	0,0	0,0	0,03	0,78	0,2025
T6	Río Torococha	74	97,00	82,50	89,40	85,725
T4	Pte. Canchi Chico	1,35	3,73	4,75	12,47	5,575
T3	Punto Intermedio	2,17	3,34	0,46	4,1	2,5175
T2	Pte. Coata	1,8	3,34	0,09	2,09	1,83
T1	Desembocadura	1,47	3,41	0,13	0,78	1,4475



CUADRO D.10: FOSFATOS DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	FOSFATOS mg/L				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	0,506	0,273	-	0,200	0,326
T7	Pte. Churi	0,237	0,167	-	0,450	0,285
T6	Río Torococha	32,440	33,800	-	41,200	35,813
T4	Pte. Canchi Chico	0,996	1,751	-	1,870	1,539
T3	Punto Intermedio	1,053	1,776	-	1,240	1,356
T2	Pte. Coata	0,991	1,796	-	1,350	1,379
T1	Desembocadura	0,890	1,747	-	1,380	1,339

CUADRO D.11: SULFATOS DEL RÍO COATA Y TOROCOCHA

Código	Referencia	SULFATOS mg/L				
		MAY-22	JUL-22	SET-22	JUN-23	PROM
T8	Pte. Unocolla	73,8	90,8	82,0	97,6	86,1
T7	Pte. Churi	75,6	87,2	80,0	97,2	85,0
T6	Río Torococha	120,8	140,0	135,0	69,8	116,4
T4	Pte. Canchi Chico	89,0	89,8	76,0	93,8	87,2
T3	Punto Intermedio	71,0	83,2	74,0	96,0	81,1
T2	Pte. Coata	74,4	83,0	74,0	92,6	81,0
T1	Desembocadura	71,6	83,2	78,0	91,8	81,2

ANEXO E: Datos de aforo por el método del correntómetro – Puente Churi

Tramo	MEDICIÓN DE CORRENTÓMETRO - PUENTE CHURI (C-1)										Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)
	Velocidad			L (m)	L TOTAL (L _i +L _{i+1})	h (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)			
	1	2	3							promedio (V _i)		
0	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0						
1	0,373	0,314	0,311	3,00	3,00	-0,25	0,38	0,1663	0,0624			
2	0,269	0,267	0,280	3,00	6,00	-0,15	0,60	0,3023	0,1814			
3	0,186	0,192	0,182	3,00	9,00	-0,15	0,45	0,2293	0,1032			
4	0,220	0,221	0,221	3,00	12,00	-0,15	0,45	0,2037	0,0917			
5	0,166	0,157	0,162	3,00	15,00	-0,15	0,45	0,1912	0,0860			
6	0,206	0,197	0,205	3,00	18,00	-0,15	0,45	0,1822	0,0820			
7	0,108	0,111	0,101	3,00	21,00	-0,17	0,48	0,1547	0,0742			
8	0,218	0,224	0,245	3,00	24,00	-0,17	0,51	0,1678	0,0856			
9	0,137	0,148	0,134	3,00	27,00	-0,21	0,57	0,1843	0,1051			
10	0,207	0,208	0,214	3,00	30,00	-0,15	0,54	0,1747	0,0943			
11	0,517	0,512	0,478	3,00	33,00	-0,15	0,45	0,3560	0,1602			
12	0,106	0,074	0,068	3,00	36,00	-0,15	0,45	0,2925	0,1316			
13	0,839	0,784	0,841	3,00	39,00	-0,25	0,60	0,4520	0,2712			
14	1,242	1,221	0,229	3,00	42,00	-0,35	0,90	0,8593	0,7734			
15	0,862	0,857	0,848	3,00	45,00	-0,27	0,93	0,8765	0,8151			
16	0,485	0,499	0,472	3,00	48,00	-0,21	0,72	0,6705	0,4828			
17	0,473	0,485	0,480	3,00	51,00	-0,21	0,63	0,4823	0,3039			
18	0,432	0,444	0,417	3,00	54,00	-0,19	0,60	0,4552	0,2731			
19	0,000	0,000	0,000	3,00	57,00	0,00	0,29	0,2155	0,0614			
				3,00	57,00	-0,19	10,44	0,3482	4,2386			

ANEXO F: Datos de aforo por el método del correntómetro – punto intermedio

MEDICIÓN DE CORRENTÓMETRO – PUNTO INTERMEDIO (C-3)										
Tramo	Velocidad			L (m)	L TOTAL L _i +L _{i+1}	h (m)	Área (m ²) (h _i +h _{i+1})/L _{i+1}	Velocidad (m/s) (V _i +V _{i+1})/2	Caudal (m ³ /s) A*V	
	1	2	3							
0	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0				
1	0,477	0,442	0,425	1,00	1,00	-0,15	0,08	0,2240	0,0168	
2	0,674	0,652	0,647	1,00	2,00	-0,15	0,15	0,5528	0,0829	
3	0,325	0,309	0,331	1,00	3,00	-0,16	0,16	0,4897	0,0759	
4	0,485	0,488	0,488	1,00	4,00	-0,16	0,16	0,4043	0,0647	
5	0,733	0,767	0,786	1,00	5,00	-0,19	0,18	0,6245	0,1093	
6	0,840	0,822	0,802	1,00	6,00	-0,19	0,19	0,7917	0,1504	
7	0,711	0,671	0,717	1,00	7,00	-0,19	0,19	0,7605	0,1445	
8	0,559	0,511	0,508	1,00	8,00	-0,15	0,17	0,6128	0,1042	
9	0,302	0,286	0,300	1,00	9,00	-0,13	0,14	0,4110	0,0575	
10	0,232	0,252	0,242	1,00	10,00	-0,15	0,14	0,2690	0,0377	
11	0,983	0,966	1,013	1,00	11,00	-0,17	0,16	0,6147	0,0983	
12	1,070	1,109	1,084	1,00	12,00	-0,17	0,17	1,0375	0,1764	
13	1,243	1,192	1,190	1,00	13,00	-0,17	0,17	1,1480	0,1952	
14	1,159	1,138	1,109	1,00	14,00	-0,25	0,21	1,1718	0,2461	
15	0,925	0,946	0,981	1,00	15,00	-0,25	0,25	1,0430	0,2608	
16	0,959	0,985	0,962	1,00	16,00	-0,25	0,25	0,9597	0,2399	
17	0,344	0,377	0,354	1,00	17,00	-0,25	0,25	0,6635	0,1659	
18	0,000	0,000	0,000	1,00	18,00	0,00	0,13	0,1792	0,0224	
				1,00	18,00	-0,18	3,13	0,6643	2,2488	

ANEXO G: Datos de aforo por el método del correntómetro – puente Coata

Tramo	MEDICIÓN DE CORRENTÓMETRO – PUENTE COATA										Caudal (m ³ /s)
	Velocidad			L (m)	L TOTAL	h (m)	Área (m ²) (h _i +h _{i+1})/L _{i+1}	Velocidad (m/s) (V _i +V _{i+1})/2	Caudal (m ³ /s) A*V		
	1	2	3							Velocidad promedio (V _i)	
0	0	0	0	0,00	0,00	0					
1	0,084	0,100	0,076	1,00	1,00	-0,25	0,13	0,0433	0,0054		
2	0,383	0,355	0,336	1,00	2,00	-0,33	0,29	0,2223	0,0645		
3	0,461	0,487	0,447	1,00	3,00	-0,23	0,28	0,4115	0,1152		
4	0,517	0,474	0,505	1,00	4,00	-0,29	0,26	0,4818	0,1253		
5	0,511	0,508	0,505	1,00	5,00	-0,29	0,29	0,5033	0,1460		
6	0,429	0,430	0,426	1,00	6,00	-0,30	0,30	0,4682	0,1381		
7	0,493	0,489	0,483	1,00	7,00	-0,33	0,32	0,4583	0,1444		
8	0,551	0,565	0,553	1,00	8,00	-0,33	0,33	0,5223	0,1724		
9	0,648	0,670	0,649	1,00	9,00	-0,27	0,30	0,6060	0,1818		
10	0,513	0,455	0,496	1,00	10,00	-0,30	0,29	0,5718	0,1630		
11	0,441	0,442	0,449	1,00	11,00	-0,23	0,27	0,4660	0,1235		
12	0,213	0,202	0,191	1,00	12,00	-0,25	0,24	0,3230	0,0775		
13	0,338	0,315	0,316	1,00	13,00	-0,25	0,25	0,2625	0,0656		
14	0,52	0,506	0,501	1,00	14,00	-0,35	0,30	0,4152	0,1246		
15	0,456	0,462	0,462	1,00	15,00	-0,27	0,31	0,4837	0,1499		
16	0,195	0,194	0,194	1,00	16,00	-0,15	0,21	0,3272	0,0687		
17	0,000	0,000	0,000	1,00	17,00	0,00	0,08	0,0972	0,0073		
				1,00	17,00	-0,28	4,42	0,3920	1,8658		

ANEXO H: Cálculos del modelo de STREETER PHELPS

1. Cálculo del tramo I (Puente Churi – punto intermedio)

1.1 Características de calidad de agua y propiedades hidrológicas

1.1.1 Características del río Coata aguas arriba del vertimiento

Parámetro	Resultado
Oxígeno Disuelto (OD)	6,69 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	4,239 mg/L
Temperatura (T)	17,27°C
Caudal (Q)	4,239 m ³ /s
Velocidad (V)	0,368 m ² /s
Profundidad (H)	0,19 m
Ancho (B)	57 m
Longitud (L)	16 Km
Altitud (E)	3 832 msnm

1.1.2 Características del agua residual

Parámetro	Resultado
Oxígeno Disuelto (OD)	0,85 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	0,332 mg/L
Temperatura (T)	18,09°C
Caudal (Q)	0,332 m ³ /s

1.2 Cálculo de tiempo de viaje

$$t = \frac{L}{v} \dots \dots \dots Ec. H. 1$$

$$t = \frac{16 * 1000}{0,368 * 3600}$$

$$t = 12,077 \text{ horas}$$

1.3 Cálculo de la distancia de homogenización

$$L_m = 0,12 * V * \frac{B^2}{H} \dots \dots \dots Ec. H. 2$$

$$L_m = 0,12 * 0,368 * \frac{57^2}{0,19}$$

$$L_m = 755,136 \text{ metros}$$

1.4 Cálculo de balance de masas para la DBO

$$DBO_{5 \text{ Mezcla}} = \frac{Q_r * DBO_r + Q_v * DBO_v}{Q_r + Q_v} \dots \dots \dots Ec. H. 3$$

$$DBO_{5 \text{ Mezcla}} = \frac{4,239 * 5 + 0,332 * 143,4}{4,239 + 0,332}$$



$$DBO_{5\text{ Mezcla}} = 15,052 \text{ mg/L}$$

1.5 Cálculo de balance de masas para el OD

$$OD_{\text{Mezcla}} = \frac{Q_r * OD_r + Q_v * OD_v}{Q_r + Q_v} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 4}$$

$$OD_{\text{Mezcla}} = \frac{4,239 * 6,69 + 0,332 * 0,85}{4,239 + 0,85}$$

$$OD_{\text{Mezcla}} = 6,266 \text{ mg/L}$$

1.6 Cálculo de balance de masas para la T°

$$T_{\text{Mezcla}} = \frac{Q_r * T_r + Q_v * T_v}{Q_r + Q_v} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 5}$$

$$T_{\text{Mezcla}} = \frac{4,239 * 17,27 + 0,332 * 18,09}{4,239 + 0,332}$$

$$T_{\text{Mezcla}} = 17,329^\circ\text{C}$$

1.7 Cálculo del oxígeno de saturación

$$O_{\text{sat}} = 14,652 - 0,41022 * (T_m) + 0,007991 * (T_m^2) - 0,000077774 * (T_m^3) \dots \dots \dots \text{Ec. H. 6}$$

$$O_{\text{sat}} = 14,652 - 0,41022 * (17,239) + 0,007991 * (17,329^2) - 0,000077774 * (17,329^3)$$

$$O_{\text{sat}} = 9,538 \text{ mg/L}$$

1.7.1 Corrección del oxígeno de saturación a la de presión de trabajo.

$$P = 760 * e^{\frac{-E}{8005}} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 7} \quad OD_{SC} = O_{\text{sat}} * \frac{P}{760} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 8}$$

$$P = 760 * e^{\frac{-3832}{8005}} \quad OD_{SC} = O_{\text{sat}} * \frac{470,88}{760}$$

$$P = 470,88 \text{ mmhg} \quad OD_{SC} = 5,909 \text{ mg/L}$$

1.8 Cálculo de déficit de oxígeno

$$D_0 = O_s - O_{\text{mezcla}} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 9}$$

$$D_0 = 5,909 - 6,266$$

$$D_0 = -0,356 \text{ mg/L}$$

1.9 Cálculo del factor de reaireación

$$K_a = 5,032 * \frac{V^{0,67}}{H^{-1,85}} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 10}$$

$$K_a = 5,032 * \frac{0,368^{0,67}}{0,19^{-1,85}}$$

$$K_a = 0,119 \text{ s}^{-1}$$

1.9.1 Corrección del factor de reaeración en función de la temperatura

Para la constante de reaeración (K_a) se considera un factor de $\theta = 1,024$

$$K_a(T) = K_{20} * \theta^{(T-20)} \dots \dots \dots Ec. H. 11$$

$$K_a(17,3^\circ C) = 0,119 * 1,024^{(17,3-20)}$$

$$K_a(17,3^\circ C) = 0,112 \text{ s}^{-1}$$

1.10 Cálculo del factor de desoxigenación

$$K_d = 1,796 * Q^{-0,49} \dots \dots \dots Ec. H. 12$$

$$K_d = 1,796 * 4,239^{-0,49}$$

$$K_d = 0,885 \text{ s}^{-1}$$

1.10.1 Corrección del factor de desoxigenación en función de la temperatura

Para la constante de desoxigenación (K_d) se considera un factor de $\theta = 1,047$

$$K_d(T) = K_{20} * \theta^{(T-20)} \dots \dots \dots Ec. H. 13$$

$$K_d(17,3^\circ C) = 0,885 * 1,047^{(17,3-20)}$$

$$K_d(17,3^\circ C) = 0,783 \text{ s}^{-1}$$

- El cálculo de la constante global de desoxigenación es igual al K_d

$$K_d = K_R = 0,783 \text{ s}^{-1}$$

1.11 Cálculo de la distancia crítica

$$X_c = \frac{1}{k_a - k_d} * \ln \left(\frac{k_a}{k_d} * \left(1 - D_0 * \frac{k_a - k_d}{k_a * DBO_5 \text{mezcla}} \right) \right) \dots \dots \dots Ec. H. 14$$

$$X_c = \frac{1}{0,112 - 0,783} * \ln \left(\frac{0,112}{0,783} * \left(1 - (-0,356) * \frac{0,112 - 0,783}{0,112 * 15,052} \right) \right)$$

$$X_c = 2,9 \text{ Km} = 2\,929 \text{ m}$$

1.12 Cálculo del tiempo crítico

$$T_c = \frac{X_c}{v} \dots \dots \dots Ec. H. 15$$

$$T_c = \frac{2\,929}{0,368}$$

$$T_c = 7960,3 \text{ seg} = 1,99 \text{ h} = 0,0831 \text{ d}$$

1.13 Cálculo de déficit de oxígeno crítico

$$D_c = \frac{k_d}{k_a} * DBO_5 m * e^{(-k_d * t_c)} \dots \dots \dots Ec. H. 16$$

$$D_c = \frac{0,783}{0,112} * 15,052 * e^{(-0,783 * 0,0831)}$$

$$D_c = 98,624 \text{ mg/L}$$

1.14 Cálculo de oxígeno crítico

$$[O_2]_c = [O_2]_{sat} - D_c \dots \dots \dots \text{Ec. H. 17}$$

$$[O_2]_c = 5,909 - 98,624$$

$$[O_2]_c = -92,714 \text{ mg/L}$$

1.15 Cálculo de concentración de materia orgánica o DBO crítica

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = DBO_{5m} * e^{(-k_d * t_c)} \dots \dots \dots \text{Ec. H. 18}$$

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = 15,052 * e^{(-0,783 * 0,0831)}$$

$$DBO_{5 \text{ crítico}} = 14,104 \text{ mg/L}$$

2. Cálculo del tramo II (punto intermedio – puente Coata)

2.1 Características del río Coata después de 16 Km.

Parámetro	Resultado
Oxígeno Disuelto de la mezcla a 16 Km (OD)	1,489 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno de la mezcla a 16 Km (DBO)	10,151 mg/L
Temperatura (T)	17,73°C
Caudal (Q)	2,248 m ³ /s
Velocidad (V)	0,664 m ² /s
Profundidad (H)	0,18 m
Ancho (B)	18 m
Longitud (L)	12 Km

3. Cálculo del tramo III (Puente Coata – desembocadura)

3.1 Características del río Coata después de 28 Km.

Parámetro	Resultado
Oxígeno Disuelto de la mezcla a 16 Km (OD)	-0,405 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno de la mezcla a 16 Km (DBO)	8,085 mg/L
Temperatura (T)	15,93°C
Caudal (Q)	1,866 m ³ /s
Velocidad (V)	0,392 m ² /s
Profundidad (H)	0,28 m
Ancho (B)	17 m
Longitud (L)	14 Km

*Para el caso del cálculo para el tramo II y III se aplicará la misma metodología que el tramo I, desde la sección 1.1 hasta el 1.15, sin realizar las secciones 1.4 al 1.7.

ANEXO I: Panel fotográfico



Fig. I.1 Equipos de campo
Multiparámetro Horiba y Turbidímetro
Hach



Fig. I.2 Medición de parámetros en
campo



Fig. I.3 Toma de muestra
(Desembocadura al Lago Titicaca)

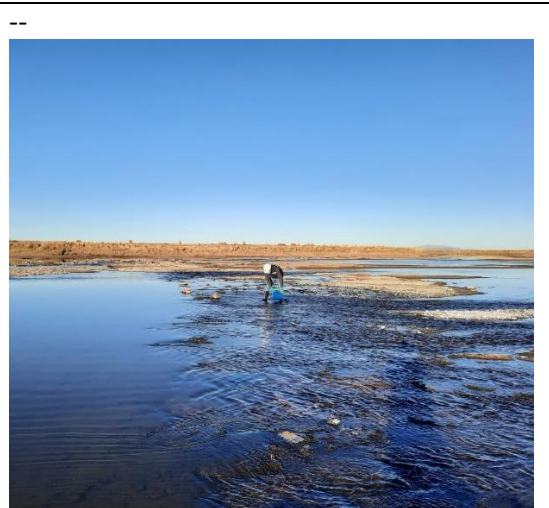


Fig. I.4 Toma de muestra (Punto
Intermedio)



Fig. I.5 Recolección de muestra para
coliformes fecales



Fig. I.6 Medición de dimensiones del
vertimiento para cálculo de caudal



Fig. I.7 Medición de caudal con equipo correntómetro



Fig. I.8 Registro de datos hídricos generados por el correntómetro

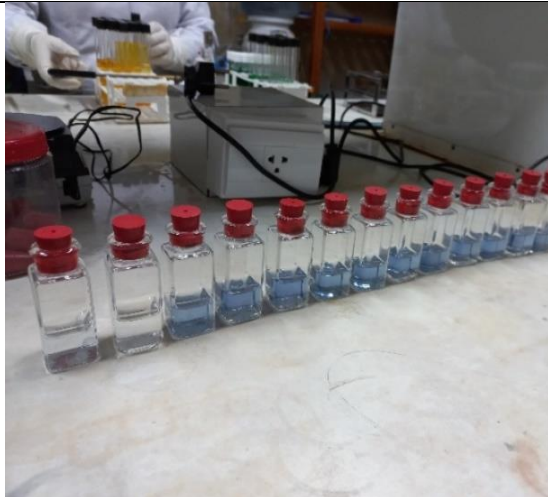


Fig. I.9 Análisis de fosfatos en Espectrofotómetro DR 4000



Fig. I.10 Análisis de Nitrógeno amoniacal en Espectrofotómetro DR 5000



ANEXO J: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Rodrigo Luis Vilca Naupa,
identificado con DNI 70095089 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Modelamiento matemático de capacidad de autodepuración de
aguas residuales domésticas en el río Coata, provincia
de San Román, 2022 - 2023 ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 05 de mayo del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO K: Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Rodrigo Luis Vilca Naupa,
identificado con DNI 70095089 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Modelamiento Matemático de capacidad de autodepuración de aguas residuales domésticas en el río Coata, provincia de San Román, 2022-2023 ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 05 de Mayo del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella