

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA RECUPERACIÓN DE LA
CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO LURÍN ENTRE LOS KM 9+300 AL
15+100”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA**

OMAYRA LUZMILA MORI SÁNCHEZ

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA RECUPERACIÓN DE LA
CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO LURÍN ENTRE LOS KM 9+300 AL
15+100”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. OMayra Luzmila Mori Sánchez

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
Presidente

Dra. LIA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesor

Mg. Sc. GONZALO RAMCÉS FANO MIRANDA
Miembro

Mg. Sc. RICARDO APACLLA NALVARTE
Miembro

LIMA – PERU

2021

DEDICATORIA

A mis padres, Fernando y Dimna, quienes con su gran amor iluminan mi vida desde el día que nací, muchas gracias por creer en mí e instruir mi vida con sus valores y ejemplo.

A mi hermana Rocío y mi Sobrinita Cielo Abigail, por inspirarme a enfrentar las dificultades de la vida con esa extraordinaria actitud.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por cuidarme en todo momento y demostrarme su amor en todo lo que me rodea. A la Universidad Nacional Agraria La Molina, a la Facultad de Ingeniería Agrícola y a cada uno de los docentes, que con su gran pasión por la ciencia me brindaron sus conocimientos. Al Proyecto “Sistema de gestión del recurso hídrico superficial y subterráneo para el uso seguro del agua ante escenarios de cambio climático en la cuenca del río Lurín”. Convenio 157-2017-FONDECYT, al Vicerrectorado de Investigación por haberme permitido ser ganadora del 9° concurso Subvención de Tesis de Pregrado UNALM 2019 y brindarme las oportunidades económicas para culminar esta investigación.

A mi asesora, Dra. Lía Ramos, por su paciencia, por su disponibilidad todo el tiempo, su profesionalismo y demostrar ser un gran ser humano que con empeño, solidaridad y ánimo, inspira a todos sus tesisas; al ingeniero Willy Lluen Chero, quien es especialista en hidráulica y calidad del agua, por su tiempo y entrega en sus capacitaciones especializadas en el tema; al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura”, donde pude conocer magníficas personas con las que compartí conocimientos y experiencias.

A Wilian Salazar, Brian Mendoza, Jessica Tapia, Stefani Sánchez y a Gerson Pardo, quienes fueron parte de este proceso desde el principio y a todas las personas maravillosas que me dieron una sonrisa, un abrazo y un mensaje de ánimo cuando lo necesitaba.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. MODELO HIDRÁULICO	3
2.2. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA.....	6
2.3. MODELO IBER	8
2.3.1. Módulo de calidad del agua en iber	9
III. METODOLOGÍA	19
3.1. ZONA DE ESTUDIO.....	19
3.2. MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	20
3.3. PROCEDIMIENTO.....	20
3.3.1. Caracterización hidráulica y de calidad del agua	22
3.3.2. Parametrización del modelo hidrodinámico y de calidad del agua.....	29
3.3.3. Simulación de escenarios para evaluar la recuperación del río.....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA Y DE CALIDAD DEL AGUA	38
4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA	44
4.3. SIMULACION DE RECUPERACIÓN DEL RÍO LURÍN	57
4.3.1. Periodo de estiaje	57
4.3.2. Periodo húmedo.....	58
4.3.3. Escenario de recuperación.....	61
V. CONCLUSIONES	74
VI. RECOMENDACIONES	76
VII. BIBLIOGRAFÍA	77
VIII. ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ecuaciones del método de Covar para calcular la constante de re aireación <i>Kaireh</i>	15
Tabla 2: Materiales, equipos y herramientas computacionales	20
Tabla 3: Métodos de análisis de los contaminantes in situ y en laboratorio	26
Tabla 4: Rango de valores de K_{dos} respecto al tipo de fondo	33
Tabla 5: Comportamiento de datos hidráulicos entre febrero y agosto del 2019 de acuerdo a promedios y desviación estándar ($\bar{x}\pm S$)	40
Tabla 6: Comportamiento de datos de calidad del agua entre febrero y agosto del 2019 de acuerdo a promedios y desviación estándar ($\bar{x}\pm S$).....	44
Tabla 7: Escala de eficiencias de la calibración de un modelo en función a los índices r^2 , E y RSR.	46
Tabla 8: Índices de eficiencia en la calibración de U y h entre los valores observados y simulados.	47
Tabla 9: Índices de eficiencia en la calibración de T, CE, OD, DBO5 y E.Coli.....	50
Tabla 10: Valores de Cowan de diversos factores que influyen en el coeficiente “n”.....	80
Tabla 11: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) para corrientes naturales.....	81
Tabla 12: Estaciones de monitoreo en el río	82
Tabla 13: Comisiones de regantes en el tramo de la zona de estudio	82
Tabla 14: Resultado de los monitoreos desde el 24 de febrero hasta el 5 de agosto del 2019	84
Tabla 15: Información horaria de Taire, Hr, Vviento y Ras en los meses de marzo, mayo y julio	87
Tabla 16: LMP para efluentes de PTAR domésticas o municipales	88
Tabla 17: Conversión de CE a Sal en los meses de marzo, mayo y julio.....	89
Tabla 18: Información de Ras , Vviento, Taire y Hr para modelar la temperatura en los meses de marzo, mayo y julio.....	92
Tabla 19: Información de I0, Hm y Ke para modelar la E.Coli en los meses de marzo, mayo y julio.	93
Tabla 20: Caudales promedios diarios de la estación Antapucro (2019)	94
Tabla 21: Caudales monitoreados en 8 puntos ubicados en el río.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Integración del módulo de calidad del agua en Iber, y datos de entrada necesarios para ejecutar cada módulo.....	10
Figura 2: Progresión de la cinética de primer orden.....	14
Figura 3: Progresión de la cinética de primer orden.....	16
Figura 4: Mapa de Ubicación política provincial de la cuenca del Río Lurín.....	19
Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología empleada en la presente investigación.	21
Figura 6: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo y comisiones de regantes ubicadas en la parte baja del río Lurín.	23
Figura 7: Superficie trabajada en Civil 3D, en donde las curvas de color cyan representan las curvas de nivel menores y las rojas las curvas de nivel mayores.....	25
Figura 8: Variación temporal y espacial del parámetro Kdbo obtenido en el laboratorio a 20°C y la DBOu. En (a) Kdbo en el río, en (b) Kdbo en los efluentes, en (c) DBOu en el río, en (d) DBOu en los efluentes.....	28
Figura 9: Malla de la zona de estudio en (a) se muestra el tamaño de malla y en (b) se muestra la malla con la interpolación del DEM en L3-EF y L4 en (c) L2-EF y en (d) L1	29
Figura 10: Rugosidad en la parte baja del tramo de estudio desde L4 (50m antes de la PTAR Cieneguilla) hasta L1 (puente Panamericana).....	30
Figura 11: Datos atmosféricos ingresados para la activación de la T, en la fecha 3 de mayo del 2019.....	32
Figura 12: Valor de Kdos ingresado en toda la zona de estudio en la fecha del 24 de marzo del 2019	33
Figura 13: Valores de Kdbo y VsDBO ingresados en toda la zona de estudio en la fecha del 24 de marzo del 2019	34
Figura 14: Datos de I0, Hmax y Ke ingresados para activar la E.Coli con el método de Mancini, en la fecha 8 de julio del 2019.....	35
Figura 15: Comportamiento de la h, U y número de Froude, a lo largo del eje del río.....	37
Figura 16: Variación temporal y espacial de datos hidráulicos medidos en campo en (a) caudal, en (b) tirante de agua, en (c) velocidad en los puntos de monitoreo ubicados en el río y en (c) caudal en efluentes.	39

Figura 17: Variación espacial y temporal de datos de calidad del agua medidos en campo en puntos de monitoreo ubicados en el río; en (a) temperatura, en (b) conductividad eléctrica, en (c) sólidos sedimentables totales, en (d) oxígeno disuelto, en (e) BDO5 y en (f) E.Coli.	42
Figura 18: Variación espacial y temporal de datos de calidad del agua medidos en campo en los efluentes; en (a) T, en (b) CE, en (c) SST, en (d) OD, en (e) BDO5 y en (f) E.Coli.	43
Figura 19: Resultados de U y h obtenidos en Iber con la rugosidad final en (a) tirante de agua, en (b) vector velocidad ambos en julio mes más crítico (menor caudal); en (c) tirante de agua, en (d) vector velocidad ambos en mayo mes con caudal promedio; en (e) tirante de agua, en (f) vector velocidad ambos en marzo mes con mayor caudal.	45
Figura 20: Comparación entre valores observados y simulados en (a) velocidad (U) y en (b) tirante del agua (h).	46
Figura 21: Rango de valores de E por cambios en el parámetro Kd _{bo} en los meses de marzo, mayo y julio.	48
Figura 22: Comparación entre valores observados y simulados la concentración de la sustancia contaminante observada y simulada en (a) oxígeno disuelto, en (b) DBO5, en (c) E.Coli, en (d) temperatura y en (e) conductividad eléctrica.	49
Figura 23: Perfiles longitudinales de concentraciones simuladas en los meses de marzo, mayo y julio para las cinco sustancias simuladas desde L5 hasta L1 en (a) OD, en (b) DBO5, en (c) E.Coli, en (d) T y en (e) CE.	51
Figura 24: Perfiles longitudinales de concentraciones simuladas para el mes más crítico julio, para las cinco sustancias simuladas desde L5 hasta L1 en (a) OD, en (b) DBO5, en (c) E.Coli., en (d) T y en (e) CE.	52
Figura 25: Perfiles de concentración longitudinal de OD, DBO5, E.Coli y T en el mes de julio.	54
Figura 26: Perfiles de concentración longitudinal de OD, DBO5, E.Coli y T en el mes de mayo.	55
Figura 27: Perfiles de concentración longitudinal de OD, DBO5, E.Coli y T en el mes de marzo.	56
Figura 28: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBO _u , E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, en la fecha más	

crítica 8 de julio del 2019.	59
Figura 29: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, en la fecha más crítica 8 de julio del 2019.....	60
Figura 30: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e).....	61
Figura 31: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, de la simulación del escenario de recuperación del río.	64
Figura 32: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, de la simulación del escenario de recuperación del río.	65
Figura 33: Perfil transversal de U, Ux , Uy, concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a la altura de la estación L1; a las 6 a.m., en escenario de recuperación del río. 66	66
Figura 34: Perfil transversal de U, Ux , Uy, concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a la altura de la estación L1; al medio día, en escenario de recuperación del río.....	67
Figura 35: Perfil transversal de U, Ux , Uy, concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a la altura de la estación L1; a las 6 p.m., en escenario de recuperación del río.....	68
Figura 36: Perfil transversal de U, Ux , Uy, concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a 25 m después de la PTAR San Bartolo; a las 6 a.m., en escenario de recuperación del río.	70
Figura 37: Perfil transversal de U, Ux , Uy, concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a 25 m después de la PTAR San Bartolo; al medio día, en escenario de recuperación del río.	71
Figura 38: Perfil transversal de U, Ux , Uy, concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a 25 m después de la PTAR San Bartolo; a las 6 p.m., en escenario de recuperación del río.	72
Figura 39: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e); de la simulación del escenario de recuperación del río.....	73
Figura 40: Superficie planialtimétrica, con curvas de nivel cyan, y curva de mayor	

altitud en rojo.....	83
Figura 41: Mallado en los puntos de monitoreo desde L5 hasta L13.....	90
Figura 42: Variación espacial de las rugosidades obtenidas durante la calibración, desde L5 hasta L13.....	91
Figura 43: Hidrograma con caudales promedios diarios de la estación Antapucro (2019).....	96
Figura 44: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, en el mes de marzo	106
Figura 45: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, en el mes de marzo.....	107
Figura 46: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e). en el mes de marzo.	108
Figura 47: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, en el mes de mayo.	109
Figura 48: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, en el mes de mayo.....	110
Figura 49: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e), en el mes de mayo.	111
Figura 50: Fotos desde la estación L1 (puente Panamericana) hasta L4 (50m antes de la PTAR San Bartolo).....	112
Figura 51: Fotos desde la estación L4 (50m antes de la PTAR San Bartolo) hasta la zona Pachacamac.....	113
Figura 52: Fotos desde la estación L5 (50m aguas debajo de la bocatoma Lurín) hasta L6 (puente Quebrada Verde)	114
Figura 53: Fotos desde la estación L6 (puente Quebrada Verde) hasta L7 (puente Guayabo).....	115
Figura 54: Fotos desde la estación L7 (puente Guayabo) hasta la descarga del efluente L9-EF (válvula 3 de la PTAR Manchay).....	116

Figura 55: Fotos desde la estación L9-EF (válvula 3 de la PTAR Manchay) hasta la captación de la comisión de regantes San Fernando	117
Figura 56: Fotos desde afloramientos a la altura del cerro Pan de Azúcar hasta la quebrada Tinajas	118
Figura 57: Fotos desde la quebrada Tinajas hasta la estación L12 (50m antes de la PTAR Cieneguilla)	119
Figura 58: Fotos desde L12 (50m antes de la PTAR Cieneguilla) hasta L13 (puente Mototaxi)	120

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: COEFICIENTE DE MANNING.....	80
ANEXO 2: ESTACIONES DE MONITOREO Y COMISIONES DE REGANTES EN EL RÍO.....	82
ANEXO 3: SUPERFICIE DEL RIO EN CIVIL 3D	83
ANEXO 4: RESULTADOS DE LOS MONITOREO	84
ANEXO 5: INFORMACION DE DATOS AMOSFÉRICOS	87
ANEXO 6: NORMATIVIDAD REFERIDA A LMP EN EL PERÚ	88
ANEXO 7: CONVERSIÓN DE CE A SALINIDAD	89
ANEXO 8: MALLADO EN CADA PUNTOS DE SIMULACIÓN	90
ANEXO 9: RUGOSIDADES EN EL TRAMO DE ESTUDIO.....	91
ANEXO 10: DATOS PARA MODELAR LA TEMPERATURA EN IBER.....	92
ANEXO 11: DATOS PARA MODELAR LA E.COLI EN IBER.....	93
ANEXO 12: CAUDALES PROMEDIOS DIARIOS DE LA ESTACIÓN ANTAPUCRO (2019) E HIDROGRAMA.	94
ANEXO 13: CAUDALES MONITOREADOS.....	97
ANEXO 14: PERFILES LONGITUDINALES, CAMPOS DE CONCENTRACIÓN LONGITUDINAL Y SERIES TEMPORALES EN LOS MESES DE MARZO Y MAYO.....	106
ANEXO 15: PANEL FOTOGRÁFICO DEL MONITOREO.	112

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A_s	Albedo
C	Concentración promediada en profundidad
r_i	Coefficiente de difusividad molecular
D	Déficit de oxígeno
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno ejercida a 5 días
DBO _U	Demanda bioquímica de oxígeno última
DEM	Modelo digital de elevación
E.Coli	Escherichia Coli
ECA	Estándar de calidad ambiental
h	Tirante de agua
H_c	Profundidad de la capa vertical sobre la que se extiende la E.Coli
H_r	Humedad relativa
Iber	Modelo matemático bidimensional
$S_{c,t}$	Número de Schmidt turbulento
I_0	Radiación solar incidente en la superficie de agua
$K_{aireacion}$	Constante de aireación a 20°C
k_{dbo}	Constante de degradación de materia orgánica a 20°C
k_{dec}	Constante de desaparición bacteriana
k_{dos}	Tasa de demanda de oxígeno por sedimento
k_e	Coefficiente de extinción de luz en el agua
LMP	Límite máximo permisible
NTU	Turbidez
OD	Oxígeno disuelto
OD _{sat}	Oxígeno disuelto en saturación
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
P1	Punto de control ubicado a 200 metros después de la PTAR San Bartolo.
P2	Punto de control ubicado a 200 metros después de la contaminación difusa de Pachacamac.
Q_{evap}	Transferencia de energía por evaporación/condensación del agua

Q_{cond}	Calor transferido por conducción
$Q_{rad,in}$	Radiación total neta absorbida por el agua
$Q_{rad,out}$	Radiación de onda larga emitida por el agua
Ra_s	Radiación solar
RPA	Aeronave piloteada remotamente
Sal	Salinidad
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SST	Sólidos suspendidos totales
T	Temperatura del agua
t	Tiempo
T_{aire}	Temperatura del aire
U	Velocidad
UTM	Universal Transverse Mercator
V_{sDBO}	Velocidad de sedimentación de la materia orgánica
V_{viento}	Velocidad del viento

RESUMEN

El río Lurín es una fuente de agua para la ciudad de Lima; sin embargo, el vertimiento de aguas residuales domésticas, la formación de botaderos, además de los largos periodos de sequía, producen el deterioro del recurso hídrico; por ello, en este estudio se monitoreó el OD, DBO, E.Coli, T, CE, SST, U y h en 8 puntos en el río, 4 en efluentes de PTARs y uno en el retorno de canal de riego la Capilla, haciendo un total de 13 puntos de monitoreo, recorriendo 20km del río, con 9 captaciones de comisiones de regantes distribuidas a lo largo del tramo. Esta información se empleó para calibrar los parámetros de k_{dbo} , k_{aire} , k_{dos} , V_{sDBO} y k_{dec} , en el modelo numérico bidimensional Iber, obteniéndose valores de $0,55 \text{ d}^{-1}$, $[4,84 \text{ d}^{-1}-80,65 \text{ d}^{-1}]$, $10 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, 0 m d^{-1} y $[1,49 \text{ d}^{-1}- 15,42 \text{ d}^{-1}]$, respectivamente, con eficiencia de “muy buena” a “satisfactoria” con valores de E: 0,813, 0,959, 0,944 y 0,518 para OD, DBO_5 , E.Coli y T, respectivamente. El tiempo computacional en cada simulación fue de 3 días, considerándose una discretización con una malla con resolución de 3, 5 y 7 m en el cauce, riberas y llanuras, respectivamente. La mayor contaminación se concentra en el tramo bajo, a la altura del km 5+400, hasta el puente Panamericana, siendo julio el mes más crítico; por ello, se propone un escenario a fin de recuperar el río, que consiste en la implementación de la PTAR Pachacámac y la optimización de la PTAR San Bartolo con caudales de descarga de $0.373 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $0.980 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, con concentraciones de 4 mg l^{-1} , 15 mg l^{-1} y 1000 NMP/100ml para la T, OD, DBO_5 y E.Coli, respectivamente, lo que permitirá que el río cumpla con los ECA respectivos.

Palabras clave: río Lurín, modelo numérico bidimensional Iber, calidad del agua, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, Escherichia Coli.

ABSTRACT

The Lurín River is a source of water for the city of Lima; however, the dumping of domestic wastewater, the formation of dumps, in addition to long periods of drought, cause the deterioration of the water resource; therefore, in this study the DO, BOD, E.Coli, T, CE, SST, U and h were monitored in 8 points in the river, 4 in effluents from WWTPs and one in the return of the irrigation canal La Capilla, making a total of 13 monitoring points, covering 20km of the river, with 9 catchments from irrigation commissions distributed along the stretch. This information was used to calibrate the parameters of k_{dbo} , k_{aire} , k_{dos} , V_{sDBO} and k_{dec} , in the two-dimensional numerical model Iber, obtaining values of $0,55\text{ d}^{-1}$, $[4,84\text{ d}^{-1}-80,65\text{ d}^{-1}]$, $10\text{ gO}_2\text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, 0 m d^{-1} y $[1,49\text{ d}^{-1}-15,42\text{ d}^{-1}]$, respectively, with efficiencies from "very good" to "satisfactory" with E values: 0.813, 0.959, 0.944 and 0.518 for OD, DBO_5 , E.Coli and T, respectively. The computational time in each simulation was 3 days, considering a discretization with a mesh with a resolution of 3, 5 and 7 m in the riverbed, riverbanks and plains, respectively. The greatest contamination is concentrated in the lower section, at the height of km 5 + 400, up to the Pan-American bridge, with July being the most critical month; therefore, a scenario is proposed in order to recover the river, which consists of the implementation of the PTAR Pachacámac and the optimization of the PTAR San Bartolo with discharge flows of $0.373\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and $0.980\text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectively, with concentrations of 4 mg l^{-1} , 15 mg l^{-1} y 1000 NMP/100ml of the T, OD, DBO_5 y E.Coli, respectively, which will allow the river to comply with the respective ECAs.

Keywords: Lurín river, Iber two-dimensional numerical model, water quality, dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, Escherichia Coli.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es necesaria para todas las reacciones bioquímicas y la vida no habría sido posible en la Tierra sin agua. La disponibilidad de agua per cápita se está reduciendo debido al aumento de las poblaciones y la reducción de la disponibilidad de agua limpia por la contaminación. La contaminación de los ríos es motivo de gran preocupación, ya que la mayoría de las poblaciones depende de los ríos para su consumo doméstico de agua. Dado que la mayoría de la gente usa el agua de estos ríos directamente para el consumo doméstico, sin suficiente tratamiento de agua, es importante determinar la calidad del agua en los ríos (Muramthookil *et al.*, 2020).

En consecuencia, a este problema complejo, que es la dispersión de contaminantes en un medio receptor, existen estudios que desarrollan modelos matemáticos de calidad de agua, los cuales son herramientas de importancia crítica para la gestión de las aguas superficiales de nuestras naciones, ya que ayudan a las comunidades locales y a los administradores ambientales a comprender mejor cómo cambian las aguas superficiales en respuesta a la contaminación y cómo protegerlas (Cho *et al.*, 2020).

La fuente de agua en estudio es el río Lurín, la cuenca del río Lurín pertenece al departamento de Lima y abarca dos provincias (Lima propiamente dicha y Huarochirí). Comprende unas 6000 ha de tierras cultivadas, 4600 ha de lomas y abarca todos los pisos ecológicos desde 0 msnm (costa del Pacífico) hasta los 5000 msnm (planicies andinas) (Momblanch *et al.*, 2015). La zona de estudio se ha limitado al tramo Km 0+578 hasta el Km 20+500 del río Lurín, identificándose la presencia de las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas de Julio César Tello, San Bartolo, Huerto Manchay y Cieneguilla, usuarios de agua de riego y además focos de contaminación.

De lo anterior, el presente trabajo de investigación realizará la modelación bidimensional de calidad del agua en el río Lurín; en definitiva, se analizará el problema integrando conceptos físicos, químicos y biológicos.

1.1. OBJETIVOS

Evaluar mediante la modelación bidimensional el estado actual de la calidad del agua y proponer un escenario de recuperación del río Lurín.

- Identificar las características hidráulicas y parámetros de calidad del agua.
- Generar y parametrizar el modelo hidrodinámico y de calidad del agua, utilizando la herramienta Iber.
- Generar y simular el escenario de recuperación del río, en base al modelo Iber parametrizado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MODELO HIDRÁULICO

La modelación matemática del flujo de agua en un río consiste en predecir los valores que toman las variables hidráulicas (tirante, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución mediante métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. Para el estudio de los efectos de la propagación de avenidas en ríos se pueden utilizar modelos unidimensionales o bidimensionales. La necesidad de estudiar cada vez fenómenos más complejos y la observación que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser bidimensional, junto con la creciente capacidad y velocidad de los ordenadores, ha llevado al uso de ecuaciones y esquemas bidimensionales (Bladé *et al.*, 2012).

Bladé *et al.*, (2012) indican que el comportamiento hidrodinámico del río, en un modelo bidimensional, se resuelve con las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) \\ = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) \\ = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde h es el tirante de agua, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y v_t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}} \quad \text{Ecuación 2}$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde, $V_{x,10}$, $V_{y,10}$ son las dos componentes de la velocidad del viento a 10 m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura y C_{VD} es un coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < \frac{5.6m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1,2 * 10^{-6}$$

$$|V_{10}| \geq \frac{5,6m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1,2 * 10^{-6} + 2,25 * 10^{-6} \left(1 - \frac{5,6}{|V_{10}|}\right)^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad como el modelo de longitud de mezcla. En el modelo de longitud, la viscosidad turbulenta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v_t = [\min(0,267kh, kd_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2,34 \frac{u_f}{kh}\right)^2 S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde $\kappa = 0,41$ es la constante de von Karman, u_f la velocidad de fricción de fondo y d_{wall} es la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana.

A continuación se definen conceptos importantes para el uso de modelos hidrodinámicos

- Geometría: representa el contorno exterior de una superficie y los contornos interiores.
- Condiciones de contorno: son aquellas que definen el comportamiento del modelo en sus límites, acorde a Bladé *et al.*, (2012) en los contornos de entrada se fija el caudal de agua y se asume que la dirección del flujo es perpendicular al contorno y los contornos de salida se refieren a los contornos por donde sale el agua del dominio de

cálculo.

- Condiciones iniciales: estas condiciones son las que definen el estado inicial del modelo en el inicio de la simulación. Asumen que la velocidad del agua es nula en el instante inicial y permiten establecer el tirante o nivel de lámina de agua inicial (Centro de Estudios Hidrográficos, 2016).
- Fuentes y sumideros: son las entradas y salidas de caudal dentro del dominio, con esto se puede simular vertidos puntuales o bombeos (Centro de Estudios Hidrográficos, 2016).
- Rugosidad: según Arcement y Schneider (1989) los coeficientes de rugosidad representan la resistencia a los flujos de inundaciones en canales y llanuras aluviales. Los resultados de la fórmula de Manning, un cálculo indirecto del caudal de los arroyos, tienen aplicaciones en la gestión de llanuras aluviales, en estudios de seguros contra inundaciones y en el diseño de puentes y caminos a través de llanuras aluviales. La fórmula de Manning es:

$$V = \frac{1,486}{n} R^{2/3} S_e^{1/2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde V es la velocidad de flujo, en pies por segundo, R el radio hidráulico en pies, S_e pendiente de la línea de gradiente de energía, en pies por pie, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Los factores más importantes que afectan la selección de los valores del canal n son el tipo y tamaño de los materiales que componen el lecho y los márgenes del canal y la forma del canal. Chow (2004) menciona el método Cowan, el cual desarrolla un procedimiento para estimar los efectos de estos factores para determinar el valor de n para un canal. El valor de n puede calcularse mediante:

$$n = m5(n0 + n1 + n2 + n3 + n4) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: n0 es la rugosidad base para canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea, n1 es el factor de corrección para implementar el efecto de las irregularidades superficiales, n2 es un valor que añade las variaciones de forma y tamaño de la sección del cauce, n3 es un valor que caracteriza el efecto de obstrucciones, n4 es un valor que incorpora el efecto de presencia de vegetación y m5

es el factor de corrección para incorporar el efecto de sinuosidad del cauce (Tabla 10, ANEXO 1).

Todos los cálculos hidráulicos que involucran flujo en canales abiertos requieren una evaluación de las características de rugosidad del canal. En el estado actual del conocimiento, la selección de coeficientes de rugosidad para canales naturales sigue siendo principalmente un arte. No se dispone de diagramas de resistencia o naves de relación cuantitativa similares a las utilizadas para el flujo constante en tuberías uniformes o para la resistencia al rozamiento de las naves. En consecuencia, la capacidad de evaluar los coeficientes de rugosidad para canales naturales que representan una amplia gama de condiciones debe desarrollarse a través de la experiencia.i (Barnes, 1987).

Horton citado por Chow (2004) propone una tabla para el coeficiente de rugosidad n en la ecuación de Manning (Tabla 11, ANEXO 1).

- Malla y Modelo digital de elevación (MDE): para resolver una de las ecuaciones que gobiernan el flujo variable en ríos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar mediante una malla (Robles, 2016). Un MDE es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994).

2.2. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

Cea *et al.*, (2016) mencionan que la evolución espacial y temporal de las especies y variables de los contaminantes se modelan con la ecuación genérica de convección-difusión la cual se resuelve para cada una de las especies consideradas en el modelo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_y C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h \left(r_i + \frac{v_t}{S_{c,t}} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S_c \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde C es la concentración promediada en profundidad de la especie, S_c es un término genérico de fuente/sumidero que depende de la profundidad en metros (h) del agua y (U_x , U_y) en $m s^{-1}$ son los dos componentes de la velocidad promediada en la profundidad, r_i es

el coeficiente de difusividad molecular, ν_t en $m^2 s^{-1}$ es la viscosidad cinemática turbulenta y $S_{c,t}$ (adimensional) es el número de Schmidt turbulento.

La ecuación de transporte por convección-difusión tiene los siguientes términos

- Término de variación temporal: representa la variación de masa de la sustancia (M) en un volumen de control definido por una columna de agua de profundidad h y área unidad (A=1); la cantidad de masa de sustancia contaminante en la columna de agua en cada instante es igual a $M=A.h.C.$ para un área unidad (A=1). La masa es igual a $M=h.C.$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial h \cdot C}{\partial t} \quad \text{Ecuación 9}$$

- Término de transporte por advección: modela el transporte de la sustancia considerada debido a la velocidad medida del flujo (U_x, U_y); representa la variación de masa de sustancia por unidad de tiempo en un volumen de control definido.

$$\frac{\partial h \cdot U_x \cdot C}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot U_y \cdot C}{\partial y} \quad \text{Ecuación 10}$$

- Término de transporte por difusión: modela la mezcla de la sustancia a causa de la existencia de diferencias espaciales en su concentración; debido al movimiento aleatorio de las partículas (generado tanto a nivel molecular como por los remolinos turbulentos), algunas de ellas se moverán desde las zonas de mayor concentración a las de menor concentración y otras en sentido opuesto; cuando existen gradientes espaciales de concentración el flujo neto de partículas se produce desde las zonas de mayor concentración hacia las zonas de menor concentración. Se modela según la Ley de Fick y depende de los parámetros:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(h \left(r_i + \frac{\nu_t}{S_{c,t}} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

r_i ($m^2 s^{-1}$) es el coeficiente de difusividad molecular el cual modela la mezcla debido al efecto del movimiento aleatorio de las partículas a nivel molecular y depende de la sustancia considerada, su valor es muy bajo ya que la difusión molecular es un proceso muy lento, por lo que en su efecto en los procesos es en general despreciable, salvo en flujos laminares, $\frac{\nu_t}{S_{c,t}}$ ($m^2 s^{-1}$) es el coeficiente de difusividad turbulento el cual modela

la mezcla debido al efecto de los remolinos turbulentos, está conformado por ν_t ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) que es la viscosidad cinemática turbulenta y el número de Schmidt turbulento $S_{c,t}$ (adimensional) se puede considerar a efectos de modelización como un parámetro de ajuste que relaciona la viscosidad turbulenta calculada con un modelo de turbulencia y el coeficiente de difusividad turbulento (Cea *et al.*, 2007).

- Términos de reacción: S_c modela los procesos que generan pérdidas o aumentos de masa de la sustancia considerada.

2.3. MODELO IBER

Bladé *et al.*, (2012) indican que la herramienta, llamada Iber, es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidades da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidades de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèriques en Ingeniería) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

El modelo Iber consta de cuatro módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, un módulo de transporte de sedimentos y un módulo de calidad de aguas; todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

- a. Módulo hidrodinámico: Cea *et al.*, (2012) mencionan que el modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones 2D de profundidad inestable promediada en aguas poco profundas turbulentas para calcular la profundidad del agua y los dos componentes horizontales de la velocidad promediada en profundidad (Ecuación 1). Las ecuaciones hidrodinámicas se resuelven con un solucionador de volumen finito no estructurado basado en una extensión de segundo orden del esquema de ceñida de Roe. Las ecuaciones hidrodinámicas se resuelven con un esquema explícito y por tanto, existe un vínculo entre el paso de tiempo máximo que se puede utilizar en las simulaciones y el tamaño de la malla numérica.

- b. Módulo de calidad de agua: Este módulo calcula la evolución espacial y temporal de varias especies y variables que son relevantes para la evaluación del estado ambiental de los ríos y estuarios que incluyen: Escherichia Coli (E.Coli), oxígeno disuelto (OD), demanda de oxígeno bioquímico carbonoso (DBO), nitrógeno orgánico (N-org), nitrógeno amoniacal ($N - NH_3$), nitrógeno en nitrato-nitrito ($N - NO_3$), temperatura del agua (T) y salinidad (Sal). Se resuelve una ecuación de transporte promediada en profundidad para cada variable con un solucionador de volumen finito no estructurado conservador de masa (Cea *et al.*, 2016).

- c. Módulo de turbulencia: Iber incorpora varios modelos de turbulencia de tipo Boussinesq promediados en profundidad para calcular las tensiones de cizallamiento turbulentas. Se incluyen los siguientes modelos de turbulencia promediados en profundidad para flujos de aguas poco profundas; viscosidad turbulenta constante, modelo parabólico, modelo de longitud de mezcla, modelo K- ϵ de Rastogi y Rodi (Cea *et al.*, 2007).

- d. Módulo de transporte de sedimentos: Este módulo resuelve las ecuaciones de transporte de sedimentos no cohesivos en régimen no estacionario. Se resuelven tanto las ecuaciones de transporte de fondo como las ecuaciones de transporte en suspensión, modelándose el acoplamiento entre la carga de fondo y la carga en suspensión mediante un término de sedimentación/re suspensión. El transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación de transporte turbulento promediada en profundidad (Modelo Iber 2.0 Manual de Usuario, 2016).

2.3.1. Módulo de calidad del agua en iber

Cea *et al.*, (2016) mencionan que el modelo calcula la evolución espacial y temporal de varias sustancias contaminantes en una masa no estratificada; es decir, se asume que las variaciones de concentración en la vertical son despreciables, las sustancias que se incluyen son Sal, T, OD, DBO, E.Coli, N-org, $N - NH_3$ y $N - NO_3$. El módulo de calidad del agua está completamente acoplado al módulo hidrodinámico que resuelve la Ecuación 1, comparten la misma malla de volumen finito no estructurado adaptado a la topografía de la zona de estudio, permitiendo al usuario definir parámetros y visualizar las salidas del modelo. Figura 1 muestra los datos de entrada que necesita el módulo de calidad de agua y

sus relaciones con los otros módulos del paquete Iber.

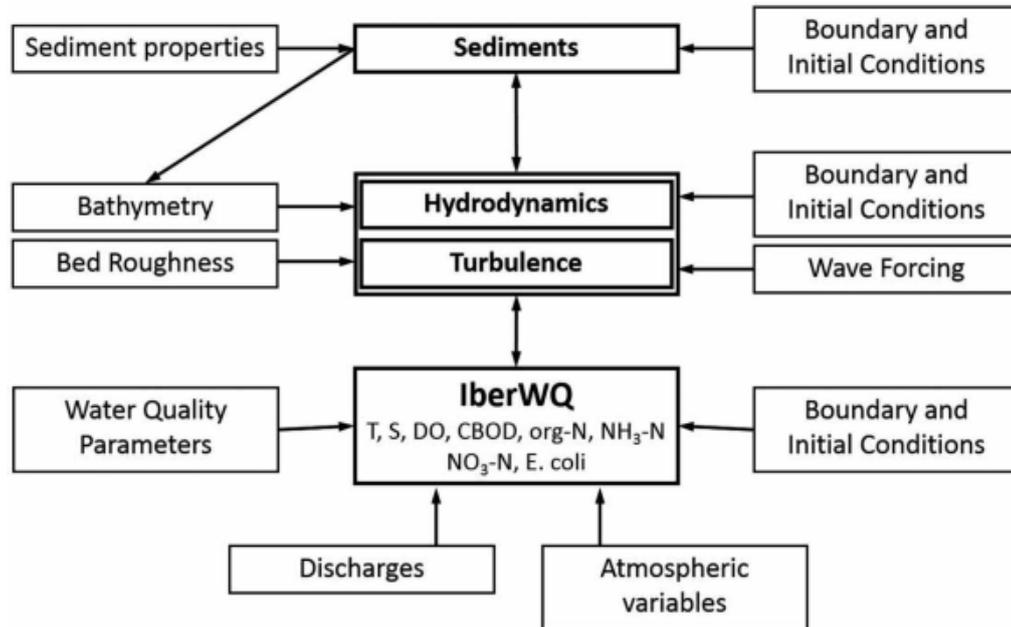


Figura 1: Integración del módulo de calidad del agua en Iber, y datos de entrada necesarios para ejecutar cada módulo

FUENTE: Cea *et al.*, (2016)

Evidentemente, no siempre que se realiza un cálculo de calidad de aguas es necesario activar todos los módulos ni introducir todos los datos que se detallan en la Figura 1, sino únicamente los que sean relevantes para el caso de estudio.

La Ecuación 8 se resuelve para cada una de las sustancias consideradas en el modelo, los procesos físicos y las reacciones bioquímicas consideradas para cada sustancia se modelan mediante el término fuente S_c , los términos fuente/sumidero para cada especie son los siguientes.

- a. Temperatura y salinidad: Iber considera cuatro procesos de transferencia de calor, términos que modelan las transferencias de calor entre el agua y la atmosfera. La Ecuación 12 representa la ecuación de reacción de la temperatura

$$\frac{S_T}{\rho C_p} (h) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde S_T se introduce en $W m^{-2}$, $\rho = 1000 \text{ Kg m}^{-3}$ y $C_p = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

$$S_T = Q_{\text{rad,in}} + Q_{\text{rad,out}} + Q_{\text{cond}} + Q_{\text{evap}} \quad \text{Ecuación 13}$$

- Radiación total neta absorbida por el agua ($Q_{\text{rad,in}}$). introducido en forma de serie temporal y se considera variable en el tiempo pero no en el espacio, incluye la radiación electromagnética procedente del sol menos la parte reflejada por la superficie del agua y la radiación atmosférica neta menos la parte reflejada por el agua.

$$Q_{\text{rad,in}} = Q_{\text{solar,neta}} + Q_{\text{atm,neta}} \quad \text{Ecuación 14}$$

- Radiación de onda larga emitida por el agua ($Q_{\text{rad,out}}$). representa la energía emitida por el agua a través de su superficie debido exclusivamente a su temperatura, dicha radiación se calcula mediante la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{\text{rad,out}} = -\varepsilon\sigma T^4$$

El signo menos indica que el agua pierde calor, donde T es la temperatura del agua en Kelvin, ε es el valor de emisividad del agua (0,97) y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,669 \cdot 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). Este valor se estima directamente en el Iber.

- Calor transferido por conducción (Q_{cond}). se calcula en función de la diferencia de temperatura entre el aire y el agua como:

$$Q_{\text{cond}} = 0,484 * c_1 * f_v * (T_{\text{aire}} - T) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$f_v = 19 + 0,90 * v_{\text{viento } 10\text{m}}^2$$

Donde Q_{cond} está expresado en $W m^{-2}$, c_1 es el coeficiente de Bowen ($0,47 \text{ mmHg }^\circ\text{C}^{-1}$), f_v es una función que define la dependencia de la transferencia de calor con la velocidad del viento a 10m de altura, T es la temperatura del agua y T_{aire} la temperatura del aire (en $^\circ\text{C}$).

- Transferencia de energía por evaporación/condensación del agua (Q_{evap}). se calcula mediante la ley de Dalton como:

$$Q_{\text{evap}} = 0,484 * f_v * (e_{\text{aire}} - e_{\text{agua}}) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde Q_{evap} esta expresado en $W m^{-2}$, e_{agua} es la presión de vapor de saturación a la temperatura del agua en mmHg, e_{aire} es la presión de vapor del aire en mmHg y f_v es la función que define la dependencia de la transferencia de calor con la velocidad del viento; las presiones de vapor e_{agua} y e_{aire} se calcula en el modelo con la siguiente ecuación:

$$e_{\text{agua}} = 4,596 * e^{\frac{17,27*T}{237,3+T}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$e_{\text{aire}} = H_r * 4,596 * e^{\frac{17,27*T_{\text{aire}}}{237,3+T_{\text{aire}}}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde T y T_{aire} son las temperaturas del agua y del aire expresadas en °C; y H_r , es la humedad relativa del aire en tanto por uno.

Por otro lado, la salinidad no reacciona con otras sustancias, es decir, es una sustancia conservativa, es por eso que la Ecuación 8 se resuelve sin términos de reacción, siendo la ecuación más sencilla de transporte de las consideradas en el módulo de calidad de Iber. Los parámetros de los que depende son el coeficiente de difusión molecular, y el número de Schmidt.

- b. OD y DBO. Cea *et al.*, (2009) indican que los procesos implementados en el término reactivo de las ecuaciones de transporte para el OD y la DBO son la reaireación superficial, degradación de la materia orgánica carbonosa, demanda de oxígeno del sedimento y la sedimentación de la materia orgánica carbonosa.

La ecuación de reacción del OD considera los procesos de reaireación, degradación de la materia orgánica carbonosa y demanda de oxígeno de sedimento de la siguiente manera:

$$S_{\text{OD}} = K_{\text{aireacion}} * \theta_1^{(T-20)} * (OD_{\text{sat}} - OD) - K_{\text{dbo}} * \theta_2^{(T-20)} * F_{\text{oxc}} * DBO - \frac{K_{\text{dos}}}{h} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde $k_{aireacion}$ es la constante de reaireación a 20°C, T es la temperatura del agua en °C, OD_{sat} es la concentración de saturación de OD, OD es la concentración de OD, θ_1 es un coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_1 = 1,024$), K_{dbo} es la constante de degradación de materia orgánica carbonosa a 20°C, θ_2 es el coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_2 = 1,047$), F_{oxc} es un factor de atenuación (adimensional) debido a bajos niveles de oxígeno, DBO es la concentración de DBO, K_{dos} es la tasa de demanda de oxígeno por el sedimento en $kg\ m^{-2}\ d^{-1}$ y h es el tirante de agua en metros.

La ecuación de reacción de la DBO considera los procesos de degradación de la materia orgánica carbonosa y la sedimentación de la materia orgánica carbonosa de la siguiente manera:

$$S_{DBO} = -K_{dbo} \cdot \theta_2^{(T-20)} \cdot F_{oxc} \cdot DBO - \frac{V_{sDBO}}{h} * DBO \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde K_{dbo} es la constante de degradación de materia orgánica carbonosa a 20°C, θ_2 es el coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_2 = 1,047$), F_{oxc} es un factor de atenuación (adimensional) debido a bajos niveles de oxígeno, DBO es la concentración de DBO, V_{sDBO} es la velocidad de sedimentación de la materia orgánica en $m\ d^{-1}$ y h es el tirante de agua.

A continuación se explican los procesos que se dan en el término reactivo de las ecuaciones de transporte para el OD y la DBO.

- Reaireación superficial. La pérdida o incremento de OD por reaireación superficial es proporcional al déficit de OD, ($OD_{sat} - OD$); en general la concentración de OD en el agua es inferior a la de saturación, por lo que este proceso supone una transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia el agua, que se modela mediante la ley de cinética de primer orden:

$$S = k * (OD_{sat} - OD) \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde k es la constante cinética del proceso, OD_{sat} es la concentración de saturación de oxígeno disuelto y OD es la concentración de OD en el agua.

Una masa de agua en reposo con una concentración inicial de OD nula aumentará con el tiempo su contenido de oxígeno hasta llegar a la condición de saturación. La tasa de reaeración es muy alta al principio (cuando la concentración de OD es baja) y disminuye a medida que la concentración de OD se acerca a su valor de saturación.

$$OD = OD_{sat}(1 - e^{-Kt}) \quad \text{Ecuación 22}$$

En la Figura 2 se muestra la gráfica de la progresión de la cinética de primer orden, donde D es el déficit de oxígeno $D = OD_{sat} - OD$

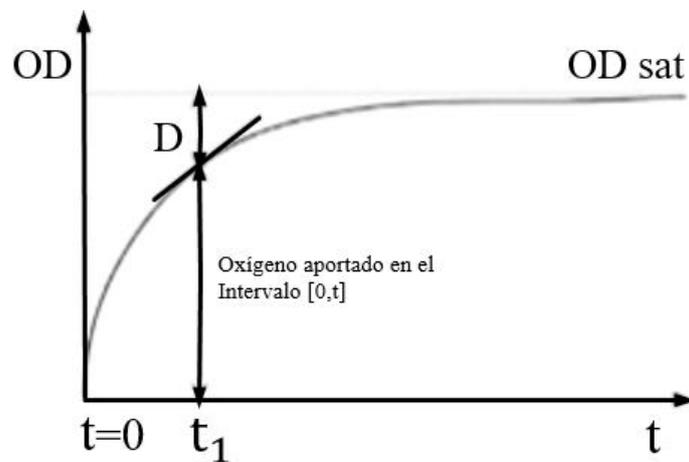


Figura 2: Progresión de la cinética de primer orden

La concentración de OD en saturación OD_{sat} depende de la T, Sal y de la presión atmosférica, considerándose estas tres variables en el modelo.

Para estimar la constante de reaeración (k), Iber utiliza fórmulas empíricas que proporcionan su valor para una T de 20°C. Este valor se corrige mediante un coeficiente para otras temperaturas del agua. El término fuente de reaeración implementado en Iber (S_{OD}) es:

$$S_{OD} = K_{aireacion} * \theta_1^{(T-20)} * (OD_{sat} - OD) \quad \text{Ecuación 23}$$

$K_{aireacion}$ se calcula en función de h y U del módulo hidrodinámico y la velocidad del viento (V_{viento}). La influencia del h y de la U se incorpora mediante el método de Covar (1976, como se citó en Cea *et al.*, 2009), el cual se basa en las formulaciones de Curchil

et al. (1962, como se citó en Cea *et al.*, 2009), Owens *et al.* (1964 como se citó en (Luis Cea *et al.*, 2009) y O'Connor y Dobbins (1958, como se citó en Cea *et al.*, 2009). La influencia de la V_{viento} se incluye mediante la fórmula de Banks y Herrera, Banks y Herrera (1977, como se citó en Cea *et al.*, 2009):

$$K_{airecion} = K_{aireh} + \frac{K_{airew}}{h} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde K_{aireh} es la constante de reaireación a 20 °C basada en las características hidráulicas del río (h y U) sin considerar la V_{viento} se calcula por el método de Covar (1976 como se citó en Cea *et al.*, 2009), K_{airew} es el coeficiente de reaireación en función de la V_{viento} , se calcula mediante la fórmula Banks y Herrera, Banks y Herrera (1977, como se citó en Cea *et al.*, 2009) (Ver Tabla 1).

Tabla 1: Ecuaciones del método de Covar para calcular la constante de reaireación K_{aireh}

Profundidad en metros (h) Velocidad del agua en $m\ s^{-1}$ (U)	Fórmula	Ecuación
Si $h \leq 0,61$ m	Owens-Gibbs	$K_{aire}(20) = 5,32 \frac{U^{0,67}}{h^{1,85}}$
Si $h > 0,61$ y $h > 3,45 * U^{2,5}$	O'Connor-Dobbins	$K_{aire}(20) = 3,93 \frac{U^{0,5}}{h^{1,5}}$
En otros casos	Churchill	$K_{aire}(20) = 5,026 \frac{U}{h^{1,67}}$

FUENTE: Elaborado con información de Cea *et al.*, (2009)

- Degradación de la materia orgánica carbonosa (DBO). el OD y la DBO disminuirán en la misma cantidad, ello implica introducir el mismo término reactivo tanto en la ecuación del OD como en la de DBO. En Iber se modeliza mediante una cinética de primer orden, según los siguientes términos reactivos en las ecuaciones de OD (S_{OD}) y DBO (S_{DBO}):

$$S_{DBOC} = S_{OD} = -k * DBO \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde k es la cinética del proceso en tiempo⁻¹

En una masa de agua en reposo, en la que inicialmente hay una determinada cantidad de materia orgánica carbonosa (DBO_0), esta disminuirá según la ecuación:

$$DBO = DBO_0 * e^{-Kt} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde k es la constante cinética del proceso en tiempo^{-1} y t es el tiempo. En la Figura 3 se muestra la progresión de la cinética de primer orden.

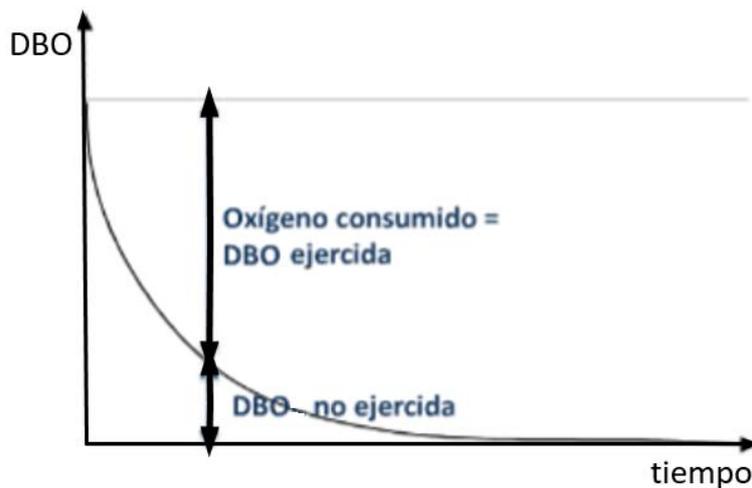


Figura 3: Progresión de la cinética de primer orden

Nota. La DBO no ejercida es la representativa de la materia orgánica carbonosa que queda por consumir en el agua en cada instante.

La caracterización de los vertidos de agua residuales se trabaja con la DBO ejercida a cinco días (DBO_5), que se mide en laboratorio; sin embargo, Iber trabaja con la DBO total o DBO_0 , también llamada DBO última (DBO_u). Por lo tanto, es necesario transformar los datos de (DBO_5) a (DBO_u) usando la Ecuación 27 ejercida en un tiempo t (DBO_t) que se relaciona con la DBO última mediante la expresión para $t=5$ días.

$$DBO_t = DBO_u * (1 - e^{-Kt}) \quad \text{Ecuación 27}$$

Finalmente el término de reacción por la degradación de la materia orgánica carbonosa para la DBO y el OD resulta:

$$S_{DBO} = S_{OD} = -K_{dbo} \cdot \theta_2^{(T-20)} \cdot F_{oxc} \cdot DBO \quad \text{Ecuación 28}$$

- Demanda de oxígeno de los sedimentos (DOS). La degradación de la materia orgánica presente en los sedimentos del fondo hace disminuir la concentración de oxígeno en el agua intersticial de los mismos, promoviendo la transferencia de oxígeno desde la columna de agua hacia el sedimento del fondo; este proceso se incluye en el término de reacción del OD según la Ecuación 29:

$$S_{OD} = -DOS = -\frac{K_{dos}}{h} \quad \text{Ecuación 29}$$

- Sedimentación de la materia orgánica carbonosa. Cuanto mayor sea la velocidad de sedimentación, menor será la cantidad de materia orgánica en suspensión en la columna de agua y por lo tanto menor será la DBO:

$$S_{DBOC} = -\frac{V_{sDBOC}}{h} * DBOC \quad \text{Ecuación 30}$$

- c. E. Coli. Cea *et al.*, (2011) indican que el proceso de desaparición bacteriana en Iber se describe mediante una cinética de primer orden; el término de reacción se expresa como:

$$S_d = -K_{dec} * C \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde K_{dec} es la constante de desaparición bacteriana en (tiempo^{-1}) y C es la concentración de E. Coli, expresado en (NMP/100ml).

Una tasa de desintegración no constante en la que el coeficiente de degradación K_{dec} se calcula con la fórmula empírica de Mancini en la que se toma en cuenta los efectos de la T , Sal y la radiación solar (Ra_s) y es considerado uno de los modelos más completos del proceso de descomposición de coliformes fecales (Cea *et al.*, 2011):

$$K_{dec} = (0,8 + 0,2Sal)1.07^{(T-20)} + 0,086 \frac{I_0}{K_e H_c} (1 - e^{(-K_e H_c)}) \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde K_{dec} es la tasa de desaparición promediada en una profundidad H_c (d^{-1}), Sal es la salinidad ($g\ l^{-1}$), T es la temperatura del agua ($^{\circ}C$), I_0 es la radiación solar incidente en la superficie del agua ($W\ m^{-2}$), K_e es el coeficiente extinción de la luz en el agua (m^{-1}), H_c es la profundidad de la capa vertical sobre la que se extendió E.coli, calculada como:

$$H_c = \min(h, H_{\max})$$

Ecuación 33

Donde H_{\max} es un parámetro especificado por el usuario y h es la profundidad del agua, si la E.Coli se extendió por toda la columna de agua $H_c = h$. Por otro lado, si la E.Coli se esparce sobre una capa vertical más delgada que la profundidad del agua, el valor de H_c estará limitado por la profundidad de esta capa ($H_c = H_{\max}$) Cea *et al.* (2011).

La tasa de degradación de E.Coli depende en gran medida de la turbidez del agua, lo que disminuye la intensidad de radiación promedio en la columna de agua. Esto se considera en el modelo mediante el coeficiente de absorción de la luz K_e , para su cálculo se usa la fórmula propuesta por Parkhill y Gulliver (2002):

$$K_e = 2,619 + 0,129 * NTU$$

Ecuación 34

Donde NTU es la turbidez del agua.

III. METODOLOGÍA

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo de investigación se llevó a cabo en la parte baja del río Lurín, al sur este de la ciudad de Lima, ubicada entre las coordenadas $76^{\circ}48'$ y $76^{\circ}54'$ de longitud oeste y $12^{\circ}7'$ $12^{\circ}16'$ de latitud sur, incluye a los distritos de Cieneguilla, Pachacamac y Lurín comprendido desde el km 20 + 500 a la altura del puente Mototaxi (L13), en el distrito de Cieneguilla hasta el km 0 + 578 a la altura del puente Panamericana (L1) en el distrito de Lurín, recorriendo 20km del río y monitoreando ocho puntos en el río, cuatro en efluentes de PTARs y uno en el retorno del canal de riego la Capilla haciendo un total de 13 puntos de monitoreo (Ver Figura 4).

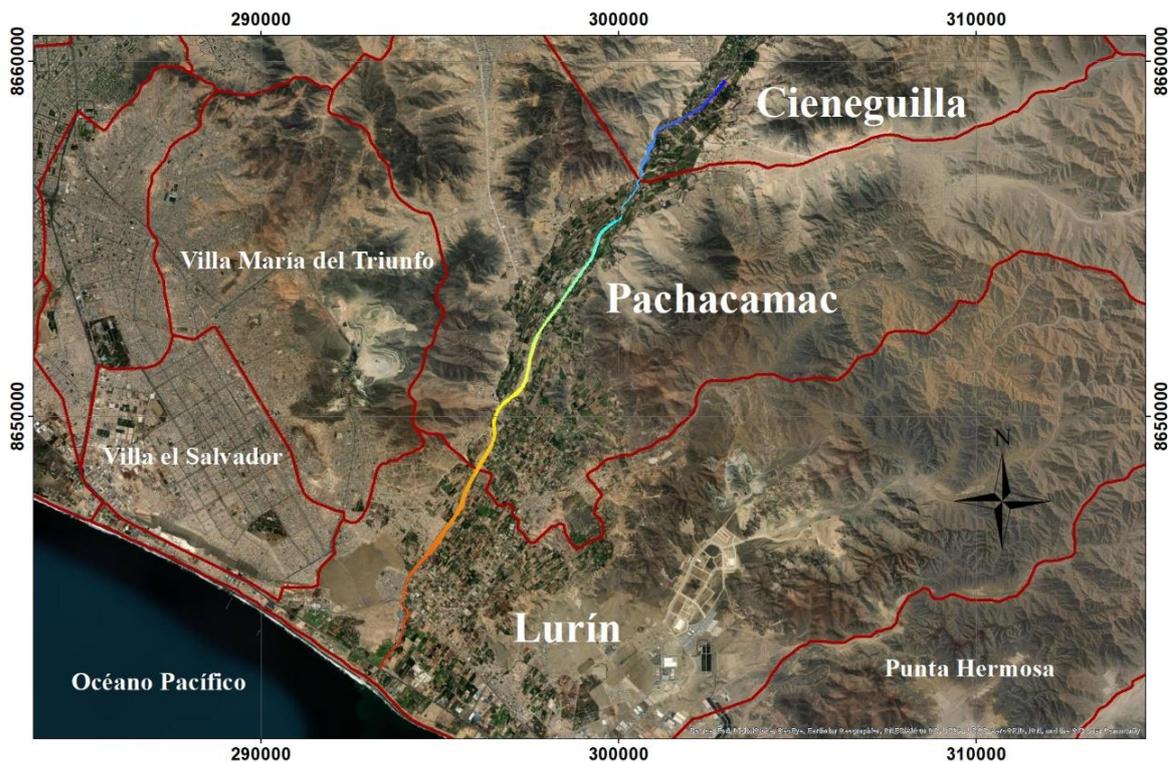


Figura 4: Mapa de Ubicación política provincial de la cuenca del Río Lurín

(Ver distribución de puntos en Tabla 12, ANEXO 2). Los efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual doméstica corresponden a las PTARs Cieneguilla, Manchay, San Bartolo y Julio C. Tello.

3.2. MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

En la Tabla 2 se muestran todos los equipos, materiales y software que se utilizaron durante la investigación.

Tabla 2: Materiales, equipos y herramientas computacionales

Equipos	Uso o aplicación
Oxímetro Oxi3210 y Cellox 325	Análisis del OD y T
Conductivímetro 3210	Análisis de la CE
Correntómetro	Medición de la velocidad
Bodtrak II	Análisis de la DBO en laboratorio
Incubadora Memert IF55	Análisis de la E.Coli
Mufla, Estufa, bomba de vacío	Para estimar los ST y SS
VAN Matrice 210 con cámara DJI Zenmuse X4S	Para la topografía del cauce del río.
GPS	Obtener las coordenadas UTM
Cámara fotográfica	Registro fotográfico
Materiales de laboratorio	Uso o aplicación
Petrefilm, pipetas de 1, 5 y 10 ml, mechero Bunsen, tubos de ensayo de 10 ml, agua destilada.	Obtención de la E.Coli
Crisoles, vaso de precipitado, probeta de 10, 50 y 100 ml	Análisis de SST
Matraz kitazato, algodón, papel filtro	Análisis de sólidos suspendidos
Soluciones buffer HI 5004, HI 5064, HI 5010, solución de calibración rápida HI 9828-25	Calibración de equipos
Alcohol metílico al 70 %	Limpieza del laboratorio
Materiales en gabinete	Uso o aplicación
Datos atmosféricos: R_a , T_{aire} , H_r , V_{viento}	Estimación de la T; y crecimiento y mortandad de la E.Coli en Iber.
Rugosidad y Mapa de uso de suelos	Simulación de la pérdida de energía en Iber.
Topografía del cauce del río	Obtención del DEM.
Caudal en el río, efluentes de PTAR y captaciones	Modelación de calidad del agua en Iber.
Softwares	Uso o aplicación
Iber 2.5.2	Modelación de calidad del agua.
Civil 3D 2019	Elaboración del contorno del río y el DEM.
ArcMap 10.5	Elaboración de mapas temáticos.

3.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento seguido en la presente tesis se muestra en el esquema secuencial de la Figura 5.

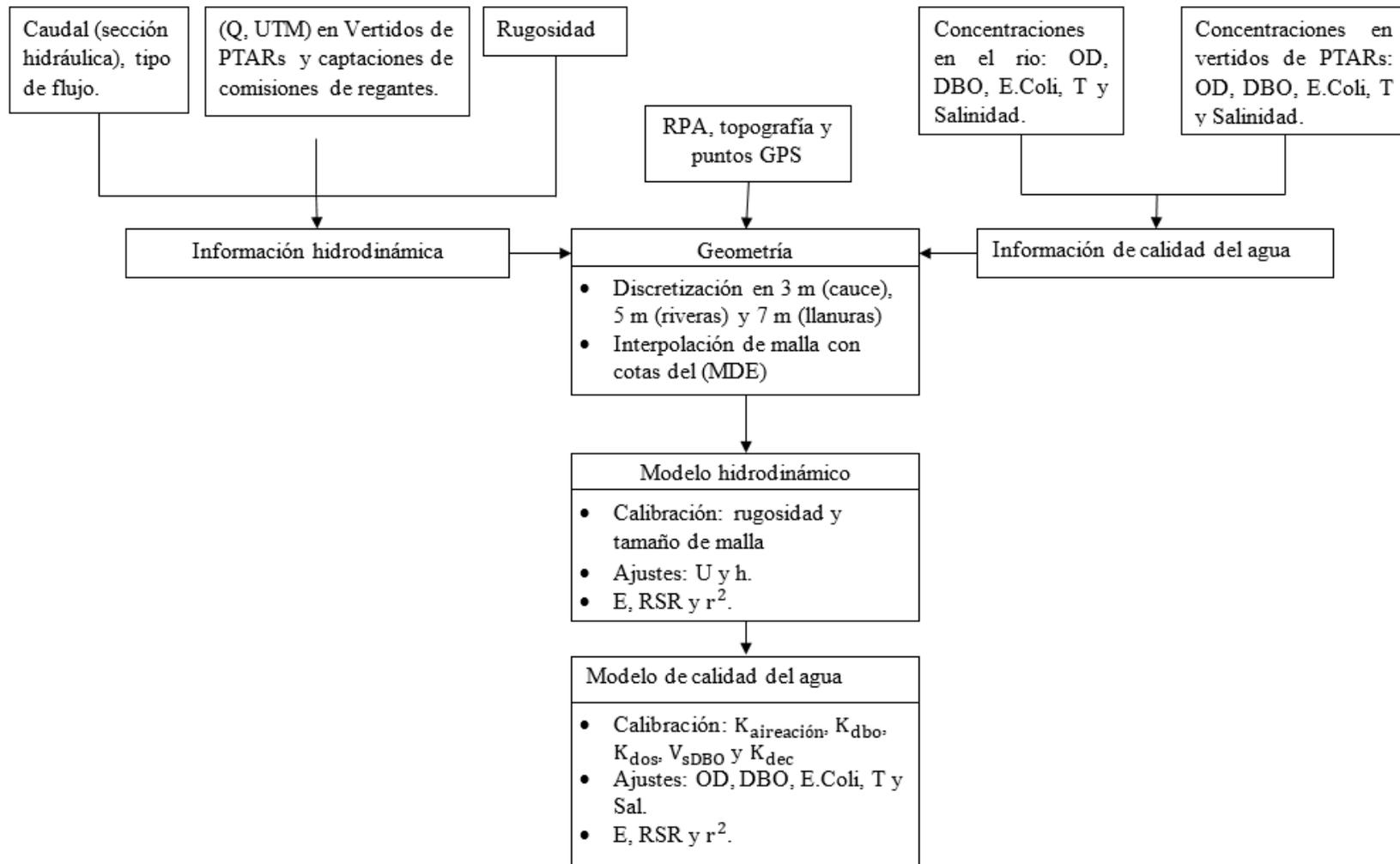


Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología empleada en la presente investigación

3.3.1. Caracterización hidráulica y de calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua y características de la sección hidráulica se colectaron en siete monitoreos entre febrero y agosto del 2019, distribuidos en las 13 estaciones de monitoreo, como se muestra de la Figura 50 hasta la Figura 58 (ANEXO 15). A la altura del puente Manchay se encuentra la quebrada Tinajas, quebrada seca durante el año activándose durante los meses de lluvia con un caudal aproximado de $0,025\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Se tienen nueve comisiones de regantes distribuidas a lo largo del tramo (Ver Tabla 13, ANEXO 2 y Figura 6), en la que se aprecia la distribución de las comisiones de regantes a lo largo del cauce del río y la ubicación de las 13 estaciones de monitoreo. En el distrito de Pachacamac, cerca al km 5+400, se identificaron vertidos no controlados y, a la altura del puente Panamericana, se observaron botaderos de residuos sólidos y zonas como letrinas informales.

Se realizó un hidrograma con caudales promedios diarios de la estación Antapucro, para el 2019, registrándose mayores caudales en enero, febrero y marzo con valores de $15.37 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $14.47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $17.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, mientras que en julio, agosto, septiembre y octubre se presentan los menores caudales, como se muestra en la Tabla 20 y Figura 43 (ANEXO 12).

En los 8 puntos de monitoreo de calidad del agua en el río, el modelo requería las características de las secciones hidráulicas, por lo cual, en cada sección, se dividió el cauce del río en al menos cinco secciones parciales transversales, midiéndose el ancho, profundidad y velocidad con correntómetro, en cada una de ellas, obteniéndose el caudal, a partir de la sumatoria de caudales parciales (Ver Tabla 21, ANEXO 13). Estos mismos pasos se siguieron en la quebrada Tinajas y en las captaciones de las comisiones de regantes, los caudales de las comisiones de regantes de difícil acceso se calcularon por balance hídrico. Es de señalarmos que en meses de estiaje, ciertos tramos del río, presentaban caudal cero, como se muestra en la Figura 52 (a) (ANEXO 15).

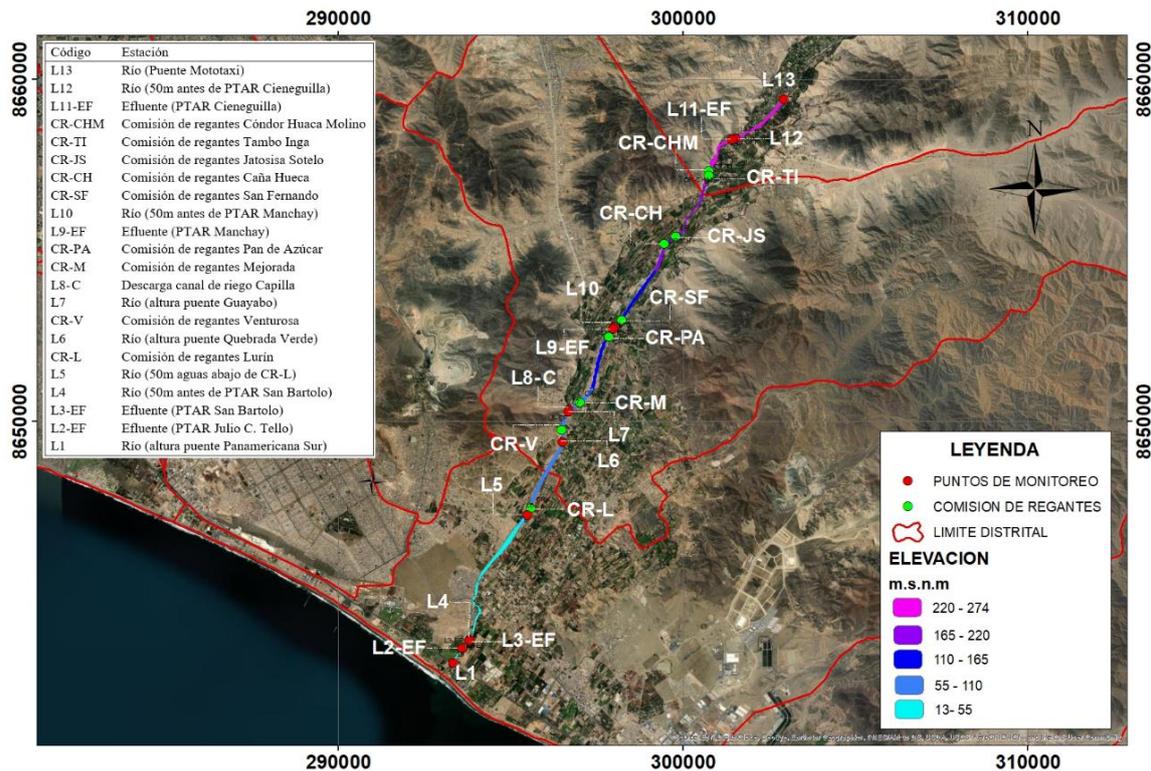


Figura 6: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo y comisiones de regantes ubicadas en la parte baja del río Lurín

Por otro lado, la información topográfica fue obtenida a partir de las imágenes tomadas con un VAN serie Matrice 210 usando una cámara con modelo DJI Zenmuse X4S, cuya altura de vuelo fue de entre 80 y 100 metros, la superposición (%) fue de 75% lateral y 70% frontal, la distancia de toma de imagen a imagen fue de 50cm y una velocidad de 6m s^{-1} , de las ortofotos en las que no se mostraba agua ni arbustos se extrajo una nube de puntos con sus respectivas coordenadas (x, y, z), para seguidamente ser trabajadas en Civil 3D, también se contó con la información topográfica de Cardich (2017) de 6,5 km comprendido entre la bocatoma Mejorada a la Bocatoma Jatosisa, obtenida con una estación total TOPCON GTS 102N, además de la información de coordenadas UTM tomadas en campo con el GPS. La información se procesó en Civil 3D, se suavizaron las curvas generándose así la superficie del cauce del río Lurín (Ver Figura 7), donde se muestra la superficie de los puntos de monitoreo L1, L2-EF, L3-EF y L4 y en la Figura 40 (ANEXO 3), se muestra los demás puntos de monitoreo; luego se procedió a extraer el MDE en formato Tiff, geo referenciado en la zona de coordenadas UTM-WGS 1984, Zona 18 Sur, con resolución de 1 metro, que fue ingresado al modelo Iber.

Respecto a la calidad del agua se evaluó: T, conductividad eléctrica (CE), OD, DBO, E.Coli y sólidos suspendidos totales (SST), obtenidos según los métodos que se muestran en la Tabla 3, las tres primeras sustancias se obtuvieron in situ y las dos últimas sustancias en el laboratorio de La Universidad Nacional Agraria La Molina.

La información completa del monitoreo se visualiza en el la Tabla 14 (ANEXO 4), asimismo estos fueron procesados en Matlab, donde se realizaron las gráficas de caja, que se muestran en la sección de resultados.

En la simulación de T y E.Coli con la ecuación de Mancini se requiere información de radiación solar (R_{a_s}), temperatura de aire (T_{aire}), humedad relativa (H_r) y velocidad del viento (V_{viento}), información que se obtuvo de la página del SENAMHI, de la Estación Meteorológica Von Humboldt, con coordenadas latitud sur $12^{\circ}4'55,95''S$, longitud oeste $76^{\circ}56'21,52''O$ y altitud 247 m.s.n.m a excepción de (R_{a_s}), que se obtuvo de la Estación Meteorológica automatizada Davis, con coordenadas latitud sur $12^{\circ}4'41,77''S$, longitud oeste $76^{\circ}56'45,20''O$ y altitud 248 m.s.n.m., ambas ubicadas en La Universidad Nacional Agraria La Molina; estos datos se presentan en Tabla 15 (ANEXO 5).

La información obtenida del muestreo se comparó de acuerdo a La Ley N° 28611, Ley General del Ambiente que establece dos conceptos fundamentales para la gestión ambiental el Estándar de calidad ambiental (ECA) y el Límite máximo permisible (LMP) (Ver Tabla 16, ANEXO 6).

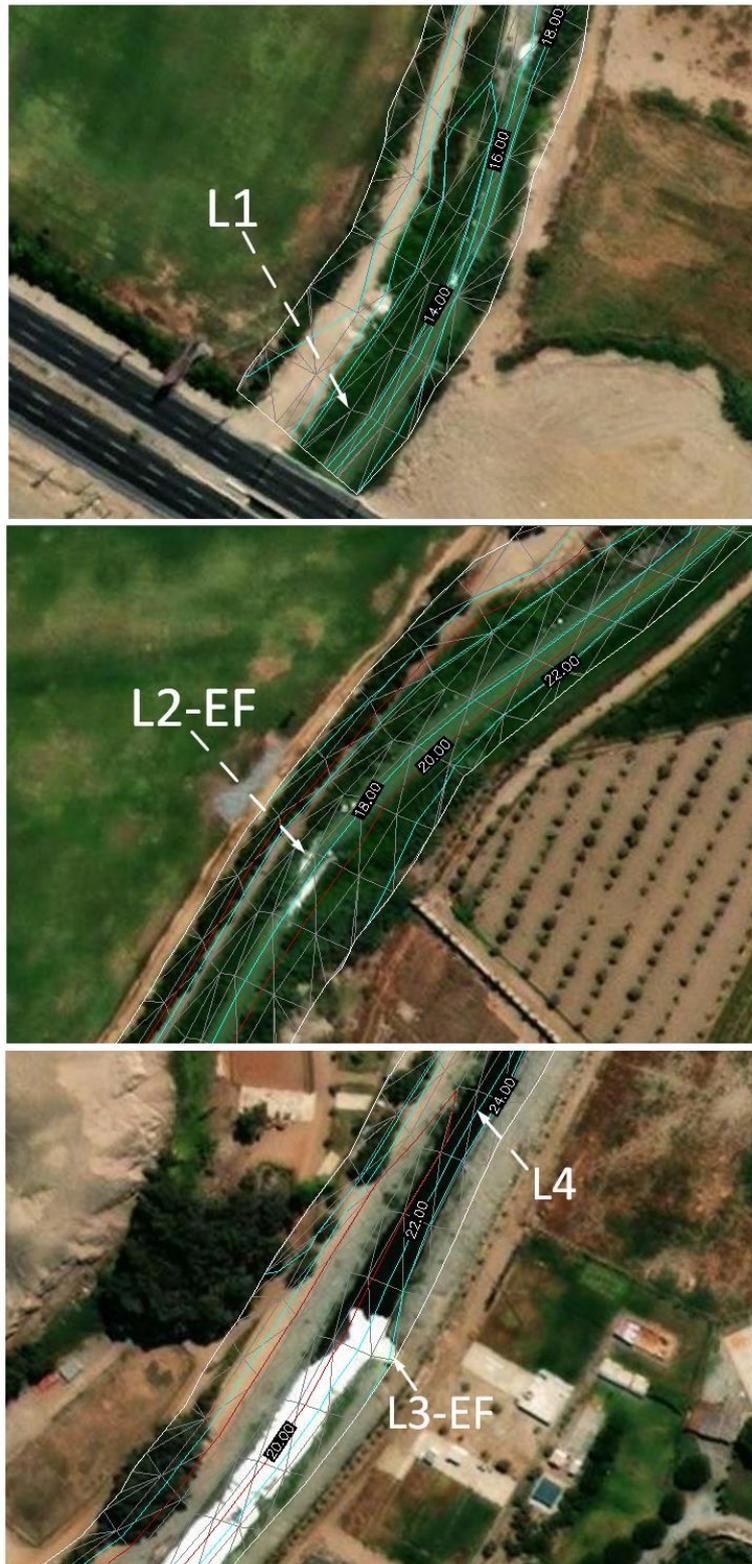


Figura 7: Superficie trabajada en Civil 3D, en donde las curvas de color cyan representan las curvas de nivel menores y las rojas las curvas de nivel mayores

Tabla 3: Métodos de análisis de los contaminantes in situ y en laboratorio

Sustancias y Variables	Metodología
Temperatura	SMEWW parte 4500-O-G
Conductividad Eléctrica	SMEWW parte 2510-B
OD	SMEWW parte 4500-O-G
DBO	SMEWW parte 5210-D
E.Coli	NMK método 147.1993
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW parte 2540-D

a. Formulación del modelo Iber

Se definieron las condiciones geométricas, las condiciones iniciales y las condiciones de contorno, según se detalla a continuación.

- Definición de la geometría. para esto, se usó Civil 3D 2019, la topografía obtenida, activándose el mapa satelital y a través de éste se definió el contorno mediante líneas, luego fue importado a la herramienta Iber en formato DXF.
- Asignación de las condiciones de contorno e iniciales tanto hidrodinámicas como de calidad del agua. En las condiciones de contorno de entrada se consideraron los datos tomados en la estación L13, para el contorno de entrada hidrodinámico, se estableció una condición de caudal total considerando el caudal por cada fecha de monitoreo; la condición de contorno de salida fue la estación L1, con una condición de flujo Supercrítico/Crítico, por otro lado para la condición inicial hidrodinámica se consideró un tirante de agua igual a cero; las condiciones de entrada de calidad del agua fueron las mismas en las condiciones iniciales, datos como T, Sal, OD, DBO_u y E.Coli variando por cada fecha, las condiciones de contorno de concentración se ingresaron en los contornos de entrada de caudal, mientras que las iniciales se definieron en todas las superficies de la geometría.
- Definición de las comisiones de regantes. En el caso de sumideros como las captaciones de las comisiones de regantes la información fue ingresada en m³ s⁻¹ en el módulo de fuentes y sumideros (*Datos*→*Hidrodinámica*→*Fuentes y Sumideros*).
- Definición de las descargas. Se definieron cinco descargas: las PTARs L2-EF, L3-EF,

L9-EF, L11-EF, el canal de regadío L8-C, con sus respectivas coordenadas en el módulo de descargas (*Datos*→*Calidad de Agua*→*Descargas*), ingresando los valores de las columnas Q (m³ s⁻¹), Sal (Kg m⁻³), T (°C), E.Coli (NMP/100ml), OD (Kg m⁻³) y DBO (Kg m⁻³).

La concentración de salinidad se obtuvo a partir de la información de CE Bodelón *et al.* (1994), mediante la Ecuación 35:

$$\log_{10}(\text{Sal}) = -0,175 + 1,0053 \log_{10}(\text{CE}) \quad \text{Ecuación 35}$$

Se aplicó esta misma ecuación lineal a los datos de CE obtenidos en campo, resultando las salinidades en cada punto de monitoreo para las tres diferentes fechas (Ver Tabla 17, ANEXO 7).

Asimismo, se impuso el valor de la DBO_u en las descargas, en condiciones de contorno e iniciales, estos valores se obtuvieron en el laboratorio y se determinaron por el método de Thomas, que según Raffo y Ruiz (2014), es una buena herramienta para obtener la constante a K_{dbo} a 20 °C; para llevar a cabo esta metodología en el laboratorio se utilizó un equipo BODTrak II, que registró la demanda bioquímica de oxígeno de las muestras de agua cada 40 minutos durante 10 días. Con la data registrada se graficaron las rectas del tiempo vs $\left(\frac{t}{\text{DBO}}\right)^{1/3}$ y se generaron ecuaciones lineales del tipo Y=a +bX, las cuales se compararon con lo propuesto por Thomas:

$$\left(\frac{t}{\text{DBO}_t}\right)^{\frac{1}{3}} = (\text{DBO}_u * K)^{-\frac{1}{3}} + \left(\frac{K_{\text{dbo}}^{\frac{2}{3}}}{6L^{\frac{1}{3}}}\right) * t \quad \text{Ecuación 36}$$

Siendo:

$$a = (\text{DBO}_u * K)^{-1/3} \text{ y } b = \left(\frac{K_{\text{dbo}}^{\frac{2}{3}}}{6L^{\frac{1}{3}}}\right)$$

De esta forma se obtuvo la K_{dbo} a 20°C y la DBO_u (Ver Figura 8).

$$K_{\text{dbo}} = \frac{6b}{a} \text{ y } \text{DBO}_u = \frac{1}{K * a^3} \quad \text{Ecuación 37}$$

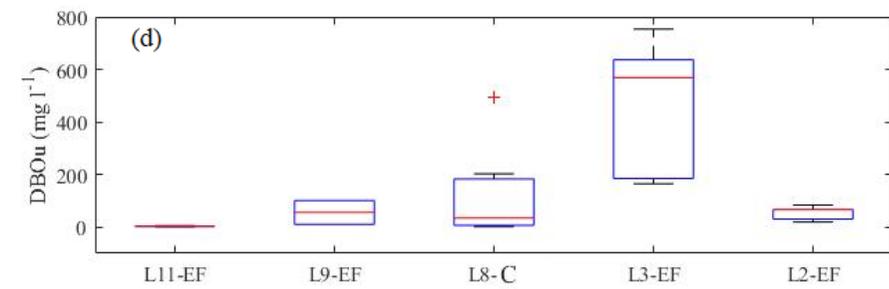
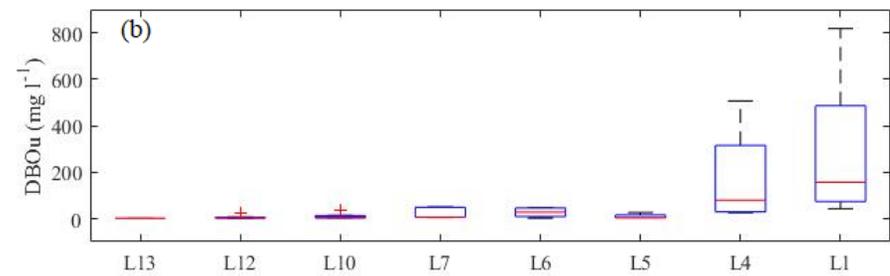
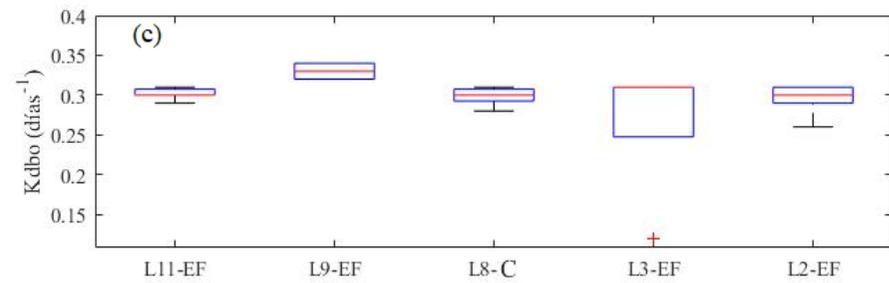
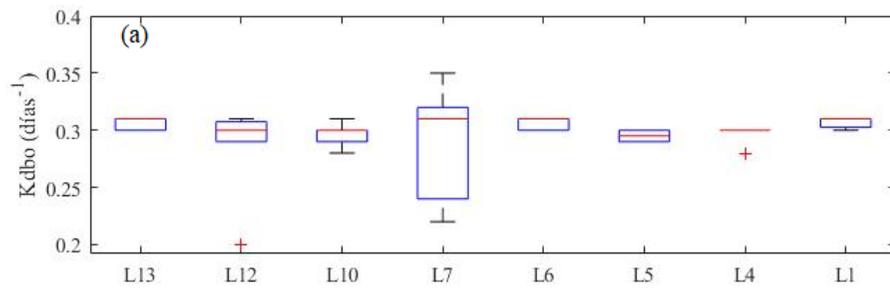


Figura 8: variación temporal y espacial del parámetro K_{dbo} obtenido en el laboratorio a 20°C y la DBO_u . En (a) K_{dbo} en el río, en (b) K_{dbo} en los efluentes, en (c) DBO_u en el río, en (d) DBO_u en los efluentes

3.3.2. Parametrización del modelo hidrodinámico y de calidad del agua

Se configuraron los tiempos de simulación y los parámetros de cálculo, siendo los principales parámetros el mallado y la rugosidad, para el módulo hidrodinámico y los parámetros específicos en cada sustancia contaminante, para el módulo de calidad de aguas que se detallan a continuación.

- a. Generación de la malla: esta se generó a cota cero, como la zona de estudio es muy irregular se utilizó una malla no estructurada, con tres tamaños de malla diferentes según la zona del río, para el cauce de 3 metros, en las riveras de 5 metros y en las llanuras de 7 metros, la malla para la zona de L3-EF y L4 se muestra en la Figura 9. Para los demás puntos (Ver Figura 41, ANEXO 8). Luego se interpoló el MDE, en formato Tiff para dar cotas a los nodos de la malla (Ver Figura 9). Con este tamaño de malla, el tiempo computacional de cada simulación en los 20km de río (puente Mototaxi hasta el puente Panamericana) fue de cuatro días.

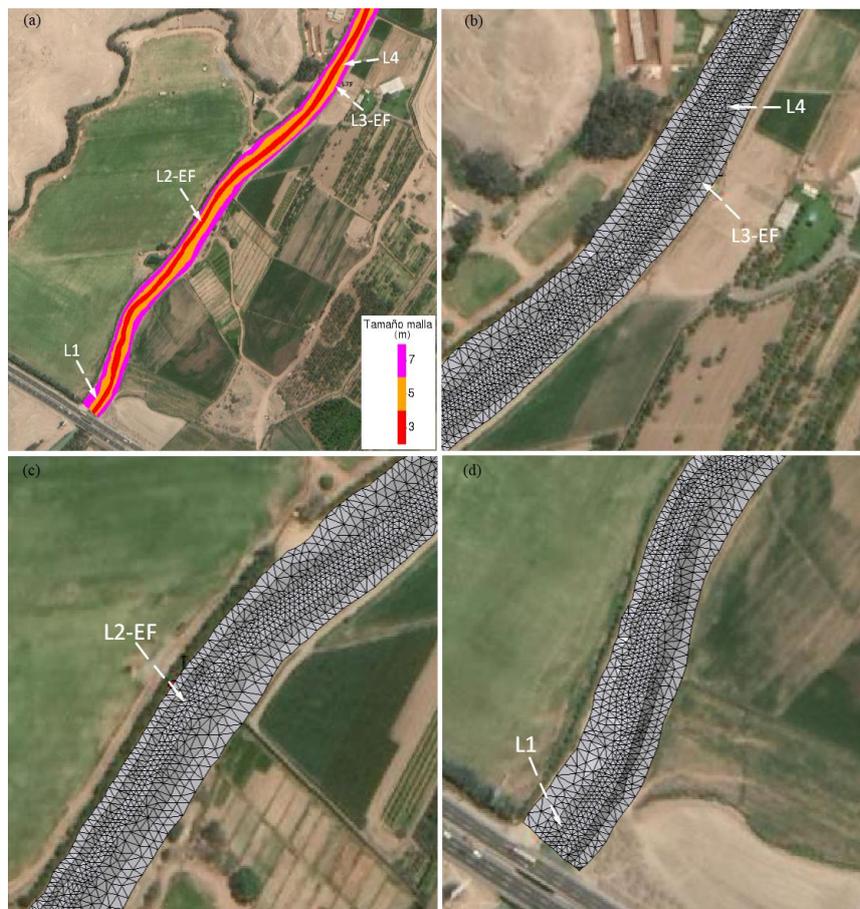


Figura 9: Malla de la zona de estudio en (a) se muestra el tamaño de malla y en (b) se muestra la malla con la interpolación del DEM en L3-EF y L4 en (c) L2-EF y en (d) L1

- b. Asignación de la rugosidad: se definió a partir de las imágenes RGB colectadas por la RTA en las visitas de campo, a partir de las cuales se pudo observar los cambios de uso de la tierra y por tanto la variación de la rugosidad, seleccionándose los valores según Chow (1994) y comparando con la información de campo las U y h de las simulaciones. En la Figura 10 se muestran las rugosidades obtenidas durante la calibración. Mayor detalle en la Figura 42 (ANEXO 9).



Figura 10: Rugosidad en la parte baja del tramo de estudio desde L4 (50m antes de la PTAR Cieneguilla) hasta L1 (puente Panamericana)

Al analizar los datos de calidad del agua, el tramo con mayor contaminación resultó aguas abajo de la bocatoma Lurín (de L5 a L1), por ello la calibración del modelo de calidad del agua se concentró en dicho tramo, se calibraron los meses de marzo, mayo y julio.

- c. Parámetro de la temperatura y salinidad: la T se caracteriza por el parámetro S_T , el cual se estima ingresando la información de $Q_{rad,in}$, V_{viento} , T_{aire} y H_r . Se introdujo el valor de $(Q_{rad,in})$, para esto se requirió de la información de Ra_s en $W\ m^{-2}$ por horas, cuando dicha radiación incide sobre la superficie del agua una parte de la energía es reflejada y el resto penetra en la masa de agua, es por eso que fue necesario definir el

Albedo (A_s), este depende del tipo de superficie sobre la que incide la radiación y del ángulo de incidencia o también llamado altitud del sol en grados sexagesimales desde el horizonte (α), su valor se estimó con la expresión $A_s = 1,18 * \alpha^{-0.77}$, α fue extraído de la página <https://salidaypuestadelsol.com/sun/lima> por horas, para 24 horas, el valor $Q_{solar,neta}$ se estimó mediante la siguiente expresión:

$$Q_{solar,neta} = (1 - A_s) * Q_{solar,incidente} \quad \text{Ecuación 38}$$

A la ($Q_{solar,neta}$) se añadió la ($Q_{atm,neta}$), la cual se calculó a partir de la T_{aire} , usando la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{atm,neta} = (1 - r) * \epsilon_{atm} * \sigma * T_{aire}^4 \quad \text{Ecuación 39}$$

Siendo T_{aire} en Kelvin, r el coeficiente de reflexión de superficie del agua a la radiación de onda larga ($\approx 0,03$), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,669 * 10^{-8} * W m^{-2} K^{-4}$) y ϵ_{atm} es la emisividad de la atmósfera, que se puede estimar como:

$$\epsilon_{atm} = 0,937 * 10^{-5} * T_{aire}^2 * (1 + 0,17 * C_c^2) \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde C_c es la fracción de cielo cubierta por nubes (entre 0 y 1), se asumió $C_c = 0$ es decir que el cielo está totalmente despejado.

La $Q_{rad,in}$, que se impuso en Iber, fue la suma de la $Q_{solar,neta}$ y la $Q_{atm,neta}$, se trabajó en una hoja Excel para las tres fechas, estos resultados se pueden ver en la Tabla 18 (ANEXO 10).

$$Q_{rad,in} = Q_{solar,neta} + Q_{atm,neta} \quad \text{Ecuación 41}$$

Para la estimación de Q_{cond} , se introdujeron datos de V_{viento} y T_{aire} .

Para la estimación de Q_{evap} , se introdujeron datos de T_{aire} , V_{viento} y H_r en tanto por uno (Ver Figura 11).

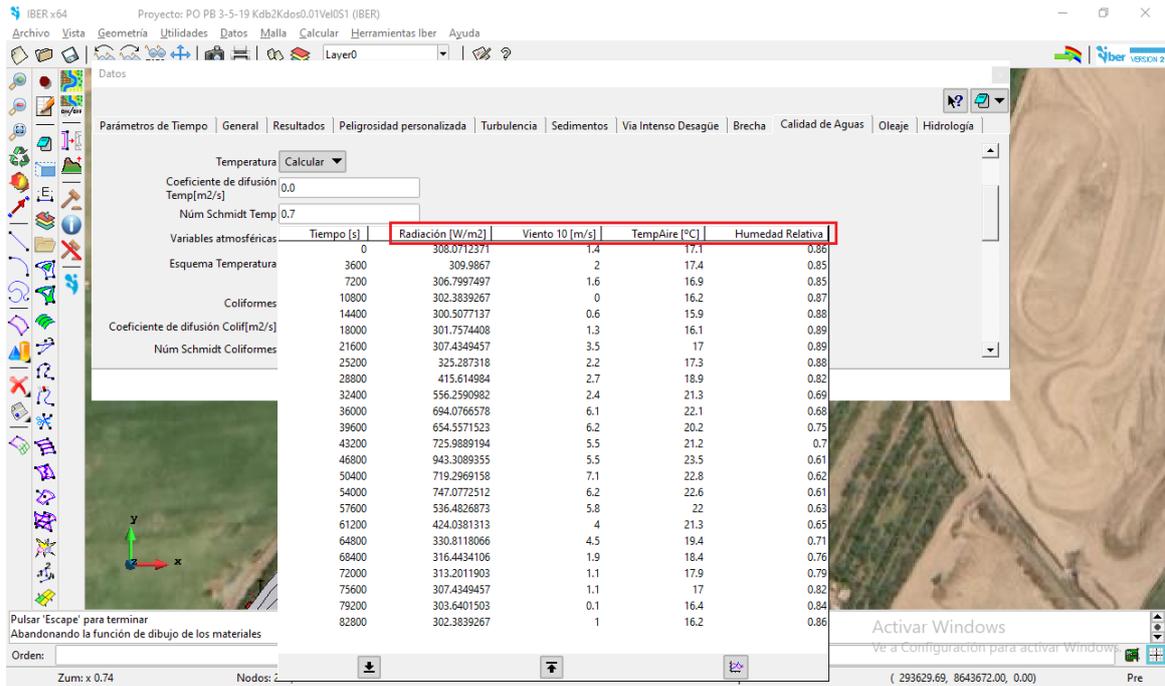


Figura 11: Datos atmosféricos ingresados para la activación de la T, en la fecha 3 de mayo del 2019

Para la estimación de la salinidad, se requirió información del coeficiente de difusión molecular y el número de Schmidt, para resolver la ecuación de convección-difusión.

d. OD y DBO: el término de reacción para la DBO y el OD dependen de los parámetros $K_{aireacion}$, K_{dbo} , K_{dos} , V_{SDBOC} ; a continuación se explica cómo se asignaron dichos parámetros.

- Una vez calibrado el modelo hidrodinámico se obtuvieron las h y U , Iber considera estos valores para el cálculo del $K_{aireacion}$ mediante fórmulas empíricas que proporcionan su valor para una T de 20°C , Iber corrige este valor mediante un coeficiente ($\theta_1=1,024$) para otras temperaturas del agua.
- Con respecto al parámetro k_{dbo} , luego de varias simulaciones por cada una de las tres fechas, se calibró el modelo obteniéndose un valor de k_{dbo} a 20°C igual a $0,55 \text{ d}^{-1}$, Iber corrige este valor mediante un coeficiente ($\theta_2=1,047$) para otras temperaturas del agua.

- Con respecto al valor de K_{dos} se introdujo de acuerdo a los rangos de valores según el tipo de fondo que sugiere Thomman (1972) (Ver Tabla 4), se consideró el tipo de lodos de origen urbano siendo el valor ingresado de $10,0 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, como se muestra en la Figura 12.

Tabla 4: Rango de valores de K_{dos} respecto al tipo de fondo

Tipo de fondo	K_{dos} ($\text{gO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$)
Lodos de origen urbano	1,0 – 10,0
lodos en estuarios	1,0 – 2,0
Suelos arenosos	0,2 – 1,0
Suelos minerales	0,05– 0,1

- El valor de V_{sDBO} hace referencia a la velocidad efectiva de sedimentación de las partículas de materia orgánica presentes en la columna de agua, se consideró igual a 0 m d^{-1} , debido a que la velocidad del agua produce agitación por fenómenos como la turbulencia y el viento, esto hace que las partículas se mantengan en suspensión, por esto su efecto se consideró despreciable frente a otros procesos como la tasa de degradación de la materia orgánica. El valor ingresado de K_{dbo} y V_{sDBO} en Iber se observa en la Figura 13.

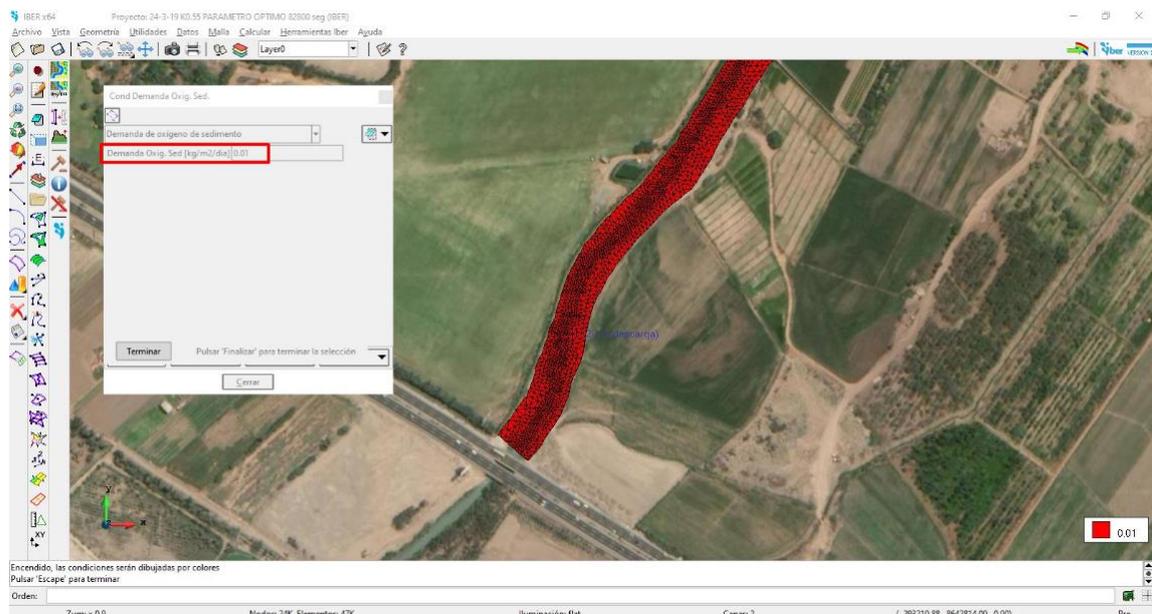


Figura 12: Valor de K_{dos} ingresado en toda la zona de estudio en la fecha del 24 de marzo del 2019

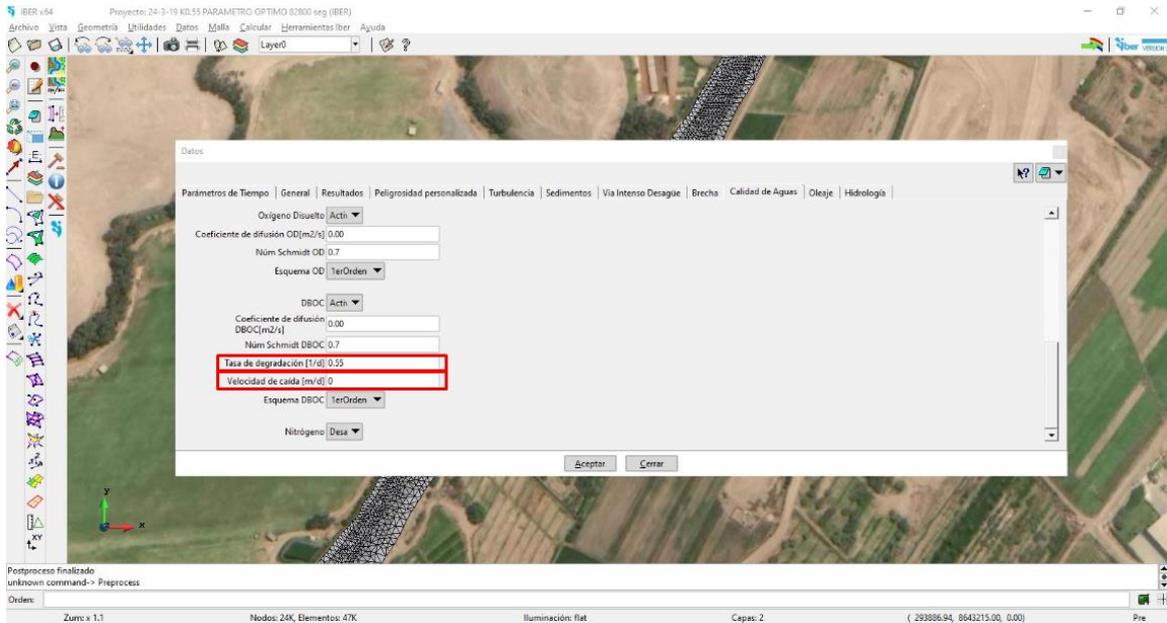


Figura 13: Valores de K_{dBO} y V_{sDBO} ingresados en toda la zona de estudio en la fecha del 24 de marzo del 2019

- e. E. Coli: se caracteriza por el parámetro K_{dec} , para calcularlo se eligió como modelo de degradación el de Mancini, el cual se estima a partir de información de I_0 , H_{max} y K_e (Ver Tabla 19, ANEXO 11).
- Los mismos valores de $Q_{solar,neto}$ (I_0) que fueron calculados para la T, se introdujeron en series temporales.
 - Asumiendo que hay una mezcla completa de E.Coli en toda la columna de agua, se asignó un valor de H_{max} muy elevado igual a 100 metros, de esta forma el modelo considera el valor de la profundidad H_c , igual a la profundidad de agua en cada punto.
 - Para calcular los valores de K_e se usó la Ecuación 34 propuesta por Parkhill y Gulliver (2002), la cual depende de la turbidez. Para hallar el valor de la turbidez del agua se tuvo que establecer una relación entre la concentración total de SST y la turbidez. Holliday *et al.*, (2003) indican una fuerte correlación entre la turbidez (NTU) y la concentración total de sedimentos en suspensión con la siguiente ecuación:

$$NTU = 1.0283 * TSS^{1.0282} \quad \text{Ecuación 42}$$

Se aplicó esta ecuación en las tres fechas de monitoreo y finalmente para el modelo se consideró la mayor turbidez para cada mes por ser más crítico. Se pueden observar los valores introducidos para la activación de la E.coli en Iber en la Figura 14.

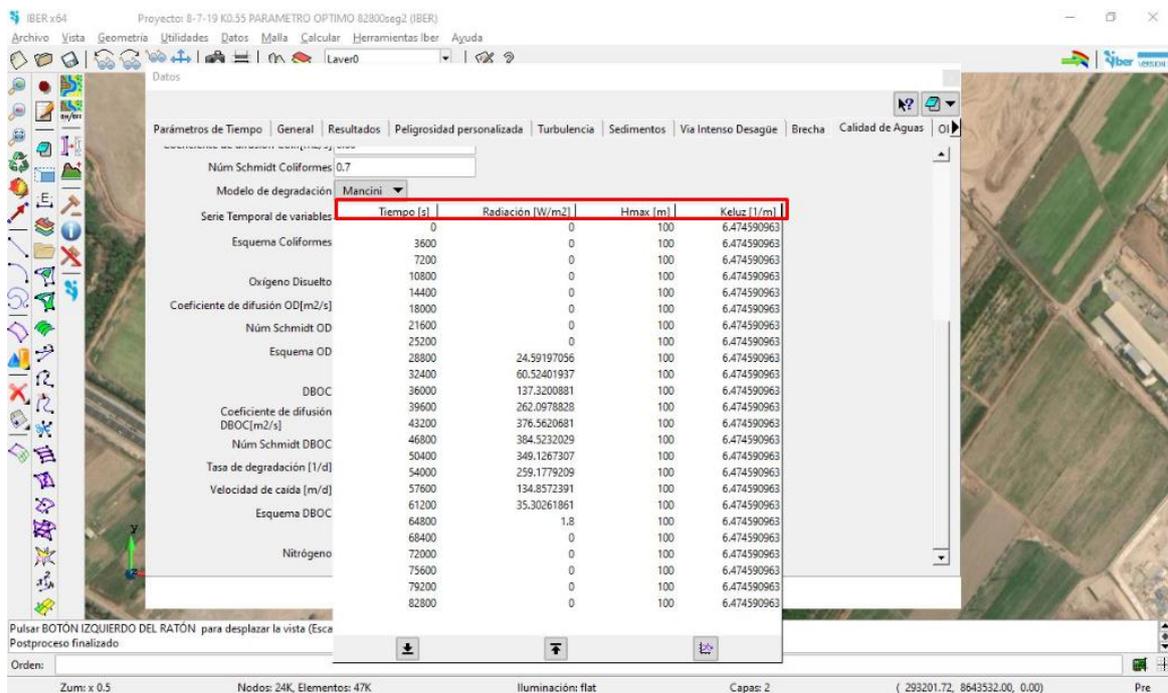


Figura 14: Datos de I_0 , H_{max} y K_e ingresados para activar la E.Coli con el método de Mancini, en la fecha 8 de julio del 2019

f. Asimismo, se asignaron dos parámetros de los que dependen todas las sustancias a modelar que son el coeficiente de difusión molecular y el número de Schmidt cuyos valores fueron $0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $0,7$ respectivamente. Otra opción adicional para todas las sustancias es el esquema numérico, que define el método utilizado para discretizar el término de transporte por advección en dicha ecuación, se puede elegir entre tres métodos de discretización primer orden, Gamma y MUSCL; los métodos Gamma y MUSCL son de segundo orden, lo cual implica mayor precisión en los resultados que con el esquema de primer orden, sin embargo, estos esquemas generaron inestabilidades numéricas en la solución impidiendo la obtención de resultados, esto se solucionó pasando al esquema de primer orden. Por lo antes mencionado para todas las simulaciones se definió el esquema de primer orden.

- g. Definición del tiempo de simulación: Debido al enmallado, al método numérico empleado y al caudal ingresado se consideró un tiempo máximo de simulación de 24 horas en todos los casos se consideró un intervalo de resultados de 100 segundos.

Luego de varias simulaciones, con un tiempo computacional de máximo un día en cada simulación (desde L5 hasta L1), se fue ajustando las concentraciones simuladas a las observadas, con lo cual fue necesario regresar al campo para comprobar posibles contaminaciones difusas, descargas y/o vertidos no detectados, con lo cual se agregó contaminación difusa a la altura del km 5+400 en Pachacamac y a la altura del puente Panamericana, además se consideró el aporte de la quebrada Tinajas. Finalmente se obtuvieron los índices de eficiencia de la calibración.

3.3.3. Simulación de escenarios para evaluar la recuperación del río

Con el modelo previamente calibrado y luego del análisis, se observó que el tramo con mayor contaminación, es desde la estación L5 a L1, debido a la contaminación difusa en Pachacamac y la descarga de la PTAR San Bartolo. Por ello, se realizó la simulación de escenarios que permitieron mejorar la calidad del agua, con simulación para el mes más crítico, como fue julio.

Las simulaciones, incluyen la optimización de la PTAR San Bartolo para que cumplan con el LMP y ECA que se exige en el río, y la implementación de una PTAR en Pachacamac, debido a las descargas de aguas residuales domésticas no controladas.

En la Figura 15 se observa el comportamiento de la h , U y el número de Froude a la largo del eje del río, para julio.

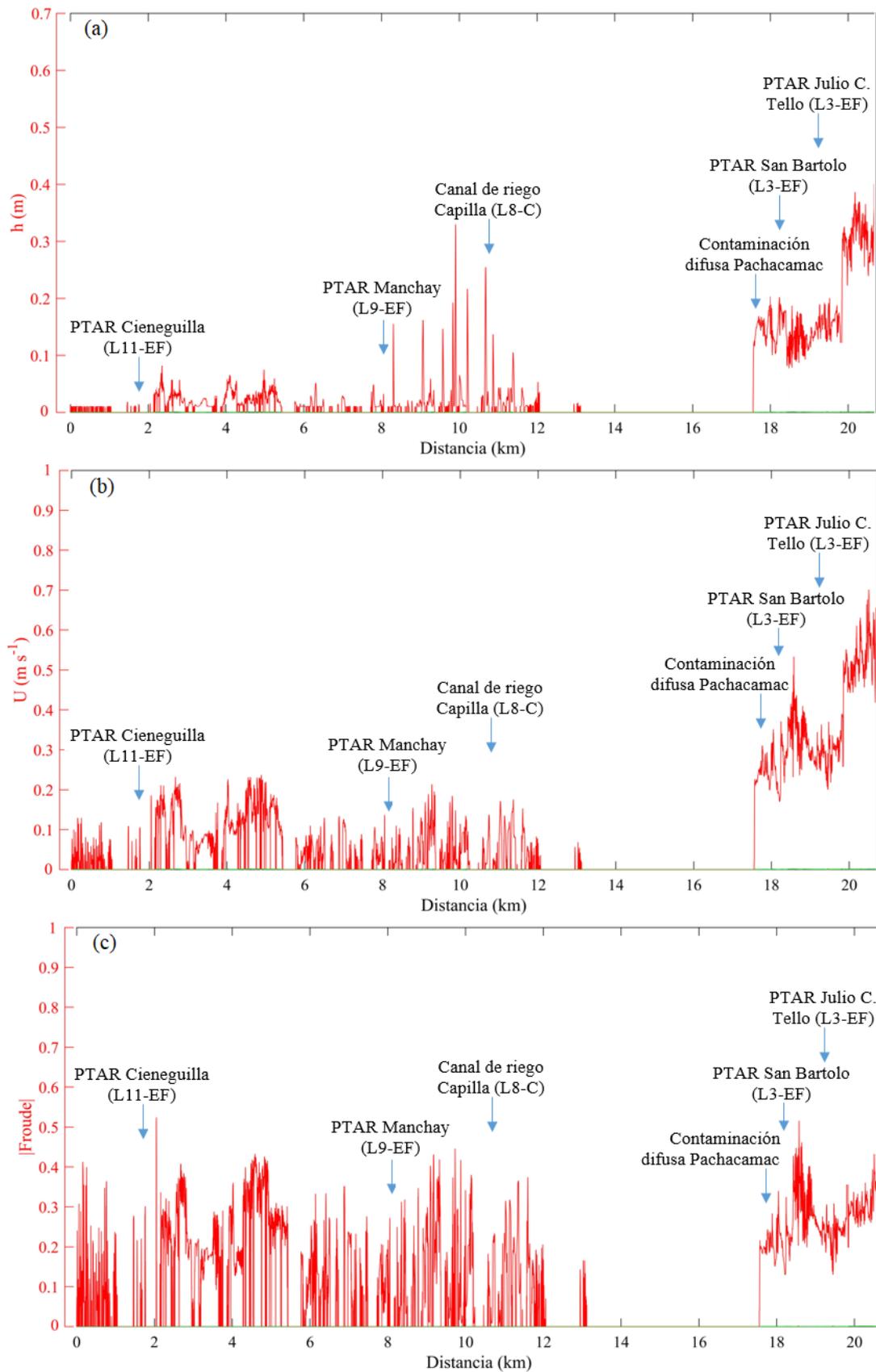


Figura 15: Comportamiento de la h , U y número de Froude, a lo largo del eje del río

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

El gráfico de cajas con información de U , h y Q , esta última tanto en el río como en los efluentes, se muestra en la Figura 16; de estos gráficos se observa que la U en todos los puntos, es menor a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ y las h , son menores que $0,8 \text{ m}$ esto hace que el flujo del río presente un estado sub crítico; con respecto al Q del río, los menores Q se presentan en L5 y L4, con valores ($\bar{x} \pm S$) de $3,22 \pm 4,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $3,39 \pm 4,99 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente; debido a la captación de comisiones de regantes, aguas arriba de estos puntos. Asimismo, se observa que el 19 de junio, 8 de julio y 5 de agosto del 2019, no existe Q en L5, y el mayor Q es en L13, con valores de $4,35 \pm 6,03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, debido pocas capitaciones de comisiones de regantes, aguas arriba de este punto. En cambio, en L1 se tiene valores de $4,77 \pm 5,50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ debido a las descargas de L3-EF y L2-EF; por otro lado se observa que el mayor Q en efluentes, se encuentra en L3-EF ($1,06 \pm 0,57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y los menores Q , se encuentran en L9-EF ($0,01 \pm 0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y en L8-C ($0,03 \pm 0,048 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). El comportamiento de los datos de acuerdo a ($\bar{x} \pm S$) en todos los puntos de monitoreo se puede observar en la Tabla 5.

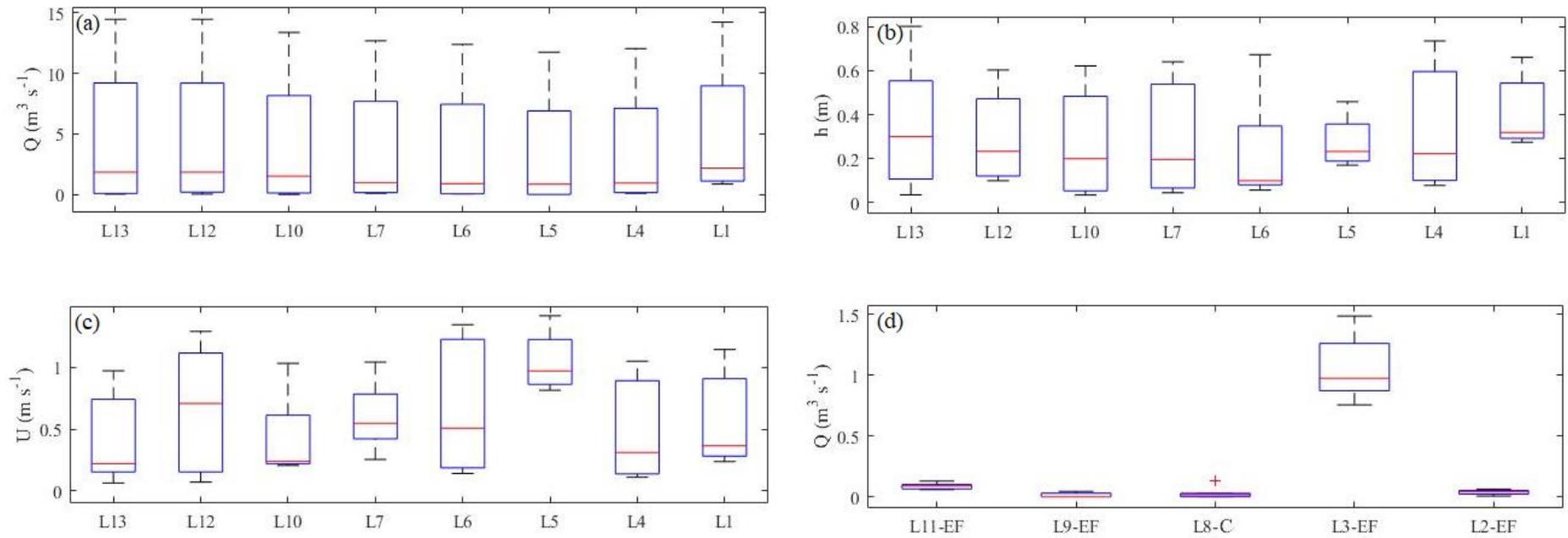


Figura 16: Variación temporal y espacial de datos hidráulicos medidos en campo en (a) caudal, en (b) tirante de agua, en (c) velocidad en los puntos de monitoreo ubicados en el río y en (d) caudal en efluentes

Tabla 5: Comportamiento de datos hidráulicos entre febrero y agosto del 2019 de acuerdo a promedios y desviación estándar ($\bar{x}\pm S$)

Puntos de monitoreo	Q (m ³ s ⁻¹)	h (m)	U (m s ⁻¹)
L13	4,35 ± 6,03	0,4 ± 0,38	0,35 ± 0,28
L12	4,41 ± 5,98	0,63 ± 0,51	0,29 ± 0,20
L11-EF	0,09 ± 0,03	2.26 ± 0.32	0.1 ± 0.02
L10	3,93 ± 5,52	0,42 ± 0,33	0,27 ± 0,24
L9-EF	0,01 ± 0,02	0.55 ± 0.27	0.24 ± 0.11
L8-C	0,03 ± 0,05	0.51 ± 0.60	0.10 ± 0.14
L7	3,65 ± 5,25	0,59 ± 0,27	0,27 ± 0,26
L6	3,50 ± 5,16	0,67 ± 0,53	0,22 ± 0,24
L5	3,22 ± 4,92	1,05 ± 0,59	0,27 ± 0,17
L4	3,39 ± 4,99	0,46 ± 0,42	0,32 ± 0,28
L3-EF	1,06 ± 0,57	0.32 ± 0.16	0.84 ± 0.49
L2-EF	0,04 ± 0,02	1.29 ± 0.33	0.12 ± 0.04
L1	4,77 ± 5,50	0,55 ± 0,39	0,4 ± 0,17

El gráfico de cajas con información de datos de calidad del agua para puntos en el río y en las descargas, se muestra en la Figura 17 y Figura 18 respectivamente, de los gráficos se observa lo siguiente:

- En todos los puntos de monitoreo, se cumple con el ECA y el LMP para la T.
- Las concentraciones de CE están dentro de lo permitido por el ECA.
- Con respecto a los SST se observa que existe mayores concentraciones en las fechas de mayor caudal ya que un mayor flujo de agua produce mayor arrastre de materiales sólidos, la estación L1 presenta los valores más altos ($114,49 \pm 159,31 \text{ mg l}^{-1}$), debido al arrastre de materiales sólidos; por el contrario el punto L13 es el que presenta los menores valores de SST ($29,24 \pm 48,91 \text{ mg l}^{-1}$).
- Las estaciones L13, L12, L10, L7, L6 y L5 presentan, concentraciones de OD dentro de lo permitido en el ECA, aun en fechas de caudal bajo, probablemente debido a la actividad fotosintética de las algas presentes; por ejemplo, en L6 el OD aumenta por la presencia de algas en el puente Quebrada Verde y el Puente Guayabo, sin embargo en la estación L7 disminuye el OD, debido a que aguas arriba se encuentra el vertido del canal de regadío Capilla L8-C, que descarga un OD de ($6,23 \pm 1,69 \text{ mg l}^{-1}$). Para L4 y L1, las concentraciones de OD cumplen con el ECA en las fechas de mayores caudales; sin embargo, se incumple en las fechas de menores caudales, debido a las descargas de los efluentes no controlados a la altura del km 5+400 (contaminación difusa de Pachacamac), de las PTARs L3-EF y L2-EF, como por los botaderos

(contaminación difusa Lurín) e infiltraciones cerca al Puente Panamericana.

- Las PTARs L11-EF y L9-EF cumplen con el LMP para la DBO_5 , sin embargo en el canal de regadío L8-C, se incumple el LMP en algunas fechas, tomando valores de $(97,23 \pm 139,75 \text{ mg l}^{-1})$, aumentando la DBO_5 en la estación L7 con valores de $(22,06 \pm 22,52 \text{ mg l}^{-1})$, incumpliendo el ECA; para las estaciones L4 y L1 no se cumplen con los valores de la DBO_5 establecidos en el ECA, debido a las descargas de los efluentes no controlados en el km 5+400 (contaminación difusa en Pachacamac), de las PTARs L3-EF y L2-EF, además de los botaderos e infiltraciones cerca al Puente Panamericana.
- La PTAR San Bartolo (L3-EF), no cumple con los LMP en todos los casos; mientras que la PTAR Julio C. Tello, Manchay y Cieneguilla, no cumplen con los LMP de E.Coli en mayo, julio y abril; sin embargo, la PTAR Cieneguilla (L11-EF), sí cumple con los LMP para el OD y DBO.
- Las estaciones L13, L12 y L10 presentan concentraciones de E.Coli dentro de lo permitido en el ECA, en la estación L7 se incumple el ECA, debido a las descargas del canal de regadío Capilla L8-C, con valores de $(271142,86 \pm 453937,74 \text{ NMP}/100\text{ml})$, en las estaciones L4 y L1, también se incumple el ECA para la E.Coli, debido a las descargas de los efluentes no controlados en el km 5+400 (contaminación difusa en Pachacamac), de las PTARs L3-EF y L2-EF, además de los botaderos e infiltraciones cerca al Puente Panamericana. (contaminación difusa Lurín).

El comportamiento de los datos de calidad del agua de acuerdo a $(\bar{x} \pm S)$ en todos los puntos de monitoreo se puede observar en la Tabla 6.

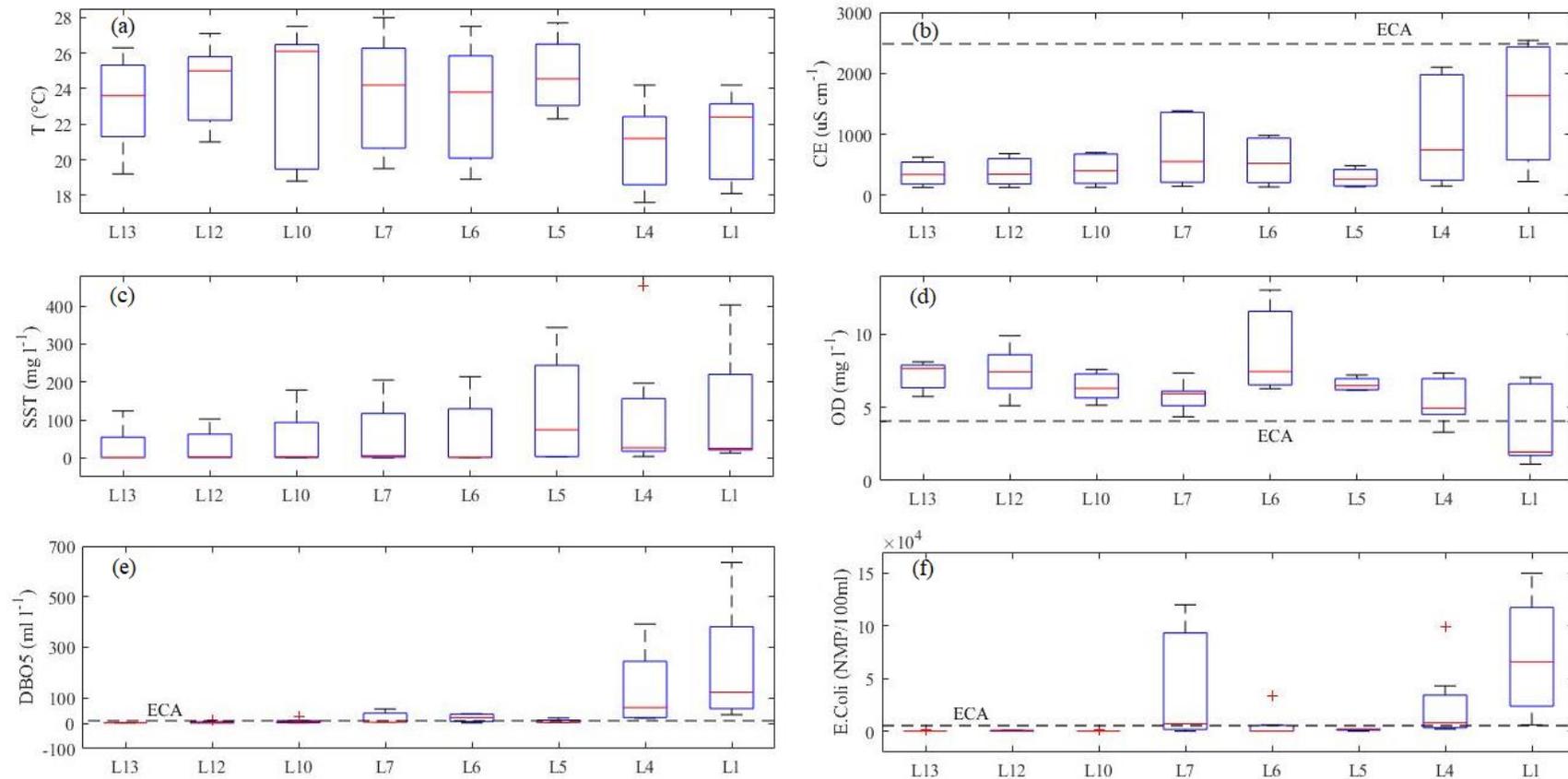


Figura 17: variación espacial y temporal de datos de calidad del agua medidos en campo en puntos de monitoreo ubicados en el río; en (a) temperatura, en (b) conductividad eléctrica, en (c) solidos sedimentables totales, en (d) oxígeno disuelto, en (e) BDO₅ y en (f) E.Coli

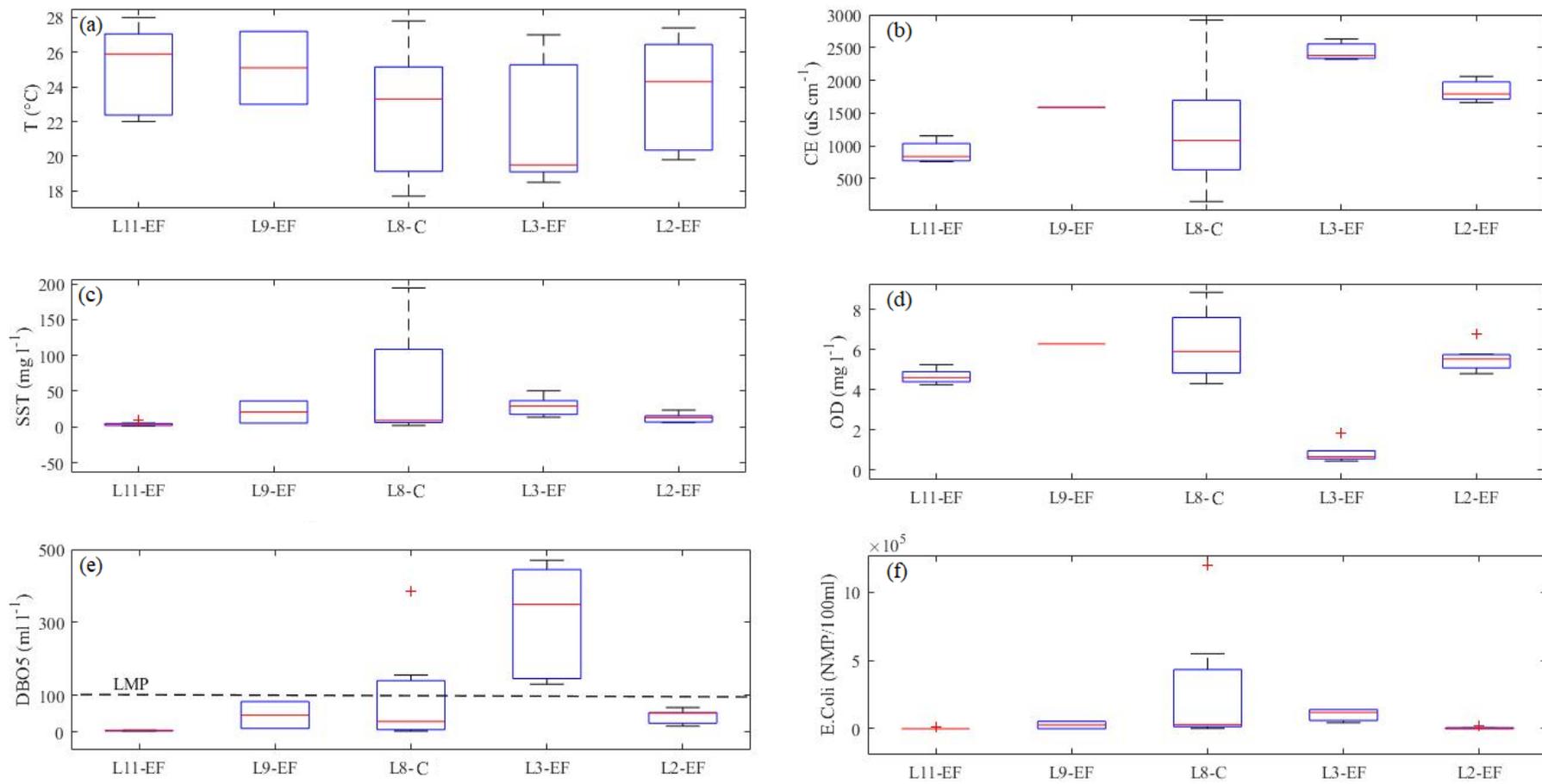


Figura 18: Variación espacial y temporal de datos de calidad del agua medidos en campo en los efluentes; en (a) T, en (b) CE, en (c) SST, en (d) OD, en (e) BDO₅ y en (f) E.Coli

Tabla 6: Comportamiento de datos de calidad del agua entre febrero y agosto del 2019 de acuerdo a promedios y desviación estándar ($\bar{x}\pm S$)

Estaciones	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	SST (mg l^{-1})	OD (mg l^{-1})	DBO5 (mg l^{-1})	E.Coli (NMP/100ml)
L13	23,31 \pm 2,58	363,80 \pm 195,90	29,24 \pm 48,91	7,23 \pm 0,97	1,93 \pm 0,48	143 \pm 378
L12	24,37 \pm 2,29	388,51 \pm 222,50	27,9 \pm 44,37	7,45 \pm 1,61	4,22 \pm 4,85	286 \pm 488
L11-EF	25,00 \pm 2,51	906,71 \pm 156,05	3,70 \pm 2,90	4,67 \pm 0,35	2,83 \pm 1,12	1714 \pm 4536
L10	23,51 \pm 3,92	430,84 \pm 244,42	44,58 \pm 74,48	6,41 \pm 0,93	8,37 \pm 9,25	143 \pm 378
L9-EF	25,10 \pm 12,31	1588,50 \pm 775,11	20,82 \pm 13,57	6,29 \pm 3,07	45,83 \pm 30,85	27000 \pm 20410
L8-C	22,44 \pm 3,76	1264,83 \pm 908,29	56,93 \pm 75,55	6,23 \pm 1,69	97,23 \pm 139,75	271143 \pm 453938
L7	23,54 \pm 3,24	757,49 \pm 582,90	55,73 \pm 84,51	5,75 \pm 0,95	22,06 \pm 22,52	60714 \pm 105855
L6	23,06 \pm 3,29	571,39 \pm 373,53	56,51 \pm 93,64	8,73 \pm 2,87	21,19 \pm 14,92	6143 \pm 12090
L5	24,78 \pm 13,34	288,68 \pm 192,83	163,92 \pm 131,78	6,58 \pm 3,54	7,97 \pm 7,38	1500 \pm 1069
L4	20,73 \pm 2,44	1080,44 \pm 892,35	107,74 \pm 165,59	5,48 \pm 1,51	142,12 \pm 147,77	23857 \pm 36108
L3-EF	21,80 \pm 11,08	2440,00 \pm 1195,64	28,76 \pm 18,24	0,83 \pm 0,61	307,31 \pm 198,08	101800 \pm 61576
L2-EF	23,59 \pm 3,25	1843,00 \pm 156,38	12,50 \pm 6,22	5,57 \pm 0,65	41,81 \pm 18,93	5000 \pm 7234
L1	21,27 \pm 2,44	1549,43 \pm 974,96	114,49 \pm 159,31	3,77 \pm 2,69	243,66 \pm 225,86	72428 \pm 55220

4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

Los resultados de los parámetros de la rugosidad para el módulo hidrodinámico y los parámetros específicos en cada sustancia contaminante para el módulo de calidad de aguas obtenidos, luego de varias simulaciones se detallan a continuación.

- a. Velocidad y altura de agua: la calibración del módulo hidrodinámico se realizó definiendo diferentes rugosidades en todo el tramo de estudio, luego de varias simulaciones de prueba y error se seleccionaron las rugosidades con los que se obtuvo un mejor ajuste entre los valores simulados y observados, se compararon los valores U y h simulados y observados, en la Figura 19 se muestran los resultados de la U y h obtenidos de Iber para el mes más crítico, julio, el mes de mayo y el mes con mayor caudal, marzo, además en la Figura 20 se muestra la comparación de los valores de U y h observados y simulados en los 13 puntos de monitoreo.

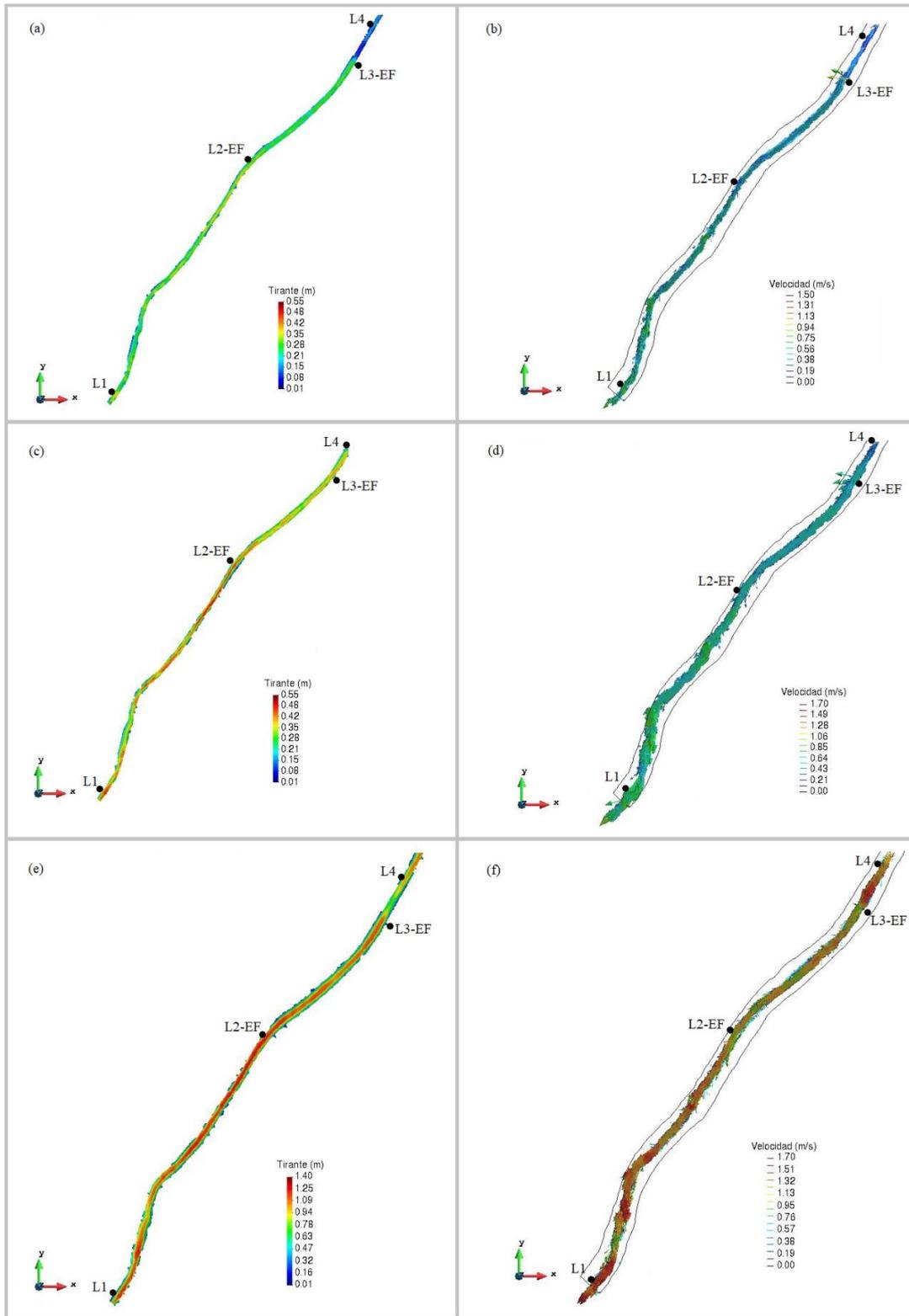


Figura 19: Resultados de U y h obtenidos en Iber con la rugosidad final en (a) tirante de agua, en (b) vector velocidad ambos en julio mes más crítico (menor caudal); en (c) tirante de agua, en (d) vector velocidad ambos en mayo mes con caudal promedio; en (e) tirante de agua, en (f) vector velocidad ambos en marzo mes con mayor caudal

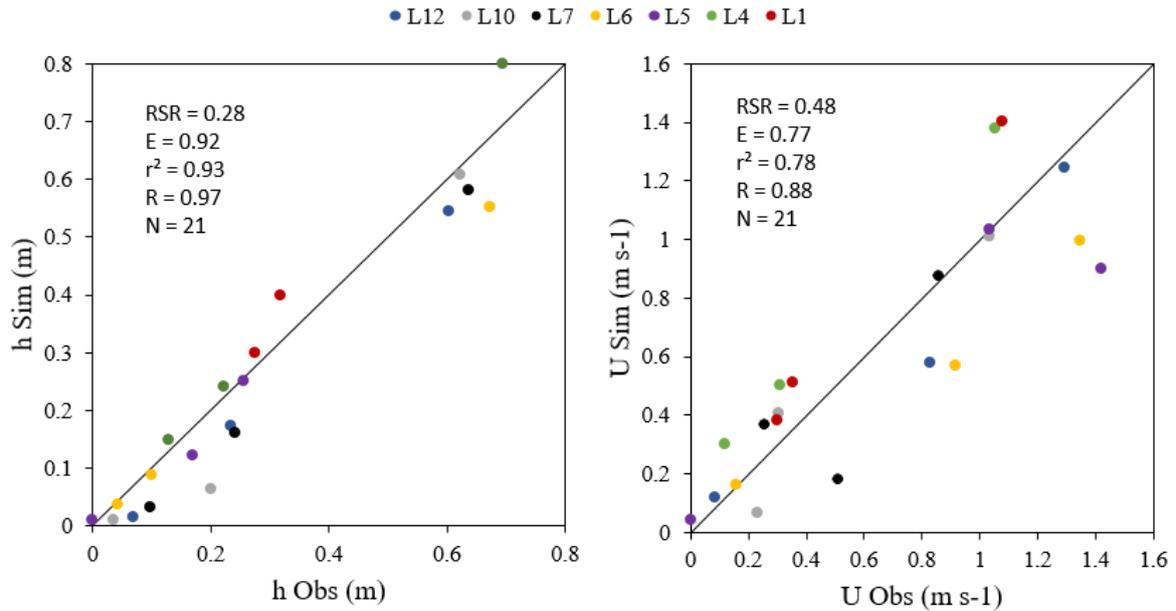


Figura 20: Comparación entre valores observados y simulados en (a) velocidad (U) y en (b) tirante del agua (h)

Para evaluar la eficiencia del modelo Iber se emplearon herramientas estadísticas como el coeficiente de determinación (r^2). La prueba t-Student, el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (E) y el ratio de la raíz del error cuadrático medio y la desviación estándar de las observaciones (RSR) (Ver Tabla 7).

Tabla 7: Escala de eficiencias de la calibración de un modelo en función a los índices r^2 , E y RSR

Eficiencia	r^2	E	RSR
Muy bueno	$0,90 < r^2 \leq 1,00$	$0,75 < E \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Bueno	$0,75 < r^2 \leq 0,90$	$0,65 < E \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
Satisfactorio	$0,50 < r^2 \leq 0,75$	$0,50 < E \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
Insatisfactorio	$r^2 \leq 0,50$	$E \leq 0,50$	$RSR \geq 0,70$

FUENTE: Elaborado en base a Moriasi (2007)

Los índices de eficiencia obtenidos en cada punto de monitoreo en el río, para la U y h, se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Índices de eficiencia en la calibración de U y h entre los valores observados y simulados

Punto de monitoreo en el río	Velocidad (U)			Tirante de agua (h)		
	E	RSR	r^2	E	RSR	r^2
L12: 50 m antes PTAR Cieneguilla	0,91	0,29	0,95	0,94	0,25	0,99
L10: 50 m antes PTAR Manchay	0,90	0,31	0,96	0,89	0,33	0,98
L7: Puente. Guayabo	0,69	0,55	0,73	0,91	0,29	0,99
L6: Pte. Quebrada Verde	0,66	0,58	0,97	0,94	0,25	0,99
L5: 50m aguas abajo de la bocatoma Lurín	0,75	0,50	0,86	0,93	0,26	0,95
L4: 50 m antes PTAR San Bartolo	0,64	0,60	0,99	0,93	0,26	0,99
L1: Pte. Panamericana Sur	0,65	0,59	0,99	0,76	0,49	0,99

Al realizar la prueba t-Student, en todos los casos no existen diferencias significativas entre los valores observados en campo y simulados en el modelo Iber.

Se observa que los valores de los índices de rendimiento se encuentran en el rango de muy bueno a satisfactorio, por lo que se afirma que la calibración es eficiente.

Una vez calibrado el módulo hidrodinámico, se procedió a calibrar el módulo de calidad del agua en la parte más contaminada, desde aguas abajo de la bocatoma Lurín hasta la altura del puente Panamericana (L5-L1). Los resultados se muestran a continuación.

- b. Parámetro de la temperatura: los parámetros de los que depende el parámetro S_T fueron ingresados de acuerdo a los datos atmosféricos por cada una de las tres fechas de monitoreo.
- c. Parámetros del OD y DBO: el parámetro que se calibró fue el K_{dbo} , el rango de valores de ese parámetro está comprendido entre 0,02 y 3,4 $días^{-1}$ (Brown y Barnwell, 1987), se procedió a ingresar valores comprendidos entre dicho rango, luego de varias simulaciones y de comparar las concentraciones de OD y DBO_5 observadas y simuladas se logró una buena eficiencia en el modelo, con un valor de K_{dbo} igual a 0,55 $días^{-1}$ a 20°C, Iber corrige este valor mediante un coeficiente ($\theta_2=1,047$) para otras temperaturas del agua. En la Figura 21, se muestran los valores de E para el OD y la DBO_5 obtenidos con siete valores diferentes de K_{dbo} para siete simulaciones por cada una de las tres fechas simuladas (marzo, mayo y julio).

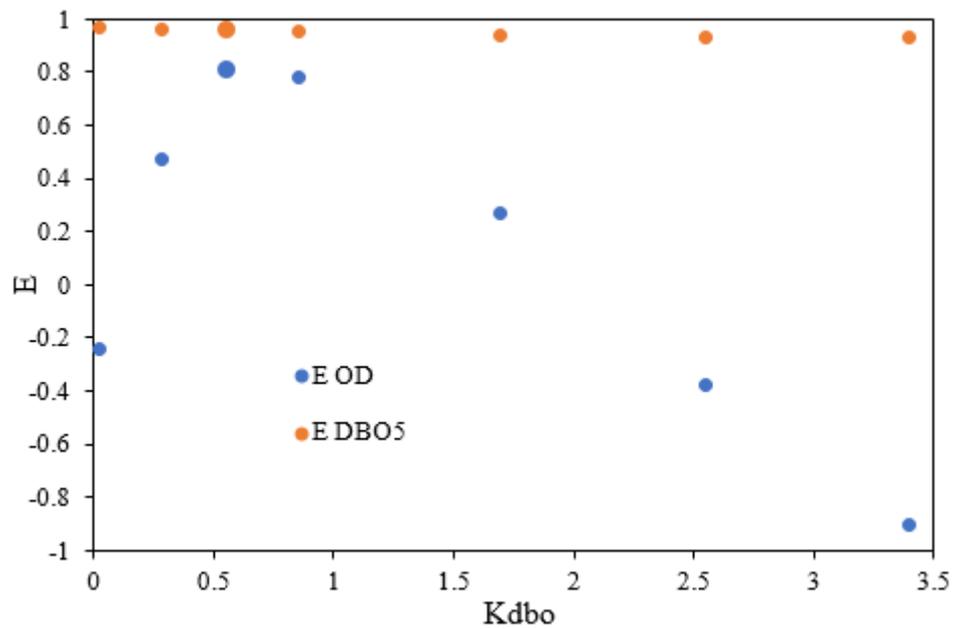


Figura 21: rango de valores de E por cambios en el parámetro K_{dbo} en los meses de marzo, mayo y julio

- d. Parámetro E.Coli: los parámetros de los que depende el parámetro K_{dec} fueron ingresados de acuerdo a los datos atmosféricos por cada una de las tres fechas de monitoreo.

Las figuras de comparación de las concentraciones observadas y simuladas para todas las sustancias se muestran en la Figura 22.

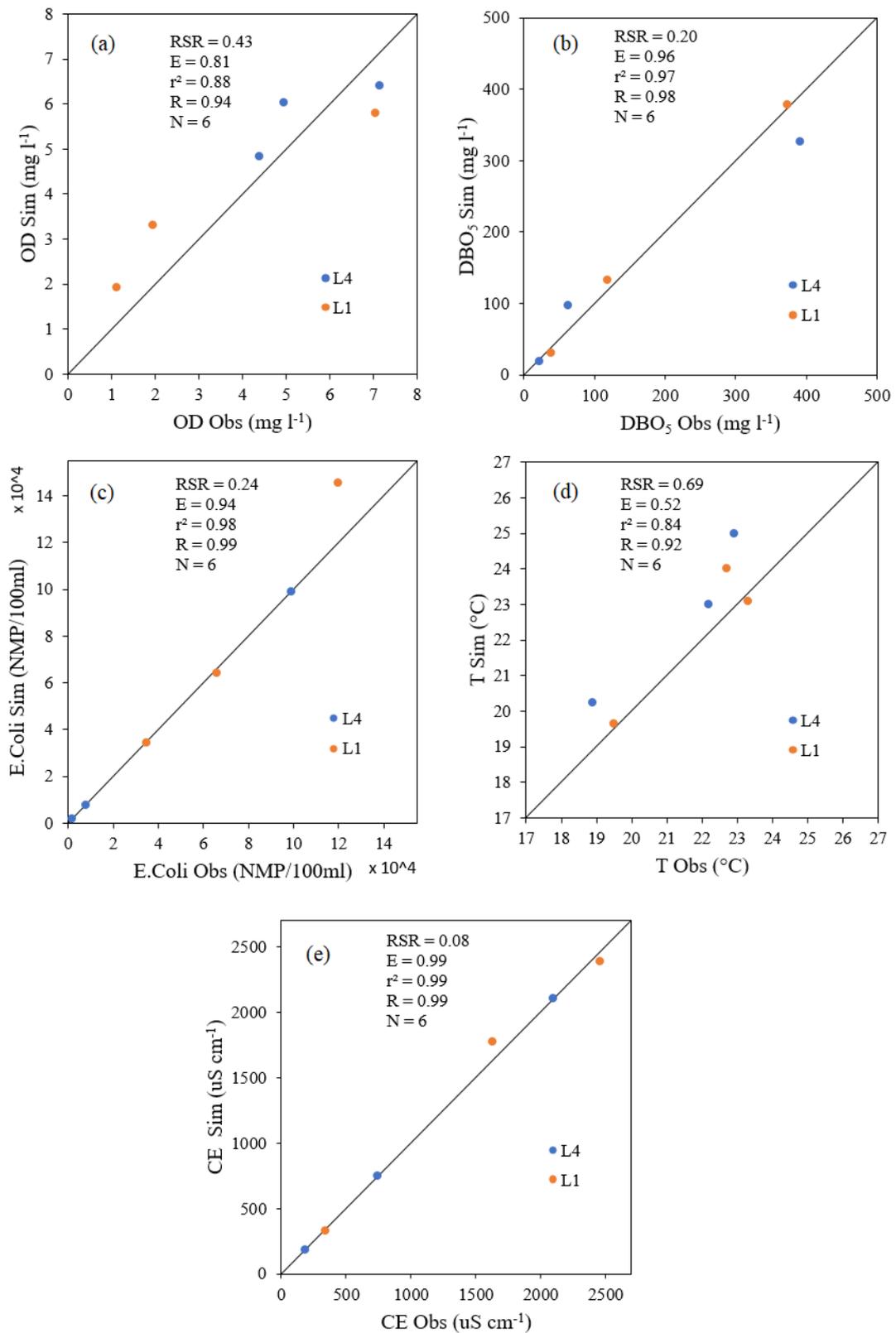


Figura 22: Comparación entre valores observados y simulados la concentración de la sustancia contaminante observada y simulada en (a) oxígeno disuelto, en (b) DBO₅, en (c) E.Coli, en (d) temperatura y en (e) conductividad eléctrica

Los índices de eficiencia obtenidos en los puntos de monitoreo L4 y L1 se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Índices de eficiencia en la calibración de T, CE, OD, DBO5 y E.Coli

Sustancias	L4: 50 m antes PTAR San Bartolo			L1: Puente Panamericana Sur			L4 y L1		
	E	RSR	r^2	E	RSR	r^2	E	RSR	r^2
	OD	0,546	0,674	0,648	0,806	0,440	0,948	0,813	0,433
DBO ₅	0,932	0,260	0,978	0,995	0,070	0,996	0,959	0,202	0,967
E.Coli	0,999	0,005	0,999	0,823	0,421	0,989	0,944	0,237	0,979
T	0,250	0,866	0,930	0,790	0,458	0,886	0,518	0,690	0,841
CE	0,999	0,003	0,999	0,988	0,108	0,989	0,994	0,076	0,994

Al realizar la prueba t-Student no existen diferencias significativas entre los valores observados y simulados con el modelo Iber.

Se observa que los valores de los índices de rendimiento para la T, en el punto L4, el índice E y RSR están en el rango insatisfactorio, debido a la influencia de la T_{aire} , la T de las descargas de las PTARs y de las contaminaciones difusas en Pachacamac y Lurín; sin embargo, los valores de los índices de rendimiento para L1 y L4 juntos se encuentran en el rango de muy bueno a satisfactorio, por lo que se afirma que la calibración es eficiente.

La variación espacial del OD, DBO₅, E.Coli, T y CE desde L5 hasta L1, se presenta en la Figura 23. Para una mejor visualización del comportamiento de la concentración de los contaminantes del mes crítico, se extrajo la variación espacial para dicho mes, que se presenta en la Figura 24.

Para visualizar mejor la evolución de las concentraciones de las sustancias contaminantes a lo largo del río, en la Figura 25, Figura 26 y Figura 27, se muestran los perfiles de concentración longitudinal del OD, DBO₅, E.Coli y T, indicándose las distancias a las que se encuentran cada descarga.

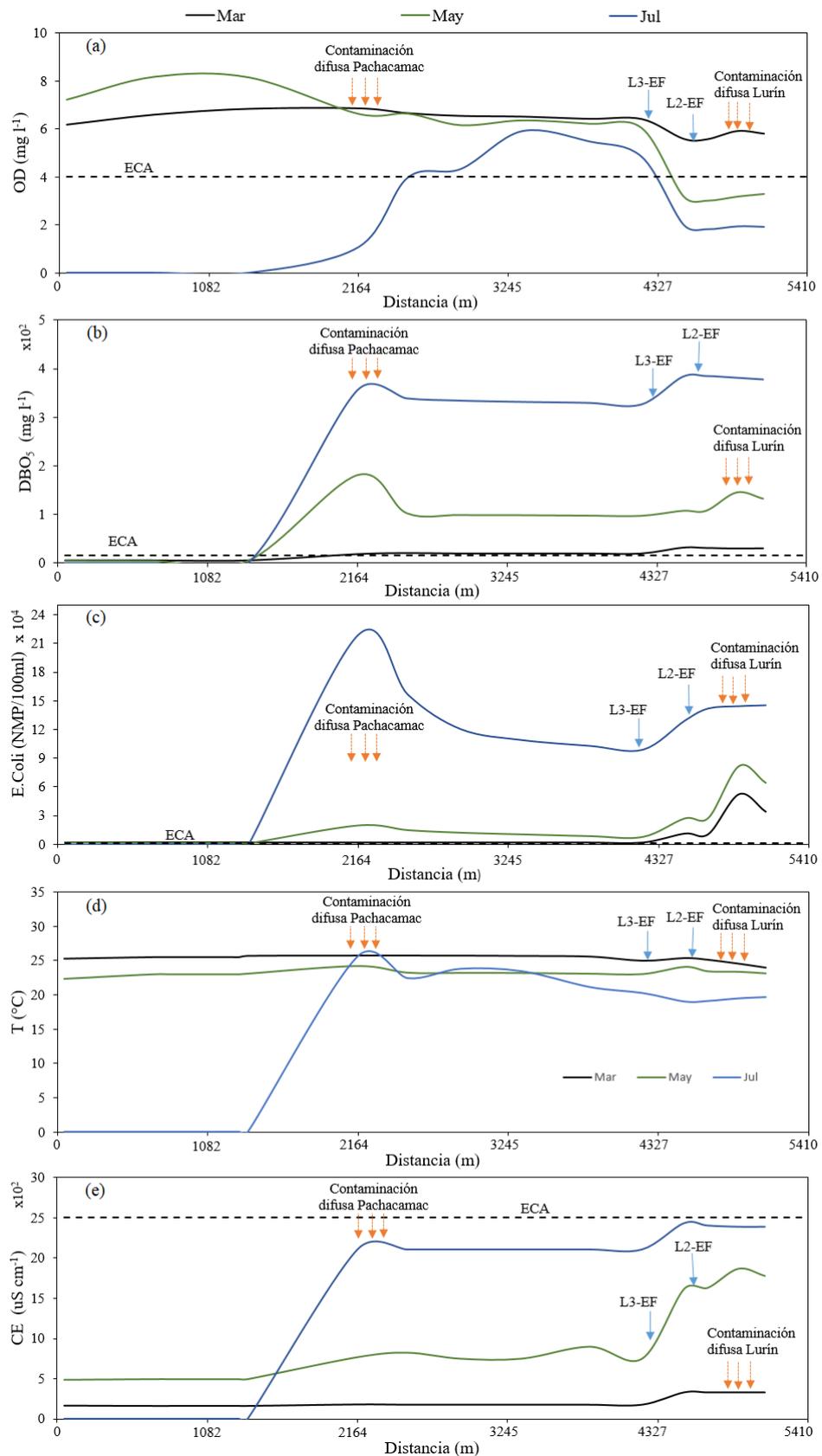


Figura 23: Perfiles longitudinales de concentraciones simuladas en los meses de marzo, mayo y julio para las cinco sustancias simuladas desde L5 hasta L1 en (a) OD, en (b) DBO₅, en (c) E.Coli, en (d) T y en (e) CE

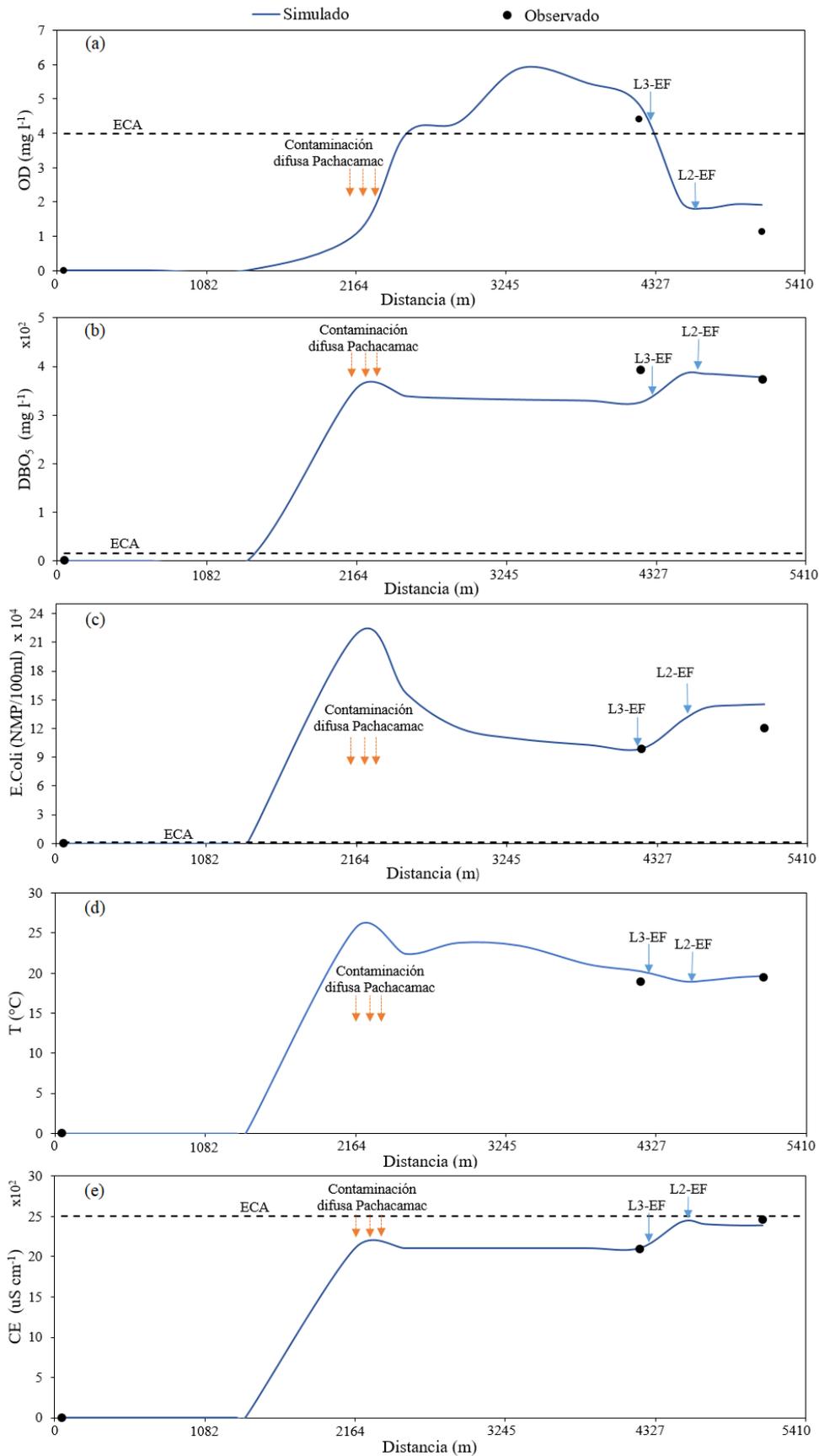


Figura 24: Perfiles longitudinales de concentraciones simuladas para el mes más crítico julio, para las cinco sustancias simuladas desde L5 hasta L1 en (a) OD, en (b) DBO₅, en (c) E.Coli., en (d) T y en (e) CE

Para el mes de julio, en la Figura 25, se observa que en L5 el caudal es cero, empezando la contaminación a la altura del km 5+400, a 2164m de L5, con la contaminación difusa de Pachacamac con concentraciones de DBO_5 y E.Coli esto induce a que el OD no se eleve considerablemente debido a la demanda de oxígeno de los procesos de biodegradación; no obstante, luego de 800m la concentración de OD aumenta progresivamente por la reaireación superficial hasta el punto de descarga de la PTAR San Bartolo que induce nuevamente a la disminución del OD y aumento de la DBO_5 incumpliendo los ECA; con respecto a la E.Coli, esta aumenta debido a la influencia de la contaminación difusa de Pachacamac, PTAR San Bartolo y PTAR Julio C. Tello, incumpliendo los ECA en todo el tramo de estudio.

Para el mes de mayo, en la Figura 26, se observa que en L5, el río presenta un caudal de $0,84 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con una concentración de contaminantes dentro de los ECA para el OD y la DBO_5 , mas no para la E.Coli; sin embargo, la contaminación difusa de Pachacamac, a 2164 m de L5, trae contaminación de E.Coli y DBO_5 , esto induce a que el OD disminuya, la DBO_5 y la E.Coli aumenten progresivamente, estas dos últimas incumpliendo los ECA, luego con las descargas de la PTAR San Bartolo, Julio C. Tello y la contaminación difusa de Lurín, el OD baja considerablemente hasta incumplir los ECA, la DBO_5 y la E.Coli aumentan siguiendo sin cumplir los ECA.

Con respecto al mes de marzo, en la Figura 27, se observa que en L5 el río presenta un caudal de $11,75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con una concentración de contaminantes dentro de los ECA para el OD y la DBO_5 mas no para la E.Coli, la contaminación difusa de Pachacamac, a 2164 m de L5, ingresa con una contaminación de E.Coli y DBO_5 , esto induce a que el OD disminuya levemente, la DBO_5 y la E.Coli aumenten, estas dos últimas incumpliendo los ECA, luego con las descargas de la PTAR San Bartolo, Julio C. Tello y la contaminación difusa de Lurín, el OD baja pero no incumple los ECA esto debido a que el caudal mayor en el río permita mayor re aireación, la DBO_5 y la E.Coli, aumentan incumpliendo los ECA.

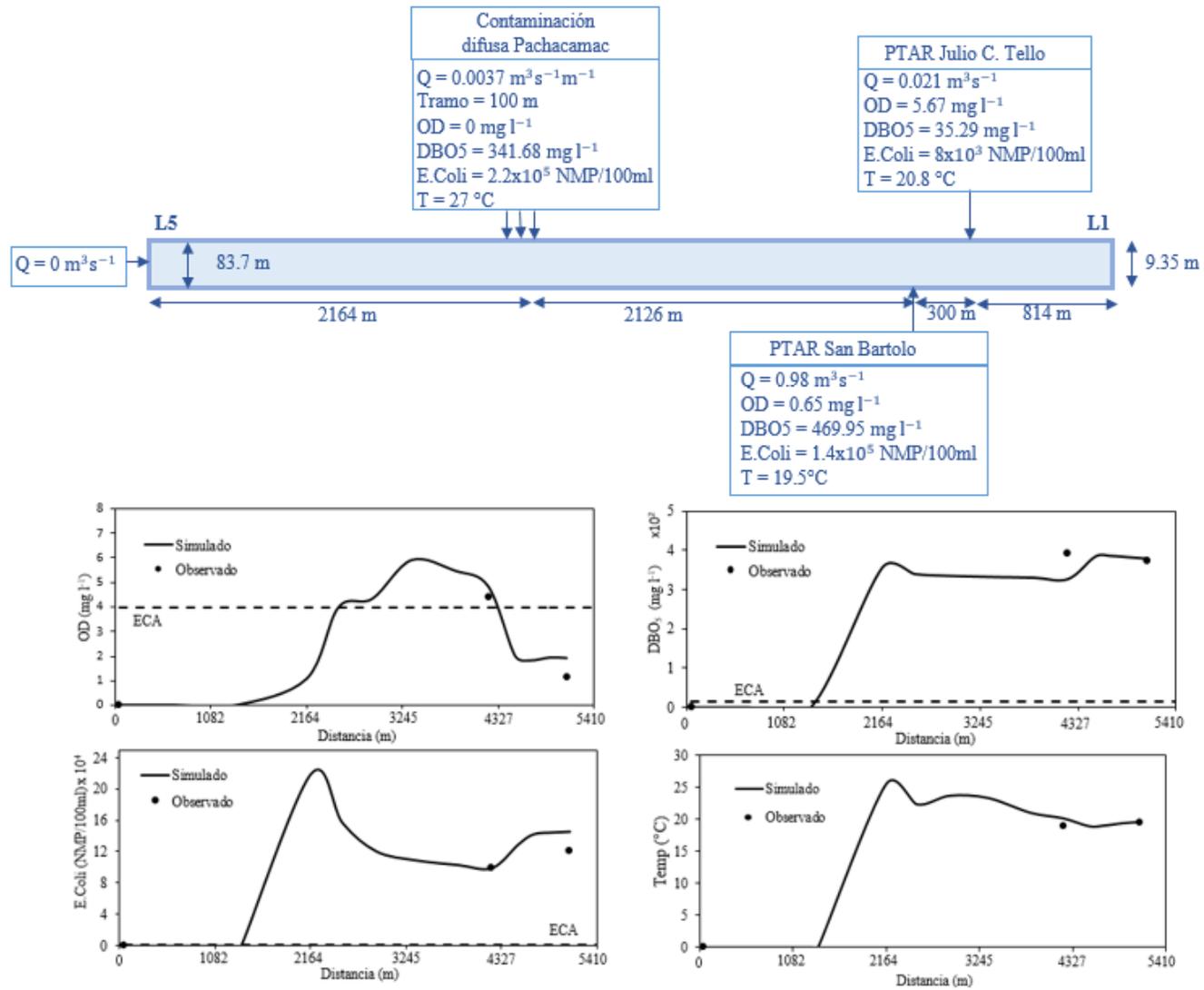


Figura 25: Perfiles de concentración longitudinal de OD, DBO₅, E.Coli y T en el mes de julio

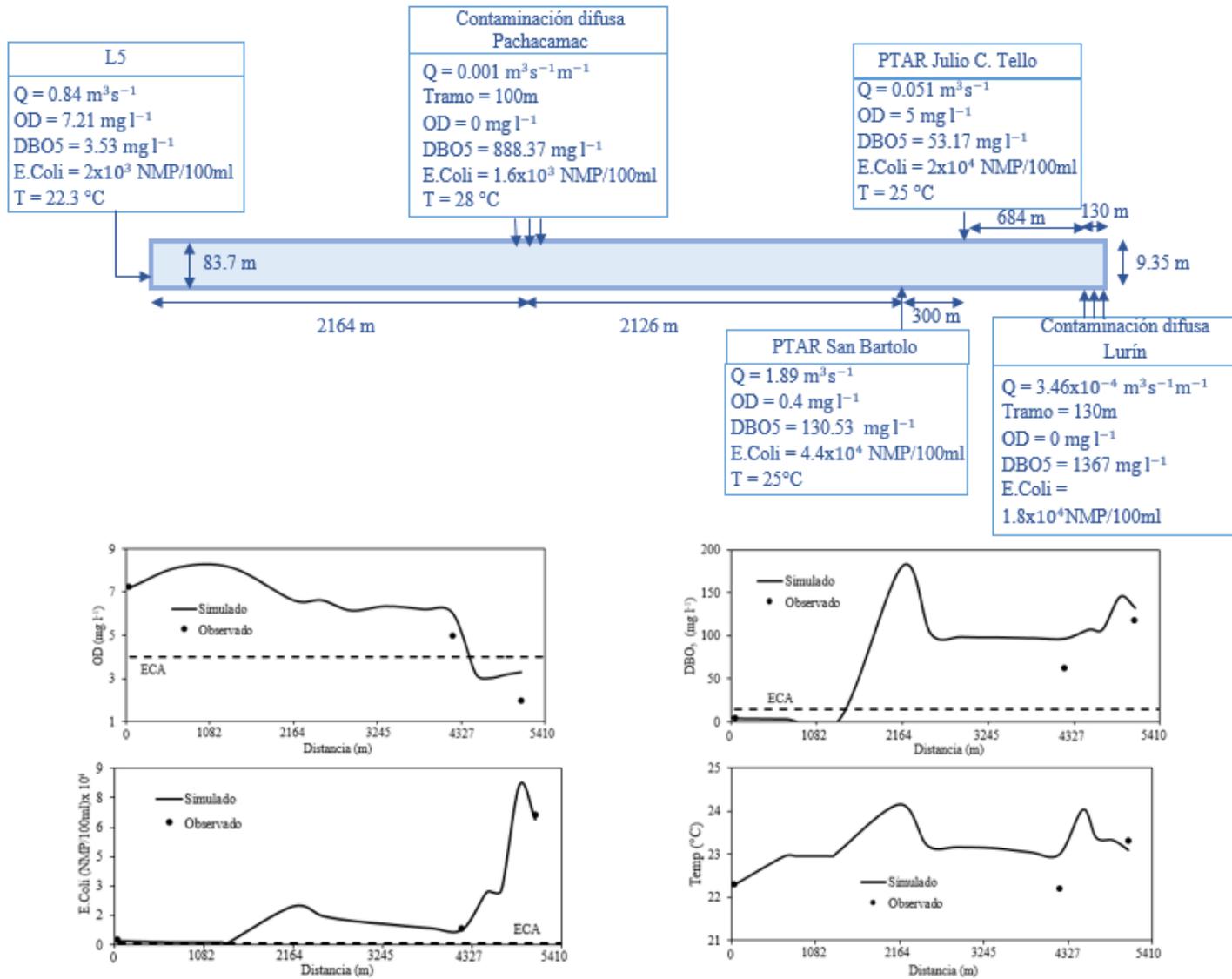


Figura 26: Perfiles de concentración longitudinal de OD, DBO₅, E.Coli y T en el mes de mayo

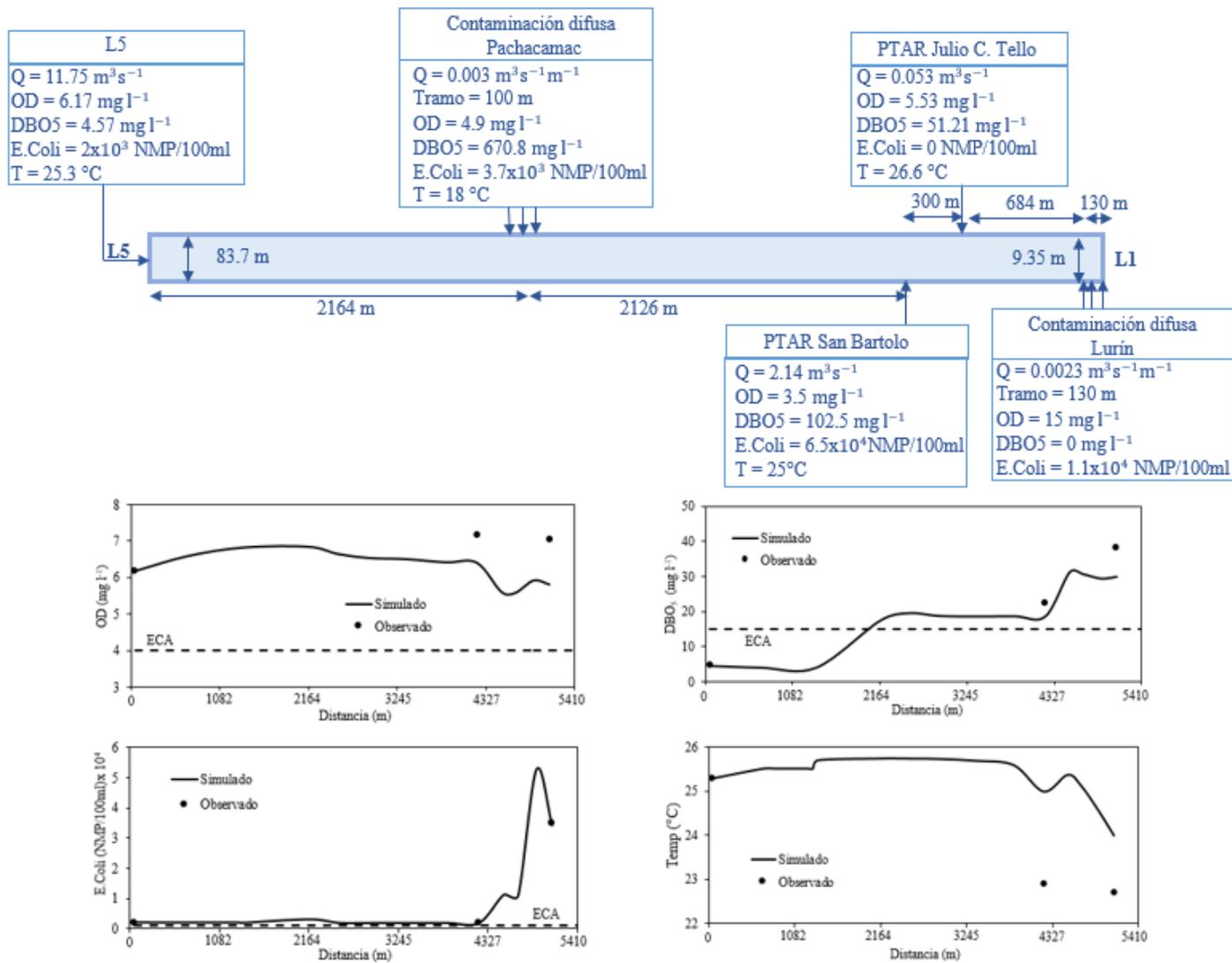


Figura 27: Perfiles de concentración longitudinal de OD, DBO₅, E.Coli y T en el mes de marzo

4.3. SIMULACION DE RECUPERACIÓN DEL RÍO LURÍN

4.3.1. Periodo de estiaje

Las peores condiciones del río corresponden a los meses de estiaje, siendo la situación extrema el (8/7/2019). Con el modelo calibrado se simuló el tramo de mayor contaminación (desde L5 hasta L1), y se evaluó el comportamiento del río, mediante perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T a las 6:00 a.m., 12:00 m. y 6:00 p.m., tal como se ve en la Figura 28, se observa que a medida que la temperatura sube el OD baja, existiendo una relación inversa; se debe a que a mayores temperaturas, existe menor solubilidad del OD y viceversa, además se observa que a mayor DBO, el OD disminuye, debido a que a mayor materia orgánica, la cual está presente en mayor cantidad en las zonas cercanas a las descargas de la contaminación difusa Pachacamac, la PTAR San Bartolo y PTAR Julio C. Tello, conlleva a que las bacterias consuman mayor oxígeno para llevar el proceso de degradación, es por eso que el OD disminuye; finalmente en cuanto a la E.Coli, se sabe que a mayor radiación solar, mayor desaparición bacteriana, es por ello que al mediodía cuando existe mayor radiación, alcanzando valores bajos de 50000 NMP/100ml, como se ve en la Figura 28 (b), siendo menor que a las 6 a.m. y 6p.m. con valores bajos de 150000 NMP/100ml como se observa en la Figura 28 (a) y Figura 28 (c), respectivamente.

Además, se extrajo el campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T, a las 6:00 a.m., 12:00 m. y 6:00 p.m., y se evaluó el comportamiento del río en cuatro puntos de control: L1 cerca al puente Panamericana, L4 ubicado 50 m antes de la PTAR San Bartolo, P1 a 200 m después de la PTAR San Bartolo y P2 a 200 m después de la contaminación difusa de Pachacamac, como se muestra en la Figura 29; se verifica que, con respecto al OD y DBO, a medida que el OD disminuye, la DBO aumenta y viceversa; y en relación a la E.Coli, esta es menor al medio día, debido a que los efectos de la radiación a esa hora son mayores, y por lo tanto, habrá un mayor mortandad, que a las 6:00 a.m. y 6:00 p.m.; de la misma manera ocurre con la T, a mayor R_{a_s} , mayor T.

Por otro lado, se estimaron las series temporales en 24 horas en los cuatro puntos de control, como se muestra en la Figura 30 (a, b, c, d), se muestran las series temporales simuladas en 24 horas del OD, DBOu, E.Coli, y T en los puntos de control: P2, L4, P1 y L1, respectivamente; se observa que los valores de DBO se incrementan por la mayor presencia de materia orgánica, sobretodo en el punto P2, P1 y L1 como se muestra en la Figura 30 (a),

(c), (d) respectivamente, por estar cerca a las descargas constantes en el tiempo, de la contaminación difusa Pachacamac, y de las PTARs San Bartolo y Julio C. Tello, esto ocasiona una disminución de OD, sin embargo en determinadas horas se presenta un incremento de OD, debido a la re aireación atmosférica. En relación a la E.Coli es menor al medio día, debido a los efectos de la radiación solar, las horas de máxima R_a_s , hace que la tasa de degradación de E.Coli sea muy elevada, produciéndose una rápida disminución de su concentración.

Finalmente, se encuentra que no se cumple con los ECAs para el OD, DBO y la E.Coli entre la PTAR San Bartolo y el puente Panamericana, debido a que las descargas de la PTAR San Bartolo con un caudal de $0.976 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, y concentraciones de $0.65 \text{ mg}^3\text{l}^{-1}$, $469.95 \text{ mg}^3\text{l}^{-1}$, $1.4 \times 10^5 \text{ NMP}/100\text{ml}$ de OD, DBO_5 y E.Coli, respectivamente, no cumplen con los LMP, además de la existencia de botaderos de residuos sólidos y zonas como letrinas informales que se observaron a la altura del puente Panamericana.

4.3.2. Periodo húmedo

Se evaluó el comportamiento del río, en los meses húmedos como marzo y mayo. En marzo (mayor caudal), se observa que, el OD cumple los ECA en todo el tramo, sin embargo las demás sustancias no; esto se visualiza en los perfiles longitudinales de concentración, en el campo de concentración bidimensional y series temporales simuladas en 24 horas para el OD, DBO_u , E.Coli, y T. (Ver Figura 44, Figura 45 y Figura 46, ANEXO 14) respectivamente.

Respecto a mayo el OD cumple el ECA, desde L5 hasta 50m antes de PTAR San Bartolo, y las demás sustancias no cumplen en todo el tramo. Esto se visualiza en los perfiles longitudinales de concentración, en el campo de concentración bidimensional y series temporales simuladas en 24 horas para el OD, DBO_u , E.Coli, y T. (Ver Figura 47, Figura 48, Figura 49, ANEXO 14), respectivamente.

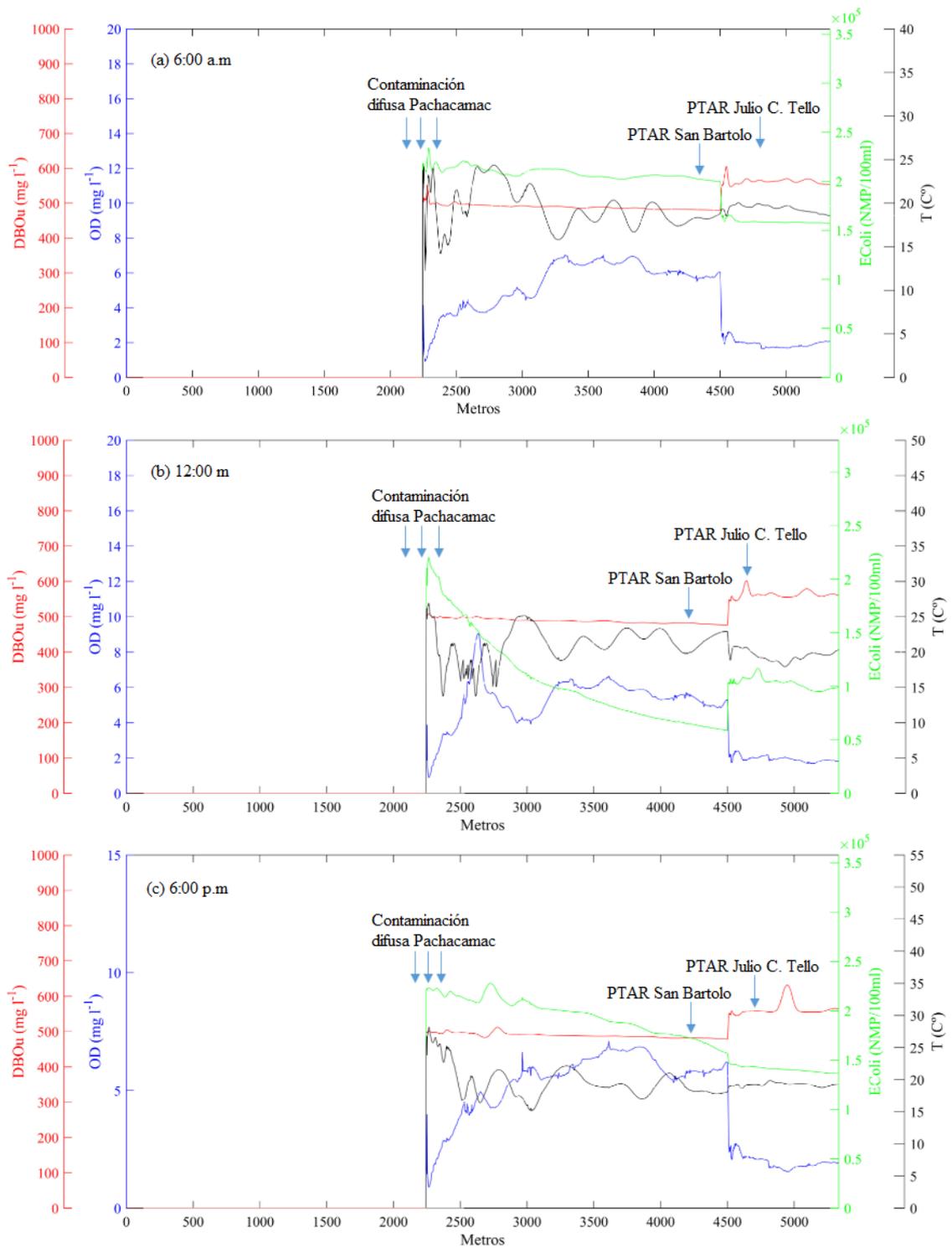


Figura 28: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, en la fecha más crítica 8 de julio del 2019

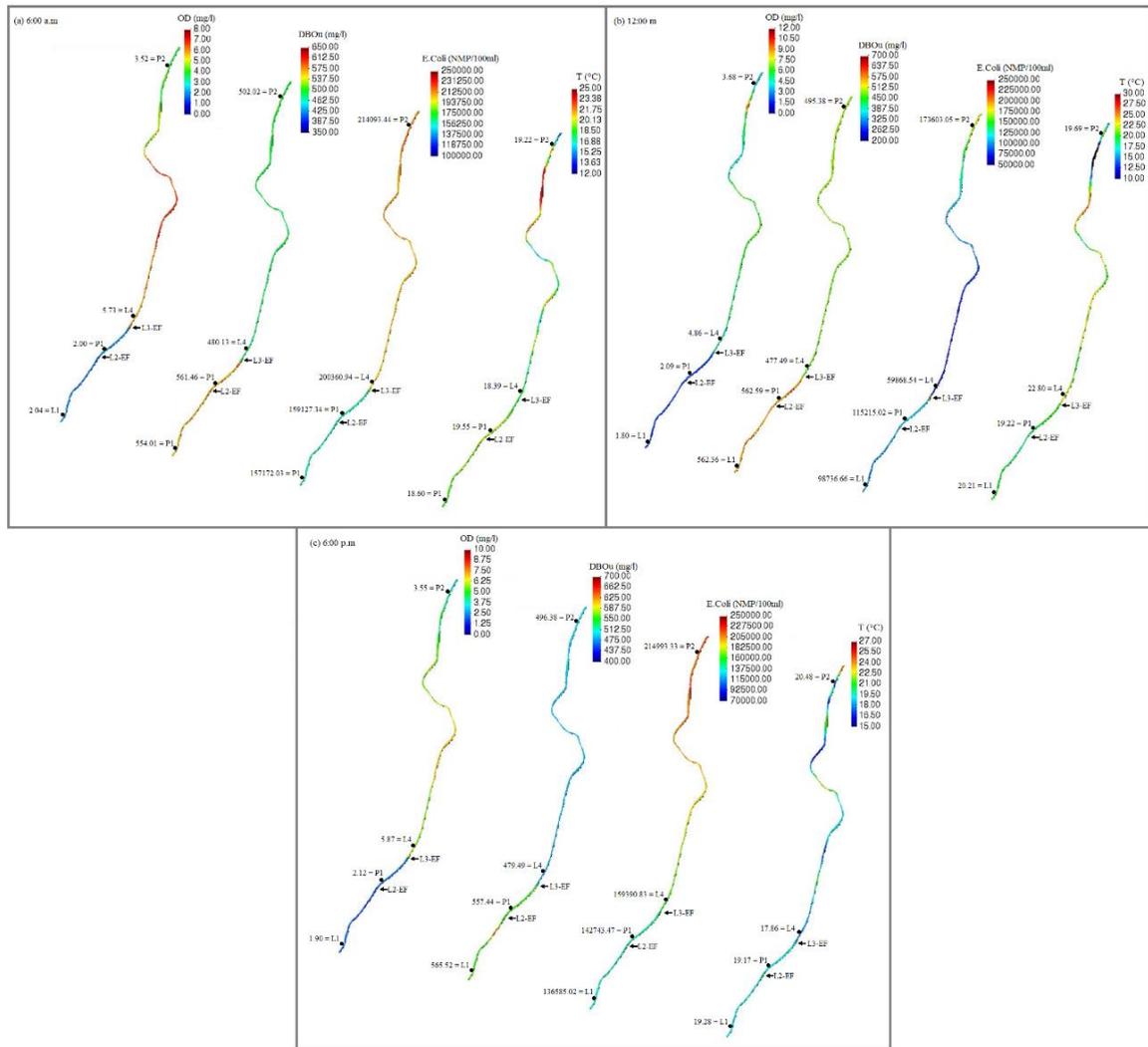


Figura 29: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, en la fecha más crítica 8 de julio del 2019

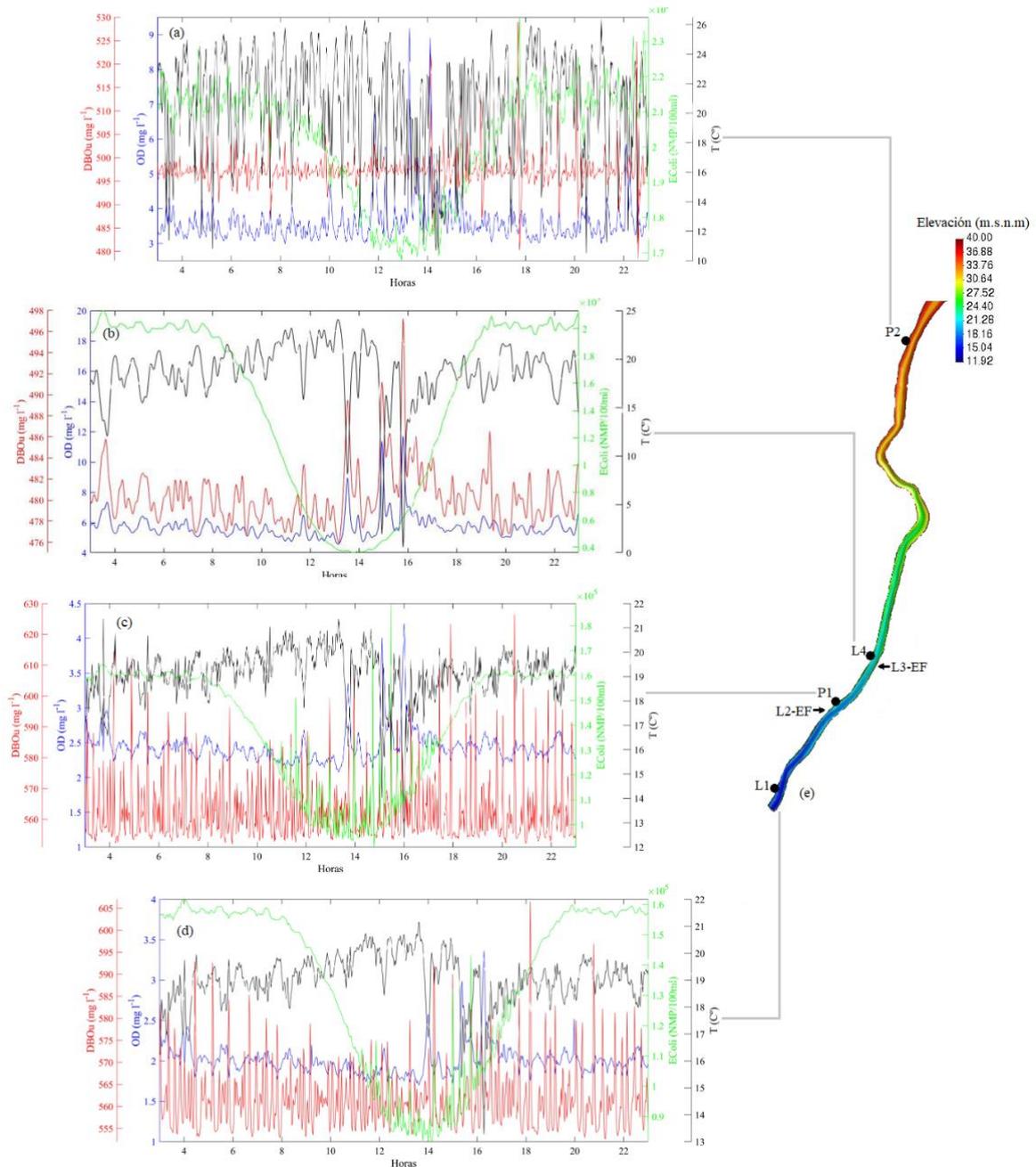


Figura 30: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e)

4.3.3. Escenario de recuperación

Se generó el escenario de recuperación del río para el mes crítico julio, con mejora de la de la PTAR San Bartolo con un caudal de descarga de $0.98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e implementación de la PTAR Pachacamac con un caudal de $0.37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, y ambas, con concentraciones de 4 mg l^{-1} , 15 mg l^{-1} y $1000 \text{ NMP}/100\text{ml}$ de OD, DBO5 y E.Coli, respectivamente, lo que permite cumplir con el LMP y ECA que se exige en el río.

Para la estimación del caudal de descarga, de la nueva PTAR, de la calibración del modelo hidrodinámico, luego de varias simulaciones de prueba y error se identificó que para el mes más crítico, el caudal estimado de aguas residuales en Pachacamac, que se está aportando al río es de $0.0037 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$, en un tramo de 100 m a la altura del km 5+400 habiendo un total de $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$; por otro lado, con lo que respecta a las concentraciones de las sustancias se tuvo en consideración que el cuerpo receptor para julio, se encuentra en periodo de estiaje, por lo tanto las descargas además de cumplir con el LMP deberán cumplir también con el ECA del río categoría 3, para esto se realizaron varias simulaciones hasta obtener concentraciones que cumplan el ECA del río, estimándose concentraciones de descarga de 4 mg l^{-1} , 15 mg l^{-1} y $1000 \text{ NMP}/100\text{ml}$ de OD, DBO5 y E.Coli, respectivamente, con esta condición el río se recupera.

En la Figura 31, se muestran los perfiles longitudinales de las sustancias contaminantes OD, DBOu, E.Coli y T, para 6:00 a.m., 12:00 m y 6:00 p.m., en la que se observa que luego de la descarga de la nueva PTAR Pachacamac y de la PTAR San Bartolo, viene un tramo en el que no se cumple con los ECA, sin embargo este tramo es considerado tramo de mezcla siendo alrededor de 200 m, fuera de estos tramos mencionados, las sustancias si cumplen con los ECA; también se observa que a medida que la temperatura sube el OD baja, existiendo una relación inversa; asimismo se observa que a mayor DBO el OD disminuye; finalmente en cuanto a la E.Coli se sabe que a mayor radiación solar, mayor desaparición bacteriana, es por ello que al mediodía cuando existe mayor radiación, alcanza valores bajos de $250 \text{ NMP}/100\text{ml}$, como se ve en la Figura 31 (b), siendo menor que a las 6 a.m, y 6p.m. con valores de 900 y 750 $\text{NMP}/100\text{ml}$, como se observa en la Figura 31 (a), (c), respectivamente.

De la misma manera, se observa la distribución espacial de los contaminantes a las 6:00 a.m, 12 m y 6:00 p.m, en los cuatro puntos de control y se verifica que, a medida que el OD aumenta, la DBO disminuye y viceversa; y en relación a la E.Coli, ésta es menor al mediodía, debido a que los efectos de la radiación a esa hora son mayores, y por lo tanto, habrá un mayor mortandad, que a las 6:00 a.m. y 6:00 p.m. (Ver Figura 32).

Para observar el comportamiento bidimensional del río, se extrajo información de h , U , U_x ,

U_y , OD, BDO, E.Coli y T, en la sección transversal a la altura de la estación L1, y a 25m después de la PTAR San Bartolo; a las 6 a.m., 12m, y 6 p.m.; en las Figura 33, 34 y 35, se muestran los resultados para la sección a la altura de L1, observándose que en el extremo izquierdo de la sección, la U llega a valores mínimos de 0.4 m s^{-1} y la h a 0.125 m siendo estos, menores valores con respecto al extremo derecho llegando a valores de 0.53 m s^{-1} y 0.35 m de U y h, respectivamente; la U influye en la concentración de contaminantes, haciendo que, a mayor U, habrá menor concentración de OD y viceversa; por otro lado a mayor T, existe menor concentración de OD, esto se nota con mayor claridad a las 6 a.m., (Ver Figura 33); al medio día la temperatura llega a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ por efectos de la radiación solar, ese calor se concentra hasta las 6 p.m. llegando a valores de $19.2 \text{ }^\circ\text{C}$; además se ve el OD alcanza valores menores que al medio día. (Ver Figura 34 y Figura 35), por otro lado, en el extremo derecho existe mayor cantidad de materia orgánica por degradar, por ende el OD es menor, a las 6 a.m. (Ver Figura 33), se ve que el OD y DBO siguen la misma tendencia, debido a que en ese momento los organismos heterótrofos aeróbicos están inactivados, y por lo tanto la concentración de DBO es baja; con respecto a la E.Coli, esta es menor al medio día (Ver Figura 34), debido a los efectos del sol.

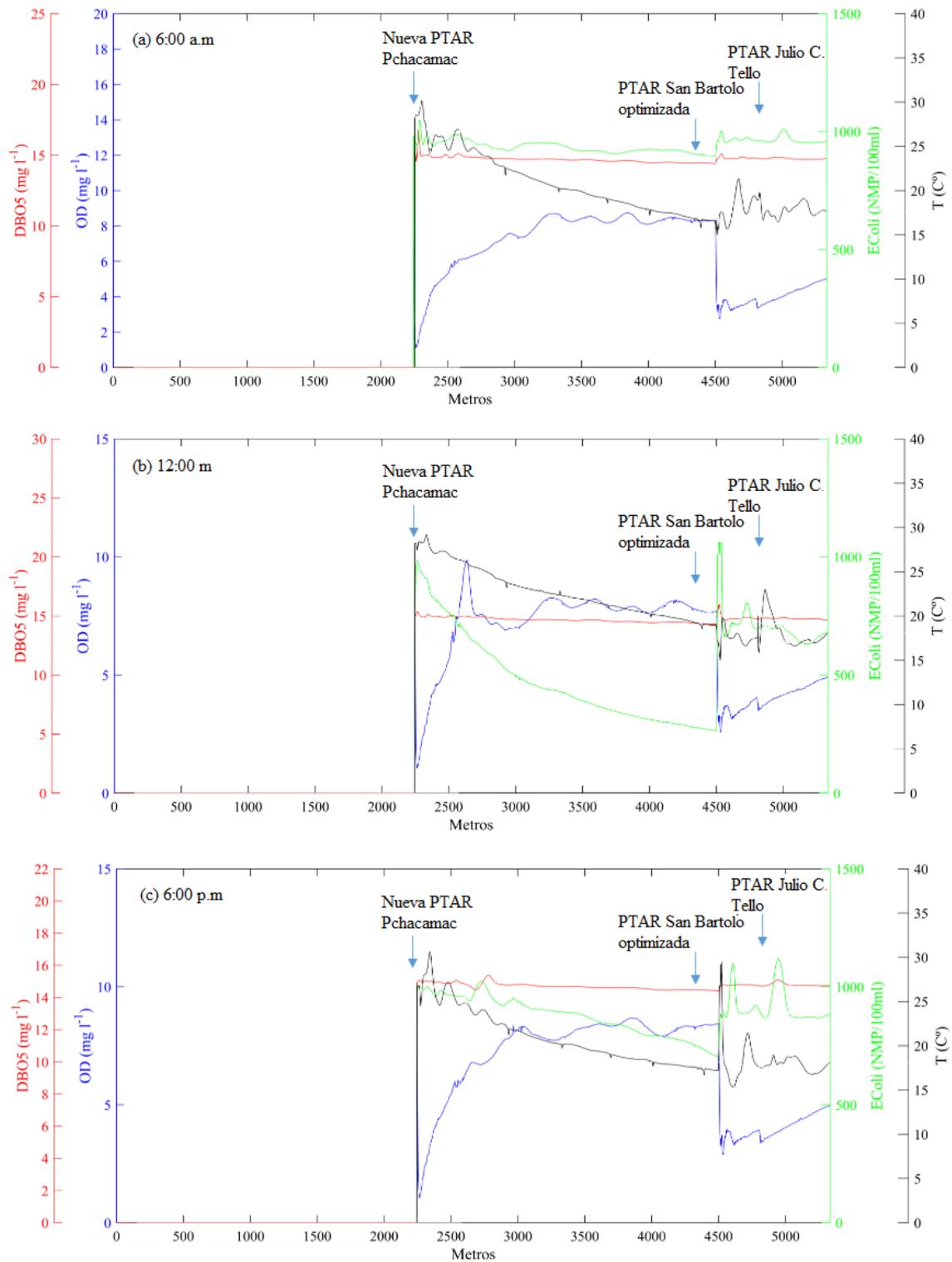


Figura 31: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, de la simulación del escenario de recuperación del río

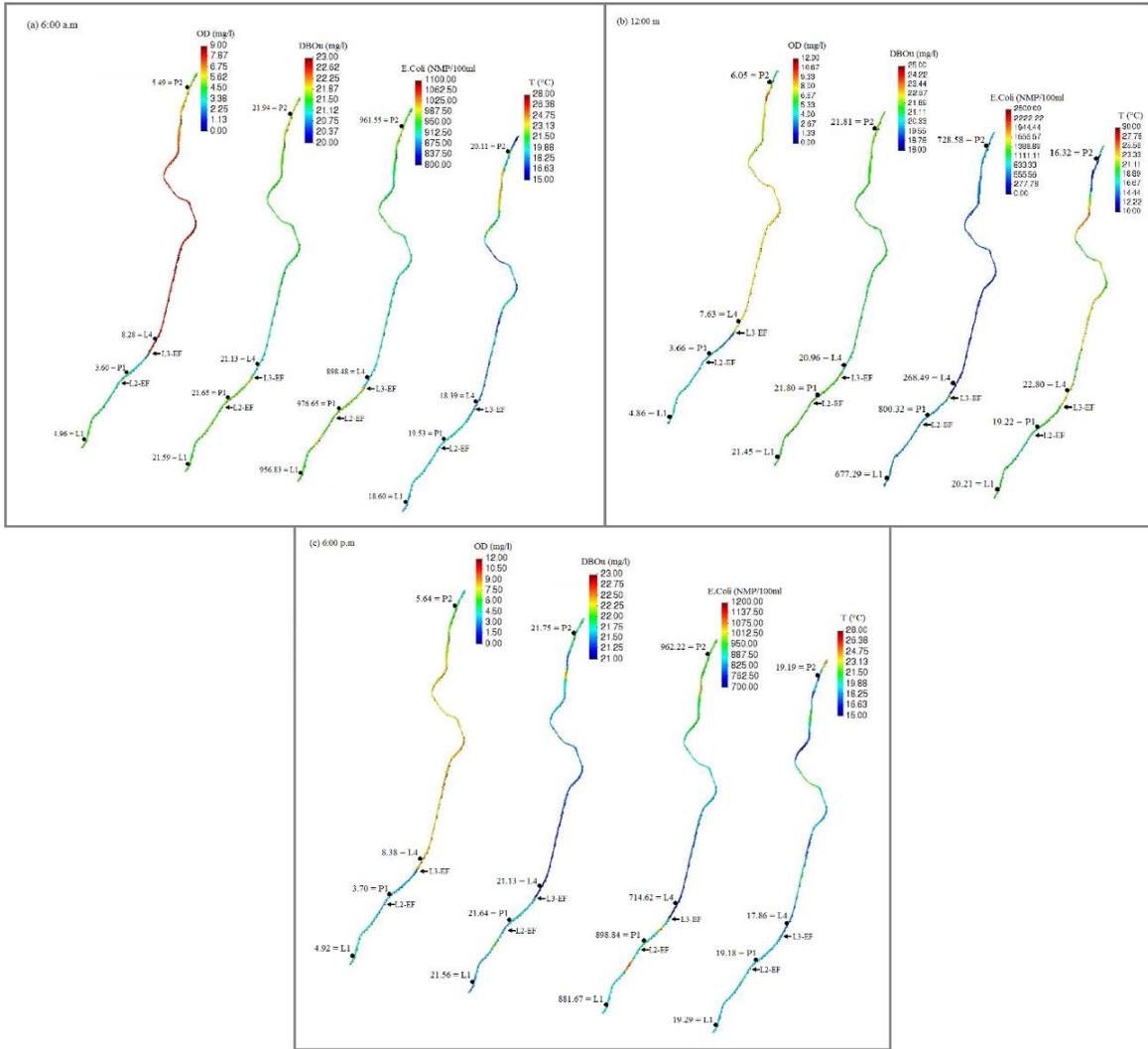


Figura 32: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, de la simulación del escenario de recuperación del río

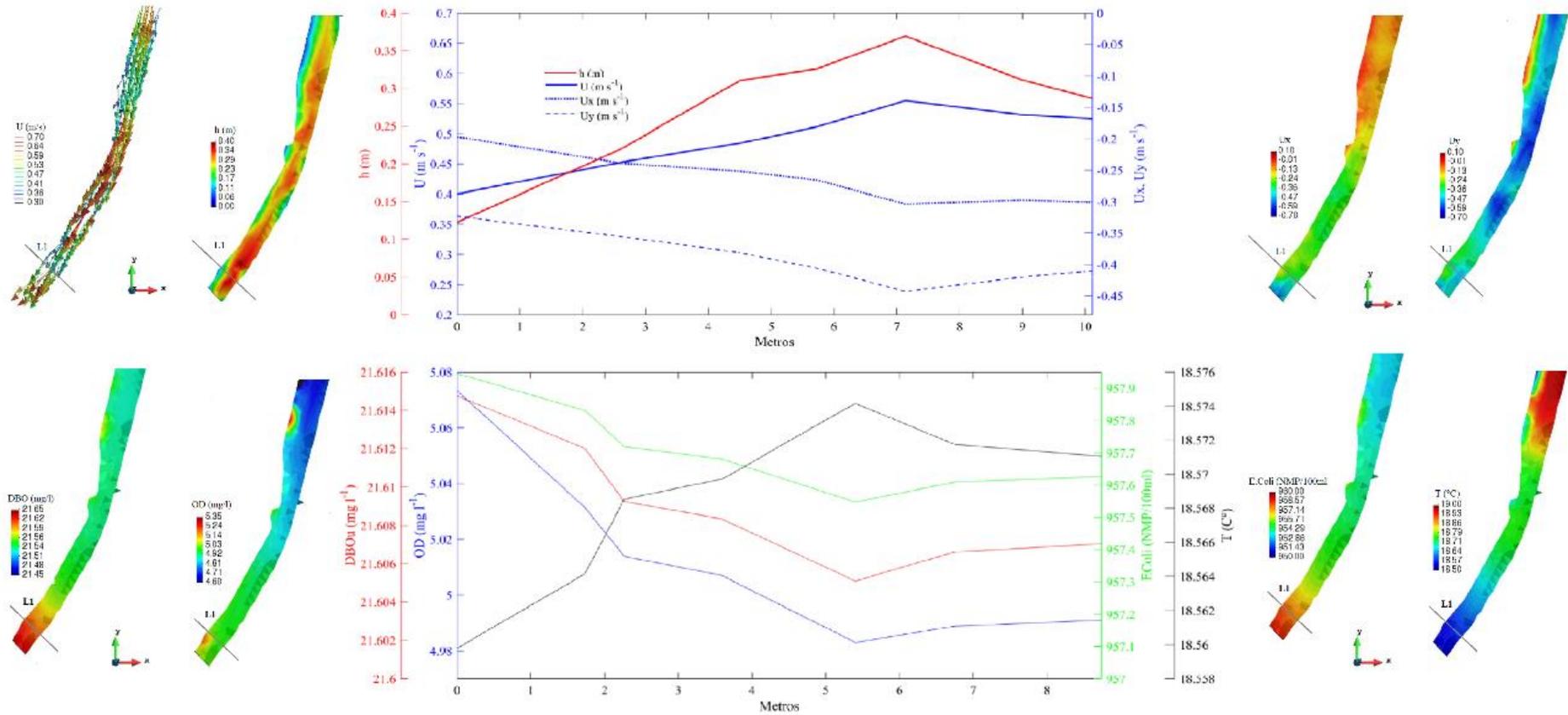


Figura 33: Perfil transversal de U , U_x , U_y , concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a la altura de la estación L1; a las 6 a.m., en escenario de recuperación del río

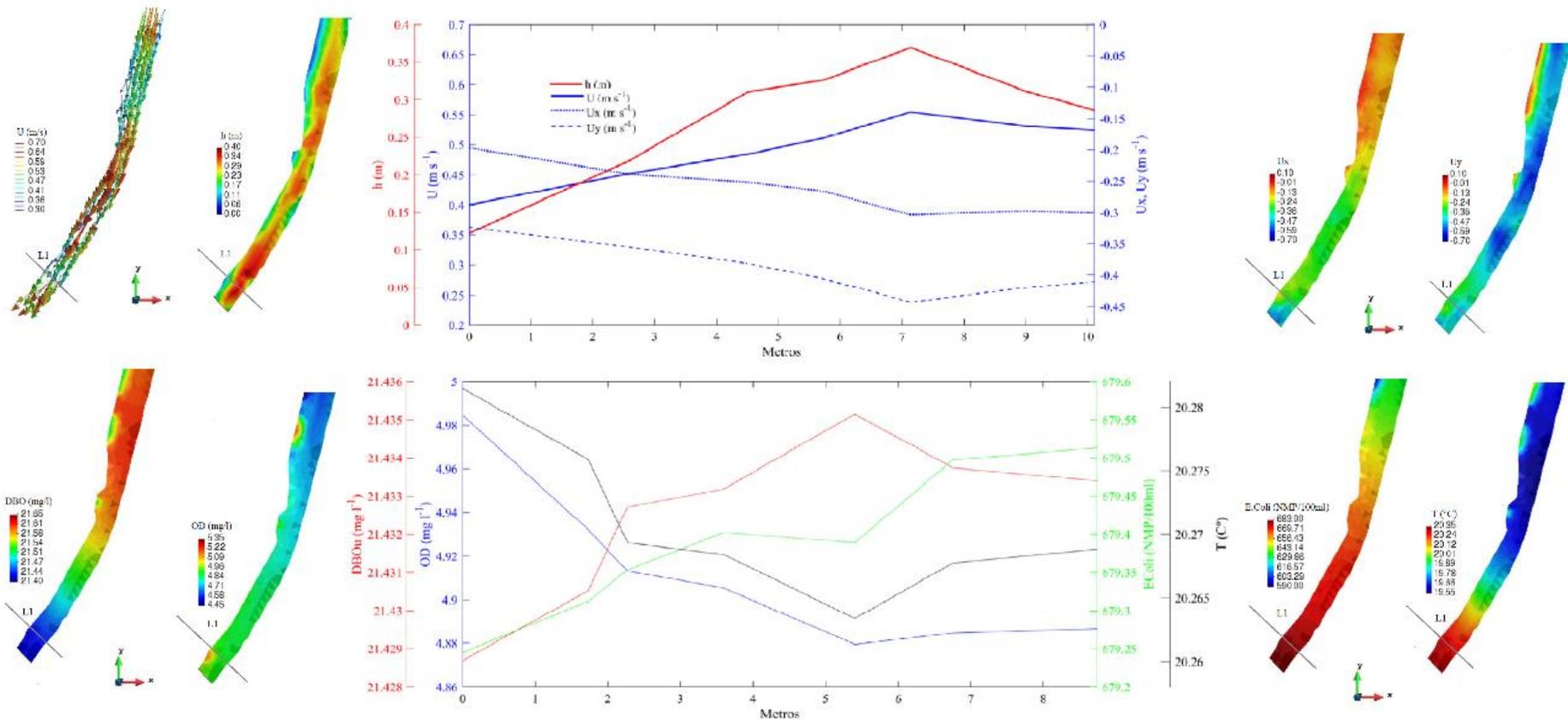


Figura 34: Perfil transversal de U , U_x , U_y , concentración de OD, $DBOu$, E.Coli y T , a la altura de la estación L1; al medio día, en escenario de recuperación del río

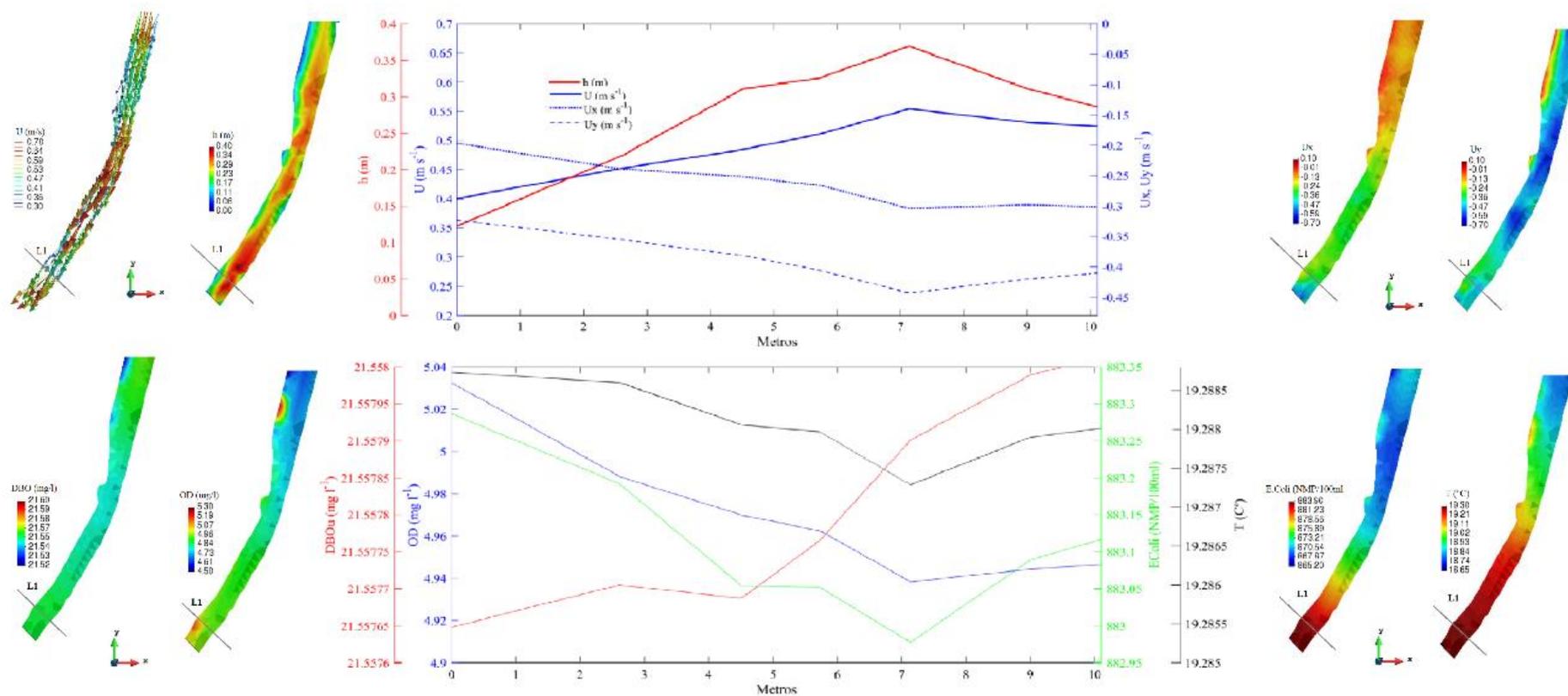


Figura 35: Perfil transversal de U , U_x , U_y , concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a la altura de la estación L1; a las 6 p.m., en escenario de recuperación del río

Desde la Figura 36, 37 y 38 se muestran los resultados para la sección a 25m después de la PTAR San Bartolo, observándose que por la gran influencia de la descarga de la PTAR San Bartolo, la diferencia de concentraciones a lo largo del perfil transversal es alta, además se ve que en el extremo izquierdo de la sección, la U, llega a valores de 0.27 m s^{-1} y la h a 0.09 m, siendo menores con respecto al extremo derecho, llegando a valores de 0.49 m s^{-1} y 0.28 m de U y h, respectivamente; la h influye en la concentración de contaminantes, ya que a menor profundidad de agua, esta se re aireará en completamente, lo que ocasionará mayor concentración de oxígeno; por esto el OD y la h presentan una relación inversa; a mayor T, existe menor concentración de OD; al medio día la T es mayor que a las 6 a.m. y 6p.m., llegando a valores de $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ver Figura 36 y Figura 38), con esta T el OD es menor al medio día (Ver Figura 37); por otro lado a mayor concentración de DBO, existe mayor cantidad materia orgánica por degradar, por ende el OD es menor; con respecto a la E.Coli, esta es menor al medio día debido a los efectos del sol (Ver Figura 37).

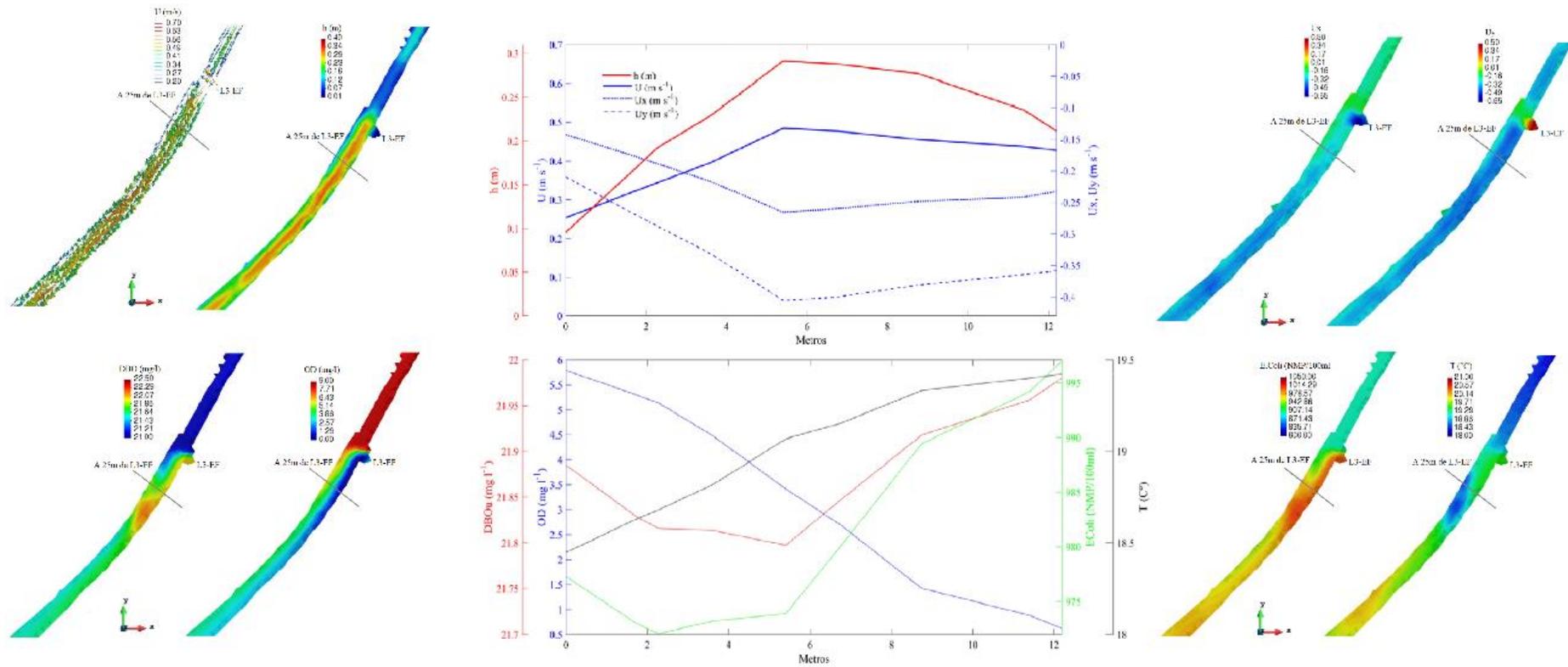


Figura 36: Perfil transversal de U , U_x , U_y , concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a 25 m después de la PTAR San Bartolo; a las 6 a.m., en escenario de recuperación del río

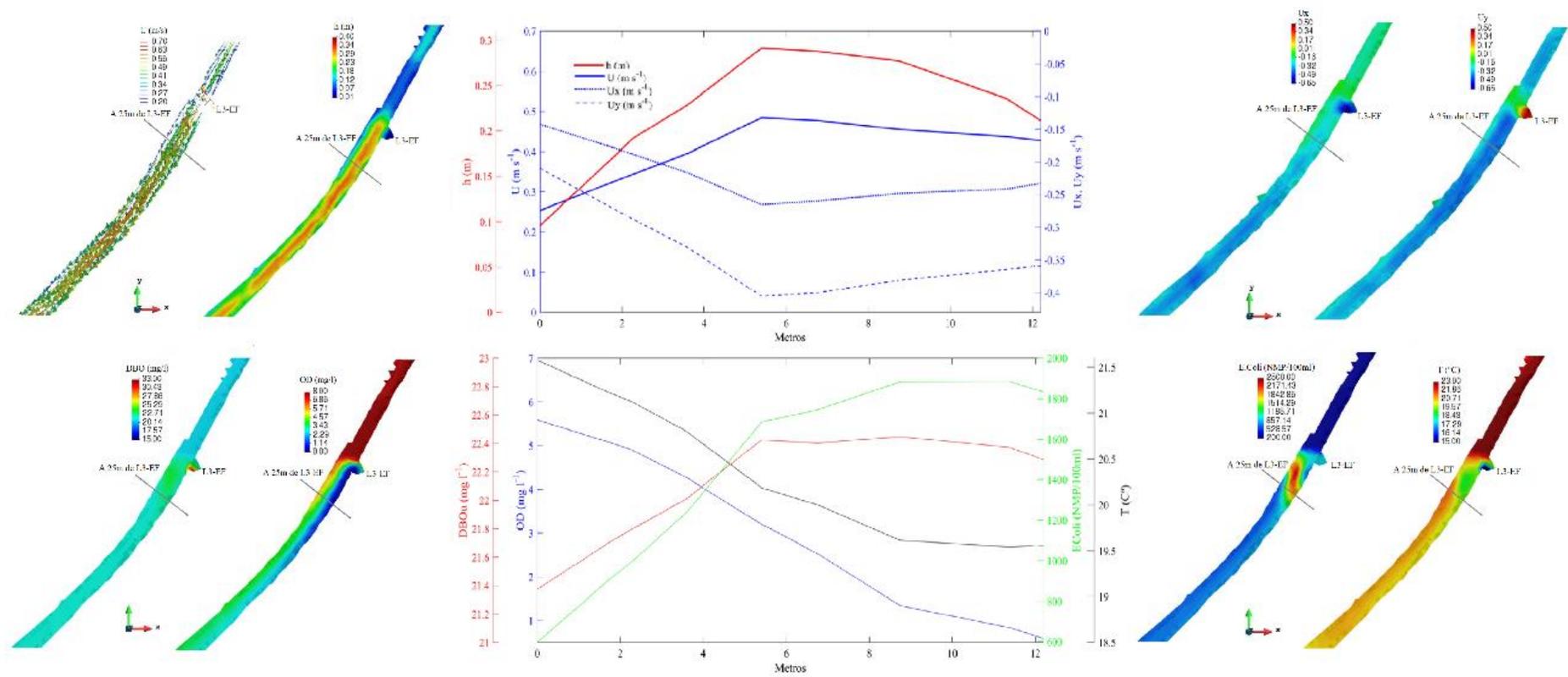


Figura 37: Perfil transversal de U , U_x , U_y , concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a 25 m después de la PTAR San Bartolo; al medio día, en escenario de recuperación del río

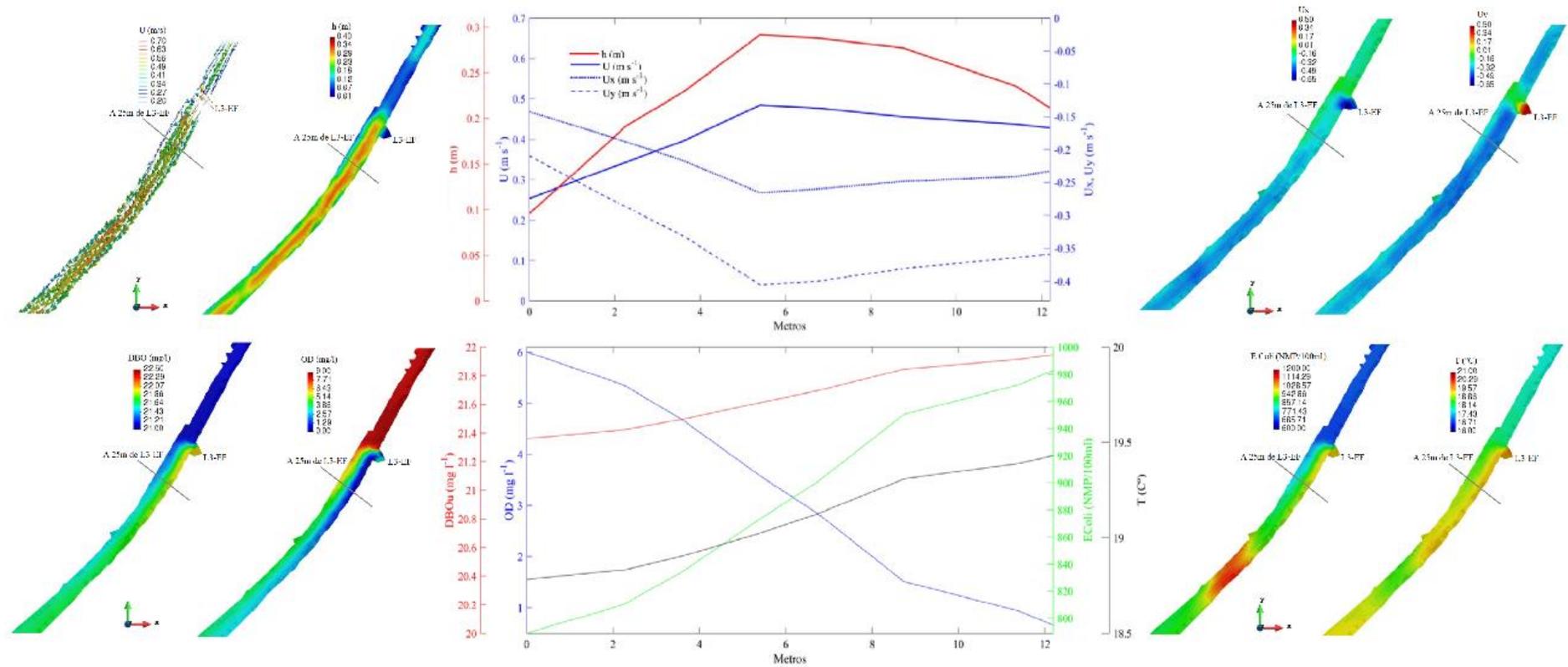


Figura 38: Perfil transversal de U , U_x , U_y , concentración de OD, DBOu, E.Coli y T, a 25 m después de la PTAR San Bartolo; a las 6 p.m., en escenario de recuperación del río

En la Figura 39 (a, b, c, d), se muestran las series temporales simuladas en 24 horas del OD, DBOu, E.Coli, y T en los puntos de control: P2, L4, P1 y L1, respectivamente. Se observa que los valores de OD, DBO y E.Coli cumplen con los ECA las 24 horas del día.

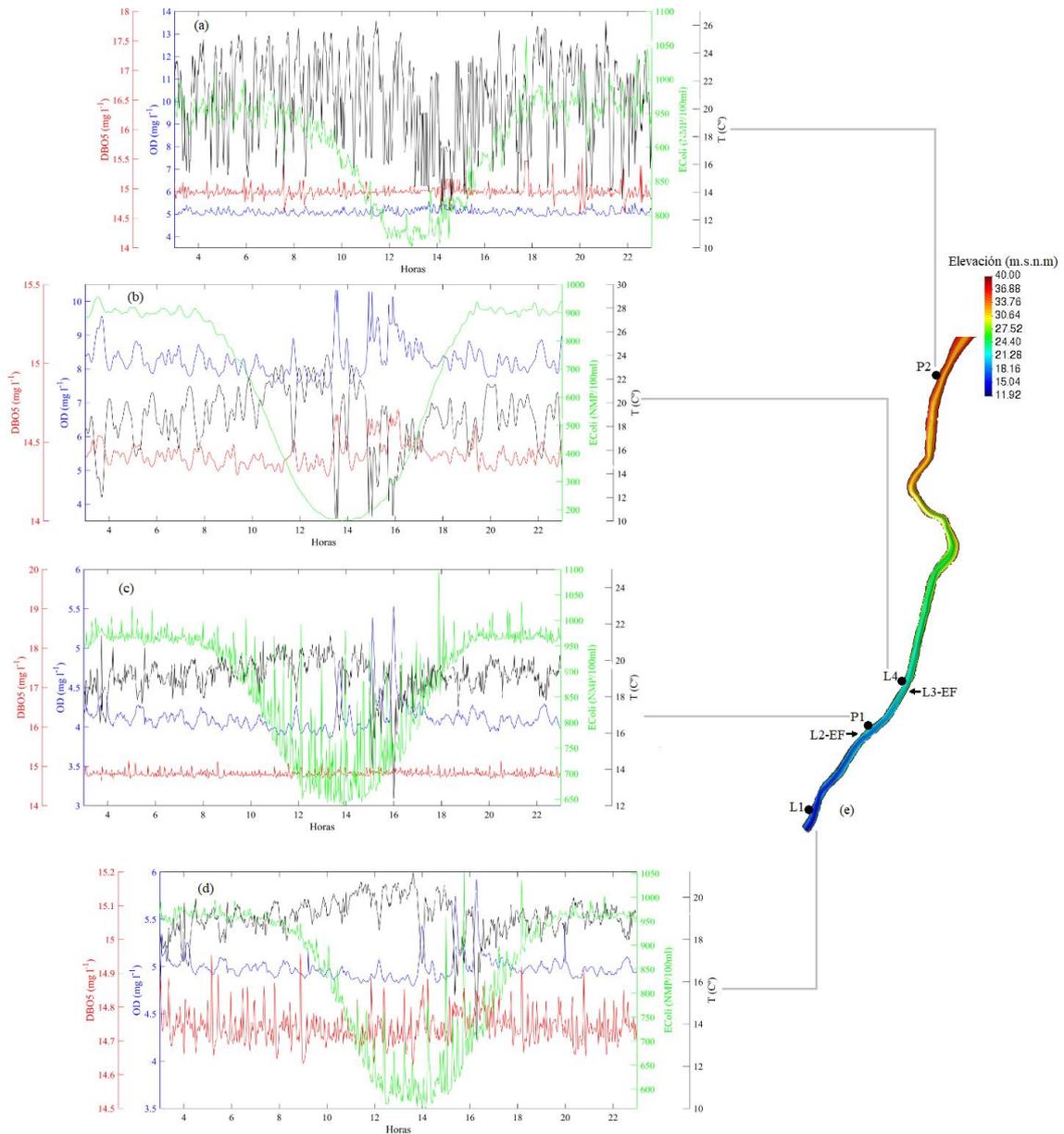


Figura 39: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e); de la simulación del escenario de recuperación del río

V. CONCLUSIONES

1. La zona más contaminada se encuentra a la altura del puente Panamericana, siendo el mes más crítico julio, con un caudal de $1.2 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, y con valores de $1,12 \text{ mg l}^{-1}$, $372,69 \text{ mg l}^{-1}$ y $1,2 \times 10^5 \text{ NMP/100ml}$ para OD, DBO_5 y E.Coli respectivamente, incumpliendo los ECA categoría 3, debido a la (i) contaminación difusa en el distrito de Pachacamac, al (ii) inadecuado funcionamiento de la PTAR San Bartolo incumpliendo con los LMP en todas las fechas monitoreadas y para todas las sustancias, alcanzando valores de $0,44 \text{ mg l}^{-1}$, $469,95 \text{ mg l}^{-1}$ y $1,4 \times 10^5 \text{ NMP/100ml}$ para OD, DBO_5 y E.Coli respectivamente, y a la (iii) contaminación difusa en Lurín a la altura del puente Panamericana.
2. Se estimó la contaminación difusa en Pachacamac a la altura del km 5+400, con caudales que varían de 0.001 a $0.0037 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, con concentraciones que alcanzan valores de 0 mg l^{-1} , 888.37 mg l^{-1} y $2.2 \times 10^5 \text{ NMP/100ml}$, para el OD, DBO y E.Coli, respectivamente; para la contaminación difusa Lurín, proveniente del transporte de contaminantes del acuífero, se obtienen las concentraciones más extremas en el mes de mayo con un caudal de $3.46 \times 10^{-4} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.
3. La calibración del modelo obtuvo un rendimiento de “muy bueno” a “satisfactorio”, con valores de E, RSR y r^2 de (0,813, 0,433 y 0,883) OD, (0,959, 0,202 y 0,967) DBO_5 , (0,944, 0,237 y 0,979) E.Coli y (0,518, 0,690 y 0,841) T, con parámetros calibrados de $0,55 \text{ d}^{-1}$, $[4,84 \text{ d}^{-1}-80,65 \text{ d}^{-1}]$, $10 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 0 m d^{-1} y $[1,49 \text{ d}^{-1}- 15,42 \text{ d}^{-1}]$ para k_{dbo} , $k_{\text{aireación}}$, k_{dos} , V_{sDBO} y k_{dec} , respectivamente.

4. El OD y la T, como el OD y la DBO, presentan una relación inversa a lo largo del tiempo y espacio; y la E.Coli, presenta al medio día, valores más bajos debido a los efectos de la radiación solar. En las secciones transversales la mayor concentración se encuentra en la parte derecha, debido a la diferencia de velocidades y alturas, además de la gran influencia de la descarga de la PTAR San Bartolo, ubicado en ese extremo del río.

5. La implementación de la PTAR Pachacamac y la optimización de la PTAR San Bartolo con caudales de descarga para el mes más crítico, julio, de $0.373 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $0.980 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, con concentraciones de 4 mg l^{-1} , 15 mg l^{-1} , $1000 \text{ NMP}/100\text{ml}$ para el OD, DBO_5 y E.Coli, respectivamente, permitirán que el río cumpla con los ECA, considerando que para esta fecha crítica, antes de la PTAR Pachacamac el caudal es $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y 50 m antes de la PTAR San Bartolo, el caudal es de $0.209 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

VI. RECOMENDACIONES

1. Monitorear la calidad del agua incluyendo metales pesados como mercurio, níquel, cobre y plomo, además del nitrógeno, fósforo y clorofila para una mayor caracterización de la contaminación.
2. Realizar un estudio del transporte de contaminantes en el acuífero Lurín, ubicado a la altura del puente panamericana, para conocer el aporte de contaminación difusa al río.
3. Implementar una PTAR en Pachacamac y optimizar el funcionamiento de la PTAR San Bartolo, para que el río pueda cumplir con los ECA.
4. Realizar un estudio de represamiento de agua en épocas de avenida, y determinar un caudal umbral de transferencia, que permita que el río cumpla con los ECA categoría 3, en épocas de estiaje.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Arcement, G. J., y Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>
- Barnes, H. H. (1987). Roughness Characteristics of Natural Channels. United States Government Printing Office, Washington.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., y Coll, A. (2012). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bodelón, O. G., Bernués, M., Baltanás, A. y Montes, C. (1994). Conductividad y salinidad en los ecosistemas acuáticos del parque nacional de Doñana (SO, España). Asociación Española de Limnología, Madrid. Spain. *Limnética*, 10 (2), 27-31. <https://repositorio.uam.es>
- Brown, L. C., Barnwell, T. O. (1987). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS. University of California. <http://www.google.com/googlebooks/tos.html>
- Cardich, K.A. (2017). *Modelación de máximas avenidas en la cuenca del río Lurín utilizando modelos hidrológico e hidráulico* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. <http://repositorio.la.molina.edu.pe>
- Cea, L., Puertas, J., y Vázquez-Cendón, M. E. (2007). Depth Averaged Modelling of Turbulent Shallow Water Flow with Wet-Dry Fronts. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 14(3), 303-341. <https://doi.org/10.1007/s11831-007-9009-3>
- Cea, L., Bermúdez, M., y Puertas, J. (2009). *Modelo de calidad de aguas bidimensional para flujos poco profundos en lámina libre. Aplicación a la desembocadura del río Ulla.*
- Cea, L., Bermúdez, M., y Puertas, J. (2011). Uncertainty and sensitivity analysis of a depth-averaged water quality model for evaluation of Escherichia Coli concentration in shallow estuaries. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1526-1539. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.001>

- Cea, L., Bermúdez, M., Puertas, J., Bladé, E., Corestein, G., Escolano, E., Conde, A., Bockelmann-Evans, B., y Ahmadian, R. (2016). IberWQ: New simulation tool for 2D water quality modelling in rivers and shallow estuaries. *Journal of Hydroinformatics*, 18(5), 816-830. <https://doi.org/10.2166/hydro.2016.235>
- Centro de Estudios Hidrográficos. (2016). *Modelo Iber 2.0 Manual del Usuario*. CEDEX.
- Cho, K. H., Pachepsky, Y., Ligaray, M., Kwon, Y., y Kim, K. H. (2020). Data assimilation in surface water quality modeling: A review. *Water Research*, 186, 116307. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116307>
- Chow, V; Maidment, D; Mays, L. 2004. *Hidráulica de canales abiertos*. Editorial Mc Graw Hill.
- Decreto Supremo N° 003- 2010- MINAM [con fuerza de ley]. Aprueban Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento Residuales Domésticas o Municipales. 17 de marzo de 2010. Diario Oficial El Peruano. <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM [con fuerza de ley]. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. 07 de junio de 2017. Diario Oficial El Peruano N° 14101. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Felicísimo, M. (1994). Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. *Pentalfa Ediciones. Oviedo, España*. 222 p.
- Holliday, C. P., Rasmussen, Todd C., Miller, William P. (2003). Establishing the Relationship between Turbidity and Total Suspended Sediment Concentration. *Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference, held April 23-24, 2003, at The University of Georgia, Kathryn J. Hatcher, Editor, Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, Georgia*. <http://hdl.handle.net/1853/48455>
- Mancini, J. L., Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates under Various Conditions. (1978). *Water Pollution Control Federation*. <https://www.jstor.org/stable/25040179>
- Momblanch, A., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., Ramos-Fernández, L., Baldeón, W., y Garcia Hernandez, J. (2015). *Análisis de medidas para la mejora de la calidad del agua en el tramo bajo del río Lurín (Perú)*. www.uco.es/jia2015/ponencias/b/b029.pdf
- Moriasi, D.; Arnold, J.; Van Liew, M.; Bingner, R.; Harmel, R. & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed

- simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50 (3), 885-900.
- Muramthookil, T., G., R.v., R. R., Masetti, A., Tammana, A., Motheram, M., y Gutlapalli, N. C. (2020). Assessment of water quality Index and study of the impact of pollution on the rivers of Kerala. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.084>
- Parkhill, K.L., Gulliver, J.S. Effect of inorganic sediment on whole-stream productivity (2002). *Hydrobiologia* 472, 5–17 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1016363228389>
- Raffo, E., Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 17(1), 71-80. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/download/12035/10751/>
- Robles, M. (2016). *Implementación de modelos Unidimensionales para la Simulación del Funcionamiento Hidráulicos de sistemas de Lagunas y Canales*. [Tesis de postgrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx>.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: COEFICIENTE DE MANNING

Tabla 10: Valores de Cowan de diversos factores que influyen en el coeficiente “n”

Condiciones de canal		Valores
Material involucrado	Tierra	0,020
	Corte en roca	0,025
	Grava fina	n_0 0,024
	Grava gruesa	0,028
Grado de irregularidad	Suave	0,000
	Menor	0,005
	Moderado	n_1 0,010
	Severo	0,020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	0,000
	Ocasionalmente alternante	n_2 0,050
	Frecuentemente alternante	0,010 – 0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	0,000
	Menor	n_3 0,010 – 0,015
	Apreciable	0,020 – 0,030
	Severo	0,040 – 0,060
Vegetación	Baja	0,005 – 0,010
	Media	n_4 0,010 – 0,025
	Alta	0,025 – 0,050
	Muy alta	0,050 – 0,100
Grado de los efectos por Meandro	Menor	1,00
	Apreciable	n_5 1,15
	Severo	1,30

FUENTE: Chow (2004)

Tabla 11: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) para corrientes naturales

Corrientes menores (ancho superficial < 30m)			
	Mínimo	Normal	Máximo
a. Corrientes en planicie			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0,025	0,030	0,033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0,030	0,035	0,040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0,033	0,040	0,045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0,035	0,045	0,050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0,040	0,048	0,055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0,045	0,050	0,060
7. Tramos lentos, con maleza y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0,075	0,100	0,150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el cana, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0,040	0,050	0,070
Planicies de inundación			
	Mínimo	Normal	Máximo
a. Pastizales sin matorrales			
1. Pasto corto	0,025	0,030	0,035
2. Pasto alto	0,030	0,035	0,050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0,020	0,030	0,040
2. Cultivos en línea maduros	0,025	0,035	0,045
3. Campos de cultivo maduros	0,030	0,040	0,050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0,035	0,050	0,070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0,035	0,050	0,060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0,040	0,060	0,080
4. Matorrales medios a densos, en invierno.	0,045	0,070	0,110
5. Matorrales medios a densos, en verano.	0,070	0,100	0,160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0,110	0,150	0,200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0,030	0,040	0,050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0,050	0,060	0,080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas.	0,080	0,100	0,120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0,100	0,120	0,160
Corrientes mayores (ancho superficial > 30m) el valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
	Mínimo	Normal	Máximo
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0,025	0,060
b. Sección irregular y rugosa	0,035	0,100

FUENTE: Chow (2004)

**ANEXO 2: ESTACIONES DE MONITOREO Y COMISIONES DE REGANTES
EN EL RÍO**

Tabla 12: Estaciones de monitoreo en el río

Código	Este	Norte	Altitud	Estación
L13	302939	8659407	268	En el río a la altura del Puente Mototaxi
L12	301548	8658259	239	En el río, 50m antes de PTAR Cieneguilla
L11-EF	301424	8658238	236	Efluente de la PTAR Cieneguilla
L10	298026	8652744	136	En río, 50m antes de PTAR Manchay
L9-EF	297974	8652690	136	Efluente de PTAR Manchay
L8-C	296714	8650330	103	Descarga de canal de riego Capilla
L7	296677	8650271	100	En el río a la altura del Puente Guayabo
L6	296500	8649384	84	En el río a la altura del Puente Quebrada Verde
L5	295482	8647253	55	En el río, 50m aguas abajo de Comisión de regantes Lurín
L4	293830	8643613	20	En el río, 50m antes de PTAR San Bartolo
L3-EF	293807	8643563	19	Efluente de PTAR San Bartolo
L2-EF	293592	8643360	17	Efluente de PTAR Julio C. Tello
L1	293345	8642920	13	En el río a la altura del Puente Panamericana Sur

Tabla 13: Comisiones de regantes en el tramo de la zona de estudio

Código	Este	Norte	Altitud	Estación
CR-CHM	300761	8657307	224	Comisión de regantes Cóndor Huaca Molino
CR-TI	300750	8657169	222	Comisión de regantes Tambo inga
CR-JS	299798	8655386	183	Comisión de regantes Jatosisa - Sotelo
CR-CH	299471	8655178	181	Comisión de regantes Caña Hueca
CR-SF	298239	8652951	143	Comisión de regantes San Fernando
CR-PA	297851	8652453	133	Comisión de regantes Pan de azúcar
CR-M	297020	8650538	104	Comisión de regantes Mejorada
CR-V	296493	8649738	91	Comisión de regantes Venturosa
CR-L	295598	8647444	58	Comisión de regantes Lurín

ANEXO 3: SUPERFICIE DEL RIO EN CIVIL 3D

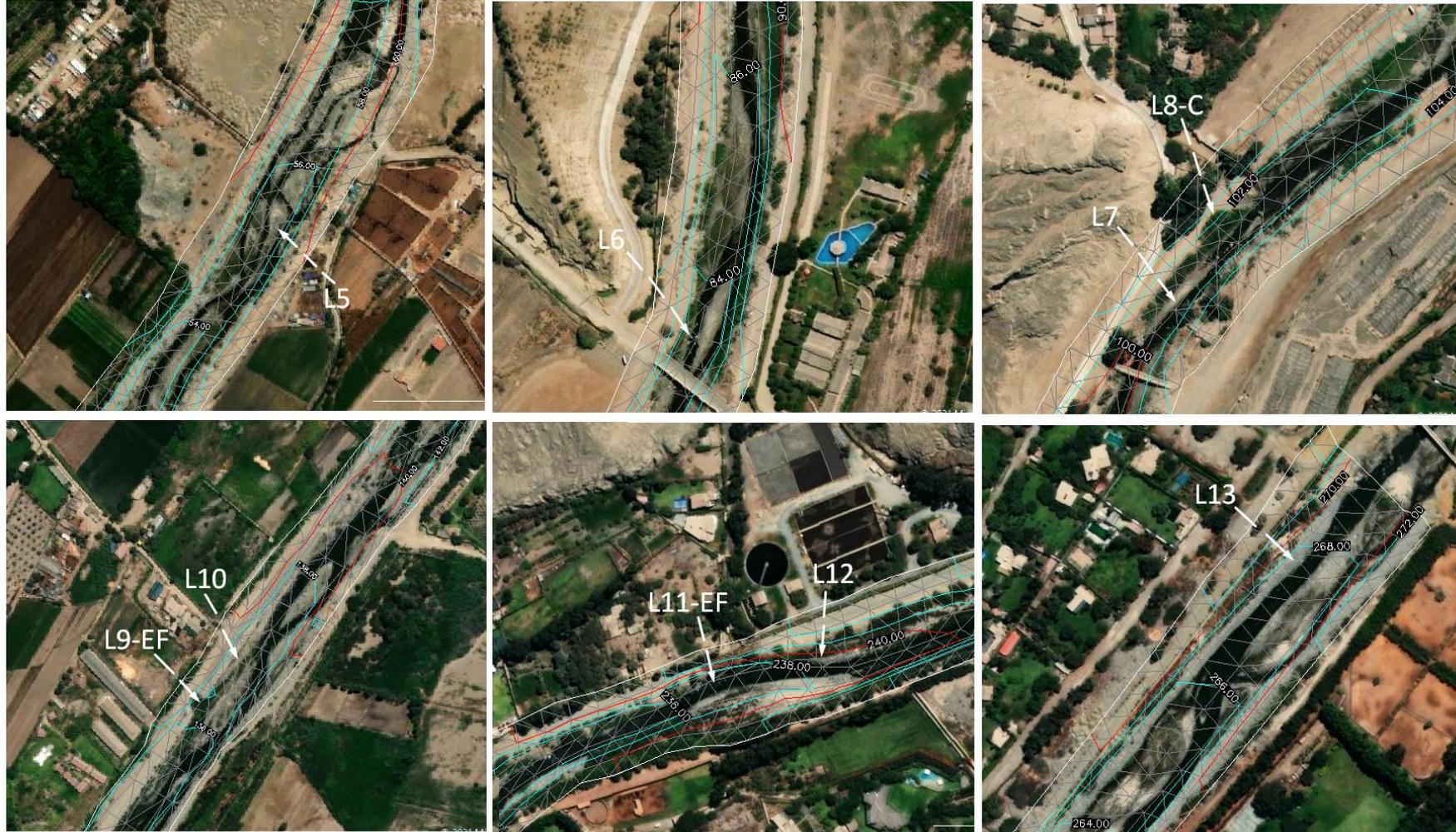


Figura 40: Superficie planialtimétrica, con curvas de nivel cian, y curva de mayor altitud en rojo.

FUENTE: Elaborado en Civil 3D con información obtenida en campo.

ANEXO 4: RESULTADOS DE LOS MONITOREO

Tabla 14: Resultado de los monitoreos desde el 24 de febrero hasta el 5 de agosto del 2019

Código	Fecha	Q (m ³ s ⁻¹)	U (m s ⁻¹)	h (m)	OD (mg l ⁻¹)	T (C°)	CE (uS cm ⁻¹)	DBO5 (mg l ⁻¹)	E.Coli (NMP/100ml)	SST (mg l ⁻¹)
L13	24/02/2019	11,48	0,97	0,39	5,95	25,10	129,90	1,62	0,00	123,60
	24/03/2019	14,47	0,90	0,80	7,65	23,60	156,70	2,77	0,00	70,80
	11/04/2019	2,41	0,14	0,61	5,74	25,40	264,00	1,65	1000,00	6,67
	3/05/2019	1,83	0,26	0,28	7,49	26,30	341,00	1,34	0,00	1,50
	19/06/2019	0,17	0,06	0,30	7,94	20,80	452,00	2,23	0,00	0,80
	8/07/2019	0,02	0,20	0,04	7,72	19,20	628,00	2,10	0,00	0,67
	5/08/2019	0,03	0,22	0,05	8,11	22,80	575,00	1,82	0,00	0,67
	24/02/2019	11,47	0,71	0,54	6,06	25,80	130,20	1,97	1000,00	102,50
L12	24/03/2019	14,47	1,29	0,60	7,81	25,00	158,40	2,20	0,00	82,00
	11/04/2019	2,41	1,21	0,26	5,12	27,10	269,00	0,96	0,00	2,67
	3/05/2019	1,83	0,83	0,23	7,02	25,80	345,00	1,21	1000,00	4,25
	19/06/2019	0,64	0,16	0,17	7,42	21,00	494,00	2,71	0,00	1,20
	8/07/2019	0,02	0,15	0,10	8,85	24,40	684,00	5,92	0,00	1,25
	5/08/2019	0,03	0,07	0,10	9,89	21,50	639,00	14,58	0,00	1,43
	24/02/2019	0,10	-	-	4,36	28,00	799,00	1,27	0,00	5,33
L11-EF	24/03/2019	0,08	-	-	4,95	27,20	762,00	2,97	0,00	2,33
	11/04/2019	0,10	-	-	4,52	26,60	763,00	2,85	12000,00	2,40
	3/05/2019	0,13	-	-	4,74	25,90	837,00	2,01	0,00	1,25
	19/06/2019	0,09	-	-	4,60	22,00	976,00	3,85	0,00	2,00
	8/07/2019	0,06	-	-	4,24	23,20	1057,00	2,28	0,00	3,00
	5/08/2019	0,06	-	-	5,25	22,10	1153,00	4,59	0,00	9,60
	24/02/2019	10,25	0,72	0,52	6,00	26,50	133,40	1,72	1000,00	179,00
L10	24/03/2019	13,39	1,03	0,62	6,30	26,40	162,50	2,35	0,00	123,00
	11/04/2019	1,95	0,21	0,37	6,90	27,50	298,00	27,91	0,00	4,00
	3/05/2019	1,50	0,30	0,20	7,40	26,10	404,00	2,48	0,00	2,00
	19/06/2019	0,40	0,21	0,06	7,59	20,00	620,00	6,64	0,00	3,00
	8/07/2019	0,00	0,23	0,04	5,15	18,80	697,00	11,34	0,00	0,57
	5/08/2019	0,01	0,24	0,05	5,52	19,30	701,00	6,16	0,00	0,50
	24/02/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
L9-EF	24/03/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	11/04/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

«Continuación»

Código	Fecha	Q (m ³ s ⁻¹)	U (m s ⁻¹)	h (m)	OD (mg l ⁻¹)	T (C°)	CE (uS cm ⁻¹)	DBO5 (mg l ⁻¹)	E.Coli (NMP/100ml)	SST (mg l ⁻¹)
L9-EF	3/05/2019	0,04	-	-	6,29	27,20	1592,00	82,65	0,00	36,40
	19/06/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	8/07/2019	0,04	-	-	5,42	23,00	1585,00	9,02	54000,00	5,25
	5/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
L8-C	24/02/2019	0,02	-	-	6,40	25,40	150,80	1,95	2000,00	194,50
	24/03/2019	0,03	-	-	8,02	27,80	2920,00	10,14	29000,00	127,50
	11/04/2019	0,02	-	-	5,50	24,40	970,00	27,91	84000,00	9,00
	3/05/2019	0,14	-	-	8,87	23,30	523,00	4,50	12000,00	51,60
	19/06/2019	0,00	-	-	4,30	19,50	1791,00	386,60	1200000,00	2,00
	8/07/2019	0,00	-	-	4,61	19,00	1084,00	94,22	21000,00	5,50
	5/08/2019	0,00	-	-	5,91	17,70	1415,00	155,28	550000,00	8,40
L7	24/02/2019	9,67	1,04	0,64	6,06	24,20	150,40	4,63	7000,00	205,33
	24/03/2019	12,69	0,86	0,64	5,93	26,90	175,00	4,56	4000,00	147,33
	11/04/2019	1,78	0,55	0,20	5,40	28,00	329,00	4,31	0,00	0,29
	3/05/2019	0,98	0,26	0,24	7,34	24,40	555,00	4,96	13000,00	26,00
	19/06/2019	0,28	0,41	0,06	5,02	19,50	1385,00	56,83	280000,00	3,60
	8/07/2019	0,08	0,57	0,05	6,13	21,40	1335,00	40,73	1000,00	1,25
	5/08/2019	0,10	0,46	0,09	4,36	20,40	1373,00	38,40	120000,00	6,33
L6	24/02/2019	9,41	1,33	0,43	6,28	23,90	137,30	21,86	4000,00	214,00
	24/03/2019	12,40	1,35	0,67	6,78	26,50	168,40	2,01	0,00	170,67
	11/04/2019	1,62	0,51	0,10	6,45	27,50	329,00	5,96	0,00	2,00
	3/05/2019	0,89	0,92	0,10	7,45	23,80	525,00	11,66	6000,00	5,75
	19/06/2019	0,12	0,16	0,08	8,56	19,80	984,00	37,55	33000,00	2,00
	8/07/2019	0,03	0,14	0,10	13,01	21,00	908,00	37,41	0,00	0,50
	5/08/2019	0,03	0,27	0,06	12,55	18,90	948,00	31,90	0,00	0,67
L5	24/02/2019	8,82	0,82	0,46	6,71	23,80	140,60	20,72	2000,00	343,50
	24/03/2019	11,75	1,03	0,26	6,17	25,30	170,10	4,57	2000,00	144,00
	11/04/2019	1,16	0,91	0,21	6,25	27,70	356,00	3,05	0,00	4,25
	3/05/2019	0,84	1,42	0,17	7,21	22,30	488,00	3,53	2000,00	2,75
	19/06/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	8/07/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	5/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
L4	24/02/2019	9,07	1,05	0,73	7,34	22,50	151,70	22,58	3000,00	452,00
	24/03/2019	12,05	1,05	0,69	7,15	22,20	182,40	22,41	2000,00	196,67
	11/04/2019	1,26	0,42	0,30	6,38	24,20	453,00	20,15	4000,00	35,20
	3/05/2019	0,94	0,31	0,22	4,94	21,20	747,00	62,40	8000,00	24,80

«continuación»

Código	Fecha	Q (m ³ s ⁻¹)	U (m s ⁻¹)	h (m)	OD (mg l ⁻¹)	T (C°)	CE (uS cm ⁻¹)	DBO5 (mg l ⁻¹)	E.Coli (NMP/100ml)	SST (mg l ⁻¹)
L4	19/06/2019	0,13	0,14	0,16	3,30	18,50	1940,00	251,99	8000,00	15,00
	8/07/2019	0,21	0,14	0,08	4,40	18,90	2100,00	392,20	99000,00	26,50
	5/08/2019	0,09	0,11	0,08	4,88	17,60	1989,00	223,11	43000,00	4,00
L3-EF	24/02/2019	1,94	-	-	3,80	21,00	577,73	108,00	20000,00	32,50
	24/03/2019	2,14	-	-	3,50	25,00	1195,85	102,50	65000,00	33,00
	11/04/2019	1,49	-	-	0,65	27,00	2340,00	150,93	65000,00	32,00
	3/05/2019	1,19	-	-	0,44	24,70	2320,00	130,53	44000,00	50,50
	19/06/2019	0,91	-	-	0,58	19,30	2630,00	349,03	120000,00	29,00
	8/07/2019	0,98	-	-	0,65	19,50	2530,00	469,95	140000,00	13,50
	5/08/2019	0,76	-	-	1,82	18,50	2380,00	436,13	140000,00	18,80
	24/02/2019	0,03	-	-	4,80	27,40	1662,00	66,39	4000,00	13,00
L2-EF	24/03/2019	0,05	-	-	5,53	26,60	1792,00	51,21	0,00	14,00
	11/04/2019	0,06	-	-	4,97	26,00	1700,00	51,61	3000,00	23,50
	3/05/2019	0,05	-	-	5,45	24,30	1742,00	53,17	20000,00	16,00
	19/06/2019	0,04	-	-	5,78	20,20	1966,00	15,63	0,00	6,00
	8/07/2019	0,02	-	-	5,67	20,80	1979,00	35,29	8000,00	6,00
	5/08/2019	0,01	-	-	6,80	19,80	2060,00	19,34	0,00	9,00
	24/02/2019	11,03	1,15	0,62	6,82	22,40	228,00	34,21	6000,00	402,67
L1	24/03/2019	14,24	1,08	0,66	7,04	22,70	344,00	38,24	35000,00	280,67
	11/04/2019	2,81	0,40	0,32	5,97	24,20	1301,00	123,03	20000,00	21,00
	3/05/2019	2,17	0,36	0,32	1,95	23,30	1633,00	117,98	66000,00	37,60
	19/06/2019	1,08	0,26	0,32	1,75	18,70	2540,00	384,34	110000,00	25,00
	8/07/2019	1,20	0,24	0,28	1,12	19,50	2460,00	372,69	120000,00	13,00
	5/08/2019	0,85	0,37	0,27	1,71	18,10	2340,00	635,11	150000,00	21,50

ANEXO 5: INFORMACION DE DATOS AMOSFÉRICOS

Tabla 15: información horaria de T_{aire} , H_r , V_{viento} y Ra_s en los meses de marzo, mayo y julio

Hora	24/03/2019				3/05/2019				8/07/2019			
	T_{aire}	H_r	V_{viento}	Ra_s	T_{aire}	H_r	V_{viento}	Ra_s	T_{aire}	H_r	V_{viento}	Ra_s
00:00	20,4	80	1,6	0	17,1	86	1,4	0	15,1	89	1,4	0
01:00	20,2	80	1,3	0	17,4	85	2,0	0	15,2	88	1,4	0
02:00	20,3	81	1,7	0	16,9	85	1,6	0	14,9	89	2,3	0
03:00	19,9	82	1,2	0	16,2	87	0,0	0	14,7	90	3,4	0
04:00	19,8	83	2,0	0	15,9	88	0,6	0	14,7	91	1,1	0
05:00	19,3	84	1,7	0	16,1	89	1,3	0	14,6	91	1,7	0
06:00	19,3	85	2,1	0	17,0	89	3,5	0	14,6	91	2,0	0
07:00	20,6	82	1,1	31	17,3	88	2,2	20	14,6	92	0,4	0
08:00	22,7	72	2,6	165	18,9	82	2,7	107	15,0	92	1,1	28
09:00	23,6	69	2,4	222	21,3	69	2,4	238	15,9	90	2,2	66
10:00	25,8	64	4,3	436	22,1	68	6,1	375	17,8	80	1,8	147
11:00	28,1	55	6,7	724	20,2	75	6,2	344	19,6	73	4,2	278
12:00	27,8	54	7,0	794	21,2	70	5,5	411	19,7	69	7,1	398
13:00	29,0	49	7,6	728	23,5	61	5,5	624	20,4	67	6,5	407
14:00	28,5	52	7,1	622	22,8	62	7,1	396	20,8	67	7,4	372
15:00	28,4	52	7,9	596	22,6	61	6,2	433	19,5	71	6,2	280
16:00	25,6	59	9,1	388	22,0	63	5,8	217	18,8	73	5,3	150
17:00	24,9	61	6,7	205	21,3	65	4,0	107	17,1	79	3,5	43
18:00	23,2	66	4,2	61	19,4	71	4,5	13	16,0	85	3,4	3
19:00	21,8	70	2,4	0	18,4	76	1,9	0	16,0	85	2,9	0
20:00	21,2	73	2,0	0	17,9	79	1,1	0	16,1	85	1,1	0
21:00	20,1	78	0,6	0	17,0	82	1,1	0	16,1	84	3,6	0
22:00	19,1	82	1,4	0	16,4	84	0,1	0	16,2	84	3,1	0
23:00	19,7	81	1,7	0	16,2	86	1,0	0	15,9	85	1,1	0

ANEXO 6: NORMATIVIDAD REFERIDA A LMP EN EL PERÚ

Tabla 16: LMP para efluentes de PTAR domésticas o municipales

Parámetro	Unidad	Concentración
Aceites y grasas	mg/l	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	10 000
DBO5	mg/l	100
DQO	mg/l	200
Sólidos en Suspensión	ml/l	150
Temperatura	°C	< 35

FUENTE: D.S. N° 003- 2010- MINAM

ANEXO 7: CONVERSIÓN DE CE A SALINIDAD

Tabla 17: Conversión de CE a Sal en los meses de marzo, mayo y julio

Estación	24/03/2019			3/05/2019			8/07/2019		
	C.E ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	C.E (mS cm^{-1})	Sal (kg m^{-3})	C.E ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	C.E (mS cm^{-1})	Sal (kg m^{-3})	C.E ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	C.E (mS cm^{-1})	Sal (kg m^{-3})
L13: A la altura del Puente Mototaxi	156,700	0,157	0,104	341,000	0,341	0,227	-	-	-
L12: 50m antes de PTAR Cieneguilla	158,400	0,158	0,105	345,000	0,345	0,229	684,000	0,684	0,456
L11-EF: Efluente de la PTAR Cieneguilla	762,000	0,762	0,509	837,000	0,837	0,559	1057,000	1,057	0,707
L10: 50m antes de PTAR Manchay	162,500	0,163	0,108	404,000	0,404	0,269	-	-	-
L9-EF: Efluente de PTAR Manchay	1582,818	1,583	1,060	1592,000	1,592	1,067	1585,000	1,585	1,062
L8-C: Descarga de canal de riego Capilla	2920,000	2,920	1,963	523,000	0,523	0,348	1084,000	1,084	0,725
L7: A la altura del Puente Guayabo	175,000	0,175	0,116	555,000	0,555	0,370	1335,000	1,335	0,894
L6: A la altura del Puente Quebrada Verde	168,400	0,168	0,111	525,000	0,525	0,350	908,000	0,908	0,607
L5: 50m aguas abajo de CR Lurín	170,100	0,170	0,113	488,000	0,488	0,325	-	-	-
L4: 50m antes de PTAR San Bartolo	182,000	0,182	0,121	747,000	0,747	0,498	2100,000	2,100	1,409
L3-EF: Efluente de PTAR San Bartolo	2410,000	2,410	1,618	2320,000	2,320	1,557	2530,000	2,530	1,699
L2-EF: Efluente de PTAR Julio C. Tello	1792,000	1,792	1,201	1742,000	1,742	1,168	1979,000	1,979	1,327
L1: A la altura del Puente Panamericana Sur	344,000	0,344	0,229	1633,000	1,633	1,094	2460,000	2,460	1,652

ANEXO 8: MALLADO EN CADA PUNTOS DE SIMULACIÓN

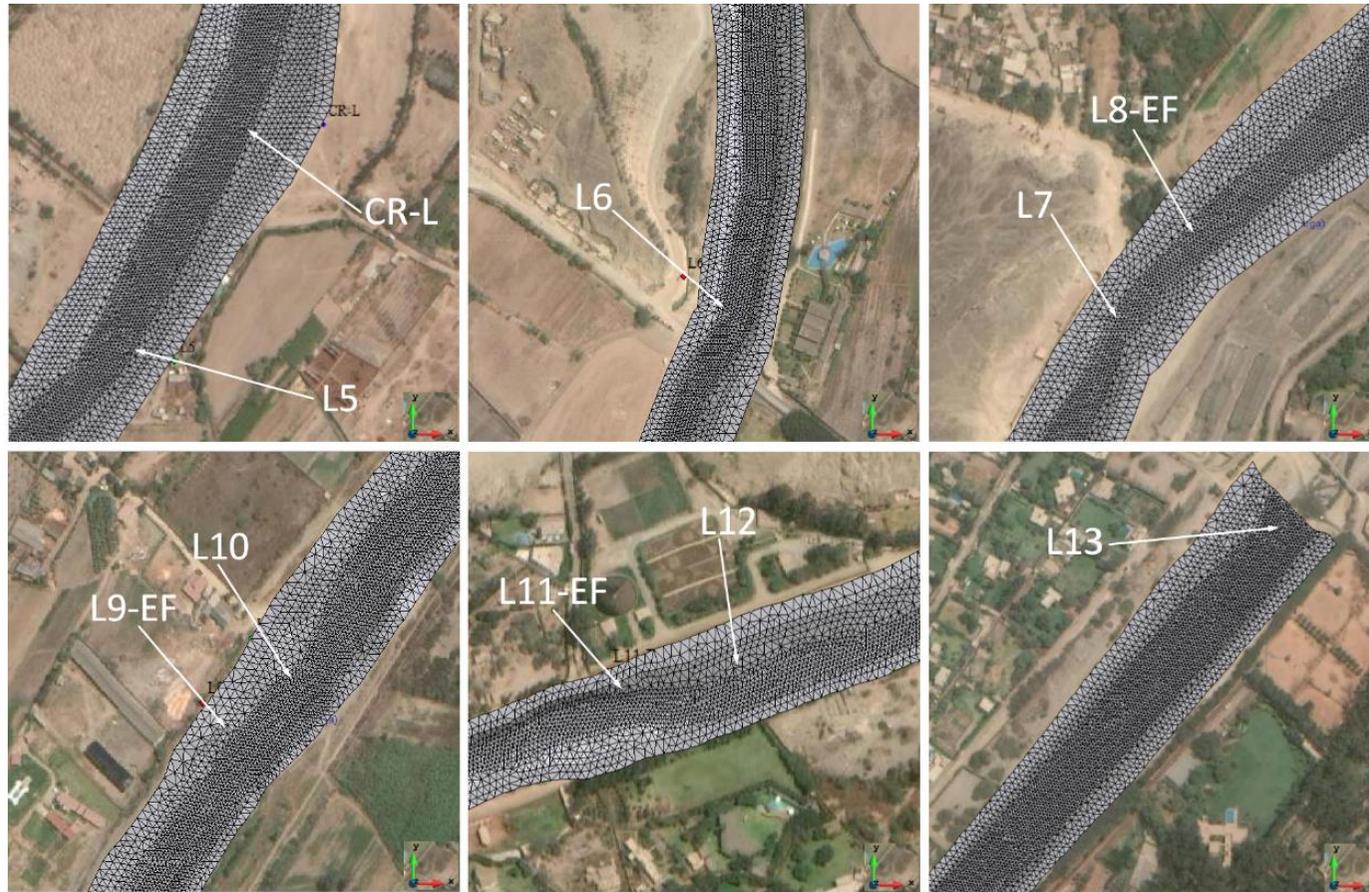


Figura 41: Mallado en los puntos de monitoreo desde L5 hasta L13

ANEXO 9: RUGOSIDADES EN EL TRAMO DE ESTUDIO

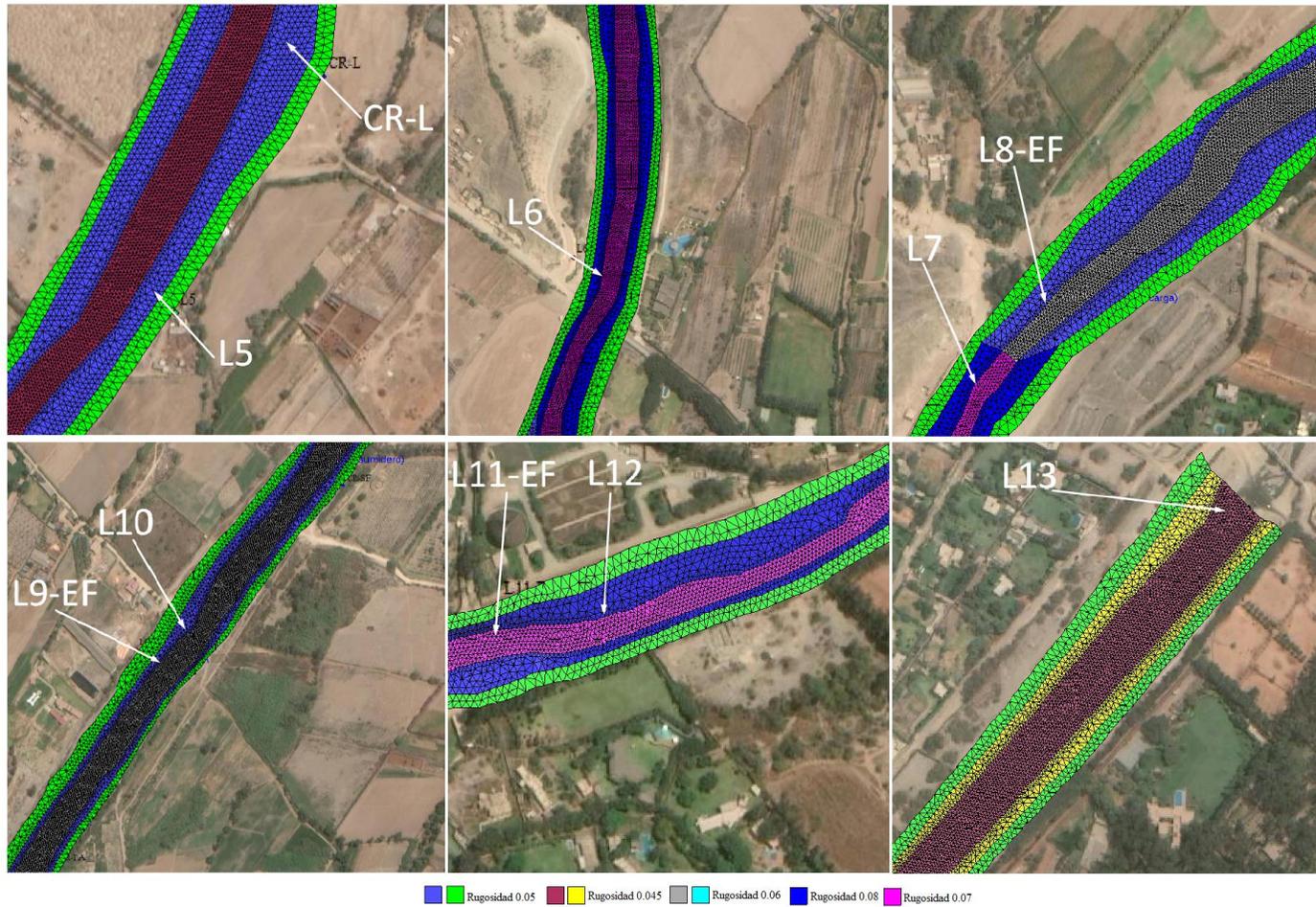


Figura 42: Variación espacial de las rugosidades obtenidas durante la calibración, desde L5 hasta L13.

ANEXO 10: DATOS PARA MODELAR LA TEMPERATURA EN IBER

Tabla 18: Información de Ra_s , V_{viento} , T_{aire} y H_r para modelar la temperatura en los meses de marzo, mayo y julio

Tiempo (s)	24/03/2019				3/05/2019				8/07/2019			
	Ra_s ($W\ m^{-2}$)	V_{viento} ($m\ s^{-1}$)	T_{aire} °C	H_r (%)	Ra_s ($W\ m^{-2}$)	V_{viento} ($m\ s^{-1}$)	T_{aire} °C	H_r (%)	Ra_s ($W\ m^{-2}$)	V_{viento} ($m\ s^{-1}$)	T_{aire} °C	H_r (%)
0	329,69	1,60	20,40	0,80	308,07	1,40	17,10	0,86	295,55	1,40	15,10	0,89
3600	328,35	1,30	20,20	0,80	309,99	2,00	17,40	0,85	296,17	1,40	15,20	0,88
7200	329,02	1,70	20,30	0,81	306,80	1,60	16,90	0,85	294,32	2,30	14,90	0,89
10800	326,34	1,20	19,90	0,82	302,38	0,00	16,20	0,87	293,10	3,40	14,70	0,90
14400	325,67	2,00	19,80	0,83	300,51	0,60	15,90	0,88	293,10	1,10	14,70	0,91
18000	322,35	1,70	19,30	0,84	301,76	1,30	16,10	0,89	292,49	1,70	14,60	0,91
21600	322,35	2,10	19,30	0,85	307,43	3,50	17,00	0,89	292,49	2,00	14,60	0,91
25200	356,28	1,10	20,60	0,82	325,29	2,20	17,30	0,88	292,49	0,40	14,60	0,92
28800	494,46	2,60	22,70	0,72	415,61	2,70	18,90	0,82	319,53	1,10	15,00	0,92
32400	558,56	2,40	23,60	0,69	556,26	2,40	21,30	0,69	361,03	2,20	15,90	0,90
36000	780,00	4,30	25,80	0,64	694,08	6,10	22,10	0,68	449,88	1,80	17,80	0,80
39600	1075,68	6,70	28,10	0,55	654,56	6,20	20,20	0,75	586,44	4,20	19,60	0,73
43200	1143,50	7,00	27,80	0,54	725,99	5,50	21,20	0,70	701,57	7,10	19,70	0,69
46800	1088,31	7,60	29,00	0,49	943,31	5,50	23,50	0,61	714,22	6,50	20,40	0,67
50400	979,02	7,10	28,50	0,52	719,30	7,10	22,80	0,62	681,52	7,40	20,80	0,67
54000	946,97	7,90	28,40	0,52	747,08	6,20	22,60	0,61	582,85	6,20	19,50	0,71
57600	722,86	9,10	25,60	0,59	536,48	5,80	22,00	0,63	453,91	5,30	18,80	0,73
61200	539,91	6,70	24,90	0,61	424,04	4,00	21,30	0,65	343,37	3,50	17,10	0,79
64800	381,68	4,20	23,20	0,66	330,81	4,50	19,40	0,71	302,93	3,40	16,00	0,85
68400	339,24	2,40	21,80	0,70	316,44	1,90	18,40	0,76	301,13	2,90	16,00	0,85
72000	335,12	2,00	21,20	0,73	313,20	1,10	17,90	0,79	301,76	1,10	16,10	0,85
75600	327,68	0,60	20,10	0,78	307,43	1,10	17,00	0,82	301,76	3,60	16,10	0,84
79200	321,03	1,40	19,10	0,82	303,64	0,10	16,40	0,84	302,38	3,10	16,20	0,84
82800	325,00	1,70	19,70	0,81	302,38	1,00	16,20	0,86	300,51	1,10	15,90	0,85

ANEXO 11: DATOS PARA MODELAR LA E.COLI EN IBER

Tabla 19: información de I_0 , H_m y K_e para modelar la E.Coli en los meses de marzo, mayo y julio

Tiempo (s)	24/03/2019			3/05/2019			8/07/2019		
	I_0 ($W\ m^{-2}$)	H_m (m)	K_e (m^{-1})	I_0 ($W\ m^{-2}$)	H_m (m)	K_e (m^{-1})	I_0 ($W\ m^{-2}$)	H_m (m)	K_e (m^{-1})
0	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
3600	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
7200	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
10800	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
14400	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
18000	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
21600	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
25200	25,24	100,00	46,26	15,94	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
28800	148,96	100,00	46,26	95,90	100,00	8,14	24,59	100,00	6,47
32400	206,71	100,00	46,26	220,45	100,00	8,14	60,52	100,00	6,47
36000	412,20	100,00	46,26	352,76	100,00	8,14	137,32	100,00	6,47
39600	690,57	100,00	46,26	326,21	100,00	8,14	262,10	100,00	6,47
43200	760,69	100,00	46,26	390,87	100,00	8,14	376,56	100,00	6,47
46800	696,25	100,00	46,26	592,17	100,00	8,14	384,52	100,00	6,47
50400	590,84	100,00	46,26	373,10	100,00	8,14	349,13	100,00	6,47
54000	559,55	100,00	46,26	402,28	100,00	8,14	259,18	100,00	6,47
57600	356,54	100,00	46,26	195,86	100,00	8,14	134,86	100,00	6,47
61200	178,71	100,00	46,26	88,23	100,00	8,14	35,30	100,00	6,47
64800	32,66	100,00	46,26	7,80	100,00	8,14	1,80	100,00	6,47
68400	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
72000	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
75600	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
79200	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47
82800	0,00	100,00	46,26	0,00	100,00	8,14	0,00	100,00	6,47

ANEXO 12: CAUDALES PROMEDIOS DIARIOS DE LA ESTACIÓN ANTAPUCRO (2019) E HIDROGRAMA

Tabla 20: Caudales promedios diarios de la estación Antapucro (2019)

fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)
1/1/2019	2.94	1/2/2019	7.21	4/3/2019	11.64	4/4/2019	4.34	5/5/2019	2.65	5/6/2019	0.92
2/1/2019	2.94	2/2/2019	5.22	5/3/2019	11.99	5/4/2019	4.26	6/5/2019	2.51	6/6/2019	0.79
3/1/2019	1.90	3/2/2019	6.43	6/3/2019	14.54	6/4/2019	3.97	7/5/2019	2.61	7/6/2019	0.80
4/1/2019	2.94	4/2/2019	7.82	7/3/2019	14.94	7/4/2019	3.89	8/5/2019	2.50	8/6/2019	0.76
5/1/2019	2.94	5/2/2019	7.49	8/3/2019	14.41	8/4/2019	3.72	9/5/2019	2.69	9/6/2019	0.73
6/1/2019	2.84	6/2/2019	9.06	9/3/2019	15.34	9/4/2019	3.71	10/5/2019	2.44	10/6/2019	0.76
7/1/2019	2.94	7/2/2019	9.34	10/3/2019	17.30	10/4/2019	3.61	11/5/2019	2.29	11/6/2019	0.70
8/1/2019	2.94	8/2/2019	9.40	11/3/2019	12.60	11/4/2019	3.57	12/5/2019	2.20	12/6/2019	0.74
9/1/2019	2.80	9/2/2019	4.82	12/3/2019	15.76	12/4/2019	3.52	13/5/2019	2.04	13/6/2019	0.78
10/1/2019	2.94	10/2/2019	10.85	13/3/2019	11.44	13/4/2019	3.32	14/5/2019	2.05	14/6/2019	0.76
11/1/2019	2.94	11/2/2019	10.04	14/3/2019	9.39	14/4/2019	3.12	15/5/2019	2.02	15/6/2019	0.71
12/1/2019	2.94	12/2/2019	8.12	15/3/2019	9.59	15/4/2019	3.22	16/5/2019	2.04	16/6/2019	0.90
13/1/2019	2.94	13/2/2019	8.73	16/3/2019	7.74	16/4/2019	3.04	17/5/2019	1.90	17/6/2019	0.87
14/1/2019	2.70	14/2/2019	8.89	17/3/2019	7.38	17/4/2019	2.99	18/5/2019	1.92	18/6/2019	0.88
15/1/2019	5.69	15/2/2019	7.55	18/3/2019	10.17	18/4/2019	2.91	19/5/2019	1.86	19/6/2019	0.93
16/1/2019	13.35	16/2/2019	8.10	19/3/2019	10.01	19/4/2019	2.88	20/5/2019	1.83	20/6/2019	0.90
17/1/2019	10.84	17/2/2019	6.53	20/3/2019	7.73	20/4/2019	2.84	21/5/2019	1.84	21/6/2019	0.60
18/1/2019	9.93	18/2/2019	3.73	21/3/2019	6.91	21/4/2019	3.33	22/5/2019	1.95	22/6/2019	0.50
19/1/2019	9.66	19/2/2019	2.95	22/3/2019	5.64	22/4/2019	3.29	23/5/2019	1.70	23/6/2019	0.70
20/1/2019	8.81	20/2/2019	4.30	23/3/2019	5.94	23/4/2019	3.34	24/5/2019	1.60	24/6/2019	0.60
21/1/2019	10.33	21/2/2019	4.97	24/3/2019	7.82	24/4/2019	3.33	25/5/2019	1.48	25/6/2019	0.36
22/1/2019	14.20	22/2/2019	7.15	25/3/2019	6.40	25/4/2019	3.17	26/5/2019	1.45	26/6/2019	0.34
23/1/2019	11.89	23/2/2019	11.54	26/3/2019	6.05	26/4/2019	3.09	27/5/2019	1.47	27/6/2019	0.28
24/1/2019	14.10	24/2/2019	14.38	27/3/2019	5.02	27/4/2019	2.76	28/5/2019	1.46	28/6/2019	0.31
25/1/2019	15.13	25/2/2019	12.26	28/3/2019	4.63	28/4/2019	2.82	29/5/2019	1.48	29/6/2019	0.31
26/1/2019	15.10	26/2/2019	14.47	29/3/2019	4.89	29/4/2019	2.77	30/5/2019	1.59	30/6/2019	0.28
27/1/2019	11.46	27/2/2019	12.48	30/3/2019	4.68	30/4/2019	3.03	31/5/2019	1.59	1/7/2019	0.47
28/1/2019	10.31	28/2/2019	8.26	31/3/2019	4.56	1/5/2019	2.87	1/6/2019	0.89	2/7/2019	0.47
29/1/2019	11.77	1/3/2019	8.46	1/4/2019	4.99	2/5/2019	2.83	2/6/2019	0.90	3/7/2019	0.45
30/1/2019	14.53	2/3/2019	9.54	2/4/2019	5.19	3/5/2019	2.78	3/6/2019	0.90	4/7/2019	0.56
31/1/2019	11.43	3/3/2019	10.96	3/4/2019	4.47	4/5/2019	2.74	4/6/2019	0.95	5/7/2019	0.54

«Continuación»

fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)	fecha	Q prom diario (m ³ s ⁻¹)
6/7/2019	0.50	6/8/2019	0.43	6/9/2019	0.00	7/10/2019	0.10	7/11/2019	0.25	8/12/2019	1.15
7/7/2019	0.44	7/8/2019	0.41	7/9/2019	0.00	8/10/2019	0.10	8/11/2019	0.25	9/12/2019	1.15
8/7/2019	0.50	8/8/2019	0.30	8/9/2019	0.20	9/10/2019	0.10	9/11/2019	0.25	10/12/2019	1.36
9/7/2019	0.46	9/8/2019	0.28	9/9/2019	0.20	10/10/2019	0.10	10/11/2019	0.25	11/12/2019	2.61
10/7/2019	0.40	10/8/2019	0.28	10/9/2019	0.20	11/10/2019	0.10	11/11/2019	1.96	12/12/2019	2.37
11/7/2019	0.47	11/8/2019	0.30	11/9/2019	0.00	12/10/2019	0.10	12/11/2019	1.65	13/12/2019	2.37
12/7/2019	0.44	12/8/2019	0.32	12/9/2019	0.20	13/10/2019	0.06	13/11/2019	1.51	14/12/2019	2.37
13/7/2019	0.52	13/8/2019	0.27	13/9/2019	0.00	14/10/2019	0.05	14/11/2019	1.19	15/12/2019	4.63
14/7/2019	0.37	14/8/2019	0.32	14/9/2019	0.00	15/10/2019	0.06	15/11/2019	1.19	16/12/2019	4.63
15/7/2019	0.37	15/8/2019	0.31	15/9/2019	0.00	16/10/2019	0.06	16/11/2019	1.19	17/12/2019	4.37
16/7/2019	0.52	16/8/2019	0.24	16/9/2019	0.00	17/10/2019	0.08	17/11/2019	0.72	18/12/2019	4.02
17/7/2019	0.39	17/8/2019	0.23	17/9/2019	0.10	18/10/2019	0.08	18/11/2019	0.45	19/12/2019	3.86
18/7/2019	0.41	18/8/2019	0.23	18/9/2019	0.10	19/10/2019	0.08	19/11/2019	0.45	20/12/2019	5.05
19/7/2019	0.51	19/8/2019	0.25	19/9/2019	0.10	20/10/2019	0.07	20/11/2019	0.45	21/12/2019	5.05
20/7/2019	0.54	20/8/2019	0.26	20/9/2019	0.10	21/10/2019	0.08	21/11/2019	0.45	22/12/2019	7.77
21/7/2019	0.48	21/8/2019	0.20	21/9/2019	0.10	22/10/2019	0.09	22/11/2019	0.45	23/12/2019	5.67
22/7/2019	0.42	22/8/2019	0.20	22/9/2019	0.10	23/10/2019	0.07	23/11/2019	0.45	24/12/2019	5.67
23/7/2019	0.49	23/8/2019	0.00	23/9/2019	0.10	24/10/2019	0.07	24/11/2019	0.45	25/12/2019	6.07
24/7/2019	0.45	24/8/2019	0.00	24/9/2019	0.10	25/10/2019	0.07	25/11/2019	0.69	26/12/2019	6.07
25/7/2019	0.33	25/8/2019	0.00	25/9/2019	0.10	26/10/2019	0.07	26/11/2019	1.55	27/12/2019	6.07
26/7/2019	0.38	26/8/2019	0.30	26/9/2019	0.10	27/10/2019	0.04	27/11/2019	0.70	28/12/2019	5.69
27/7/2019	0.26	27/8/2019	0.20	27/9/2019	0.10	28/10/2019	0.01	28/11/2019	1.59	29/12/2019	5.69
28/7/2019	0.29	28/8/2019	0.00	28/9/2019	0.10	29/10/2019	0.05	29/11/2019	1.59	30/12/2019	5.54
29/7/2019	0.39	29/8/2019	0.00	29/9/2019	0.10	30/10/2019	0.05	30/11/2019	1.59	31/12/2019	5.54
30/7/2019	0.45	30/8/2019	0.00	30/9/2019	0.10	31/10/2019	0.05	1/12/2019	1.00		
31/7/2019	0.47	31/8/2019	0.00	1/10/2019	0.10	1/11/2019	0.08	2/12/2019	2.23		
1/8/2019	0.00	1/9/2019	0.20	2/10/2019	0.10	2/11/2019	0.08	3/12/2019	2.23		
2/8/2019	0.00	2/9/2019	0.20	3/10/2019	0.10	3/11/2019	0.08	4/12/2019	2.04		
3/8/2019	0.30	3/9/2019	0.20	4/10/2019	0.10	4/11/2019	0.07	5/12/2019	2.04		
4/8/2019	0.38	4/9/2019	0.30	5/10/2019	0.10	5/11/2019	0.07	6/12/2019	2.04		
5/8/2019	0.38	5/9/2019	0.30	6/10/2019	0.10	6/11/2019	0.32	7/12/2019	1.15		

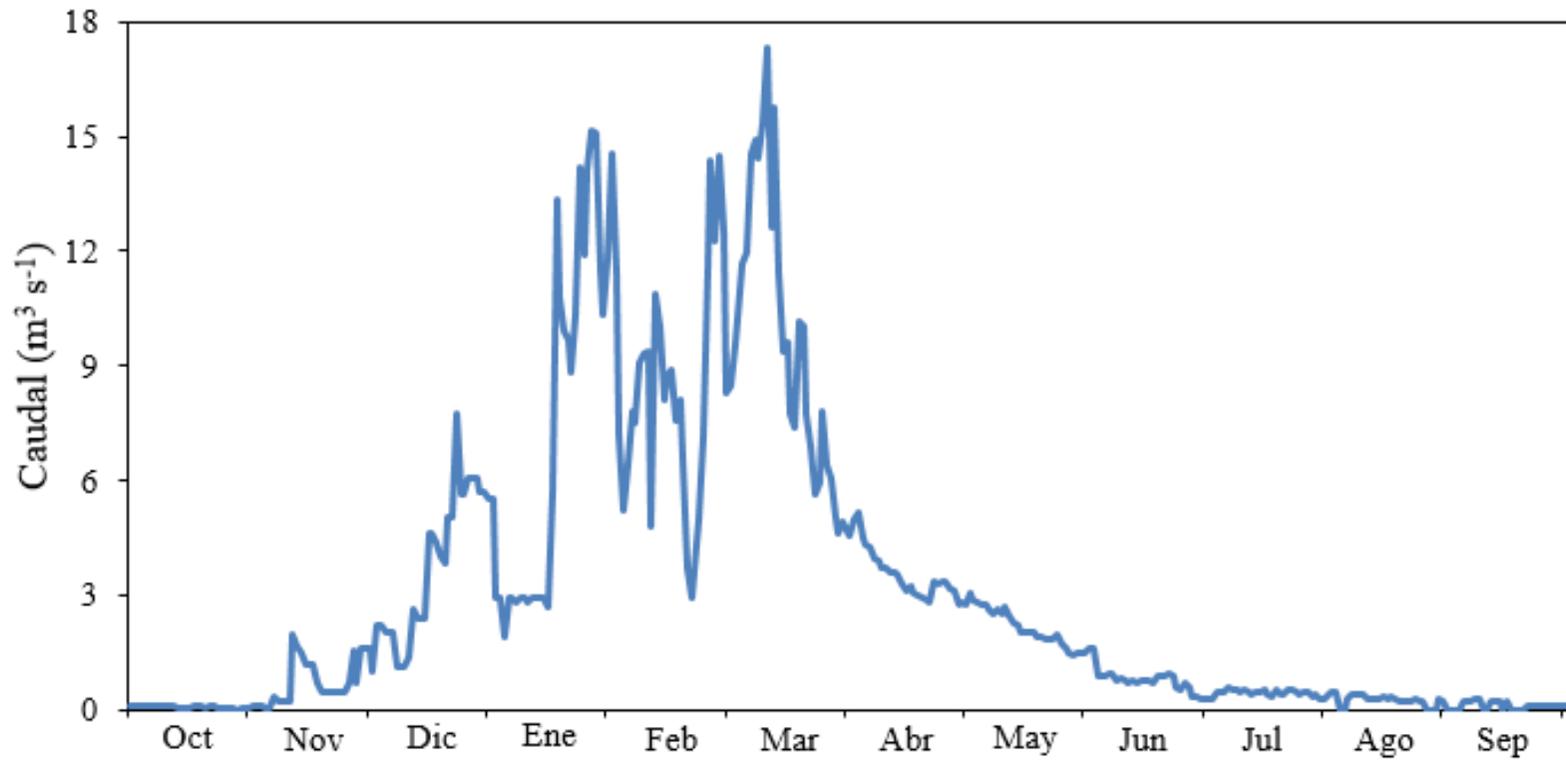


Figura 43: Hidrograma con caudales promedios diarios de la estación Antapucro (2019)

ANEXO 13: CAUDALES MONITOREADOS

Tabla 21: Caudales monitoreados en 8 puntos ubicados en el río

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	
24/02/2019	L13						L12						
	6,00	0,30	0,75	6,00	1,80	1,35	5,00	0,54	0,65	5,00	2,70	1,76	
	12,00	0,30	0,97	6,00	1,80	1,75	10,00	0,70	0,80	5,00	3,50	2,80	
	18,00	0,39	0,97	6,00	2,34	2,27	15,00	0,60	0,80	5,00	3,00	2,40	
	24,00	0,39	1,01	6,00	2,34	2,36	20,00	0,70	0,80	5,00	3,50	2,80	
	30,00	0,39	0,99	6,00	2,34	2,32	25,00	0,54	0,65	5,00	2,70	1,76	
	36,00	0,30	0,80	6,00	1,80	1,44							
	Caudal de la sección					11,49	Caudal de la sección					11,51	
24/03/2019	6,00	0,50	0,27	6,00	3,00	0,81	5,00	0,54	0,67	5,00	2,70	1,81	
	12,00	0,58	0,49	6,00	3,48	1,71	10,00	0,70	1,00	5,00	3,50	3,50	
	18,00	0,90	0,90	6,00	5,40	4,86	15,00	0,60	1,29	5,00	3,00	3,87	
	24,00	0,90	0,85	6,00	5,40	4,59	20,00	0,70	1,00	5,00	3,50	3,50	
	30,00	0,59	0,48	6,00	3,54	1,70	25,00	0,54	0,67	5,00	2,70	1,81	
	36,00	0,50	0,27	6,00	3,00	0,81							
		Caudal de la sección					14,47	Caudal de la sección					14,49
11/04/2019	6,00	0,60	0,09	6,00	3,60	0,32	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	
	12,00	0,60	0,10	6,00	3,60	0,36	10,00	0,20	1,00	5,00	1,02	1,02	
	18,00	0,60	0,14	6,00	3,60	0,50	15,00	0,23	1,21	5,00	1,15	1,39	
	24,00	0,61	0,14	6,00	3,66	0,51	20,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	
	30,00	0,60	0,10	6,00	3,60	0,36	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	
	36,00	0,60	0,10	6,00	3,60	0,36							
		Caudal de la sección					2,42	Caudal de la sección					2,41

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)
3/05/2019	L13						L12					
	6,00	0,10	0,25	6,00	0,60	0,15	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	12,00	0,15	0,25	6,00	0,90	0,23	10,00	0,23	0,76	5,00	1,15	0,87
	18,00	0,30	0,26	6,00	1,80	0,47	15,00	0,23	0,83	5,00	1,15	0,95
	24,00	0,20	0,25	6,00	1,20	0,30	20,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	30,00	0,28	0,26	6,00	1,68	0,44	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	36,00	0,17	0,25	6,00	1,02	0,26						
	Caudal de la sección					1,83	Caudal de la sección					1,83
19/06/2019	6,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	12,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	10,00	0,17	0,16	5,00	0,85	0,14
	17,00	0,25	0,06	5,00	1,25	0,08	15,00	0,50	0,20	5,00	2,50	0,50
	22,00	0,30	0,06	5,00	1,50	0,09	20,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	30,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	36,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00						
	Caudal de la sección					0,17	Caudal de la sección					0,64
8/07/2019	6,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	12,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	18,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	13,50	0,07	0,09	3,50	0,25	0,02
	21,00	0,04	0,20	3,00	0,12	0,02	20,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,00
	30,00	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	36,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00						
	Caudal de la sección					0,02	Caudal de la sección					0,02

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)
5/08/2019	L13						L12					
	6,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	12,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	18,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	14,50	0,10	0,07	4,50	0,45	0,03
	20,80	0,05	0,22	2,80	0,14	0,03	20,00	0,00	0,00	5,50	0,00	0,00
	30,00	0,00	0,00	9,20	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
	36,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00						
	Caudal de la sección					0,03	Caudal de la sección					0,03
24/02/2019	L10						L7					
	5,00	0,52	0,72	5,00	2,60	1,87	4,00	0,50	0,80	4,00	2,00	1,60
	10,00	0,52	0,80	5,00	2,60	2,08	8,00	0,55	0,87	4,00	2,20	1,91
	15,00	0,52	0,80	5,00	2,60	2,08	12,00	0,64	1,04	4,00	2,56	2,66
	20,00	0,52	0,90	5,00	2,60	2,34	16,00	0,55	0,86	4,00	2,20	1,89
	25,00	0,52	0,72	5,00	2,60	1,87	20,00	0,50	0,80	4,00	2,00	1,60
	Caudal de la sección					10,24	Caudal de la sección					9,67
24/03/2019	L10						L7					
	5,00	0,50	0,90	5,00	2,50	2,25	4,00	0,64	0,86	4,00	2,56	2,20
	10,00	0,59	1,00	5,00	2,95	2,95	8,00	0,67	0,90	4,00	2,68	2,41
	15,00	0,62	1,03	5,00	3,10	3,19	12,00	0,82	1,05	4,00	3,28	3,44
	20,00	0,55	1,00	5,00	2,75	2,75	16,00	0,67	0,90	4,00	2,68	2,41
	25,00	0,50	0,90	5,00	2,50	2,25	20,00	0,64	0,86	4,00	2,56	2,20
	Caudal de la sección					13,39	Caudal de la sección					12,67

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	
	L10							L7					
11/04/2019	5,00	0,37	0,21	5,00	1,85	0,39	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	10,00	0,37	0,21	5,00	1,85	0,39	8,00	0,21	0,60	4,00	0,82	0,49	
	15,00	0,38	0,21	5,00	1,90	0,40	12,00	0,25	0,70	4,00	1,00	0,70	
	20,00	0,37	0,21	5,00	1,85	0,39	16,00	0,21	0,70	4,00	0,84	0,59	
	25,00	0,37	0,21	5,00	1,85	0,39	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					1,95	Caudal de la sección					1,78	
3/05/2019	5,00	0,20	0,30	5,00	1,00	0,30	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	10,00	0,20	0,30	5,00	1,00	0,30	8,00	0,27	0,29	4,00	1,08	0,31	
	15,00	0,20	0,30	5,00	1,00	0,30	12,00	0,29	0,30	4,00	1,16	0,35	
	20,00	0,20	0,30	5,00	1,00	0,30	16,00	0,28	0,29	4,00	1,12	0,32	
	25,00	0,20	0,30	5,00	1,00	0,30	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					1,50	Caudal de la sección					0,99	
19/06/2019	5,00	0,06	0,21	5,00	0,30	0,06	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	10,00	0,06	0,21	5,00	0,30	0,06	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	15,00	0,09	0,25	5,00	0,45	0,11	12,00	0,07	0,49	4,00	0,28	0,14	
	20,00	0,06	0,21	5,00	0,30	0,06	16,00	0,07	0,50	4,00	0,28	0,14	
	25,00	0,06	0,21	5,00	0,30	0,06	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					0,36	Caudal de la sección					0,28	

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)		
	L10							L7						
8/07/2019	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	10,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	13,50	0,00	0,15	3,50	0,01	0,00	12,00	0,03	0,63	4,00	0,12	0,08		
	20,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,00	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	Caudal de la sección						0,00	Caudal de la sección						0,08
5/08/2019	5,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	10,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	14,50	0,02	0,15	4,50	0,09	0,01	12,00	0,07	0,40	4,00	0,28	0,11		
	20,00	0,00	0,00	5,50	0,00	0,00	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00		
	Caudal de la sección						0,01	Caudal de la sección						0,11
	L6							L5						
24/02/2019	4,00	0,30	1,02	4,00	1,20	1,22	4,00	0,46	0,82	4,00	1,84	1,51		
	8,00	0,43	1,33	4,00	1,72	2,29	8,00	0,46	0,82	4,00	1,84	1,51		
	12,00	0,43	1,33	4,00	1,72	2,29	12,00	0,58	1,20	4,00	2,32	2,78		
	16,00	0,43	1,33	4,00	1,72	2,29	16,00	0,46	0,82	4,00	1,84	1,51		
	20,00	0,30	1,10	4,00	1,20	1,32	20,00	0,46	0,82	4,00	1,84	1,51		
	Caudal de la sección						9,41	Caudal de la sección						8,82

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	
	L6							L5					
24/03/2019	4,00	0,30	1,00	4,00	1,20	1,20	4,00	0,26	1,20	4,00	1,04	1,25	
	8,00	0,57	1,30	4,00	2,28	2,96	8,00	0,38	1,25	4,00	1,52	1,90	
	12,00	0,67	1,35	4,00	2,68	3,62	19,00	0,50	1,50	11,00	5,50	8,25	
	16,00	0,66	1,30	4,00	2,64	3,43	19,50	0,38	1,25	0,50	0,19	0,24	
	20,00	0,30	1,00	4,00	1,20	1,20	20,00	0,26	1,20	0,50	0,13	0,16	
	Caudal de la sección					12,41	Caudal de la sección					11,79	
11/04/2019	4,00	0,13	0,51	4,00	0,52	0,27	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	8,00	0,15	0,53	4,00	0,60	0,32	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	12,00	0,20	0,57	4,00	0,80	0,46	12,00	0,21	0,47	4,00	0,84	0,39	
	16,00	0,15	0,53	4,00	0,60	0,32	16,00	0,21	0,91	4,00	0,84	0,76	
	20,00	0,13	0,51	4,00	0,52	0,27	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					1,62	Caudal de la sección					1,16	
3/05/2019	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	8,00	0,11	0,97	4,00	0,44	0,43	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	12,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	12,00	0,17	1,25	4,00	0,68	0,85	
	16,00	0,12	0,97	4,00	0,48	0,47	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					0,89	Caudal de la sección					0,85	

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	
	L6							L5					
19/06/2019	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	8,00	0,09	0,16	4,00	0,36	0,06	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	12,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	12,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	16,00	0,09	0,18	4,00	0,36	0,06	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					0,12	Caudal de la sección					0,00	
8/07/2019	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	12,00	0,04	0,17	4,00	0,16	0,03	12,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					0,03	Caudal de la sección					0,00	
5/08/2019	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	12,00	0,06	0,14	4,00	0,22	0,03	12,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	16,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	
	Caudal de la sección					0,03	Caudal de la sección					0,00	

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	
	L4							L1					
24/02/2019	2,00	0,65	1,20	2,00	1,30	1,56	3,00	0,62	1,15	3,00	1,86	2,14	
	4,00	0,80	1,30	2,00	1,60	2,08	6,00	0,65	1,15	3,00	1,95	2,24	
	6,00	0,90	1,50	2,00	1,80	2,70	9,00	0,95	1,20	3,00	2,85	3,42	
	8,00	0,80	1,70	2,00	1,60	2,72	12,00	0,90	1,20	3,00	2,70	3,24	
	Caudal de la sección						9,06	Caudal de la sección					
24/03/2019	2,00	0,69	1,50	2,00	1,38	2,07	3,00	0,65	1,20	3,00	1,95	2,34	
	4,00	0,85	1,70	2,00	1,70	2,89	6,00	0,85	1,27	3,00	2,55	3,24	
	6,00	0,99	1,90	2,00	1,98	3,76	9,00	0,95	1,47	3,00	2,85	4,19	
	8,00	0,90	1,85	2,00	1,80	3,33	12,00	0,99	1,50	3,00	2,97	4,46	
	Caudal de la sección						12,05	Caudal de la sección					
11/04/2019	2,00	0,30	0,42	2,00	0,60	0,25	3,00	0,32	0,30	3,00	0,96	0,29	
	4,00	0,34	0,45	2,00	0,68	0,31	6,00	0,38	0,55	3,00	1,14	0,63	
	6,00	0,50	0,45	2,00	1,00	0,45	9,00	0,57	0,56	3,00	1,71	0,96	
	8,00	0,30	0,42	2,00	0,60	0,25	12,00	0,55	0,57	3,00	1,65	0,94	
	Caudal de la sección						1,26	Caudal de la sección					
3/05/2019	2,00	0,29	0,41	2,00	0,58	0,24	3,00	0,32	0,36	3,00	0,96	0,35	
	4,00	0,27	0,47	2,00	0,54	0,25	6,00	0,45	0,36	3,00	1,35	0,49	
	6,00	0,25	0,42	2,00	0,50	0,21	9,00	0,58	0,41	3,00	1,74	0,71	
	8,00	0,27	0,45	2,00	0,54	0,24	12,00	0,55	0,38	3,00	1,65	0,63	
	Caudal de la sección						0,94	Caudal de la sección					

«Continuación»

	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	Distancia desde la orilla (m)	h (m)	U (m s ⁻¹)	ΔX (m)	Área (m ²)	Q (m ³ s ⁻¹)	
	L4							L1					
19/06/2019	2,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	3,00	0,32	0,26	3,00	0,96	0,25	
	4,00	0,16	0,14	2,00	0,32	0,04	6,00	0,32	0,26	3,00	0,96	0,25	
	6,00	0,16	0,14	2,00	0,32	0,04	9,00	0,39	0,27	3,00	1,17	0,32	
	8,00	0,16	0,14	2,00	0,32	0,04	12,00	0,33	0,27	3,00	0,99	0,27	
	Caudal de la sección						0,13	Caudal de la sección					
8/07/2019	2,00	0,13	0,12	2,00	0,26	0,03	3,00	0,27	0,30	3,00	0,81	0,24	
	4,00	0,15	0,20	2,00	0,30	0,06	6,00	0,27	0,30	3,00	0,81	0,24	
	6,00	0,17	0,25	2,00	0,34	0,09	9,00	0,32	0,35	3,00	0,96	0,34	
	8,00	0,13	0,12	2,00	0,26	0,03	12,00	0,39	0,33	3,00	1,17	0,39	
	Caudal de la sección						0,21	Caudal de la sección					
5/08/2019	2,00	0,08	0,11	2,00	0,16	0,02	3,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	
	4,00	0,08	0,12	2,00	0,16	0,02	6,00	0,25	0,35	3,00	0,75	0,26	
	6,00	0,09	0,15	2,00	0,18	0,03	9,00	0,26	0,37	3,00	0,78	0,29	
	8,00	0,09	0,15	2,00	0,18	0,03	12,00	0,27	0,37	3,00	0,81	0,30	
	Caudal de la sección						0,09	Caudal de la sección					

**ANEXO 14: PERFILES LONGITUDINALES, CAMPOS DE
CONCENTRACIÓN LONGITUDINAL Y SERIES TEMPORALES
EN LOS MESES DE MARZO Y MAYO**

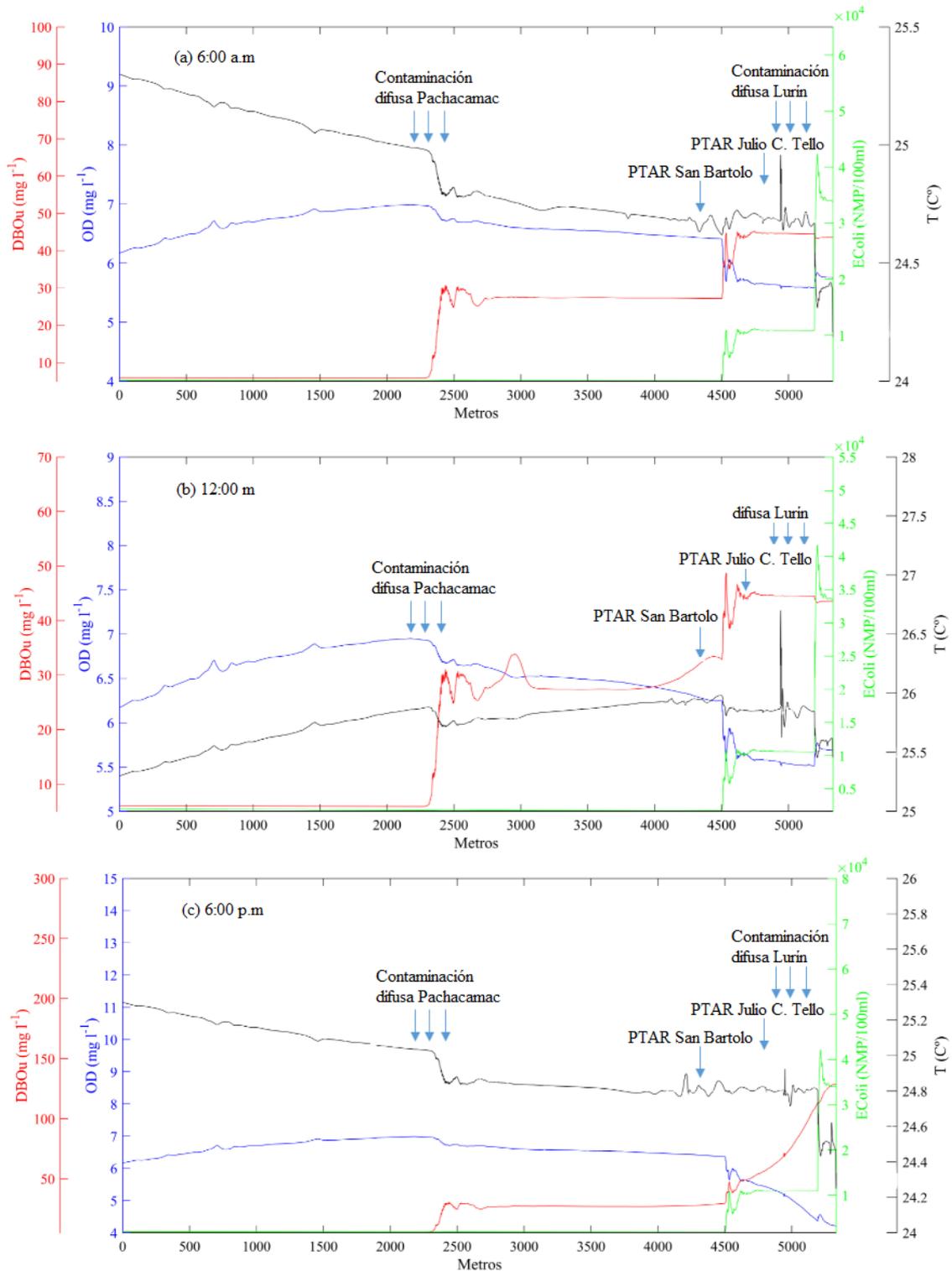


Figura 44: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, en el mes de marzo

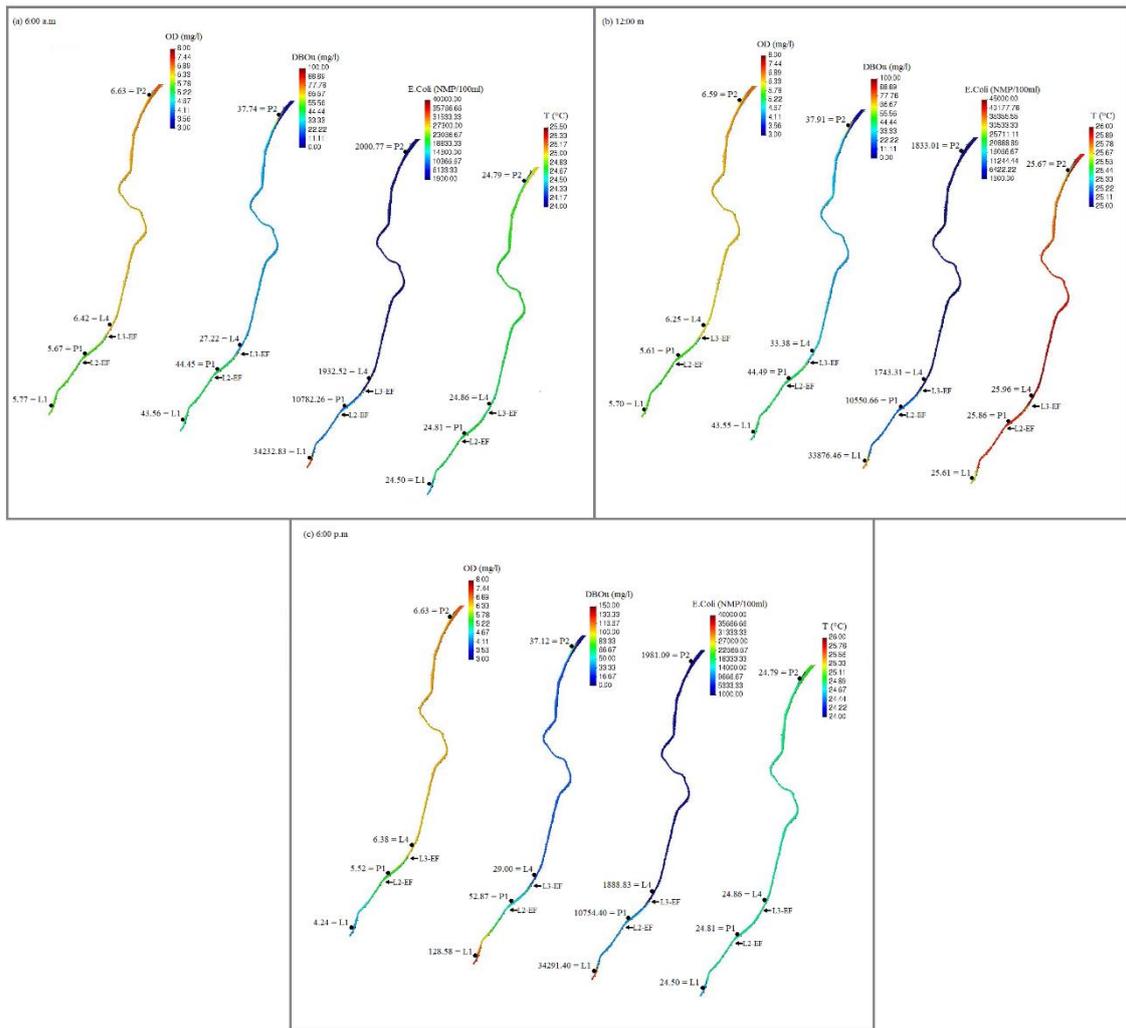


Figura 45: Campo de concentración bidimensional del OD, DBOu, E.Coli y T en (a) a las 6:00 a.m, en (b) 12:00 m y en (c) 6:00 p.m, de la simulación, en el mes de marzo

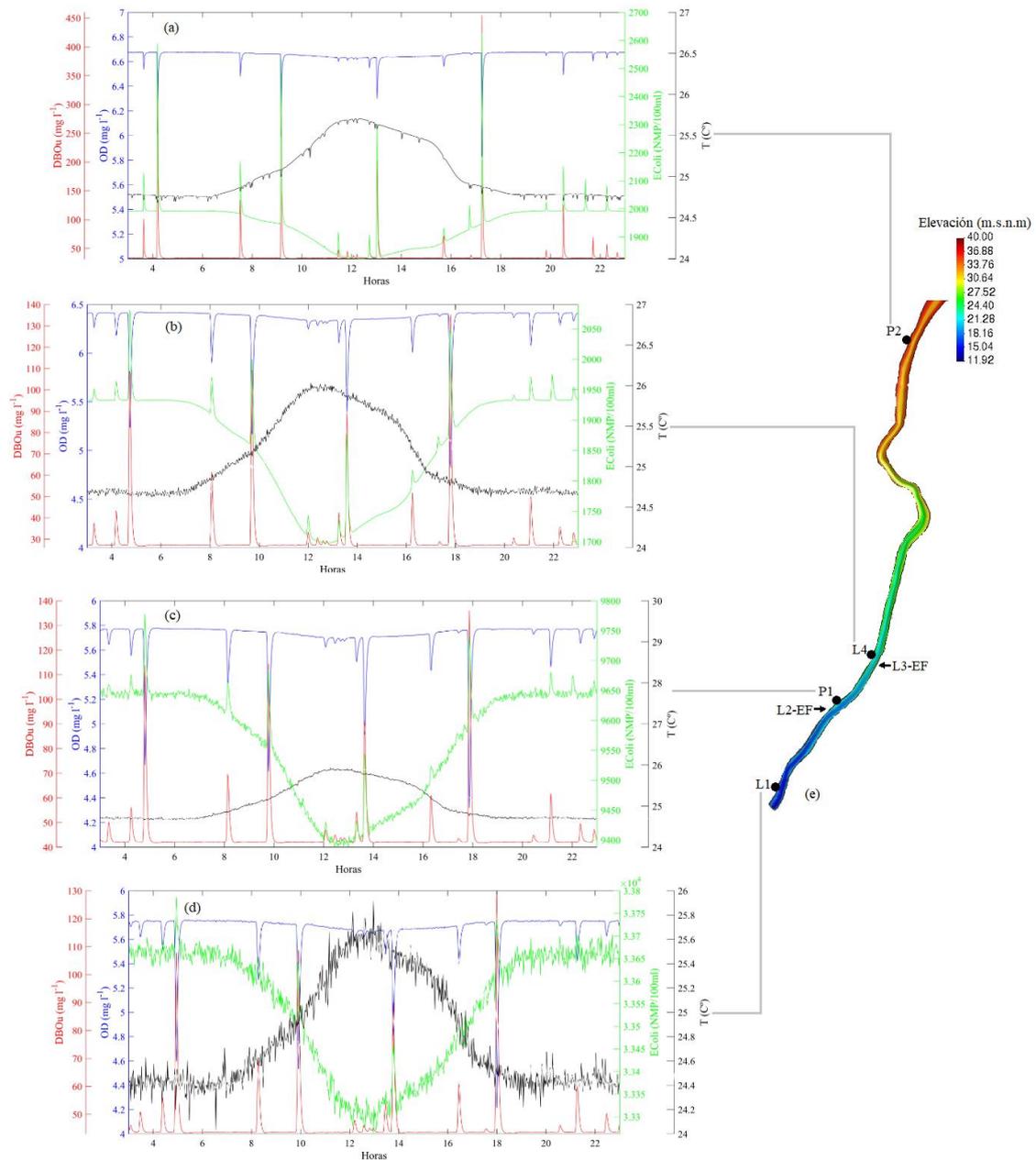


Figura 46: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e) en el mes de marzo

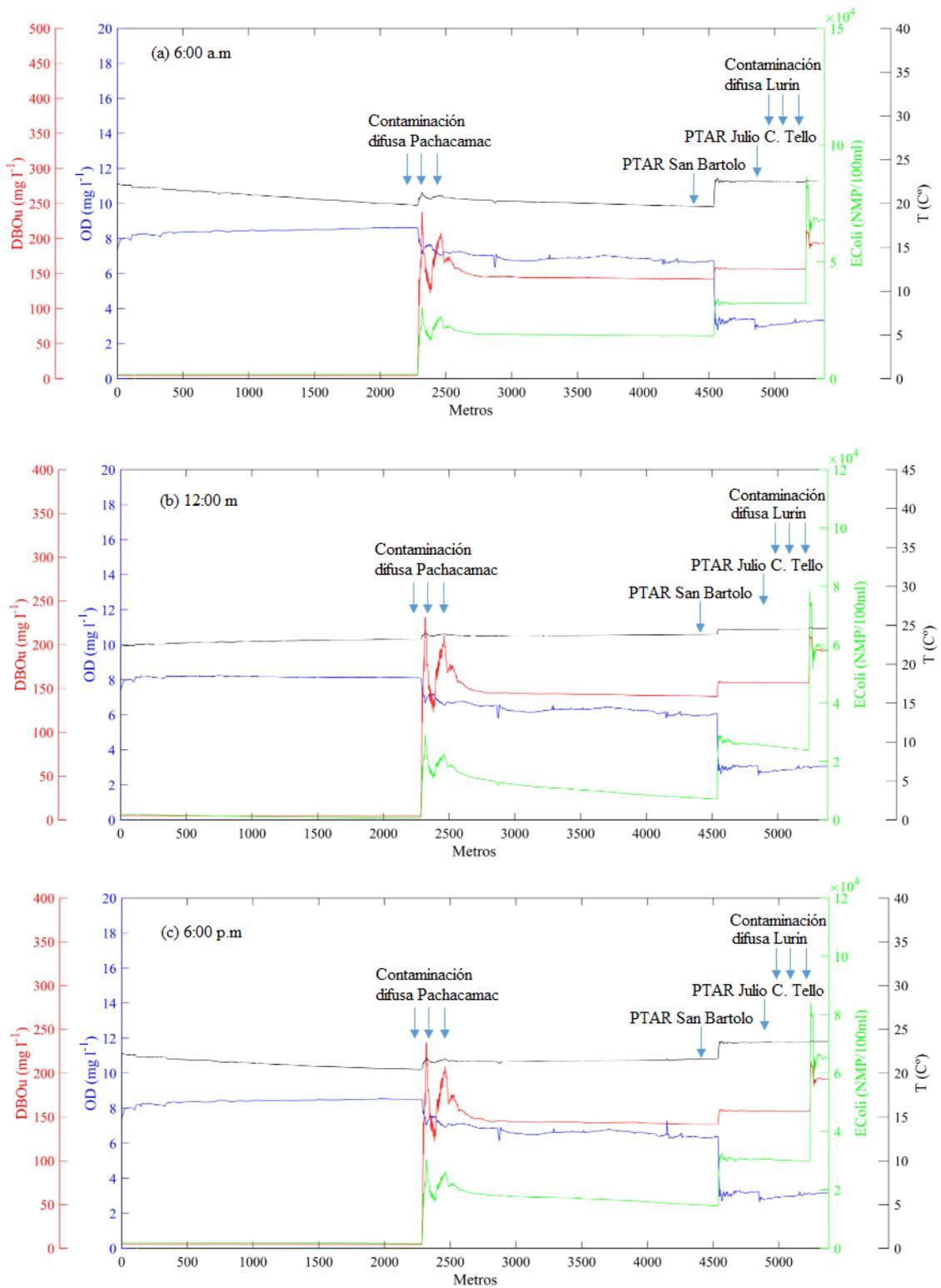


Figura 47: Perfiles longitudinales de concentración de OD, DBOu, E.Coli y T (desde L5 hasta L1); en (a) a las 6 a.m, en (b) 12 m y en (c) 6 p.m, en el mes de mayo

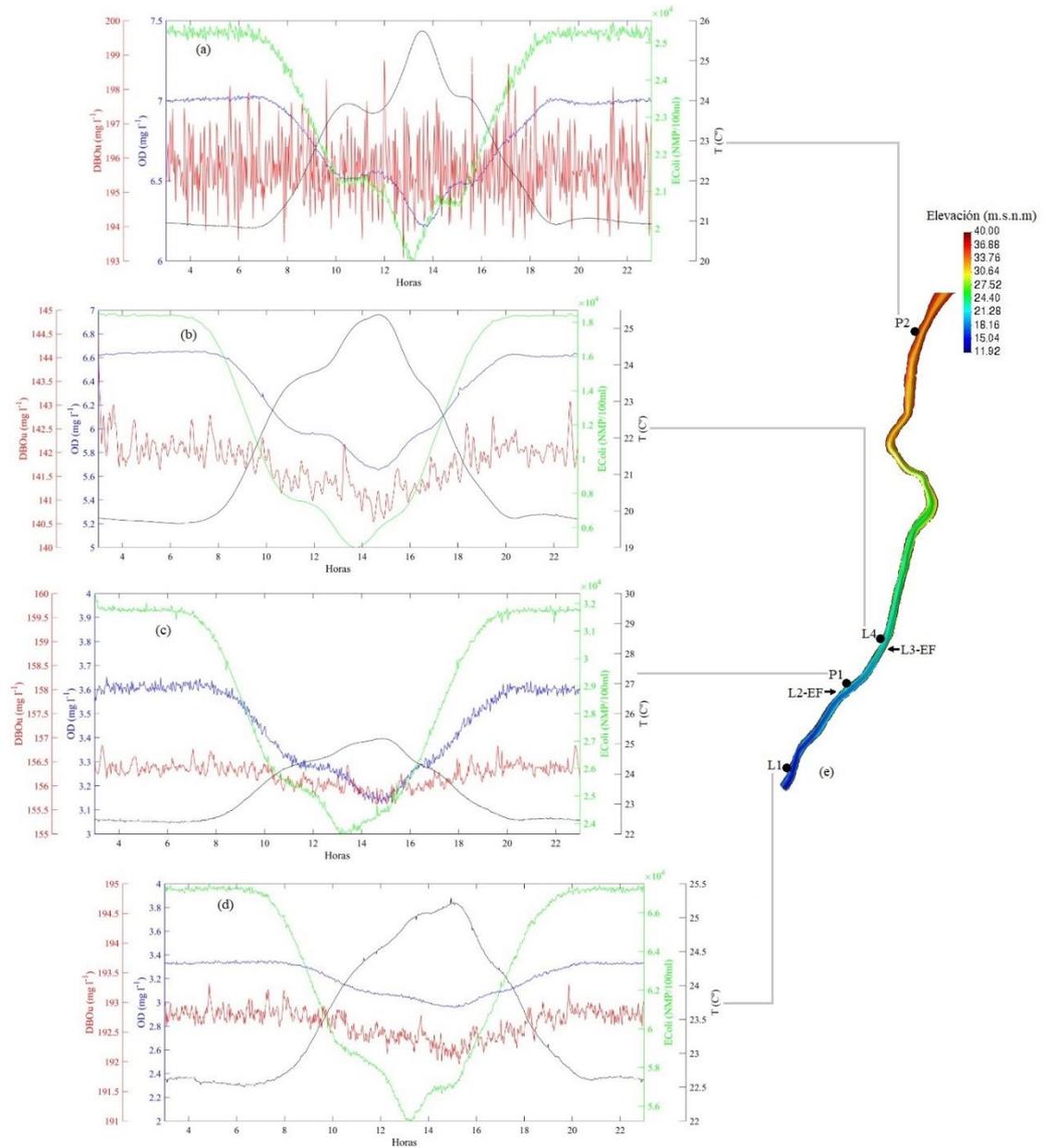


Figura 49: Series temporales simuladas en 24 horas de OD, DBOu, E.Coli, y T en el tramo bajo del río. Puntos de control: P2 (a), L4 (b), P1 (c), L1 (d) y Elevación (e), en el mes de mayo

ANEXO 15: PANEL FOTOGRÁFICO DEL MONITOREO.



Figura 50: Fotos desde la estación L1 (puente Panamericana) hasta L4 (50m antes de la PTAR San Bartolo)

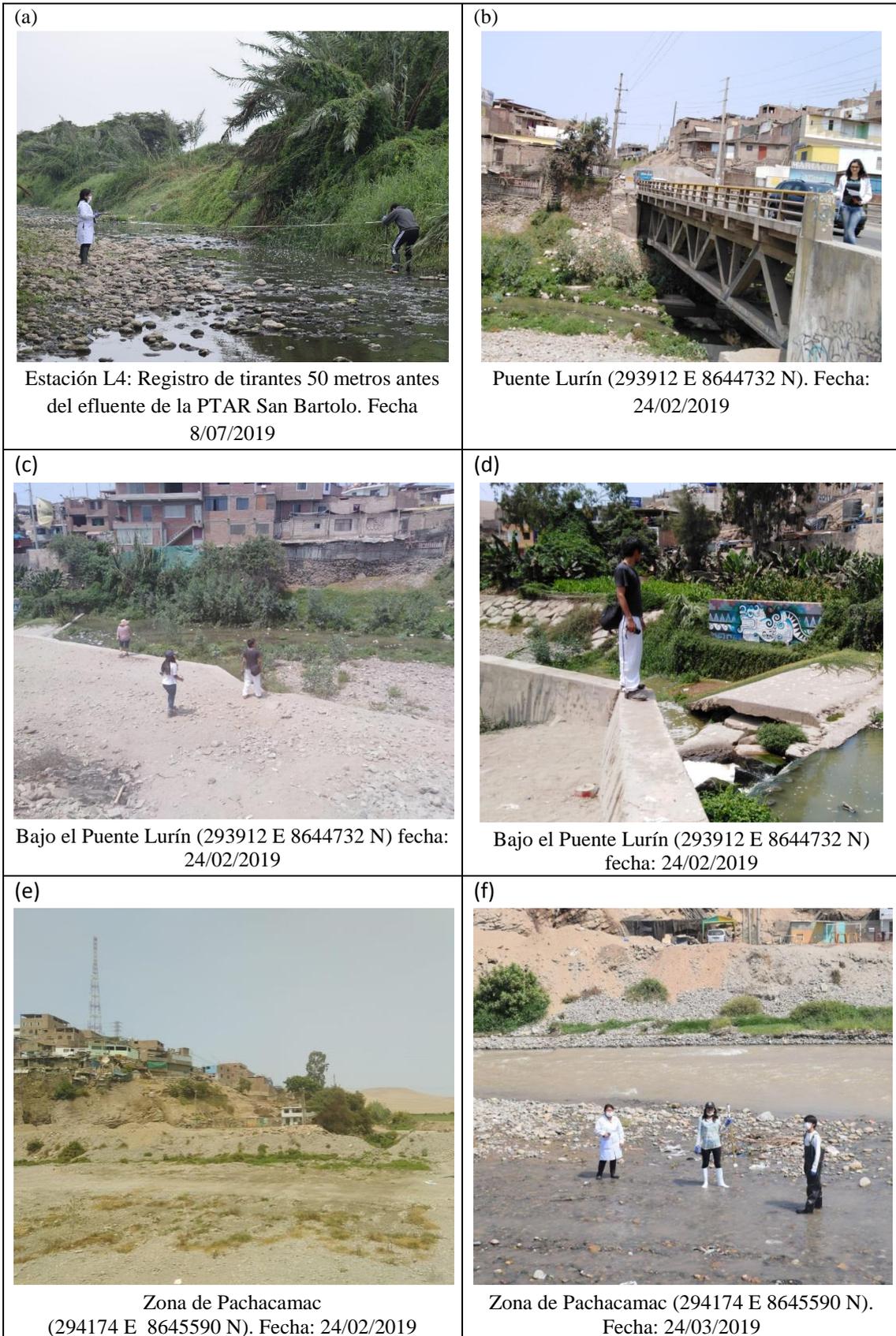


Figura 51: Fotos desde la estación L4 (50m antes de la PTAR San Bartolo) hasta la zona Pachacamac



Figura 52: Fotos desde la estación L5 (50m aguas debajo de la bocatoma Lurín) hasta L6 (puente Quebrada Verde)



Figura 53: Fotos desde la estación L6 (puente Quebrada Verde) hasta L7 (puente Guayabo)



Figura 54: Fotos desde la estación L7 (puente Guayabo) hasta la descarga del efluente L9-EF (válvula 3 de la PTAR Manchay)



Figura 55: Fotos desde la estación L9-EF (válvula 3 de la PTAR Manchay) hasta la captación de la comisión de regantes San Fernando



Figura 56: Fotos desde afloramientos a la altura del cerro Pan de Azúcar hasta la quebrada Tinajas



Figura 57: Fotos desde la quebrada Tinajas hasta la estación L12 (50m antes de la PTAR Cieneguilla)

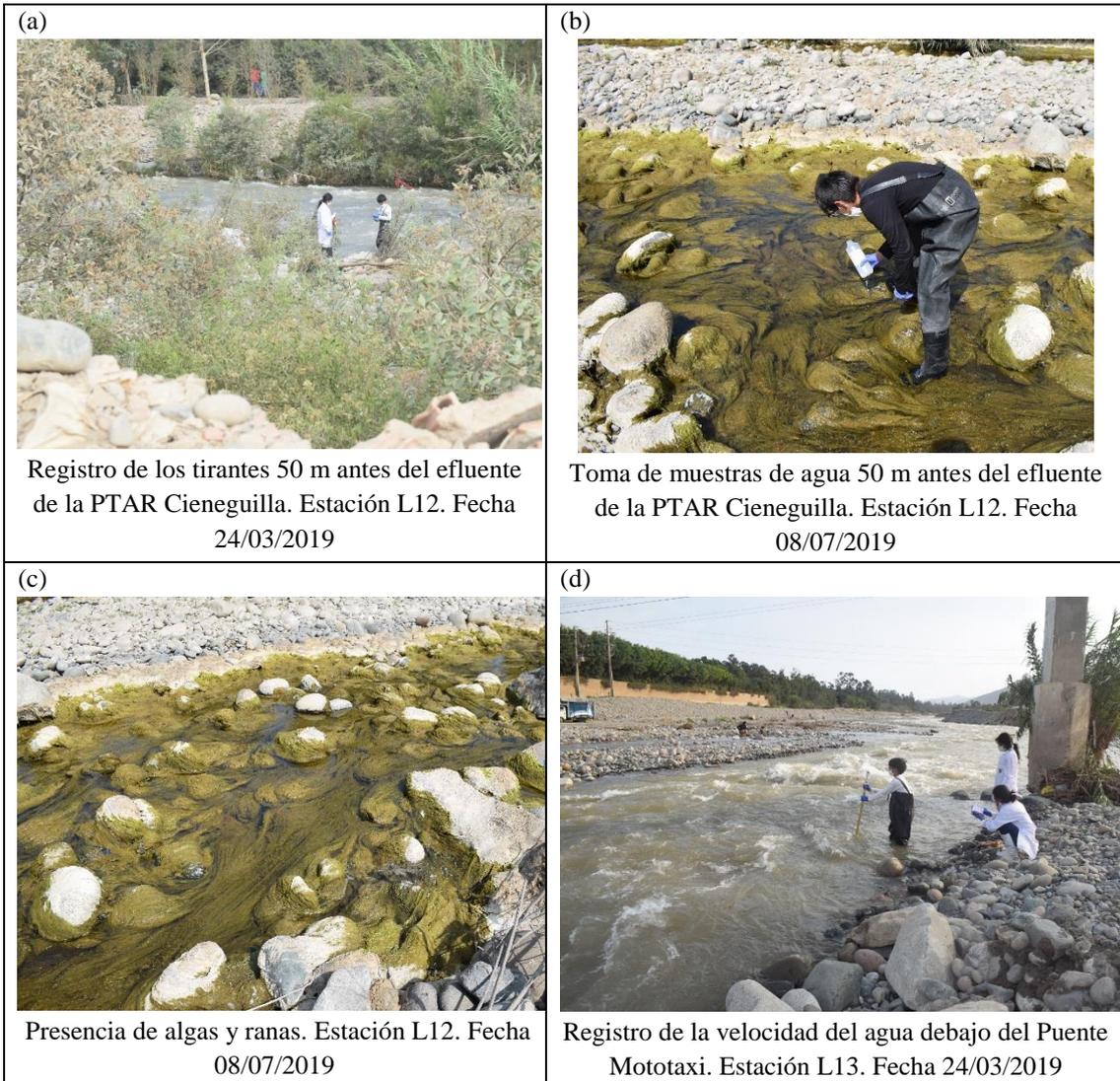


Figura 58: Fotos desde L12 (50m antes de la PTAR Cieneguilla) hasta L13 (puente Mototaxi)