

# Calidad del recurso

# hídrico de Bogotá (2012-2013)

Manuel Salvador  
Rodríguez Susa  
Lina Sabrina Porras  
Aída Juliana Martínez León  
Natalia Ramírez Zamudio



# Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2012-2013)



Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2012-2013) / Manuel Salvador Rodríguez Susa... [et al.]. -- Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Ediciones Uniandes: Alcaldía Mayor, Secretaría Distrital de Ambiente, 2014.  
231 pp.; Cd

Otros autores: Lina S. Porras, Aída Juliana Martínez, Natalia Ramírez

ISBN 978-958-774-047-9

1. Calidad del agua – Bogotá (Colombia) I. Rodríguez Susa, Manuel Salvador II. Porras, Lina Sabrina III. Martínez León, Aída Juliana IV. Ramírez, Natalia V. Universidad de los Andes (Colombia). Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental VI. Bogotá (Colombia). Alcaldía Mayor. Secretaría Distrital de Ambiente.

CDD 628.161 SBUA

Primera edición: noviembre de 2014

© Manuel Salvador Rodríguez, Lina Porras, Aída Juliana Martínez, Natalia Ramírez

© Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, respecto a esta edición

Ediciones Uniandes  
Carrera 1ª núm. 19-27, edificio Aulas 6, piso 2  
Teléfono: 3394949, ext. 2133  
Bogotá D.C., Colombia  
infeduni@uniandes.edu.co

© Secretaría Distrital de Ambiente, titular del derecho  
Avenida Caracas núm. 54-38  
Teléfonos 377 88 99  
Bogotá D. C., Colombia

ISBN CD: 978-958-774-047-9

Corrección de estilo: Ella Suárez  
Diagramación: David Reyes y Proceditor  
Imagen de cubierta: *Cuenca alta del río Fucha*, de Natalia Ramírez  
Interactividad y replicación del disco: Proceditor

Impreso en Colombia – *Printed in Colombia*

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial.

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ

Gustavo Petro Urrego  
Alcalde Mayor

María Susana Muhamad González  
Secretaria Distrital de Ambiente

Julio César Pulido Puerto  
Subsecretario General y de Control Disciplinario

Haipha Thricia Quiñones Murcia  
Directora de Control Ambiental

Giovanni José Herrera Carrascal  
Subdirector del Recurso Hídrico y del Suelo

Pedro Nel Gamba García  
Profesional Técnico de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá (RCHB)

Liliana Carolina Quintero Delgado  
Profesional de apoyo  
Grupo profesional

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Manuel Salvador Rodríguez Susa  
Profesor asociado-director

Edna Lorena Delgado Hurtado  
Especialista

Lina Sabrina Porras  
Aída Juliana Martínez León  
Natalia Ramírez Zamudio  
Asistentes de investigación (y coautoras)

Andrés Felipe Delgado  
David Alberto Sarmiento Medina  
Jesús Antonio Flórez Salamanca  
Nelson Leonardo Santiago  
Santiago Andrés Céspedes Penagos  
Walter Ramírez Vargas  
Comisión de monitoreos

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.	Ubicación geográfica puntos de monitoreo RCHB (2012-2013).....	21
FIGURA 1.2.	Esquema de toma de muestra y medición de velocidad puntual .....	22
FIGURA 1.3.	Esquema de toma de muestra con botella muestreadora .....	23
FIGURA 1.4.	Representación gráfica de parámetros <i>in situ</i> .....	25
FIGURA 1.5.	Representación gráfica: parámetros tipo 1.....	26
FIGURA 1.6.	Representación gráfica: parámetros tipo 2 .....	27
FIGURA 1.7.	Representación gráfica: curvas de duración de carga .....	30
FIGURA 2.1.	Perfil de pH: río Torca.....	34
FIGURA 2.2.	Perfil de conductividad: río Torca .....	35
FIGURA 2.3.	Perfil de oxígeno disuelto: río Torca .....	36
FIGURA 2.4.	Perfil de $DBO_5$ : río Torca.....	37
FIGURA 2.5.	Perfil de $DOO$ : río Torca.....	38
FIGURA 2.6.	Perfil de SST: río Torca .....	39
FIGURA 2.7.	Perfil de $N_{total}$ : río Torca .....	41
FIGURA 2.8.	Perfil de $P_{total}$ : río Torca.....	42
FIGURA 2.9.	Perfil de grasas y aceites: río Torca.....	43
FIGURA 2.10.	Perfil de SAAM: río Torca.....	44
FIGURA 2.11.	Perfil de coliformes fecales: río Torca .....	46
FIGURA 2.12.	Perfil de sulfuros: río Torca.....	47
FIGURA 2.13.	Perfil de fenoles: río Torca .....	48
FIGURA 2.14.	Perfil de bario: río Torca .....	48
FIGURA 2.15.	Perfil de cadmio: río Torca.....	49
FIGURA 2.16.	Perfil de cinc: río Torca .....	50
FIGURA 2.17.	Perfil de cobre: río Torca .....	51
FIGURA 2.18.	Perfil de cromo total: río Torca .....	51
FIGURA 2.19.	Perfil de níquel: río Torca.....	52
FIGURA 2.20.	Perfil de plomo: río Torca .....	52
FIGURA 2.21.	Curva de duración de carga $DBO_5$ : río Torca .....	54
FIGURA 2.22.	Curva de duración de carga $DOO$ : río Torca.....	55

FIGURA 2.23.	Curva de duración de carga SST: río Torca .....	57
FIGURA 2.24.	Curva de duración de carga $N_{total}$ : río Torca.....	58
FIGURA 2.25.	Curva de duración de carga $P_{total}$ : río Torca .....	60
FIGURA 2.26.	Curva de duración de carga grasas y aceites: río Torca .....	62
FIGURA 2.27.	Curva de duración de carga SAAM: río Torca .....	63
FIGURA 2.28.	Mapa de calidad: río Torca .....	66
FIGURA 3.1.	Perfil de pH: río Salitre .....	67
FIGURA 3.2.	Perfil de conductividad: río Salitre .....	68
FIGURA 3.3.	Perfil de oxígeno disuelto: río Salitre .....	69
FIGURA 3.4.	Perfil de $DBO_5$ : río Salitre .....	71
FIGURA 3.5.	Perfil de DQO: río Salitre .....	73
FIGURA 3.6.	Perfil de SST: río Salitre .....	76
FIGURA 3.7.	Perfil de $N_{total}$ : río Salitre.....	78
FIGURA 3.8.	Perfil de $P_{total}$ : río Salitre .....	80
FIGURA 3.9.	Perfil de grasas y aceites: río Salitre .....	82
FIGURA 3.10.	Perfil de SAAM: río Salitre .....	84
FIGURA 3.11.	Perfil de coliformes fecales: río Salitre .....	86
FIGURA 3.12.	Perfil de sulfuros: río Salitre .....	87
FIGURA 3.13.	Perfil de fenoles: río Salitre .....	88
FIGURA 3.14.	Perfil de bario: río Salitre.....	89
FIGURA 3.15.	Perfil de cadmio: río Salitre .....	89
FIGURA 3.16.	Perfil de cinc: río Salitre .....	90
FIGURA 3.17.	Perfil de cobre: río Salitre.....	91
FIGURA 3.18.	Perfil de cromo total: río Salitre .....	91
FIGURA 3.19.	Perfil de níquel: río Salitre .....	92
FIGURA 3.20.	Perfil de plomo: río Salitre.....	92
FIGURA 3.21.	Curva de duración de carga $DBO_5$ : río Salitre.....	95
FIGURA 3.22.	Curva de duración de carga DQO: río Salitre .....	97
FIGURA 3.23.	Curva de duración de carga SST: río Salitre.....	101
FIGURA 3.24.	Curva de duración de carga $N_{total}$ : río Salitre .....	104
FIGURA 3.25.	Curva de duración de carga $P_{total}$ : río Salitre.....	107
FIGURA 3.26.	Curva de duración de carga GyA: río Salitre .....	109
FIGURA 3.27.	Curva de duración de carga SAAM: río Salitre.....	112
FIGURA 3.28.	Mapa de calidad: río Salitre.....	117
FIGURA 4.1.	Perfil de pH: río Fucha.....	119
FIGURA 4.2.	Perfil de conductividad: río Fucha .....	120
FIGURA 4.3.	Perfil de oxígeno disuelto: río Fucha .....	121
FIGURA 4.4.	Perfil de $DBO_5$ : río Fucha .....	123
FIGURA 4.5.	Perfil de DQO: río Fucha.....	125
FIGURA 4.6.	Perfil de SST: río Fucha .....	128
FIGURA 4.7.	Perfil de $N_{total}$ : río Fucha .....	130

FIGURA 4.8.	Perfil de $P_{total}$ : río Fucha .....	132
FIGURA 4.9.	Perfil de grasas y aceites: río Fucha .....	134
FIGURA 4.10.	Perfil de SAAM: río Fucha .....	137
FIGURA 4.11.	Perfil de coliformes fecales: río Fucha .....	139
FIGURA 4.12.	Perfil de sulfuros: río Fucha .....	140
FIGURA 4.13.	Perfil de fenoles: río Fucha .....	141
FIGURA 4.14.	Perfil de bario: río Fucha .....	141
FIGURA 4.15.	Perfil de cadmio: río Fucha .....	142
FIGURA 4.16.	Perfil de cinc: río Fucha .....	143
FIGURA 4.17.	Perfil de cobre: río Fucha .....	143
FIGURA 4.18.	Perfil de cromo total: río Fucha .....	144
FIGURA 4.19.	Perfil de níquel: río Fucha .....	144
FIGURA 4.20.	Perfil de plomo: río Fucha .....	145
FIGURA 4.21.	Curva de duración de carga $DBO_5$ : río Fucha .....	147
FIGURA 4.22.	Curva de duración de carga $DOO$ : río Fucha .....	150
FIGURA 4.23.	Curva de duración de carga SST: río Fucha .....	153
FIGURA 4.24.	Curva de duración de carga $N_{total}$ : río Fucha .....	157
FIGURA 4.25.	Curva de duración de carga $P_{total}$ : río Fucha .....	159
FIGURA 4.26.	Curva de duración de carga GyA: río Fucha .....	162
FIGURA 4.27.	Curva de duración de carga SAAM: río Fucha .....	165
FIGURA 4.28.	Mapa de calidad: río Fucha .....	168
FIGURA 5.1.	Perfil de pH: río Tunjuelo .....	169
FIGURA 5.2.	Perfil de conductividad: río Tunjuelo .....	170
FIGURA 5.3.	Perfil de oxígeno disuelto: río Tunjuelo .....	171
FIGURA 5.4.	Perfil de $DBO_5$ : río Tunjuelo .....	173
FIGURA 5.5.	Perfil de $DOO$ : río Tunjuelo .....	174
FIGURA 5.6.	Perfil de SST: río Tunjuelo .....	176
FIGURA 5.7.	Perfil de $N_{total}$ : río Tunjuelo .....	178
FIGURA 5.8.	Perfil de $P_{total}$ : río Tunjuelo .....	180
FIGURA 5.9.	Perfil de grasas y aceites: río Tunjuelo .....	182
FIGURA 5.10.	Perfil de SAAM: río Tunjuelo .....	184
FIGURA 5.11.	Perfil de coliformes fecales: río Tunjuelo .....	186
FIGURA 5.12.	Perfil de sulfuros: río Tunjuelo .....	187
FIGURA 5.13.	Perfil de fenoles: río Tunjuelo .....	188
FIGURA 5.14.	Perfil de bario: río Tunjuelo .....	188
FIGURA 5.15.	Perfil de cadmio: río Tunjuelo .....	189
FIGURA 5.16.	Perfil de cinc: río Tunjuelo .....	190
FIGURA 5.17.	Perfil de cobre: río Tunjuelo .....	190
FIGURA 5.18.	Perfil de cromo total: río Tunjuelo .....	191
FIGURA 5.19.	Perfil de níquel: río Tunjuelo .....	192
FIGURA 5.20.	Perfil de plomo: río Tunjuelo .....	192

FIGURA 5.21.	Curva de duración de carga $DBO_5$ : río Tunjuelo .....	195
FIGURA 5.22.	Curva de duración de carga $DQO$ : río Tunjuelo .....	197
FIGURA 5.23.	Curva de duración de carga SST: río Tunjuelo .....	200
FIGURA 5.24.	Curva de duración de carga $N_{total}$ : río Tunjuelo .....	203
FIGURA 5.25.	Curva de duración de carga $P_{total}$ : río Tunjuelo .....	205
FIGURA 5.26.	Curva de duración de carga GyA: río Tunjuelo .....	209
FIGURA 5.27.	Curva de duración de carga SAAM: río Tunjuelo .....	211
FIGURA 5.28.	Mapa de calidad: río Tunjuelo .....	215
FIGURA 6.1.	Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Torca.....	224
FIGURA 6.2.	Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Salitre .....	226
FIGURA 6.3.	Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Fucha.....	228
FIGURA 6.4.	Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Tunjuelo.....	230



# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1.	Puntos de monitoreo RCHB (2012-2013) .....	20
TABLA 1.2.	Parámetros de calidad medidos en las campañas de monitoreo: tipo 1.....	24
TABLA 1.3.	Parámetros de calidad medidos en las campañas de monitoreo: tipo 2 .....	24
TABLA 1.4.	Criterios de calidad para diferentes usos del agua.....	27
TABLA 1.5.	Resultados arsénico .....	28
TABLA 2.1.	Nomenclatura: río Torca .....	33
TABLA 2.2.	Carga DBO <sub>5</sub> (rango medio de caudales) vs. metas: río Torca.....	53
TABLA 2.3.	Carga DQO (rango medio de caudales) vs. metas: río Torca .....	55
TABLA 2.4.	Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Torca .....	56
TABLA 2.5.	Carga N <sub>total</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Torca .....	59
TABLA 2.6.	Carga P <sub>total</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Torca .....	59
TABLA 2.7.	Carga grasas y aceites (rango medio caudales) vs. metas: río Torca .....	61
TABLA 2.8.	Carga de SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Torca .....	62
TABLA 2.9.	WQI río Torca: tramo 1 .....	64
TABLA 2.10.	WQI río Torca: tramo 2.....	64
TABLA 3.1.	Carga DBO <sub>5</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre .....	93
TABLA 3.2.	Carga DQO (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre .....	98
TABLA 3.3.	Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre .....	99
TABLA 3.4.	Carga N <sub>total</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre.....	102
TABLA 3.5.	Carga P <sub>total</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre.....	105
TABLA 3.6.	Carga GyA (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre.....	109
TABLA 3.7.	Carga SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre.....	111
TABLA 3.8.	WQI río Salitre: tramo 1 .....	113
TABLA 3.9.	WQI río Salitre: tramo 2 .....	113
TABLA 3.10.	WQI río Salitre: tramo 3 .....	115

TABLA 3.11.	wQI río Salitre: tramo 4 .....	116
TABLA 4.1.	Carga $DBO_5$ (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	146
TABLA 4.2.	Carga $DOO$ (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	151
TABLA 4.3.	Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	151
TABLA 4.4.	Carga $N_{total}$ (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	154
TABLA 4.5.	Carga $P_{total}$ (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	159
TABLA 4.6.	Carga GyA (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	162
TABLA 4.7.	Carga SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha .....	163
TABLA 4.8.	wQI río Fucha: tramo 1 .....	164
TABLA 4.9.	wQI río Fucha: tramo 2 .....	166
TABLA 4.10.	wQI río Fucha: tramo 3 .....	166
TABLA 4.11.	wQI río Fucha: tramo 4 .....	167
TABLA 5.1.	Carga $DBO_5$ (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	195
TABLA 5.2.	Carga $DOO$ (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	198
TABLA 5.3.	Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	201
TABLA 5.4.	Carga $N_{total}$ (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	204
TABLA 5.5.	Carga $P_{total}$ (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	206
TABLA 5.6.	Carga de GyA (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	207
TABLA 5.7.	Carga SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo .....	211
TABLA 5.8.	wQI río Tunjuelo: tramo 1 .....	212
TABLA 5.9.	wQI río Tunjuelo: tramo 2 .....	212
TABLA 5.10.	wQI río Tunjuelo: tramo 3 .....	214
TABLA 5.11.	wQI río Tunjuelo: tramo 4 .....	214
TABLA 6.1.	Resumen de cumplimiento parámetros tipo 1: río Torca .....	217
TABLA 6.2.	Resumen de parámetros tipo 2: río Torca .....	218
TABLA 6.3.	Resumen cumplimiento de parámetros tipo 1: río Salitre .....	218
TABLA 6.4.	Resumen de parámetros tipo 2: río Salitre .....	219
TABLA 6.5.	Resumen cumplimiento de parámetros tipo 1: río Fucha .....	219
TABLA 6.6.	Resumen de parámetros tipo 2: río Fucha .....	220
TABLA 6.7.	Resumen cumplimiento de parámetros tipo 1: río Tunjuelo .....	220
TABLA 6.8.	Resumen de parámetros tipo 2: río Tunjuelo .....	221
TABLA 6.9.	Composición típica de agua residual doméstica cruda .....	222
TABLA 6.10.	Concentración promedio: parámetros críticos .....	222
TABLA 6.11.	Resumen de variables críticas y evolución del índice de calidad del agua (wQI): río Torca .....	223
TABLA 6.12.	Resumen de variables críticas y evolución wQI: río Salitre .....	225
TABLA 6.13.	Resumen de variables críticas y evolución wQI: río Fucha .....	227
TABLA 6.14.	Resumen de variables críticas y evolución wQI: río Tunjuelo .....	229

# SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

A	Agrícola
BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno, xileno
CH <sub>1</sub>	Consumo humano (tratamiento convencional)
CH <sub>2</sub>	Consumo humano (desinfección)
Cormagdalena	Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
DSE	Disruptores del sistema endocrino
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
GyA	Grasas y aceites
Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
L/s	Litros por segundo
MDLC	Multilinear Discrete Lag-Cascade Method of Channel Routing
NMP	Número más probable
NSE	<i>Normalized sum of excursions</i> (cantidad normalizada de excursiones)
N <sub>total</sub>	Nitrógeno total
OD	Oxígeno disuelto
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
P	Pecuario
PAH	<i>Polycyclic aromatic hydrocarbon</i> (hidrocarburos aromáticos policíclicos)
PCB	Policloruros de bifenilo
PFF	Preservación de la flora y la fauna
pH	Potencial de hidrógeno
POC	Pesticidas organoclorados
POP	Pesticidas organofosforados
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
P <sub>total</sub>	Fósforo total

R1	Recreativo (contacto primario)
R2	Recreativo (contacto secundario)
RBP	<i>Rapid bioassessment protocols</i> (protocolos de bioevaluación rápida)
RCHB	Red de Calidad Hídrica de Bogotá
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
UNAL	Universidad Nacional de Colombia
WQI	<i>Water quality index</i> (índice de calidad de agua)
ZMI	Zona de minas inundadas

# PRÓLOGO

La contaminación y, por lo tanto, la imposibilidad de acceder directamente al recurso hídrico de buena calidad son problemas que actualmente enfrenta la humanidad. En este sentido y reconociendo el agua como un derecho vital y sagrado para los bogotanos, el plan de desarrollo Bogotá Humana de la Alcaldía Mayor ha adoptado políticas que proponen transformaciones sociales, culturales y ambientales que buscan adaptar la ciudad al cambio climático, lo cual conlleva implementar medidas para la adecuada gestión del agua desde su captación, uso y hasta su disposición. Lo anterior por medio de herramientas como la participación ciudadana, la educación ambiental y el fortalecimiento institucional. El propósito de la administración es posicionar a Bogotá como una de las ciudades de Colombia que cuenten con un plan de adaptación y mitigación para resistir los fenómenos naturales extremos a los cuales nos vemos sometidos hoy en día.

El cambio climático que vinculamos a las actividades antrópicas causa modificaciones drásticas en el comportamiento del ciclo hidrológico natural, y esto —sumado a la presencia de descargas de vertimientos urbanos— reduce drásticamente la capacidad de asimilación de contaminantes de los ríos, que se evidencia en la baja resiliencia que tienen los recursos naturales en las áreas urbanas. Esta problemática termina afectando a toda la población que no visualiza los ríos como un recurso, sino como un problema al cual se le da la espalda.

La contaminación de las fuentes de agua de la ciudad, debido a la industrialización, a la urbanización desordenada, entre otros factores, afecta gravemente la calidad del recurso hídrico, compuesto —entre otros— por humedales, quebradas, canales y, principalmente, los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo. A pesar de ello, la calidad en los tramos altos de los ríos localizados en los cerros orientales es buena, al punto que ofrecen soporte a la vida acuática y servicios ambientales a comunidades cercanas que realizan en ellos actividades recreacionales. Así, esta condición se convierte en una visión ideal que se debe extender a todos los cuerpos de agua de la capital colombiana.

La Secretaría Distrital de Ambiente, como autoridad ambiental urbana, desde la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo, adelanta el control a los usuarios y a actividades que generan descargas de vertimientos sobre el sistema hídrico superficial y el sistema de alcantarillado de Bogotá, en un intento por disminuir el impacto causado sobre el recurso. La Red de Calidad Hídrica de Bogotá (RCHB) monitorea la calidad de los principales cuerpos de agua de la ciudad, lo cual permite realizarle un seguimiento al estado de su calidad y generar las acciones encaminadas a su protección y recuperación. El conocimiento adquirido mediante la RCHB ha hecho posible que la ciudad avance en el ordenamiento del recurso y cuente con elementos de planificación

enfocados en el mejoramiento, como son los objetivos de calidad y metas de reducción de cargas contaminantes. Además de la identificación de los sectores productivos y áreas de la ciudad que impactan de manera considerable los cuerpos hídricos, se ejecutan actividades de control propias de la autoridad ambiental.

Adicionalmente, la RCHB —como elemento de investigación— ha aportado documentos técnicos base para adoptar normas locales de calidad de vertimientos, enfocadas en mejorar las condiciones de calidad de las descargas de aguas residuales a fuentes superficiales, al suelo y al alcantarillado público, de manera que se reduzcan las cargas contaminantes que llegan a los cuerpos de agua de la ciudad y sus efectos finales en el río Bogotá, aplicando principios de armonía regional, gradación normativa y rigor subsidiario.

La gestión que se ha venido realizando en los últimos años —en la que se han invertido cuantiosos recursos financieros y técnicos, encaminados al mejoramiento de la calidad del recurso hídrico de la capital— han sido insuficiente para obtener cambios y beneficios notables; sin embargo, ya se empiezan a evidenciar cambios y conservación de la calidad en los tramos iniciales de los ríos.

Este logro incentiva los esfuerzos institucionales, pero esta política demanda recursos humanos, tecnológicos y normativos; de ahí el compromiso actual del plan de desarrollo Bogotá Humana, que ha priorizado acciones con el fin de generar transformaciones sociales para defender lo fundamental: la vida.

La Secretaría Distrital de Ambiente, consciente de que el aprendizaje adquirido no es suficiente, en colaboración con la Universidad de los Andes, estableció espacios de investigación, participación y socialización del estado y comportamiento de la calidad de los ríos bogotanos; además, utilizó diversas herramientas de gestión que involucran la administración, la protección y la conservación de la calidad del recurso hídrico, entre las que se encuentran: el monitoreo del agua superficial, la modelación de la calidad del agua, la gestión de sistemas de información hidrológica, la valoración de bienes y servicios ecosistémicos y la legislación ambiental aplicada.

La gestión del agua es equivalente a la gestión de conflictos entre seres humanos y de estos con el entorno. Un sistema de gestión del agua y de sus cuencas se crea para evitar dichos conflictos, prevenirlos y solucionarlos. El ser humano debe aprender a vivir con estos y prepararse para enfrentarlos adecuadamente, sabiendo además que la escasez relativa de agua se incrementará constantemente con el tiempo, producto del crecimiento económico, demandas sociales y cambios climáticos. La competencia entre usuarios será cada vez es mayor y despiadada, por lo que se requiere disponer de leyes e instituciones para gestionar adecuadamente el sistema.

Esperamos que esta publicación suministre la información necesaria para la comprensión del papel que cumple la RCHB, de manera que se impulsen transformaciones culturales que busquen la recuperación del medio ambiente en nuestra Ciudad. De este modo, se busca promover la apropiación de la ciudadanía en lo concerniente a los bienes y servicios ambientales que prestan estos ecosistemas, a través de mejores hábitos de consumo responsable y la optimización del sistema hídrico de la ciudad, mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

# 1. MONITOREO Y ANÁLISIS DE DATOS DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ

La metodología propuesta en el Contrato de Ciencia y Tecnología 01202 de 2009, al igual que en las anteriores fases de monitoreo de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá (RCHB), involucró la revisión de los puntos de monitoreo que hasta la fecha poseía la red. El tipo de monitoreo realizado históricamente y los parámetros de caracterización de aguas medidos fueron mantenidos con objeto de robustecer la información que alimenta la base de datos de la RCHB, la cual —hasta la fecha— ha demostrado ser apropiada para el establecimiento del estado del recurso hídrico superficial principal de la ciudad.

## 1.1. Sitios de monitoreo

Para el programa de monitoreo de la RCHB 2012-2013 se mantuvo el número de puntos de monitoreo de treinta:

- Cuatro en el río Torca.
- Seis en el río Salitre.
- Ocho en el río Fucha.
- Diez en el río Tunjuelo.
- Dos en la cuenca media del río Bogotá.

Para la evaluación del número de puntos constituyentes de la RCHB en el periodo de monitoreo 2012-2013, la Universidad de los Andes evaluó la pertinencia y ubicación de cada uno de estos puntos. Como resultado de esta evaluación, se mantuvieron en su totalidad los sitios de monitoreo existentes para todos los ríos. Al igual que en el año previo, algunos de los puntos de monitoreo fueron ligeramente desplazados teniendo en cuenta como criterio el desarrollo de la longitud de mezcla de vertimientos existentes aguas arriba de estos, y las obras de mantenimiento adelantadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). En la tabla 1.1 y en la figura 1.1 se presentan los sitios de monitoreo y su ubicación.

## 1.2. Esquema de monitoreo

Estas campañas se realizaron siguiendo la metodología empleada en ejercicios previos de caracterización (Secretaría Distrital de Ambiente y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá [SDA y EAAB], 2008; Universidad de los Andes, 2010 y 2011), en los cuales durante ventanas temporales de dos horas se realizaba un

TABLA 1.1. Puntos de monitoreo RCHB (2011-2012)

Tramos	Puntos*			
	Río Torca	Río Salitre	Río Fucha	Río Tunjuelo
1	Bosque de Pinos [101430N -103150E]	Parque Nacional [103150N-101430E]	El Delirio [95541N-101917E]	La Regadera [78878N-92546E]
2	Calle 161 [115852N -104449E]**	Arzobispo carrera 7ª [103269N-101304E]	Carrera 7ª río Fucha [87861N-98913E]	Universidad Antonio Nariño [87211N-94924E] Yomasa [89744N-944458E]
	Jardines de Paz [120219N -104166E] Club Guaymaral (San Simón) [122505N-104294E]	Carrera 30 x calle 53 [105138N-99824E]	Avenida Ferrocarril [101760N-95059E]	Doña Juana [92188N-94556E]
3		Carrera 30 x calle 53 [105138N-99824E] Avenida 68 [110463N-99600E]	Avenida Las Américas [103708N-94267E]	Doña Juana [92188N-94556E] Barrio México [95841N-93717E] San Benito [96416N-93264E]
			Avenida Boyacá [105699N -94338E]	Makro Autopista Sur [100543N-91694E]
4		Avenida 68 [110463N-99600E]	Visión Colombia [106314N-93698E]	Makro Autopista Sur [100543N-91694E]
		Transversal 91 [113219N-98080E]	Fucha Zona Franca [107236N-92496E]	Transversal 86 [101812N-88598E]
		Salitre con Alameda [115901N-94878E]	Fucha con Alameda [107503N-91611E]	Puente La Independencia [102519N-86982E]
				Isla Pontón San José [102175N-84478E]

\* Los puntos sobre el río Bogotá corresponden a Puente Común [129614N-105344] y Cierre [103951N-83032E].

\*\* Coordenadas norte-este-Sistema Magna-Sirgas.

monitoreo compuesto isovolumétrico de agua cada 30 minutos, en cada uno de los puntos constituyentes de la RCHB. Se buscó que cada punto de la RCHB fuera monitoreado seis veces en la mañana (entre las 05:00 y las 12:00 horas) y seis veces en la tarde (entre las 12:00 y las 19:00 horas). Estas campañas se dividieron en dos etapas: la primera de ellas se desarrolló entre el 13 de agosto y el 10 de noviembre de 2012, y la etapa dos, entre el 4 de febrero y el 22 de junio de 2013.

### 1.2.1. Logística de campo

Para la realización de estas campañas se utilizó una comisión de campo, conformada por un vehículo, un coordinador de comisión y dos auxiliares de campo. Durante los monitoreos la comisión de campo fue acompañada periódicamente por equipos de verificación integrados por personal de la Universidad de los Andes, los cuales supervisaron las actividades desarrolladas en campo.



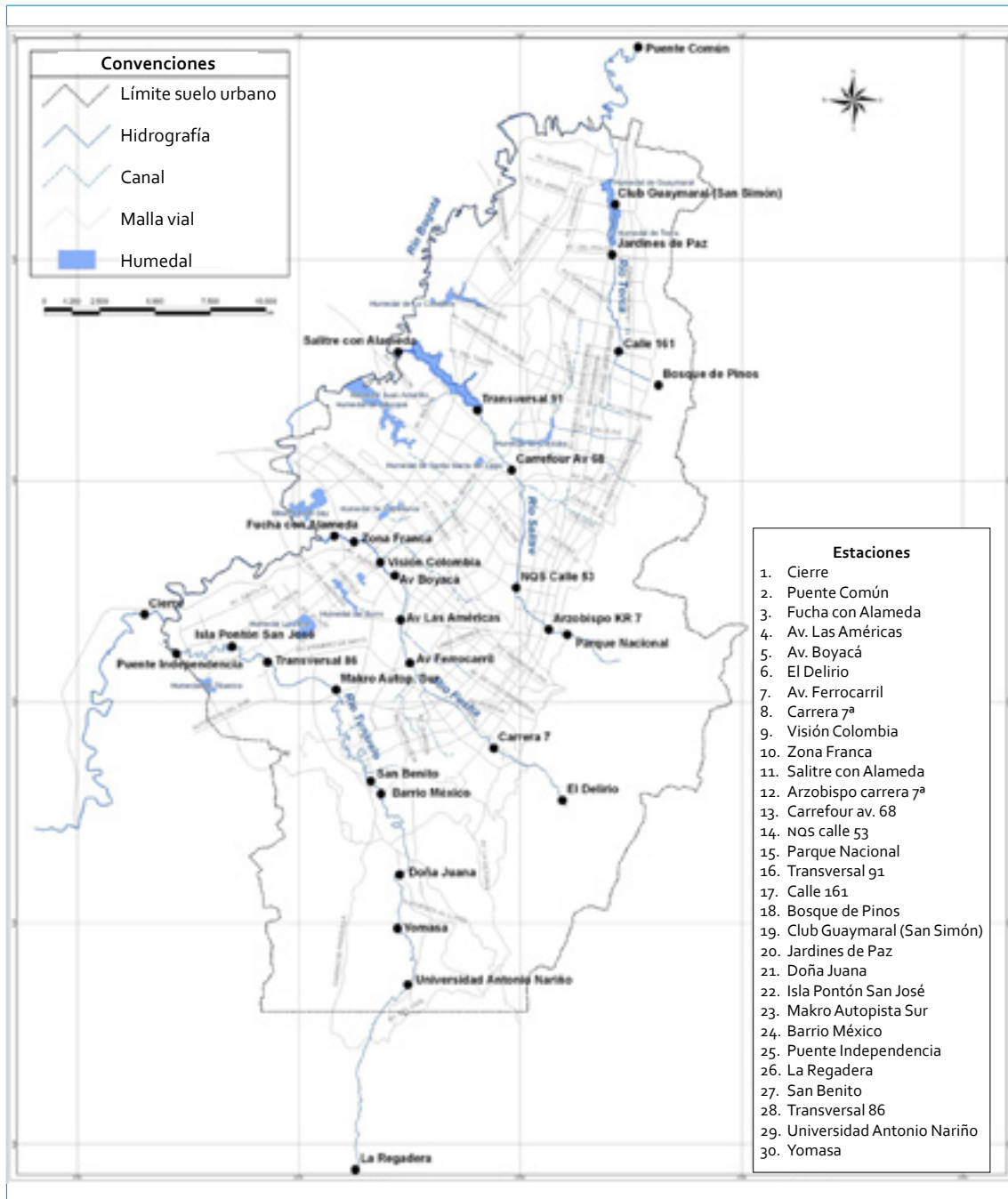


FIGURA 1.1. Ubicación geográfica puntos de monitoreo RCHB (2012-2013)

### 1.2.2. Aforo y parámetros *in situ*

Para la medición de caudal en los sitios de monitoreo se utilizó el método *área-velocidad*, en el cual la velocidad de la corriente se debe medir con un correntómetro debidamente calibrado (ya sea de cazoletas con eje vertical o de hélice con eje horizontal), a fin de tomar lecturas a diferentes porcentajes de la profundidad: 20 %, 60 % y 80 % (figura 1.2), en verticales definidas por el aforador, según los criterios mínimos de ejecución, los cuales ya se habían usado en monitoreos previos de la RCHB (Norma NE-001-Medición de caudales por el método *área-velocidad*; SDA y EAAB, 2008). Los aforos por vadeo en corrientes pequeñas se llevaron a cabo con varilla de extensión, y por suspensión en bote cautivo, en corrientes intermedias o mayores.

De acuerdo con las recomendaciones dadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), en su documento preliminar de *Me-*

*diciones hidrométricas* (1999), dependiendo de la disponibilidad de tiempo, del ancho de la sección transversal, de la profundidad del agua, de las características del lecho y de los cambios de nivel, se utilizó alternadamente el método de un punto y el método de dos puntos para la medición de la velocidad media en la vertical, como se describe a continuación:

*Método de un punto.* La medición de la velocidad puntual se midió al 60 % de la profundidad total por debajo de la superficie. Esta medición se asumió como la velocidad media en la vertical. Este método se usó en secciones del río donde la profundidad no superó un metro.

*Método de dos puntos.* La medición de la velocidad puntual se realizó al 20 % y al 80 % de la profundidad total por debajo de la superficie. El promedio de estos dos valores se asumió como la velocidad media en la vertical. Este método fue utilizado en secciones del río donde la profundidad superó un metro. Para

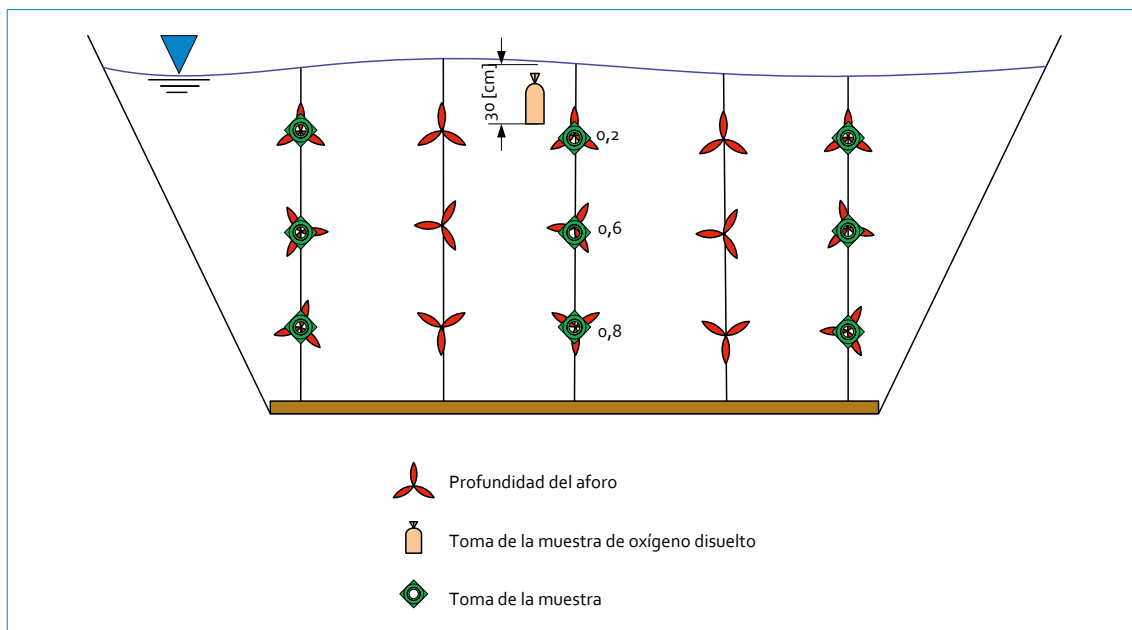


FIGURA 1.2. Esquema de toma de muestra y medición de velocidad puntual

los dos métodos se tuvo la precaución de que el aparato quedara sumergido por completo y la no resuspensión del sedimento.

Para obtener muestras representativas del agua del río para la lectura de los parámetros *in situ* se utilizó una botella muestreadora (Universidad Nacional de Colombia-Cormagdalena, 2007; Universidad Nacional de Colombia-Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá [UNAL-EAAB, 2009] o un balde plástico, dependiendo de la profundidad del río observada (figura 1.3). Las muestras se tomaban en tres verticales a lo largo de la sección transversal del respectivo punto de monitoreo. Posteriormente, la muestra era integrada y bien mezclada para obtener una correcta y confiable medición de la conductividad, pH y temperatura *in situ*. Los valores reportados por cada equipo de medición se consignaron en formatos previamente diseñados para tal fin, acondicionados con espacios para las anotaciones de variables ambientales, climatológicas y particularidades relevantes que se presentaran en el transcurrir de la campaña de monitoreo.

### 1.2.3. Toma de muestras

Las muestras puntuales se refrigeraron para su preservación hasta el final del monitoreo. Transcurrido el periodo de monitoreo se mezclaron las muestras integradas a volúmenes iguales para obtener una muestra compuesta del volumen deseado, la cual se preservó siguiendo los protocolos del Laboratorio Ambiental de la Universidad de los Andes y las guías de monitoreo del Ideam. La muestra compuesta se transportó con la debida cadena de custodia al Laboratorio Ambiental (Universidad de los Andes) para realizarle los análisis de laboratorio respectivos. En el momento de tomar las muestras puntuales en la sección del río se tomaron las precauciones necesarias para evitar la resuspensión de sedimentos y la afectación posterior de la representatividad de la muestra líquida.

Los análisis de caracterización sobre las muestras de agua variaron según el tipo de análisis deseado. Se realizaron caracterizaciones fisicoquímicas de tipo 1 y de tipo 2. En las tablas 1.2 y 1.3 se listan los determinantes

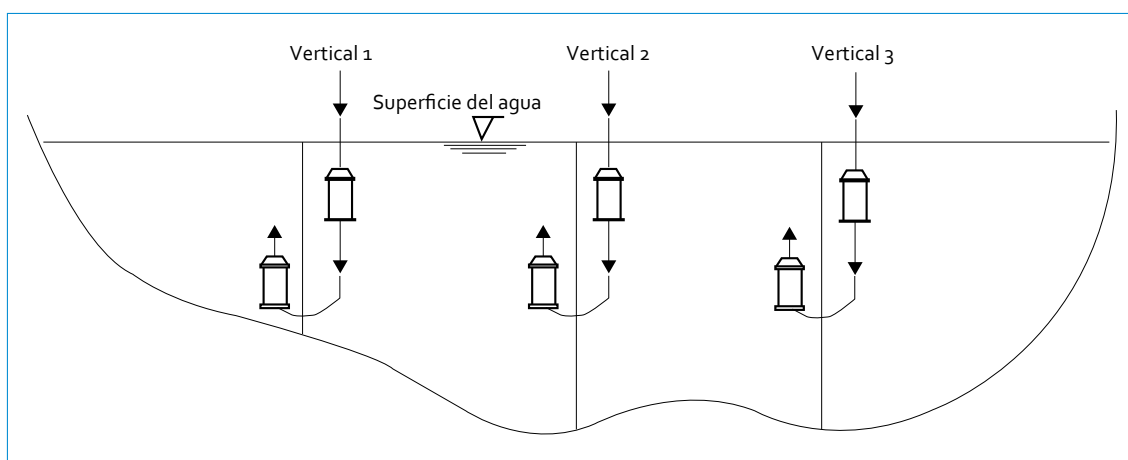


FIGURA 1.3. Esquema de toma de muestra con botella muestreadora

TABLA 1.2. Parámetros de calidad medidos en las campañas de monitoreo: tipo 1

Parámetros				
Coliformes fecales	Coliformes totales	DBO <sub>5</sub>	DQO	Fósforo
Grasas y aceites	Nitrógeno total (NTK+NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> )	SAAM	SST	Oxígeno disuelto y pH

TABLA 1.3. Parámetros de calidad medidos en las campañas de monitoreo: tipo 2

Parámetros				
Coliformes fecales	Coliformes totales	DBO <sub>5</sub>	DQO	Fósforo
Grasas y aceites	Nitrógeno total (NTK+NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> )	SAAM	SST	Oxígeno disuelto y pH
Alcalinidad	Nitrógeno amoniacal	Arsénico	Bario	Cadmio
Cianuro	Cinc	Cobre	Cromo	Dureza
Fenoles	Manganeso	Mercurio	Níquel	Plomo
Sulfuros				

de calidad del agua que se midieron en las muestras compuestas para los dos diferentes tipos de caracterizaciones.

### 1.3. Procesamiento, validación y análisis de datos

Una vez se obtuvo toda la información de calidad de los cuerpos de agua, se procedió al procesamiento, a la validación y al análisis, donde fue necesario tener en cuenta dos elementos importantes: a) el análisis estadístico y b) la representación gráfica. Dentro del análisis estadístico se realizaron operaciones que describen de forma numérica el conjunto de la información obtenida de la RCHB. Incluyen las medidas de tendencia como el promedio y la mediana, las medidas de dispersión como los rangos y las medidas de clasificación relativa como los percentiles. Las representaciones gráficas se utilizaron para identificar patrones y relación entre la información y permitieron

identificar posibles anomalías, asociadas con eventos inesperados que influyen en el análisis de la información.

Con el fin de observar la distribución o la posición relativa de un dato frente al conjunto de datos, se utilizaron los percentiles, los cuales también pueden ser útiles para resumir los datos. Un percentil es el valor de un dato que es mayor o igual a un porcentaje determinado de los valores de datos. Los percentiles que, por lo general, se usan para análisis estadístico son los cuartiles de los datos 25, 50 y 75. El percentil 50 también se conoce como la mediana y los percentiles 25 y 75 se utilizan para evaluar la dispersión de la información.

Las medidas más utilizadas para determinar la tendencia central de los datos son la media y la mediana. La media o promedio significa el centro de la muestra o de un conjunto de valores; sin embargo, para las distribuciones asimétricas, la media no es necesariamente el mismo que el valor medio. La mediana es el

valor que está en la mitad de los datos cuando estos son ordenados de menor a mayor, separando la mitad superior de una muestra, de la mitad inferior. Cuando hay un número par de observaciones, entonces no hay valor medio único, por lo que se toma la media de los dos valores centrales.

Dependiendo de la frecuencia de seguimiento, los datos no pueden reflejar las condiciones crónicas, sino que proporcionan una vista instantánea de las condiciones en el momento de la toma de muestras, especialmente cuando se trata de parámetros que son altamente variables y sensibles a los impactos localizados. Para aprovechar al máximo el análisis de los datos, se representaron gráficamente todos los datos obtenidos hasta el momento de la fase 1 (segundo semestre de 2009) a la fase 4 (primer semestre de 2013).

Dependiendo del tipo de contaminante analizado se generaron diferentes tipos de gráficos para representar el comportamiento de los datos en el tiempo y a lo largo de los ríos. Los parámetros medidos *in situ* (pH, tem-

peratura, conductividad y oxígeno disuelto) se representaron como se muestra en la figura 1.4. El análisis de los datos *in situ* permite indicar cambios verdaderamente significativos en el tiempo y entre varios puntos de monitoreo en la corriente, segregados por cuenca alta, media y baja.

Los parámetros tipo 1 (demanda bioquímica de oxígeno [DBO<sub>5</sub>], demanda química de oxígeno [DQO], sólidos suspendidos totales [SST], grasas y aceites [GyA], sustancias activas al azul de metileno [SAAM], fósforo total [P<sub>total</sub>], nitrógeno [N<sub>total</sub>], coliformes totales y fecales) se analizaron por medio de diagramas de caja (por tramo del río), las cuales tienen las siguientes características:

- La tapa de arriba y de abajo de la caja representan los percentiles 75 y 25 de las muestras, respectivamente. La distancia entre las dos tapas son los rangos intercuantiles. Cuando se analiza la longitud de la caja, se puede observar la amplitud o la variabilidad de las observaciones.

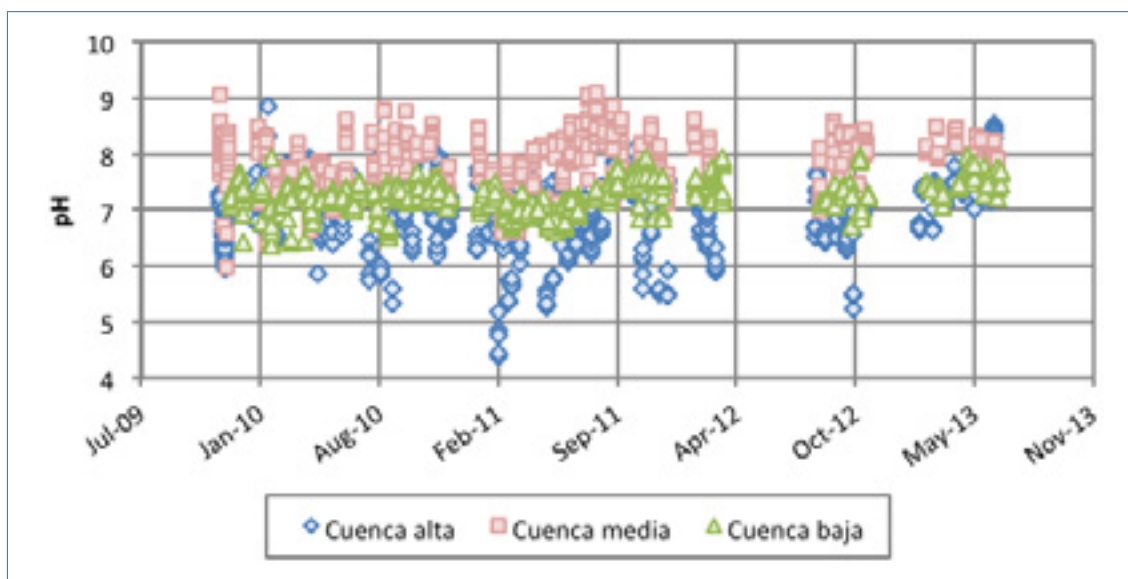


FIGURA 1.4. Representación gráfica de parámetros *in situ*

- Los bigotes son las líneas que se extienden por debajo y por encima de la caja. Estos vienen desde los rangos intercuartiles hasta la observación más lejana (valor máximo o mínimo).
- Las observaciones fuera de los bigotes se identifican como valores extremos o atípicos, los cuales se encuentran 1,5 veces más lejos del rango intercuartil de la tapa de arriba o de debajo de la caja.

Adicionalmente, se incluyó la mediana y la media dentro de cada diagrama de caja, y el valor del objetivo de calidad y las concentraciones de una agua residual doméstica típica (figura 1.5), con el fin de ver no solo cómo se comportan los contaminantes a lo largo del tiempo y de la corriente, sino frente a los estándares de calidad y si las condiciones actuales se asemejan al agua residual doméstica sin tratar.

Finalmente los parámetros tipo 2 (alcalinidad, dureza, fenoles, nitrógeno amoniacal, sulfuros y metales) se evaluaron con el fin de determinar el grado de deterioro de un cuerpo de agua frente a un potencial uso (figura 1.6).

De esta manera se pueden identificar puntos específicos o condiciones particulares donde se supera un estándar de calidad, bien sea para mantener la vida acuática, para proteger la salud humana o para su potencial uso para agua potable (tabla 1.4). Además, es una manera fácil de ilustrar la frecuencia y la magnitud en las que se infringen los criterios de calidad.

La mayoría de los criterios de calidad utilizados para la evaluación de los parámetros tipo 2 los estableció la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos, la cual ha compilado los criterios nacionales de calidad del agua recomendados para la protección de la vida acuática y la salud humana en las aguas superficiales. Las concentraciones están clasificadas en *criterion maximum concentration* (CMC) y *criterion continuous concentration* (CCC), que por sus siglas en inglés significan criterio de concentración máxima relativo a un efecto agudo y criterio de concentración continua relativo a un efecto crónico, respectivamente. Los criterios para agua potable son los establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

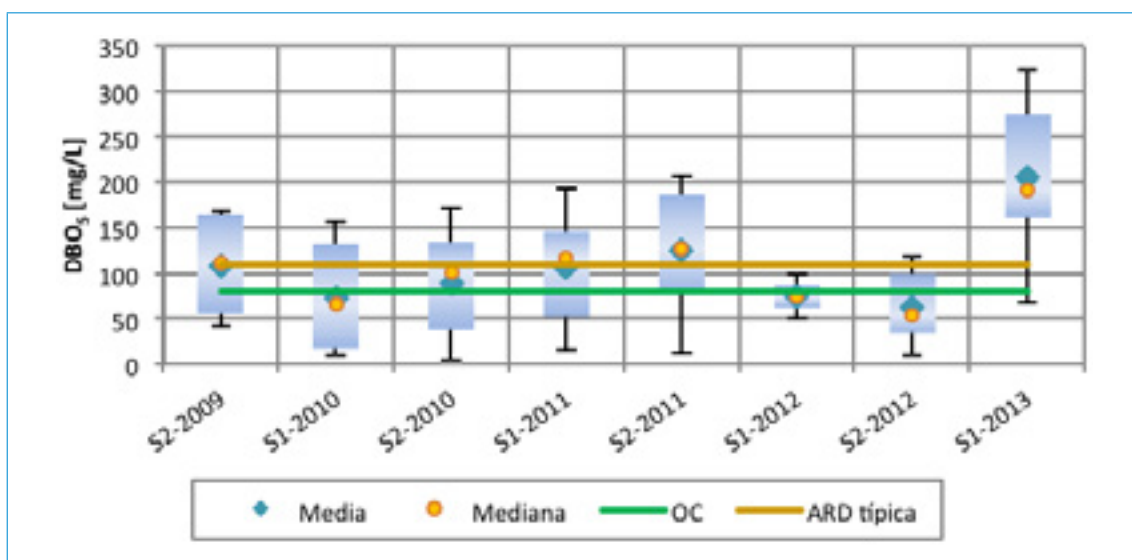


FIGURA 1.5. Representación gráfica: parámetros tipo 1

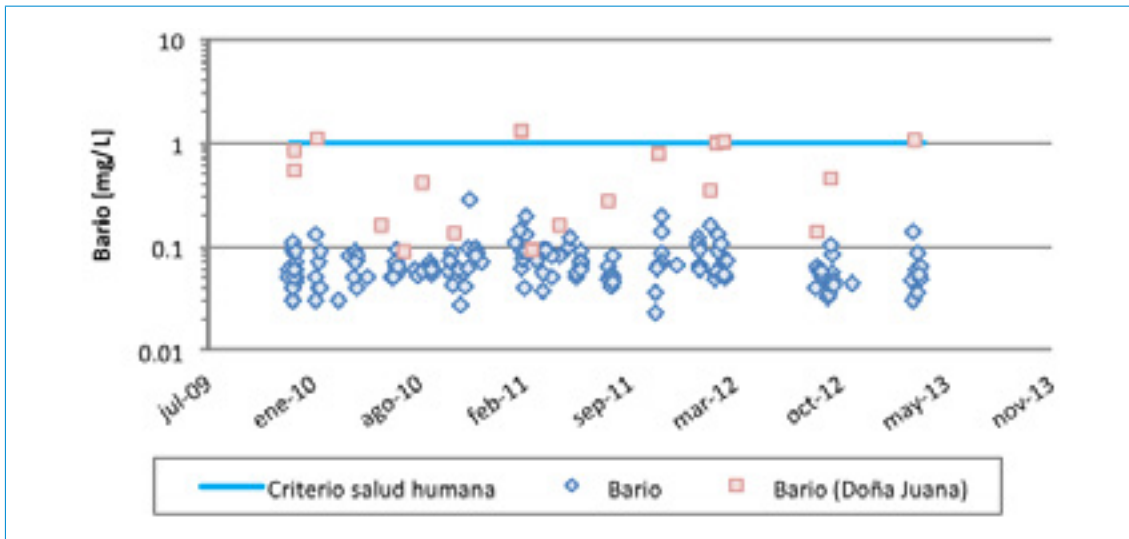


FIGURA 1.6. Representación gráfica: parámetros tipo 2

TABLA 1.4. Criterios de calidad para diferentes usos del agua

	Vida acuática		Salud humana		Efecto orga- noléptico (mg/L)	Agua potable (mg/L)
	CMC (mg/L)	CCC (mg/L)	Agua + organismos (mg/L)	Solo organismos (mg/L)		
Alcalinidad	-	20 mg/L	-	-	-	-
Dureza	-	-	-	-	-	100
Fenoles	-	-	10	860	0,3	-
Sulfuros	-	0,002	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal	-	5,89*	-	-	-	-
		7,02**				
Arsénico	0,34	0,15	0,000018	0,00014	-	0,01
Bario	-	-	1	-	-	0,7
Cadmio	0,002	0,00025	-	-	-	0,003
Cinc	0,12	0,12	7,4	26	5	4
Cobre	-	-	1,3	-	1	2
Cromo total	0,57***	0,074***	-	-	-	0,05
Manganeso	-	-	0,05	0,1	-	-
Níquel	0,47	0,052	0,61	4,6	-	0,07
Plomo	0,065	0,0025	-	-	-	0,01

CMC: criterio de concentración máxima; CCC: criterio de concentración continua.

\* Donde las primeras etapas de vida de los peces están presentes (pH 7 y temperatura 12 °C).

\*\* Donde las primeras etapas de vida de los peces están ausentes (pH 7 y temperatura 12 °C).

\*\*\* Cromo trivalente (Cr III).

Para dureza = 100 mg/L.

Se encontró que en casi la totalidad de las muestras el arsénico fue inferior al límite de detección (0,007 mg/L). En la tabla 1.5 se presentan la cantidad de datos de arsénico que fueron no detectables y los que marcaron concentraciones superiores al límite de detección

(casillas resaltadas). Dentro del total de datos de arsénico, el 98 % está por debajo del límite de detección. Un comportamiento similar se presentó en las demás fases, lo cual indica que el agua de los ríos evaluados no presenta impacto alguno por contaminación con arsé-

TABLA 1.5. Resultados arsénico

Río	Punto	n	Arsénico (mg/L)	n	Arsénico (mg/L)
Torca	Bosque de Pinos	2	<0,007	1	<0,021
	Calle 161	2	<0,007	1	<0,021
	Jardines de Paz	2	<0,007	1	<0,021
	San Simón	2	<0,007	1	<0,021
Salitre	Parque Nacional	2	<0,007	1	<0,021
	Arzobispo	2	<0,007	1	<0,021
	Calle 53	2	<0,007	1	<0,021
	Carrefour	2	<0,007	1	<0,021
	Transversal 91	2	<0,007	1	<0,021
	Salitre Alameda	2	<0,007	1	<0,021
Fucha	Delirio	2	<0,007	1	<0,021
	Carrera 7	2	<0,007	1	<0,021
	Ferrocarril	2	<0,007	1	<0,021
	Américas	1	<0,004	1	<0,021
		1	0,009		
	Avenida Boyacá	2	<0,007	1	<0,021
	Visión Colombia	2	<0,007	1	<0,021
	Zona Franca	2	<0,007	1	<0,021
Fucha Alameda	2	<0,007			
Tunjuelo	La Regadera	2	<0,007	1	<0,021
	UAN	2	<0,007	1	<0,021
	Yomasa	2	<0,007	1	<0,021
	Doña Juana	2	<0,007	1	<0,021
	Barrio México	2	<0,007	1	<0,021
	San Benito	2	<0,007	1	<0,021
	Makro Sur	2	<0,007	1	<0,021



Río	Punto	n	Arsénico (mg/L)	n	Arsénico (mg/L)
Tunjuelo	Transversal 86	1	<0,004	1	<0,021
		1	0,008		
	Puente Independencia	2	<0,007	1	<0,021
	Isla Pontón	2	<0,007	1	<0,021
Bogotá	Puente Común	2	<0,007	1	<0,021
	Cierre	2	<0,007	1	<0,021

nico. Es importante resaltar que no es común encontrar arsénico como elemento libre en aguas naturales, debido a que es poco soluble.

Finalmente, los valores extremos o atípicos son las observaciones que se encuentran muy lejos del rango intercuartil. En el análisis estadístico de la información se obtuvieron 1066 datos atípicos, lo que corresponde a cerca del 7% del total de los datos analizados. Estos valores no fueron tenidos en cuenta en el análisis.

#### 1.4. Estimación de cargas

La estimación de cargas contaminantes aportadas en cada uno de los tramos de los cuatro principales ríos de la ciudad se viene realizando en función del comportamiento en 24 horas. Esta aproximación se implementó con el fin de lograr un mejor acercamiento a la dinámica de la carga en los ríos, la cual, en algunos tramos, está influenciada por la descarga permanente de aguas residuales. Para la estimación de cargas diarias fue preciso usar información secundaria, puesto que los monitoreos se han realizado en ventanas temporales de dos horas. La información secundaria se obtuvo de los monitoreos de 24 horas en diferentes puntos de la RCHB hechos durante el Convenio 069 de 2007, también suscrito entre la SDA y la Universidad de los Andes.

Con el fin de evaluar las cargas en función de la condición hidrológica se utilizaron curvas de duración. La metodología se adoptó de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos, la cual establece el análisis de la curva de caudales, el cual estudia la frecuencia acumulada de los datos históricos de flujo durante un periodo determinado. Una curva de caudales relaciona los valores de caudal con el porcentaje de tiempo en que esos valores se han alcanzado o excedido. El uso de porcentaje de tiempo proporciona una escala uniforme que oscila entre 0 y 100. Por lo tanto, se considera la gama completa de caudales de un corriente de agua. Los caudales bajos se exceden la mayoría de veces, mientras que las crecientes se superan con poca frecuencia. El eje x de la curva duración de caudal representa el porcentaje de tiempo como en una distribución de frecuencia acumulativa —los valores van ordenados de mayor a menor (de 100 a 0)— y el eje y representa el valor de caudal asociado con ese porcentaje de tiempo.

Las curvas de caudales sirven como base para el desarrollo de las curvas de duración de carga, en los que pueden basarse las cargas máximas totales para un cuerpo de agua. Una curva de duración de carga se desarrolla multiplicando el caudal por el objetivo de la calidad del agua para el contaminante de interés y un factor de conversión de unidades (línea azul en

la figura 1.6). Cuando se utiliza la metodología de curva de duración de carga en el desarrollo de una carga máxima, es importante tener en cuenta que toda la curva de duración debe ser aplicada para dar cuenta de los distintos regímenes de flujo. Los datos de calidad del agua, tomados con alguna medida de caudal en el momento del muestreo, se pueden utilizar para calcular una carga instantánea (puntos rojos y morados en la figura 1.6). Usando el porcentaje relativo de excedencia de la curva de duración de caudal que corresponde al caudal en el momento del monitoreo, la carga calculada se puede representar en un formato de curva de duración (figura 1.7).

Al mostrar las cargas instantáneas calculadas a partir de los datos de calidad del agua y el caudal promedio diario del monitoreo (expresada como un intervalo de curva de duración de caudales), se desarrolla un patrón que describe las características del deterioro de calidad del agua. Las cargas que se encuentran por encima de la curva indican la superación del criterio de la calidad, mientras que las de debajo de la curva de duración de carga muestran el cumplimiento con el estándar.

Con el fin de comprobar el cumplimiento de las cargas en la condición de rango medio de caudal (entre el percentil 40 y 60) se estableció como criterio que las cargas instantáneas no deberían exceder el criterio de calidad en más del 10% de las muestras, el cual está representado por percentil 90 de las cargas estimadas en dicha condición (línea roja en la figura 1.7). De esta manera, la reducción de carga calculada asegura que no más del 10% de las muestras es superior a la norma.

### 1.5. Índice de calidad

La evaluación de la calidad del agua con respecto a los objetivos de calidad se implementó por medio del Índice de Calidad del Agua (woi). Este se calcula a partir de tres variables F1, F2 y F3, que representan diferentes aproximaciones para determinar la calidad del agua:

- F1 (alcance): representa la cantidad de parámetros que no alcanzan los objetivos al menos una vez. Los parámetros corresponden a los que están establecidos en los objetivos de calidad que se

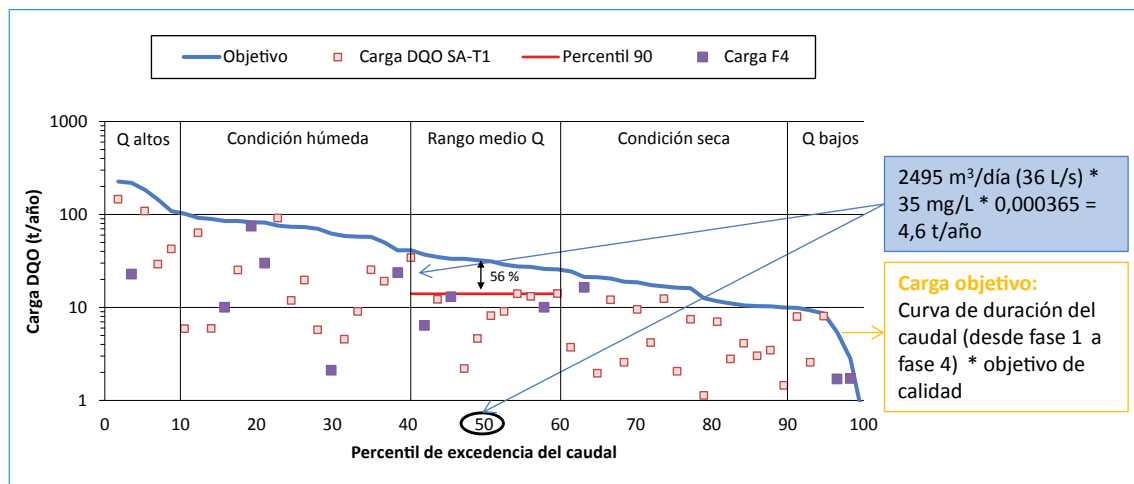


FIGURA 1.7. Representación gráfica: curvas de duración de carga

van a evaluar. Para el caso de la Resolución 5731 de 2008 son 10 parámetros (oxígeno disuelto, pH, DBO5, DQO, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales, aceites y grasas, SST y SAAM).

- F2 (frecuencia): representa la cantidad de datos que no alcanzan los objetivos de calidad. Cuando se está calculando el WQI de un tramo pueden haber varios datos para un mismo parámetro, bien sea porque se están teniendo en cuenta varias campañas o porque un tramo tiene varios puntos de monitoreo.
- F3 (amplitud): representa la cantidad por la cual los datos no alcanzan los objetivos.

Los resultados del WQI se clasifican según las siguientes categorías:

**Excelente** [95 < WQI < 100]: la calidad del agua alcanza los objetivos de calidad; la calidad está protegida sin que las condiciones deseables estén amenazadas.

**Buena** [80 < WQI < 94]: la calidad del agua alcanza los objetivos de calidad; la calidad está protegida en un menor nivel. Sin embargo, las condiciones deseables pueden estar amenazadas.

**Regular** [65 < WQI < 79]: la calidad del agua no alcanza los objetivos de calidad; ocasionalmente las condiciones deseables están amenazadas.

**Marginal** [45 < WQI < 64]: la calidad del agua no alcanza los objetivos de calidad; frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas.

**Pobre** [0 < WQI < 44]: la calidad del agua no alcanza los objetivos de calidad; la mayoría de veces la calidad está amenazada o afectada, por lo general apartada de las condiciones deseables.



## 2. RÍO TORCA

### 2.1. Resultados del monitoreo físicoquímico

Las concentraciones de los contaminantes evaluados varían notablemente entre los puntos de monitoreo del río Torca, al mostrar que los vertimientos de aguas residuales generan un impacto negativo en la calidad del agua. Es importante resaltar que en el río Torca, a partir del segundo semestre del 2010, se replantearon los emplazamientos de los puntos de monitoreo, a fin de generar información de la calidad del agua que evidenciara los puntos más críticos de contaminación. Durante los monitoreos de 2006-2007 y 2009-2010 el río contó con tres puntos (Canal El Cedro, Makro y Club Guaymaral). Luego del replanteamiento de los puntos se amplió la cobertura para tener un total de cuatro puntos (Bosque de Pinos, Calle 161, Jardines de Paz y San Simón). Es importante mencionar que estos cambios dificultan la comparación por la distancia entre ellos y las descargas que se reciben aguas arriba. Los únicos puntos que pueden ser comparables en el tiempo son Club Guaymaral y San Simón pues, aunque se distancien aproximadamente 3 km, no existen cambios hidráulicos importantes o aportes que alteren la calidad de un punto a otro.

A continuación se presenta un análisis temporal de la evolución de los parámetros de calidad a lo largo del tiempo. La nomenclatura en las gráficas de cada parámetro se detalla en la tabla 2.1.

TABLA 2.1. Nomenclatura: río Torca

Nomenclatura	Periodo
H	Históricos: 2006-2007
F1	Fase 1: 2009-2010
F2	Fase 2: 2010-2011
F3	Fase 3: 2011-2012

#### 2.1.1. Validación de datos: diagramas de cajas

##### 2.1.1.1. pH

En la figura 2.1 se presenta el comportamiento del pH en el río Torca, donde se pueden observar leves diferencias en los rangos dependiendo de la cuenca, sin evidenciar cambios drásticos. El promedio de los valores de pH de la cuenca alta y de la baja estuvo alrededor de 7,2 unidades; mientras que el valor medio en la cuenca media fue de 7,6 unidades, lo que mostró ser el sector del río con los valores de pH más altos.

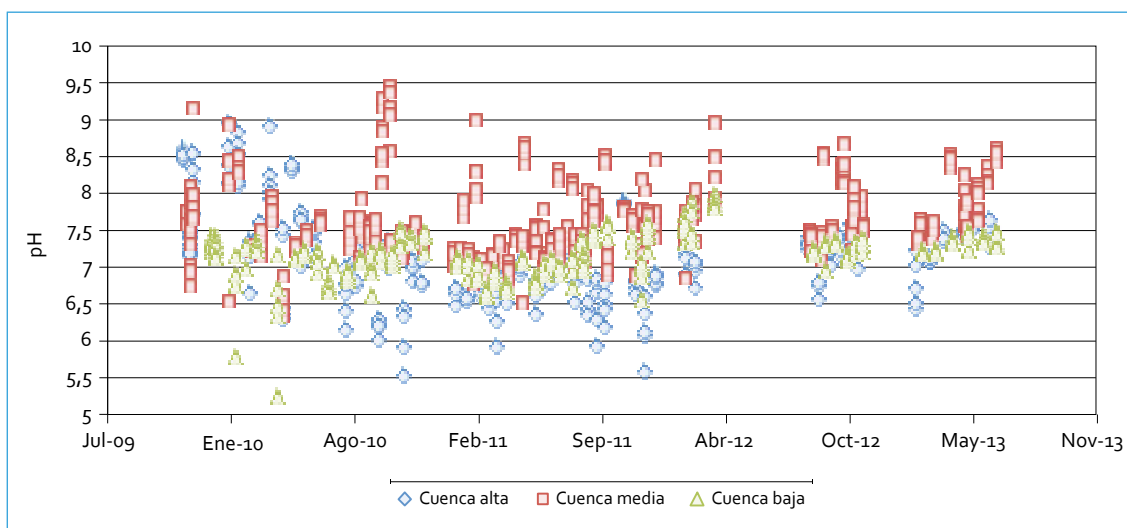


FIGURA 2.1. Perfil de pH: río Torca

En la cuenca alta (Bosque de Pinos) se pueden apreciar los valores más bajos; mientras que en la cuenca media se nota un incremento por el efecto de las descargas de aguas residuales. El punto principalmente afectado por las descargas es Calle 161. En la cuenca baja, las unidades de pH disminuyen por el efecto de los ácidos grasos volátiles producidos en la descomposición anaerobia de la materia orgánica recibida en la cuenca media.

En términos generales, se notó un comportamiento constante a lo largo del tiempo con pequeñas variaciones. Se observó que en la cuenca alta los valores de pH entre noviembre de 2009 y junio de 2010 (rango 6,3-8,9 unidades de pH) fueron superiores a los datos registrados después de junio de 2010 (rango 5,5-7,9 unidades de pH), lo cual muestra que las condiciones de pH en Canal El Cedro (antiguo punto de monitoreo de la cuenca alta) se asemejan más a la cuenca media, la cual está afectada por descargas de aguas residuales, que a las de Bosque de Pinos, punto sin afectación por actividades antropogénicas. En la cuenca media, a partir de septiembre de 2010

se ha registrado una mayor frecuencia de valores de pH por encima de 8 unidades, lo que evidencia que los puntos Calle 161 y Jardines de Paz se ven más afectados por las descargas de agua residuales que el punto Makro Autonorte (antiguo punto de monitoreo de la cuenca alta).

#### 2.1.1.2. Conductividad

El comportamiento de la conductividad del río Torca se presenta en la figura 2.2, donde se observa que las menores conductividades se encuentran en la cuenca alta, con una gran diferencia en magnitud frente a las cuencas media y baja. En Bosque de Pinos la conductividad se encontró en un rango de 23-86  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a excepción de los registros entre noviembre de 2009 y junio de 2010, los cuales fueron superiores a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ello refleja que la calidad del antiguo punto de monitoreo se ve afectada por descargas de aguas residuales domésticas que pueden aportar cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos que aumentan la conductividad del agua.

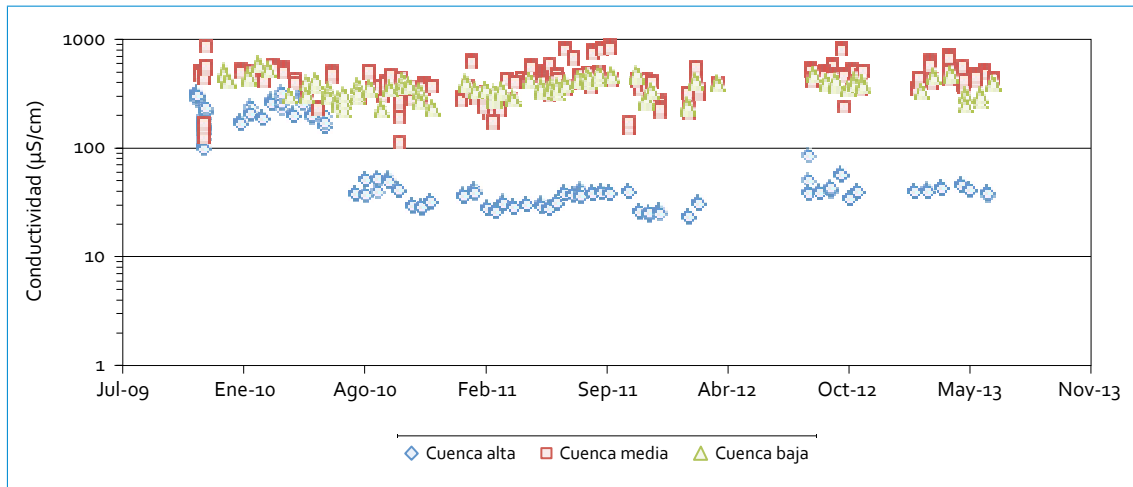


FIGURA 2.2. Perfil de conductividad: río Torca

Las conductividades en la cuenca media (Calle 161 y Jardines de Paz) alcanzaron los valores más altos del río: variaron en un rango de 114 a 888  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La diferencia entre la cuenca alta y la media refleja el alto impacto en la calidad del agua como consecuencia de la descarga de aguas residuales, al registrarse un aumento de más de cuatro veces en los valores medio. Los cambios en la cuenca media a lo largo del tiempo evidencian que en el último año no se han presentado valores por debajo de 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y que ha mostrado conductividades igualmente altas a las encontradas a lo largo de tiempo; pero más homogéneas. En la cuenca baja, las conductividades se mantienen altas; sin embargo, el rango de variación es más pequeño que en la cuenca media (entre 222 y 607  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual se puede relacionar con un ligero amortiguamiento de las descargas, que ayuda a mantener conductividades más homogéneas. Los cambios de la conductividad en función del tiempo en la cuenca baja no son considerablemente importantes y no permiten establecer cambios dinámicos en los últimos años.

### 2.1.1.3. Oxígeno disuelto

Se puede observar en la figura 2.3 que las concentraciones disminuyen desde la cuenca alta hacia la baja pasando de concentraciones de saturación (7,9 mg/L) a condiciones anaerobias (0,1 mg/L). Se aprecia el drástico cambio como consecuencia del consumo de oxígeno utilizado en la degradación de la materia orgánica recibida.

La cuenca alta cuenta con los mejores niveles de oxígeno disuelto, con un rango de variabilidad poco amplio, entre 6,4 y 7,9 mg/L (excluyendo los registros en Canal El Cedro). Entre noviembre de 2009 y junio de 2010 las concentraciones de oxígeno disuelto alcanzaron valores por debajo de 5 mg/L, lo que refleja el efecto de las primeras descargas de aguas residuales aguas arriba de Canal El Cedro. En la cuenca media, los valores de oxígeno disuelto varían notablemente (0,03-6,5 mg/L) y muestra una alta dispersión ligada a la dinámica de las descargas de aguas residuales. Este comportamiento permite inferir la capacidad autodepuradora del río, especialmente en Calle 161, ya que en un momento del día

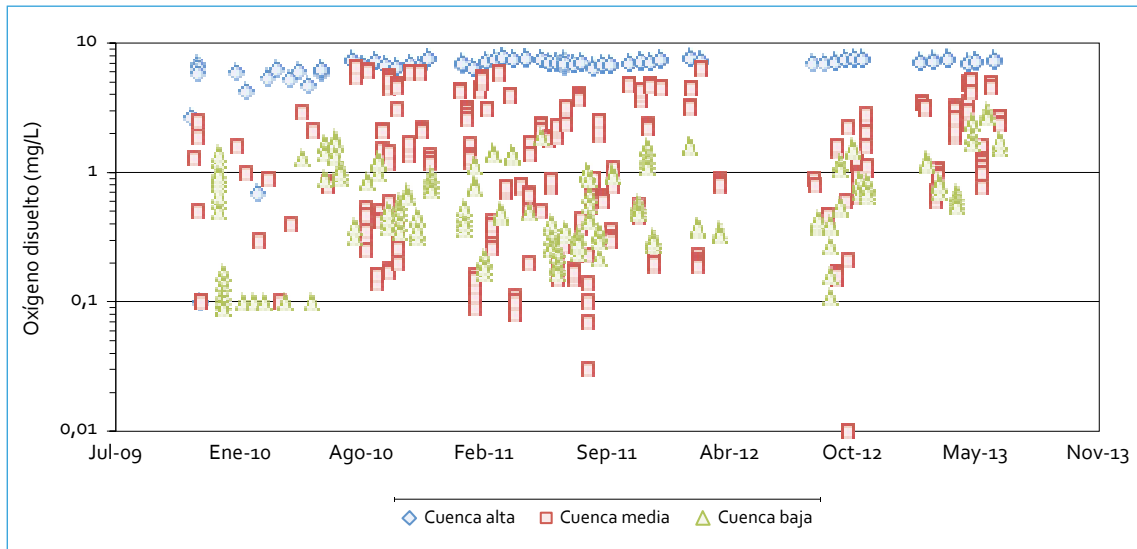


FIGURA 2.3. Perfil de oxígeno disuelto: río Torca

puede haber un alto consumo de oxígeno que reduce la concentración, como en otros en los que se mantiene relativamente alta, dada la poca cantidad de materia orgánica en el agua. En Jardines de Paz, el oxígeno tiende a ser más bajo y muestra la pérdida de asimilación del río. Además, se encontró una mayor frecuencia con valores por debajo de 1 mg/L. A lo largo del tiempo, las concentraciones más bajas se presentaron entre febrero y noviembre de 2011.

#### 2.1.1.4. $DBO_5$

El comportamiento de la descarga bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) en el río Torca muestra que las mayores concentraciones se presentaron en el tramo 2 (figura 2.4), lo cual es coherente con el comportamiento del oxígeno disuelto. El tramo 1 presentó las concentraciones más bajas de  $DBO_5$  en el río Torca, incluso más bajas que las registradas en Canal El Cedro para en 2009 y 2010. Muy pocos valores superaron el límite de detección (1 mg/L), mientras que en

Canal El Cedro las concentraciones históricas estuvieron entre 4 y 41 mg/L. Este cambio en el punto de monitoreo hace que a partir del segundo semestre de 2010 las concentraciones de  $DBO_5$  sean inferiores al objetivo de calidad (15 mg/L).

En el tramo 2, las concentraciones de  $DBO_5$  aumentan notablemente con respecto al punto anterior, hasta llegar a 40 mg/L. Las mayores se presentaron en los semestres S2-2009, S2-2011 y S2-2012, especialmente en el punto Calle 161, el que más impacto recibe por las descargas de agua residual. En S2-2010 se presentó la mayor frecuencia en concentraciones bajas; el promedio estuvo en 18 mg/L, sobre todo en Jardines de Paz. Algunos datos estuvieron por encima de la concentración típica de un agua residual doméstica diluida (110 mg/L) en el S2-2012, que fue el semestre con mayores concentraciones de  $DBO_5$ . Al igual que en el tramo anterior, las concentraciones de  $DBO_5$  fueron inferiores al objetivo de calidad (150 mg/L).



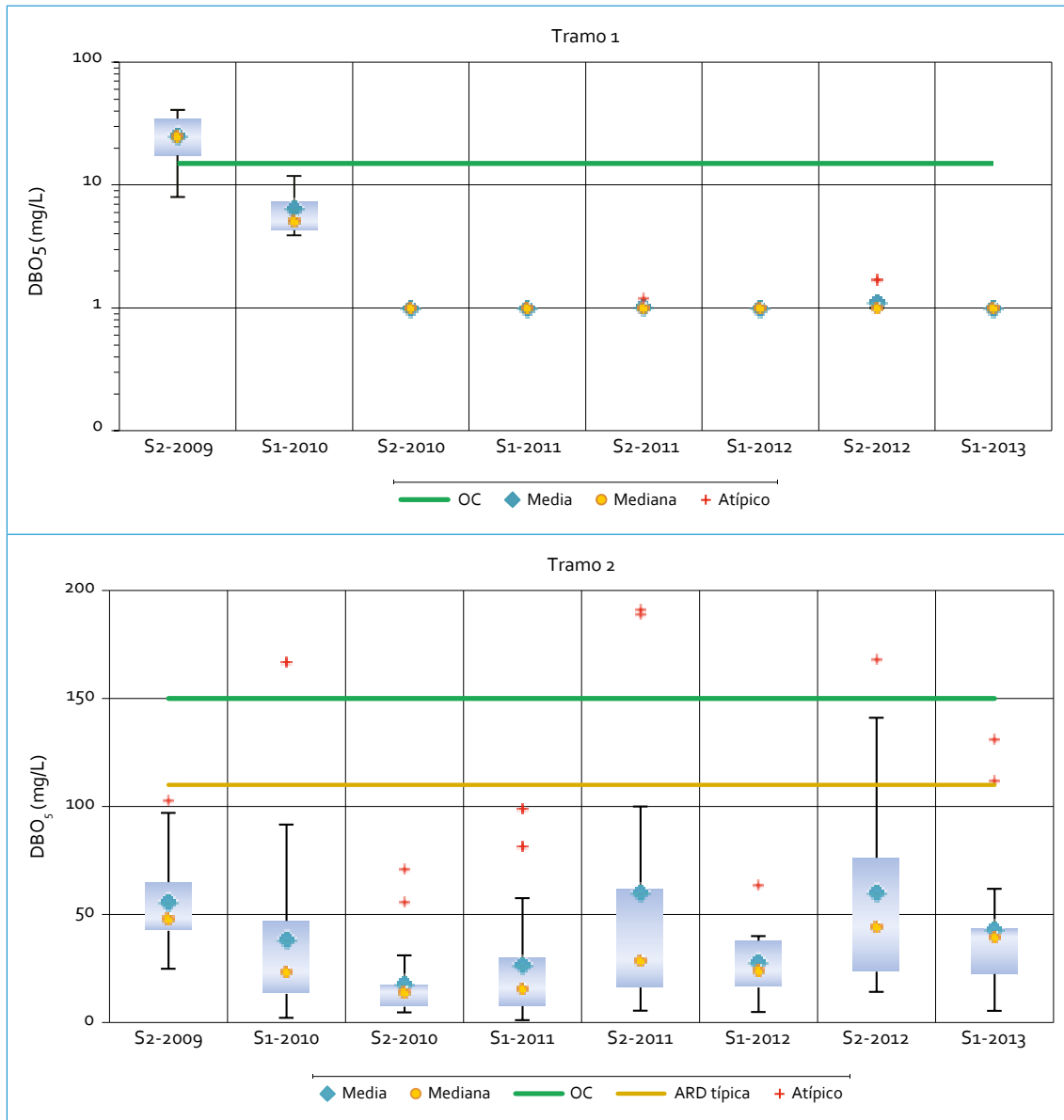


FIGURA 2.4. Perfil de  $DBO_5$ : río Torca

#### 2.1.1.5. DQO

En la figura 2.5 se presenta el comportamiento de las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) del río Torca. Se puede observar un aumento importante de las concentraciones a lo largo del río, entre el tramo 1 y el tramo 2. En el tramo 1 se midieron las

concentraciones más bajas de DQO en el río, que variaron en un rango de 2,7 a 27 mg/L, excluidos los datos de los semestre S2-2009 y S1-2010, que corresponden a monitoreos en el antiguo punto. Al igual que la  $DBO_5$ , las concentraciones de DQO a partir del S2-2010 fueron inferiores al objetivo de calidad (50 mg/L), lo cual denota una buena calidad.

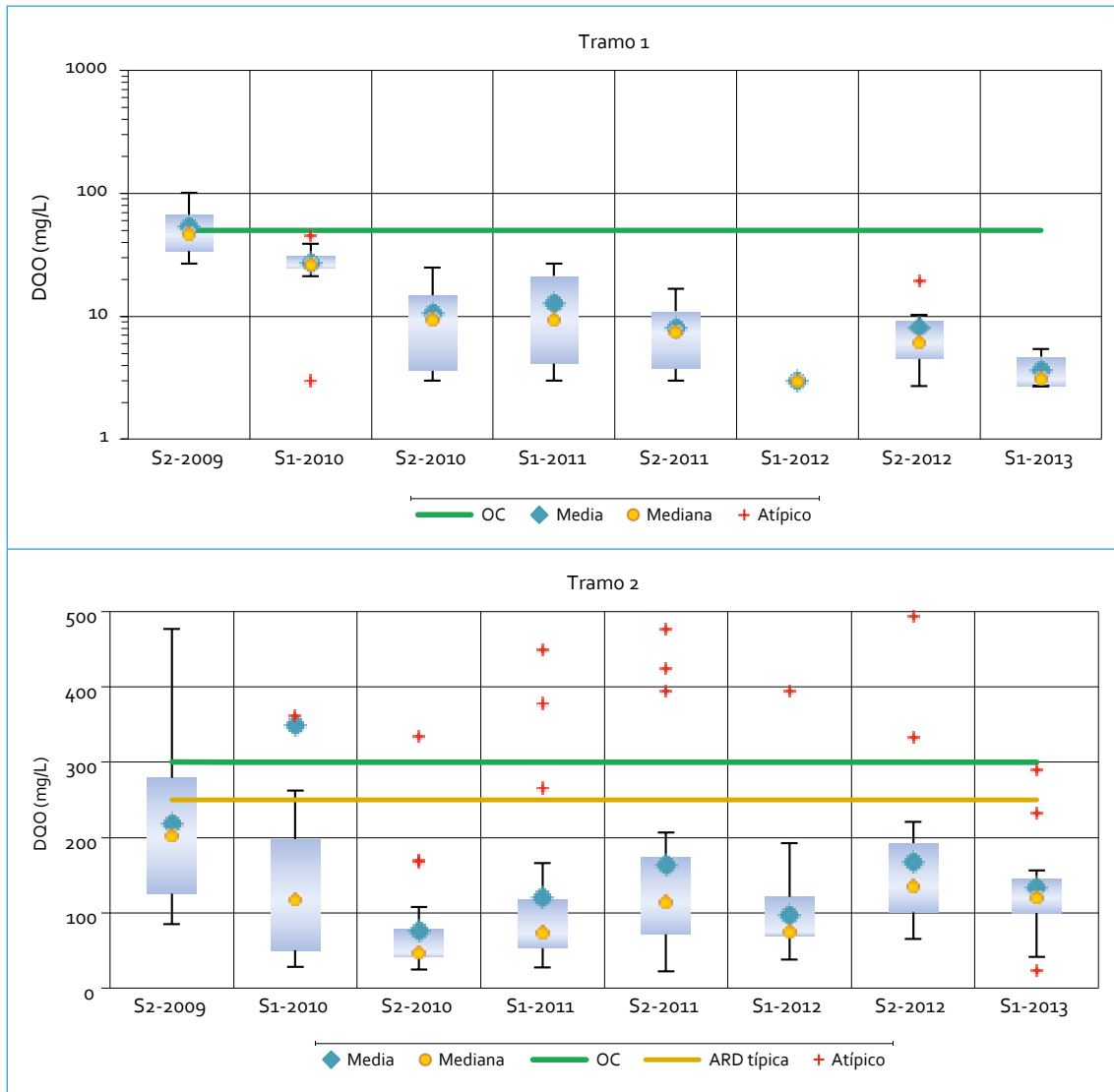


FIGURA 2.5. Perfil de DQO: río Torca

En cuanto al tramo 2, las concentraciones aumentan notablemente en referencia al tramo 1, al pasar de concentraciones promedio de entre 3 y 13 mg/L en Bosque de Pinos a valores por encima de los 100 mg/L; ello deja en evidencia la afectación sobre la calidad del agua por las descargas de aguas residuales. Así como para la  $DBO_5$  las mayores concentraciones promedio de DQO se presentaron en los semestres S2-2009, S2-2011 y S2-2012, algunos datos,

en S2-2009 y S1-2010, estuvieron por encima de la concentración típica de un agua residual doméstica; sin embargo, a partir del S2-2010 las concentraciones no han excedido los 221 mg/L y han mostrado concentraciones un poco más homogéneas. Al igual que en el tramo anterior, las concentraciones de  $DBO_5$  fueron inferiores al objetivo de calidad (300 mg/L). En general, se observó que la calidad con respecto a la DQO es mucho mejor en Bosque de

Pinos que en el antiguo punto (Canal El Cedro), además del aumento en las concentraciones en el tramo 2, tal como ocurrió para la  $DBO_5$ , lo cual destaca el efecto de las descargas de aguas residuales sobre el río.

2.1.1.6. SST

El comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) muestra un aumento entre los dos tramos del río (fi-

gura 2.6). En el tramo 1 los SST estuvieron en un rango de 1,6 a 16 mg/L, sin contar los datos registrados en los primeros semestres de monitoreo (especialmente en el S2-2009), cuando el punto de monitoreo era Canal El Cedro. Así como para los indicadores de materia orgánica ( $DBO_5$  y  $DQO$ ), las concentraciones de SST a partir del S1-2010 fueron inferiores al objetivo de calidad (20 mg/L) y se han mantenido bajas a lo largo del tiempo.

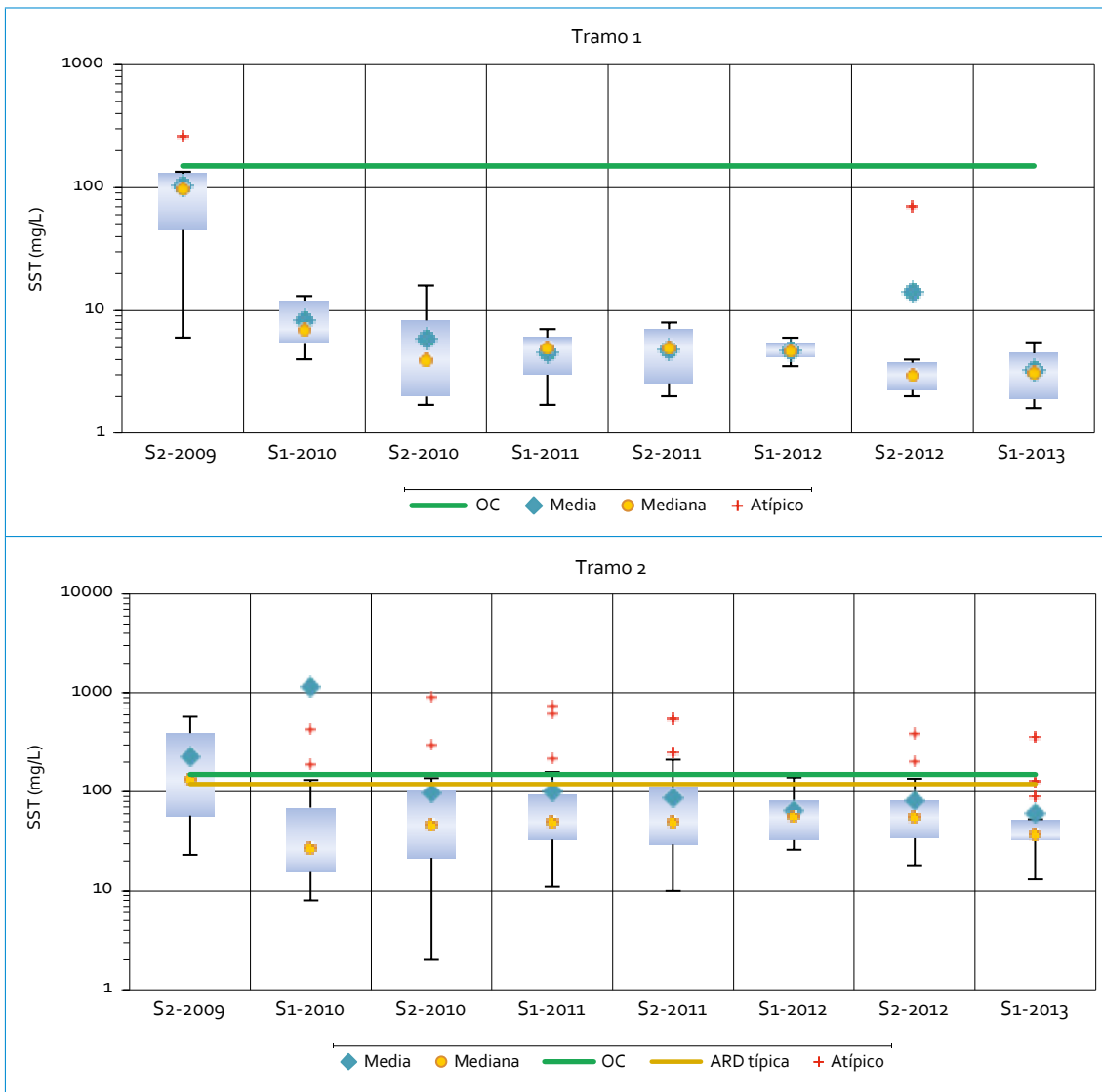


FIGURA 2.6. Perfil de SST: río Torca

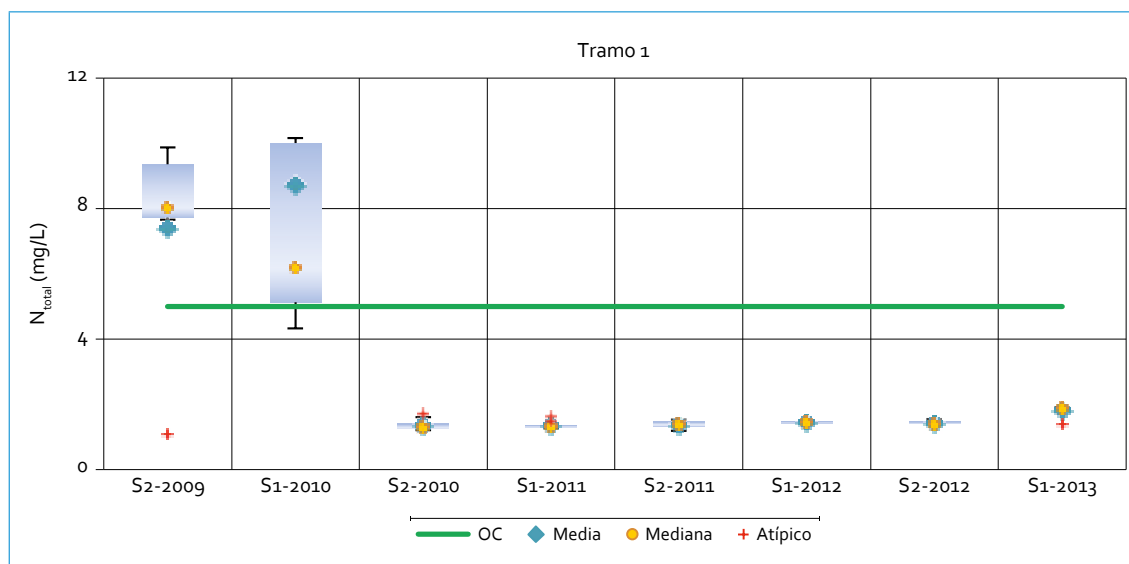
En el tramo 2 (Calle 161, Jardines de Paz y San Simón) se obtuvieron altas cantidades de SST. El aumento de las concentraciones entre los dos tramos refleja el impacto de las descargas al río. Adicionalmente, los datos variaron en rangos muy amplios (2-575 mg/L), siendo Calle 161 y Jardines de Paz los puntos que con más frecuencia presentaron concentraciones por encima de 80 mg/L, y San Simón el punto donde se registraron más datos por debajo de 30 mg/L. Este comportamiento muestra que el sector del tramo 2 entre Calle 161 y Jardines de Paz tiene un alto impacto por las descargas de agua residual, y hacia aguas abajo el río encuentra una manera de amortiguar o diluir el efecto de las altas concentraciones de sólidos. Las concentraciones en San Simón varían entre 10 y 140 mg/L.

Las mayores concentraciones de SST se presentaron en S2-2009, S2-2010, S1-2011 y S2-2011, al mostrar valores medios muy cercanos a la concentración típica de agua residual doméstica diluida (120 mg/L). Muy pocos datos de SST superaron el objetivo de calidad (150

mg/L), pero esto no quiere decir que la calidad del agua del tramo 2 sea buena.

#### 2.1.1.7. Nitrógeno

En la figura 2.7 se presenta el comportamiento del nitrógeno total ( $N_{total}$ ). Este parámetro, que involucra los compuestos nitrogenados (NTK, nitritos y nitratos), mostró un aumento importante entre los tramos 1 y 2. Los valores de nitrógeno en Bosque de Pinos tuvieron una alta uniformidad, ya que la mayoría de ellos, a partir del S2-2010, estuvieron por debajo del límite de detección (1,1 mg/L) y por debajo del objetivo de calidad (5 mg/L), en contraste con los valores de nitrógeno de los semestres S2-2009 y S1-2010, que corresponden al antiguo punto de monitoreo. En el tramo 2, las concentraciones de  $N_{total}$  aumentaron bastante en comparación y fueron muy variables: el rango estuvo entre 1,2 y 35 mg/L. Las concentraciones más altas se registraron en Calle 161 y Jardines de Paz, que mostraron una vez más el alto impacto generado por las descargas de



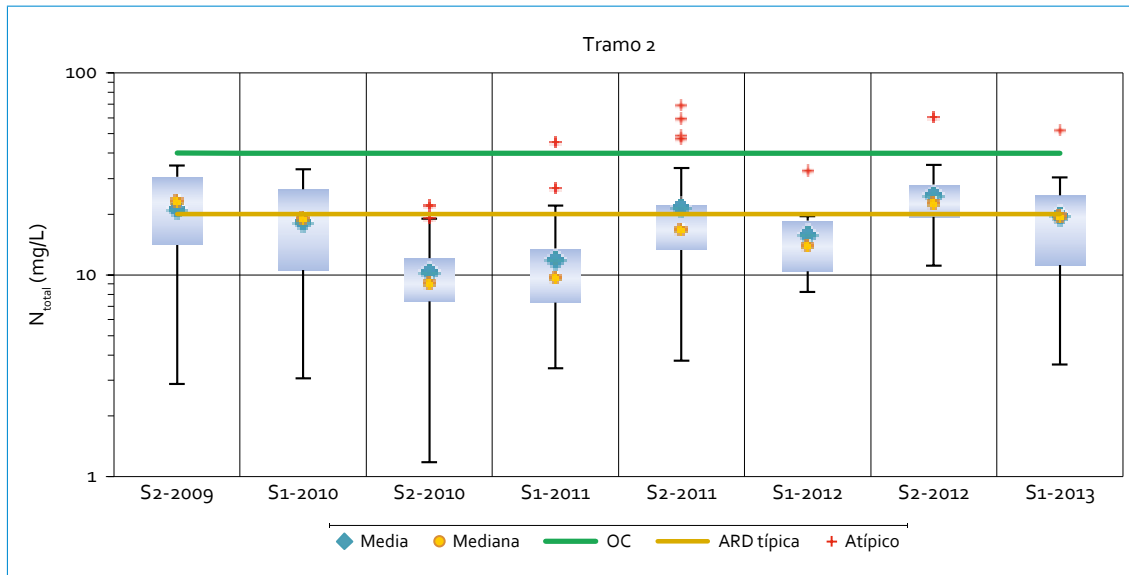


FIGURA 2.7. Perfil de  $N_{total}$ : río Torca

agua residual doméstica, sin dar espacio a una asimilación por parte del cuerpo de agua receptor. Aproximadamente el 30% de los datos de  $N_{total}$  estuvieron por encima de 20 mg/L, lo que refleja un estado alarmante con respecto a este parámetro; sin embargo, ningún valor incumplió el objetivo de calidad (40 mg/L).

Es posible que dentro de los procesos biológicos que se dan en el río por las descargas de agua residual el más predominante sea la oxidación de la materia orgánica, que da lugar a un decaimiento muy abrupto en el oxígeno disuelto sin dar espacio a la oxidación del amonio, por lo que las concentraciones de nitrógeno en el tramo 2 del río se asemejan más a la del agua residual sin tratar. Dentro del tramo 2, las concentraciones más bajas (por debajo de 10 mg/L) tendieron a presentarse en el punto San Simón y mostraron, una vez más, un efecto depurador, amortiguador y de dilución. En promedio, a lo largo del tiempo las concentraciones se han mantenido constantes, a excepción de los semestres S2-2010 y S1-2011,

en los que se presentaron con más frecuencia concentraciones bajas de nitrógeno.

#### 2.1.1.8. Fósforo

En el tramo 1 se encontraron las concentraciones más bajas de fósforo ( $P_{total}$ ) del río Torca, que variaron entre 0,04 y 1,4 mg/L. Contrario al comportamiento de los parámetros ya analizados, no se ven diferencias importantes entre el antiguo punto de monitoreo y el actual, lo cual denota que esas primeras descargas no contienen cantidades importantes de fósforo que reflejen un aumento en el cuerpo receptor. A lo largo del tiempo, las concentraciones de fósforo tendieron a aumentar en las últimas campañas de monitoreo, y en algunas ocasiones se superó el objetivo de calidad (1 mg/L). Se podría pensar que este comportamiento responde a una condición natural del río, ya que en este punto no se presentan vertimientos que se traduzcan en aumentos en el fósforo natural (figura 2.8).

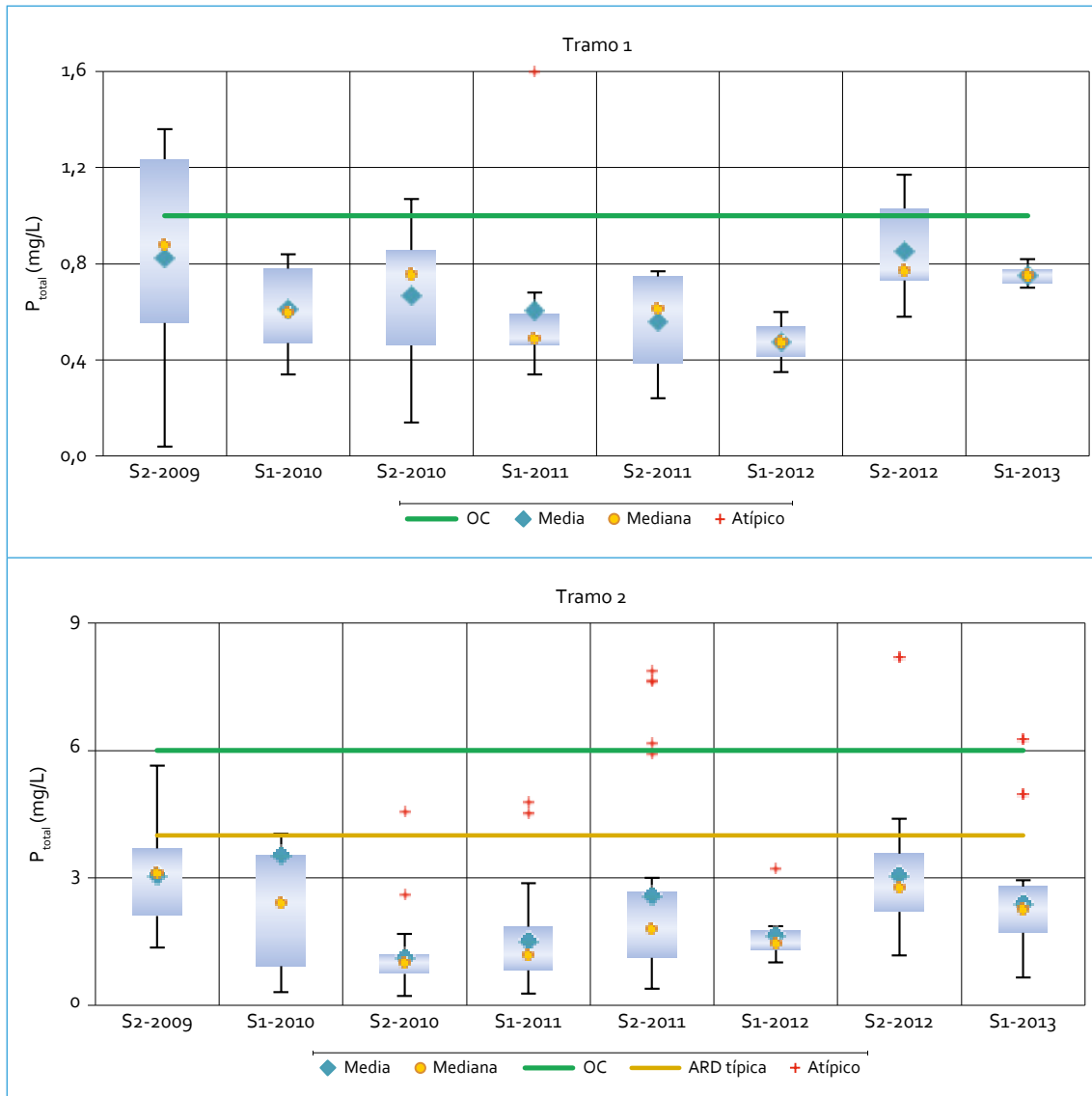


FIGURA 2.8. Perfil de  $P_{total}$ : río Torca

En el tramo 2 (Calle 161, Jardines de Paz y San Simón) se obtuvieron datos más dispersos (entre 0,2 y 5,6 mg/L), con aumento en las concentraciones de fósforo de 3 veces en promedio con respecto a Bosque de Pinos. La variabilidad de los datos está sujeta a las descargas de aguas residuales, especialmente en los puntos de monitoreo más críticos (Calle 161 y Jardines de Paz). Ningún dato superó el

objetivo de calidad (6 mg/L). En Calle 161 se presentó una mayor frecuencia de valores que superaron los 4 mg/L; sin embargo, estos datos resultaron ser atípicos.

#### 2.1.1.9. Grasas y aceites

El comportamiento de las concentraciones de grasas y aceites en el río Torca muestra que las

mayores concentraciones se encontraron en el tramo 2. En Bosque de Pinos el 78% de los resultados fue inferior al límite de detección (figura 2.9), por lo que los valores aparecen sesgados a este valor (3,6 mg/L). A lo largo del tiempo, las medianas de las concentraciones de grasas y aceites se han mantenido constantes, y en ninguna ocasión se superó el objetivo de calidad (20 mg/L). En el tramo 2 las concentraciones fueron muy variables (entre

3,6 y 84 mg/L), lo cual refleja que, dependiendo de la hora del vertimiento, el río puede tener concentraciones muy bajas o medianamente altas de grasas y aceites.

Estas últimas no son muy solubles en el agua y van transitando a lo largo del río; por lo tanto, es más probable que la variabilidad de las grasas y aceites en este punto esté más ligada al transporte superficial que a una degradación. Aunque muy pocos datos superaron

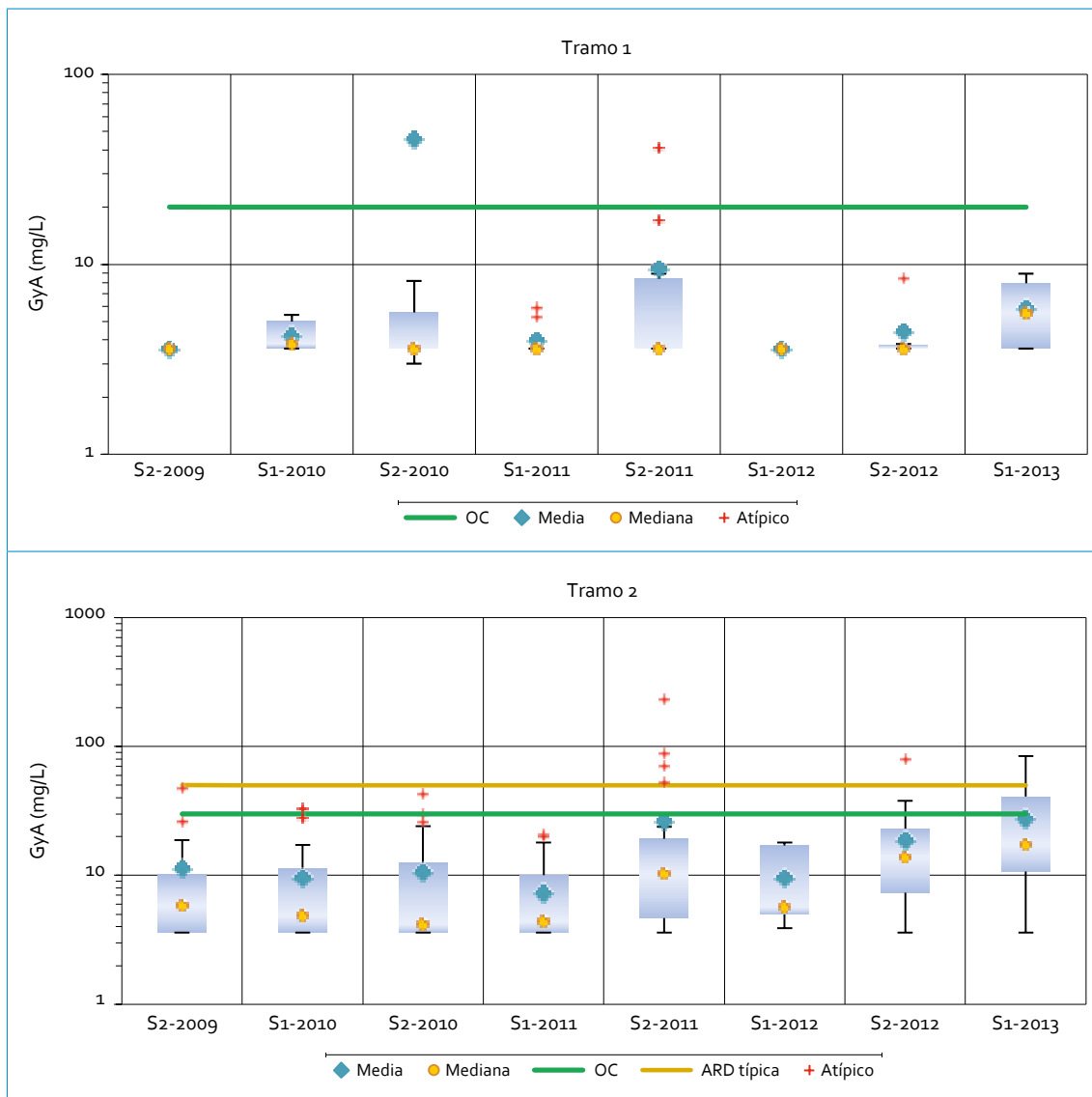


FIGURA 2.9. Perfil de grasas y aceites: río Torca

el objetivo de calidad (30 mg/L) y la concentración típica del agua residual doméstica (50 mg/L), la mayoría de concentraciones por encima de 15 mg/L se presentó en Calle 161 y Jardines de Paz, sector donde se recibe la mayor cantidad de descargas de agua residual doméstica. En Jardines de Paz, cerca del 90 % de los datos estuvo por debajo de 15 mg/L, lo que refleja una posible retención por el buchón presente en ese trayecto. Los dos semestres más críticos fueron S2-2011 y S1-2012.

2.1.1.10. SAAM

En la figura 2.10 se observa el aumento de las concentraciones de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) entre los tramos 1 y 2 del río Torca. El tramo 1 presentó las concentraciones más bajas de SAAM, al variar en un rango de 0,02 a 0,23 mg/L, excluyendo los datos de los semestre S2-2009 y S1-2010, que corresponden a monitoreos en el antiguo punto de Canal El Cedro. A partir del S2-2010 las concen-

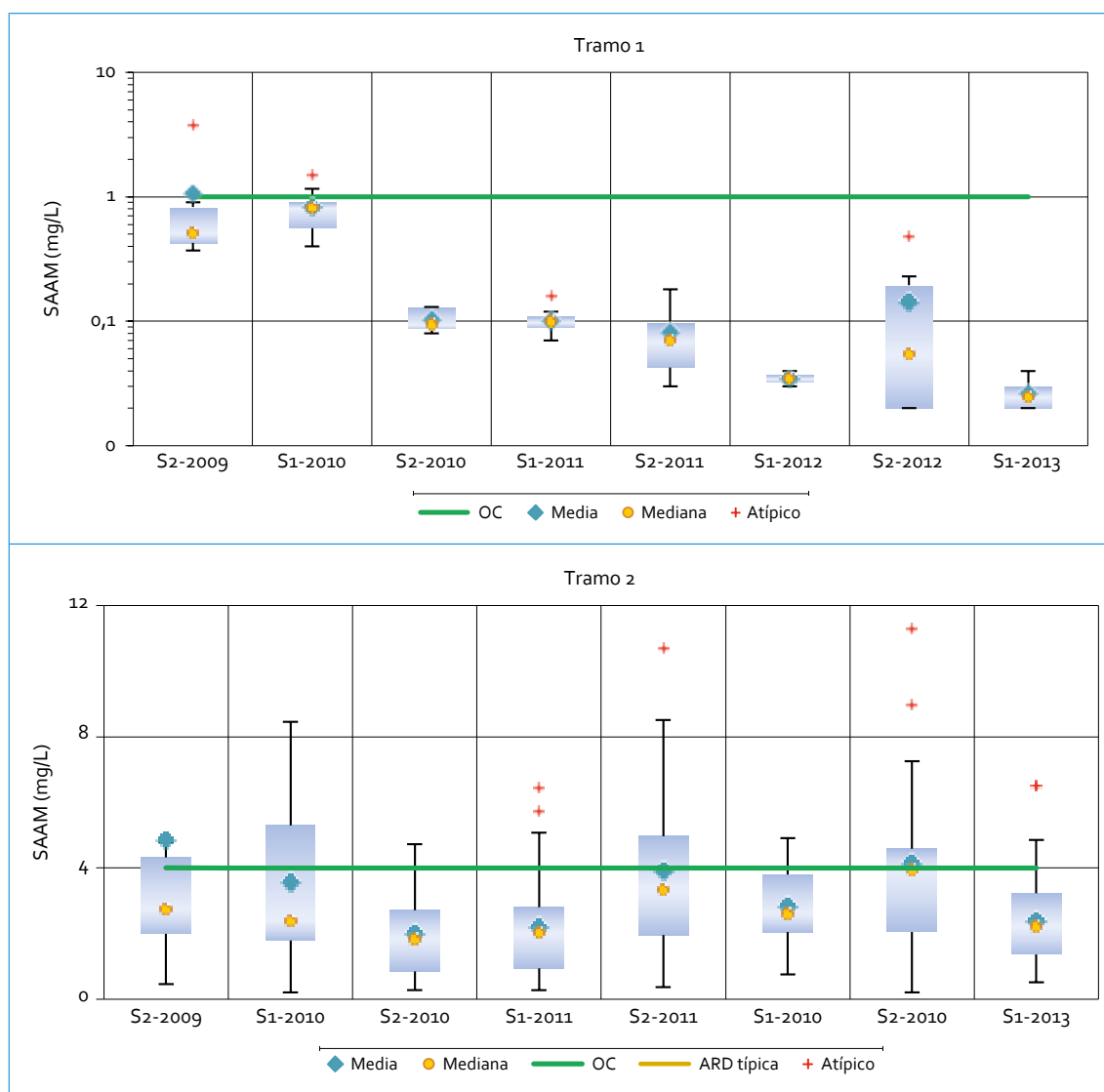


FIGURA 2.10. Perfil de SAAM: río Torca



traciones de SAAM han sido muy inferiores al objetivo de calidad (1 mg/L). En el tramo 2 las concentraciones de surfactantes aumentaron notablemente, al pasar de valores promedio entre 0,03 y 0,14 mg/L en Bosque de Pinos a valores por encima de 3 mg/L. Ello deja en evidencia la afectación que generan las descargas de agua residual sobre el río. Así mismo, para los indicadores de materia orgánica, las mayores concentraciones promedio de SAAM se presentaron en los semestres S2-2009, S2-2011 y S2-2012, aunque en el S2-2009 el valor promedio estuvo afectado por un valor atípico y la mediana fue muy similar a los demás semestres. Por otro lado, aproximadamente el 35 % de los datos incumplió el objetivo de calidad (4 mg/L), al alcanzar concentraciones hasta de 8,5 mg/L. Estas altas cantidades de surfactantes en el agua son capaces de aumentar la solubilidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

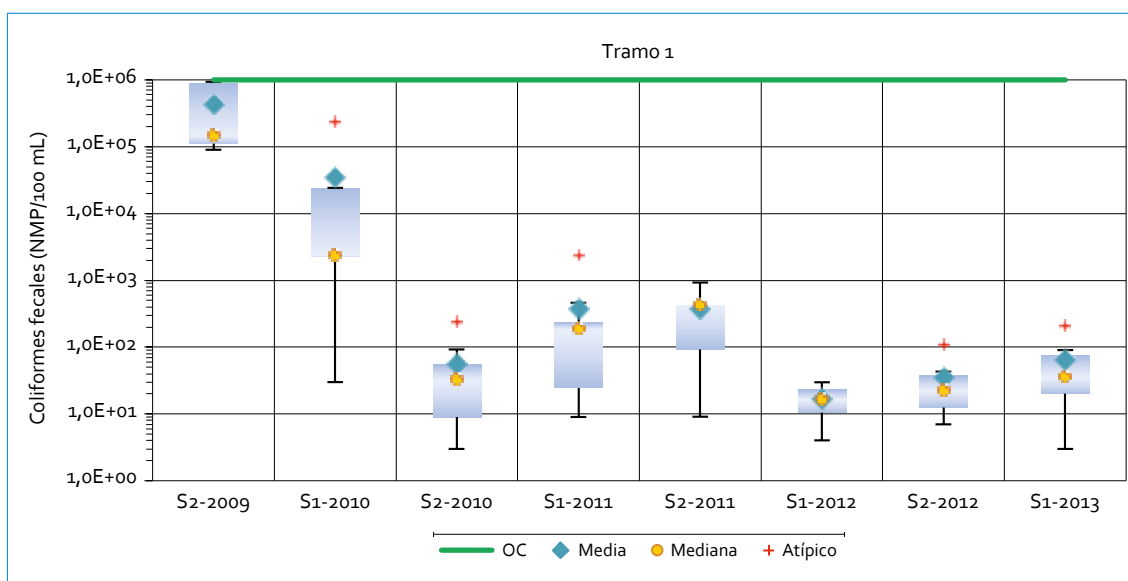
Dentro del tramo 2, los puntos Calle 161 y Jardines de Paz fueron los que con más frecuencia presentaron concentraciones por enci-

ma de 4 mg/L, y San Simón fue el punto donde se registraron más datos por debajo de 1 mg/L. Este comportamiento, al igual que en otros parámetros, muestra que el sector del tramo 2 entre Calle 161 y Jardines de Paz tiene un alto impacto por las descargas de agua residual, y hacia aguas abajo el río encuentra una manera de degradar o diluir las altas concentraciones de surfactantes, pues las concentraciones en San Simón variaron entre 0,27 y 4,4 mg/L.

#### 2.1.1.11. *Coliformes fecales*

El comportamiento de las concentraciones de coliformes fecales muestra, así como para la mayoría de parámetros, que las mayores concentraciones se encuentran en el tramo 2 (figura 2.11). En el primero, los coliformes fecales estuvieron en un rango entre  $3,0$  y  $9,3 \times 10^2$  NMP/100 mL, mientras que en el tramo 2 las concentraciones alcanzaron magnitudes de  $10^7$  NMP/100 mL.

En Bosque de Pinos se observaron bajos niveles de coliformes. Ello mostró que lo re-



Continúa

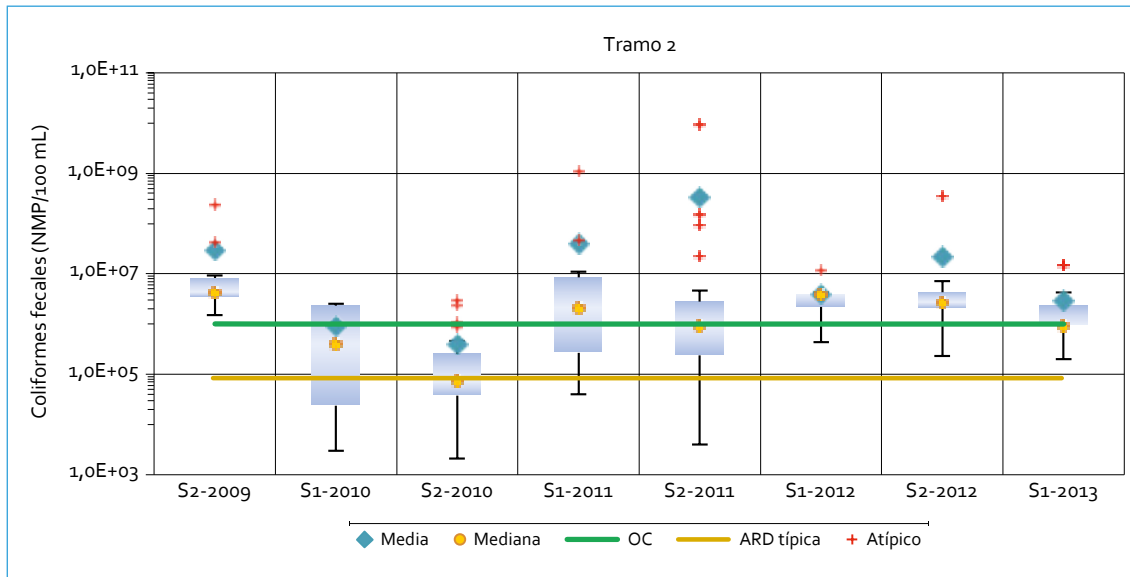


FIGURA 2.11. Perfil de coliformes fecales: río Torca

portado en Canal El Cedro para los semestres S2-2009 y S1-2010 no se ajustaba como referente de calidad, pues distintos valores superaron el rango típico del agua residual doméstica diluida ( $10^3$ - $10^5$  NMP/100 mL) y algunos se acercaron al objetivo de calidad ( $10^6$  NMP/100 mL). A lo largo del tiempo, se notó que entre los semestres, las medianas y promedios variaron levemente; sin embargo, se desconocen las causas de estas variaciones, puesto que en la parte alta del río no se reciben descargas y goza de una buena calidad.

En el tramo 2 se obtuvieron los datos más variables del río, con un rango entre  $2,1 \times 10^3$  y  $1,1 \times 10^7$  NMP/100 mL. El aumento respecto a Bosque de Pinos es muy significativo: se resalta de nuevo el alto impacto negativo que las descargas de agua residual doméstica tienen en el río. Aproximadamente el 80% de los datos excedió la concentración típica del agua residual doméstica diluida, lo cual refleja que, en materia de coliformes fecales, el agua de este tramo es muy similar al agua transportada en la red sanitaria. Además, ratifica que el origen

mayoritario de las descargas de agua residuales es doméstico. Cerca del 50% de los datos incumplió el objetivo de calidad ( $1 \times 10^6$  NMP/100 mL). A diferencia de otros parámetros en los tres puntos de monitoreo (Calle 161, Jardines de Paz y San Simón) se presentaron valores por encima de  $1 \times 10^5$  NMP/100 mL en cantidades similares, y ello refleja que el impacto es homogéneo a lo largo del tramo. En el tiempo, la variabilidad en los datos del tramo 2 dificulta establecer un patrón en el comportamiento de los coliformes fecales; no obstante, el periodo menos crítico fue S2-2010 y el promedio de las concentraciones estuvo muy cerca al objetivo de calidad, lo cual indica la alta probabilidad de encontrar incumplimientos en este parámetro.

#### 2.1.1.12. Sulfuros

Las concentraciones de sulfuros en todos los puntos de monitoreo del río Torca variaron entre el límite de detección (0,5 mg/L) y 2,4 mg/L, como se muestra en la figura 2.12. En el primer punto, Bosque de Pinos, las concen-

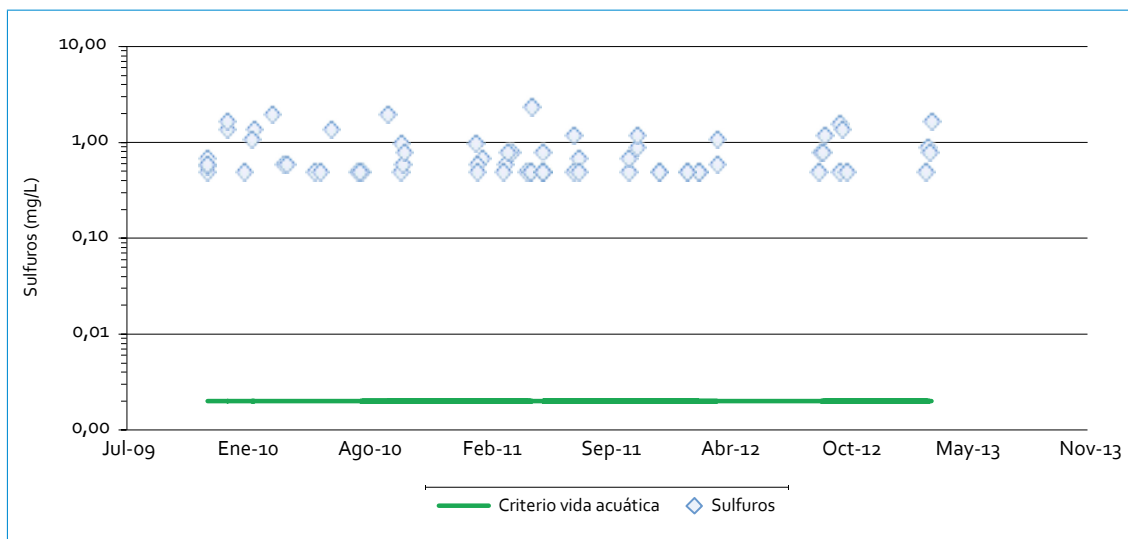


FIGURA 2.12. Perfil de sulfuros: río Torca

traciones fueron las menores del río Torca, cercanas o inferiores a límite de detección, lo que denota la buena calidad del punto. Aunque el criterio de vida acuática de efecto crónico de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos es muy bajo (0,002 mg/L), y el método analítico no permite cuantificar concentraciones más bajas de 0,5 mg/L, el primer punto de monitoreo no representa un riesgo para el ecosistema acuático, puesto que no hay perturbaciones que alteren la calidad natural del río.

Dado que el criterio es más bajo que el límite de detección, cerca del 60 % de las concentraciones de sulfuros del río Torca fue superior al límite de detección y mostró que, a partir del segundo punto de monitoreo, el río no cuenta con las condiciones óptimas de sulfuros para soportar la vida acuática. Cabe resaltar que el 60 % de los sulfuros registrados en San Simón fue inferior a 0,5 mg/L, lo que puede indicar que están transformándose en la cuenca baja del río ( $H_2S$ ). A lo largo de tiempo los sulfuros no han variado sustancialmente en el río; a

partir de Calle 161 las concentraciones se han mantenido por el orden de 0,9 mg/L.

#### 2.1.1.13. Fenoles

Las concentraciones de fenoles en todos los puntos de monitoreo del río Torca tendieron a estar cerca al valor del límite de detección (0,02 mg/L), excepto para los puntos Calle 161 y Jardines de Paz, donde se presentó una alta frecuencia de valores elevados (entre 0,02 y 0,26 mg/L), que reflejan ser el sector más crítico producto de las descargas de agua residual. Ningún dato excedió el criterio establecido por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos para producir un efecto organoléptico en el agua (0,3 mg/L). Este comportamiento muestra que, a pesar de la variabilidad de los fenoles por el efecto de las descargas de agua residual, no hay un impacto considerable en el agua del río. A lo largo de tiempo, los fenoles no han variado significativamente; las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,07 mg/L.

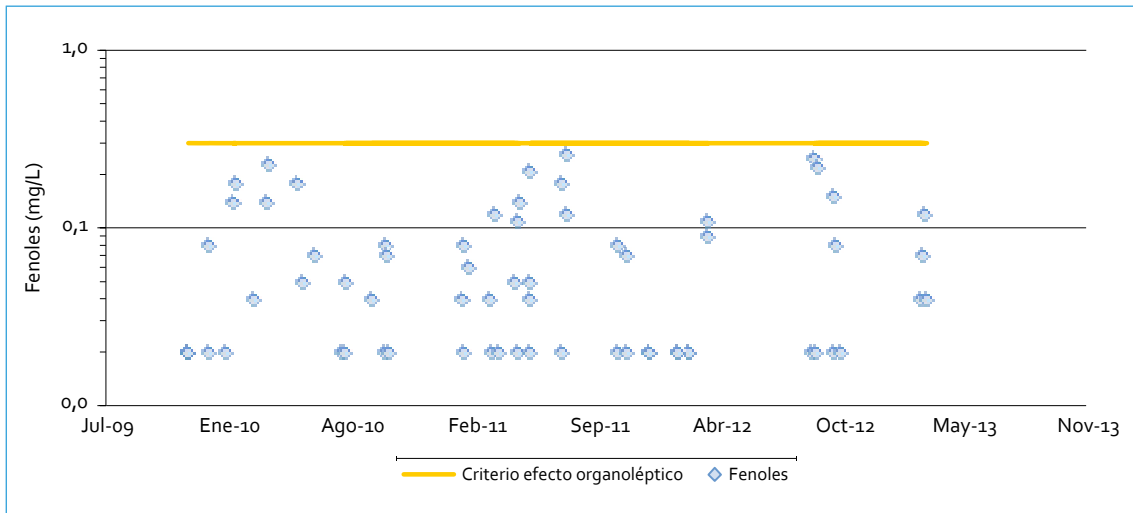


FIGURA 2.13. Perfil de fenoles: río Torca

2.1.1.14. Metales

2.1.1.14.1. Bario

Las bajas concentraciones de bario en Bosque de Pinos (entre 0,008 y 0,026 mg/L) se pueden considerar de origen natural y no presentan una afectación a la calidad del agua. Por el contrario, en los siguientes puntos se notó un

incremento, efecto de la descarga de aguas residuales hacia el río, con impacto no crítico, ya que la Organización Mundial de la salud (OMS) tiene como límite máximo permisible 0,7 mg/L de bario para el agua potable, y la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos, de 1 mg/L, para la salud humana. Un solo dato excedió los criterios establecidos por la OMS y la Agencia de Protección de Medio

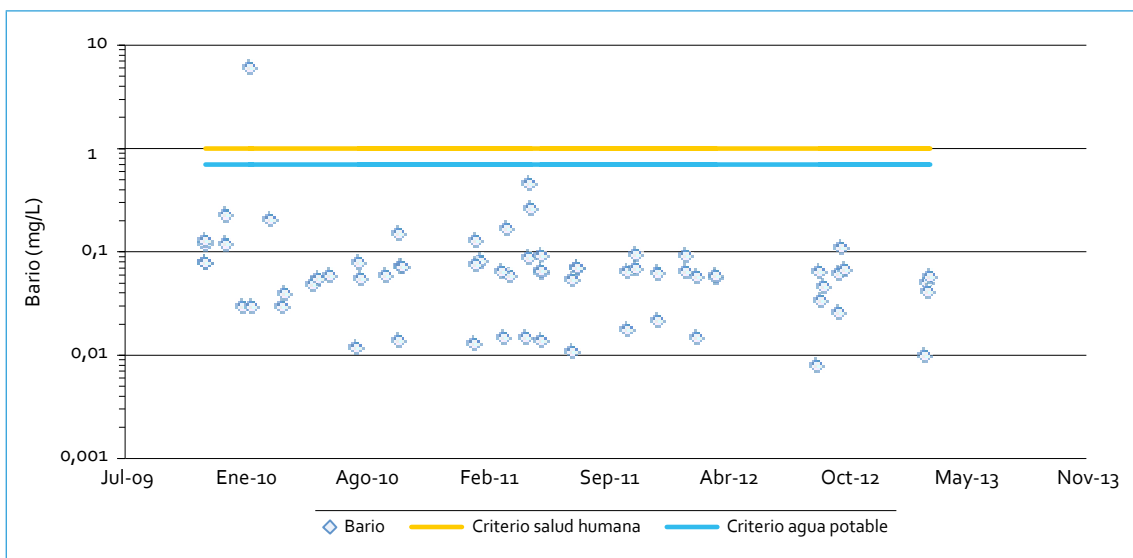


FIGURA 2.14. Perfil de bario: río Torca

Ambiente de Estados Unidos, al mostrar que, a pesar de la variabilidad del bario, no hay un impacto considerable en el agua del río. A lo largo de tiempo, el bario no ha variado significativamente en el río y ha mantenido concentraciones alrededor de 0,07 mg/L.

#### 2.1.1.14.2. Cadmio

En la figura 2.15 se presentan las concentraciones de cadmio en todos los puntos de monitoreo del río Torca, donde se observa que la gran mayoría de los datos se mantuvieron muy cerca al límite de detección (0,001; 0,003 y 0,006 mg/L, según el periodo). El rango de variación del cadmio estuvo entre 0,001 y 0,16 mg/L. Dado que el criterio de vida acuática es más bajo que el límite de detección, cerca del 7% de las concentraciones de cadmio fue superior a los límites de detección; por lo tanto, superiores al criterio de agua potable de la OMS (0,003 mg/L) y muestran que el río cuenta posiblemente con las condiciones idóneas en cadmio para soportar la vida acuática.

#### 2.1.1.14.3. Cinc

Las concentraciones de cinc en todos los puntos de monitoreo del río Torca se presentan en la figura 2.16, donde se puede ver la poca variabilidad de datos. En el primer punto del río, Bosque de Pinos, los valores de cinc fueron los más bajos del río, en tanto que en Calle 161 y Jardines de Paz, los más altos. Las concentraciones estuvieron entre 0,004 y 2,95 mg/L. Cerca del 25% de las concentraciones de cinc del río Torca fueron superiores al criterio establecido por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos para la vida acuática (efecto agudo o crónico, 0,11 mg/L), las cuales se registraron especialmente en Calle 161 y Jardines de Paz. Todos los valores cumplen con los demás criterios (salud humana y agua potable) y mostraron que, respecto al cinc, el río puede no tener todo el tiempo las condiciones óptimas para soportar la vida acuática, pero puede ofrecer otros usos. A lo largo de tiempo, el cinc no ha variado de manera significativa, aunque entre

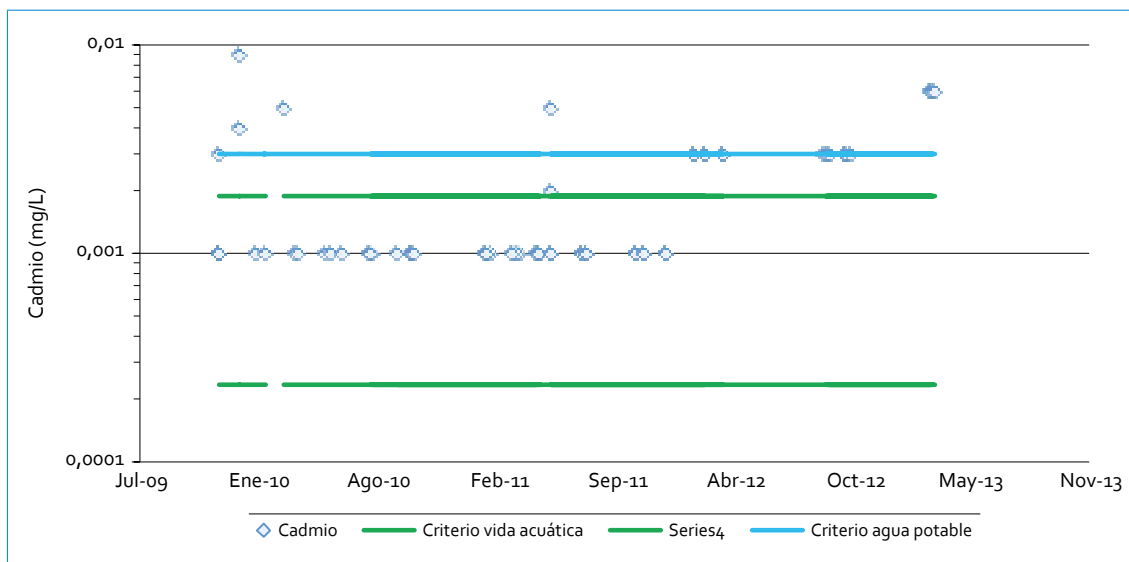


FIGURA 2.15. Perfil de cadmio: río Torca

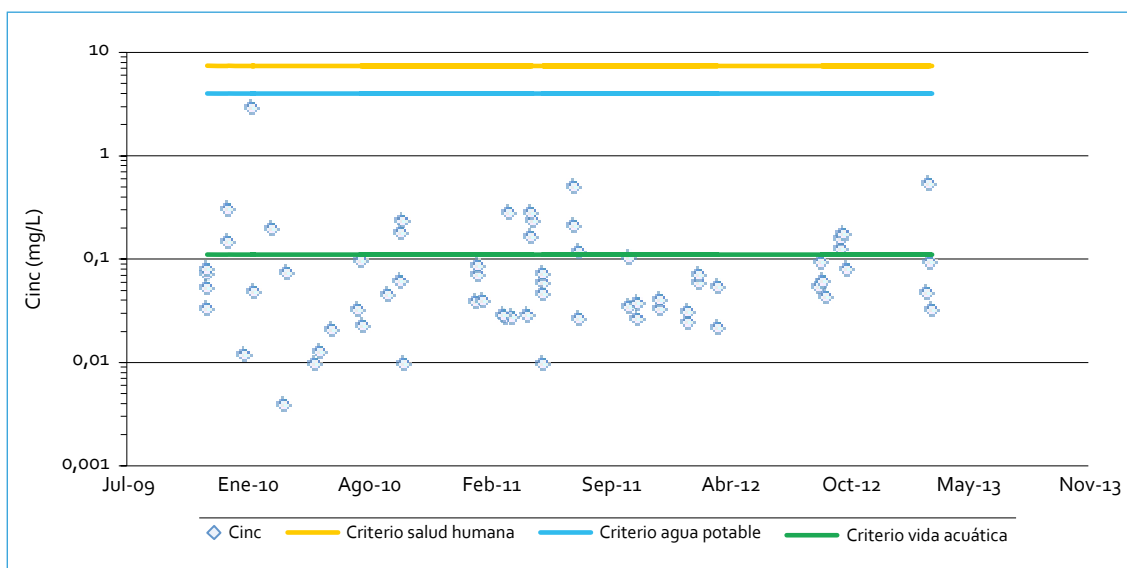


FIGURA 2.16. Perfil de cinc: río Torca

enero de 2010 y mayo de 2011 se registraron las concentraciones más bajas. En promedio, las concentraciones se han mantenido en torno a 0,09 mg/L.

#### 2.1.1.14.4. Cobre

La mayor frecuencia de concentraciones altas se dio en el punto Jardines de Paz, seguido de Calle 161 y San Simón. Sin embargo, en Jardines de Paz y en San Simón también se registraron varios datos por debajo del límite de detección (0,001 y 0,016 mg/L, según el periodo). Ningún dato excede los criterios de calidad establecidos por Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos o la OMS para la protección de la vida humana (1,3 mg/L), efecto organoléptico (1 mg/L) o agua potable (2 mg/L), mostrando que las cantidades de cobre en el río no representan un verdadero impacto en la calidad (figura 2.17).

#### 2.1.1.14.5. Cromo total

Las concentraciones de cromo total del río Torca (figura 2.18), al igual que los demás metales, no presentan variaciones importantes.

Las concentraciones de cromo total a lo largo del río estuvieron casi siempre bajo los límites de detección. Tan solo el 15% de los datos sobrepasaron estos valores y la mayoría se presentaron en la parte baja del río. Teniendo en cuenta el criterio para el agua potable de la OMS (0,05 mg/L), el 3% de los datos sobrepasó este criterio, por lo que el cromo total no genera una alarma de impacto en la calidad.

#### 2.1.1.14.6. Níquel

Las concentraciones de níquel en el río Torca tampoco presentan variaciones importantes. Los valores en todos los puntos de monitoreo estuvieron entre 0,003 y 0,011 mg/L, excluyendo un valor muy elevado fuera del rango intercuartil (figura 2.19). Se puede observar que la gran mayoría de los datos se mantuvieron

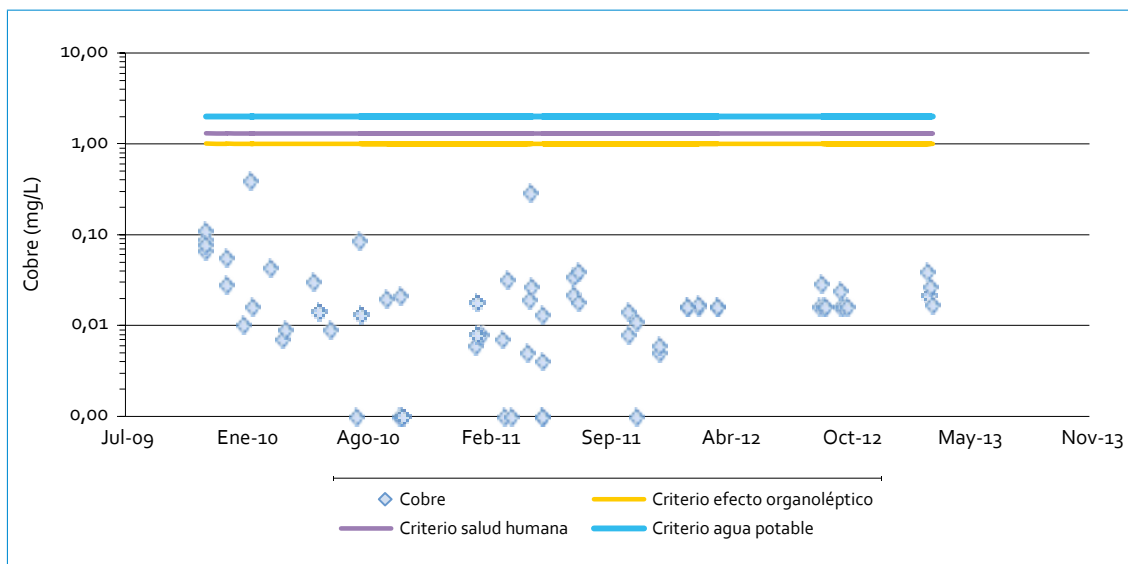


FIGURA 2.17. Perfil de cobre: río Torca

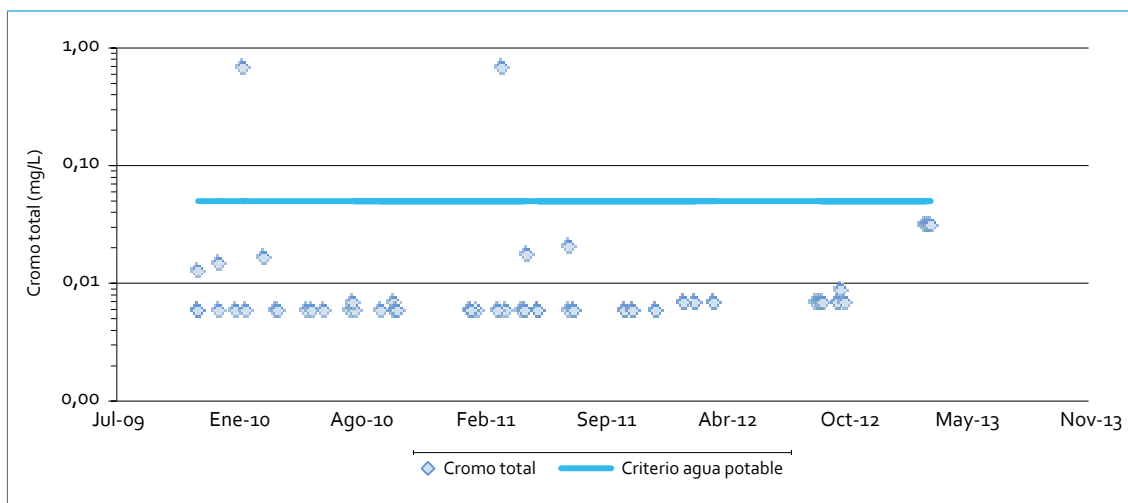


FIGURA 2.18. Perfil de cromo total: río Torca

muy cerca al límite de detección (0,001; 0,003 y 0,006 mg/L, según el periodo). Las concentraciones por encima del límite de detección se registraron especialmente en San Simón. En promedio, todos los puntos presentaron niveles homogéneos de níquel y mostraron una baja variabilidad a lo largo del río. Es importante mencionar que solo un dato excedió los criterios establecidos por la OMS para agua

potable (0,07 mg/L) y la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos para la vida acuática (rango entre 0,005 y 0,44 mg/L), al evidenciar que no hay un impacto considerable en el agua del río respecto a los niveles de níquel. A lo largo de tiempo el níquel no ha variado significativamente y las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,003 mg/L.

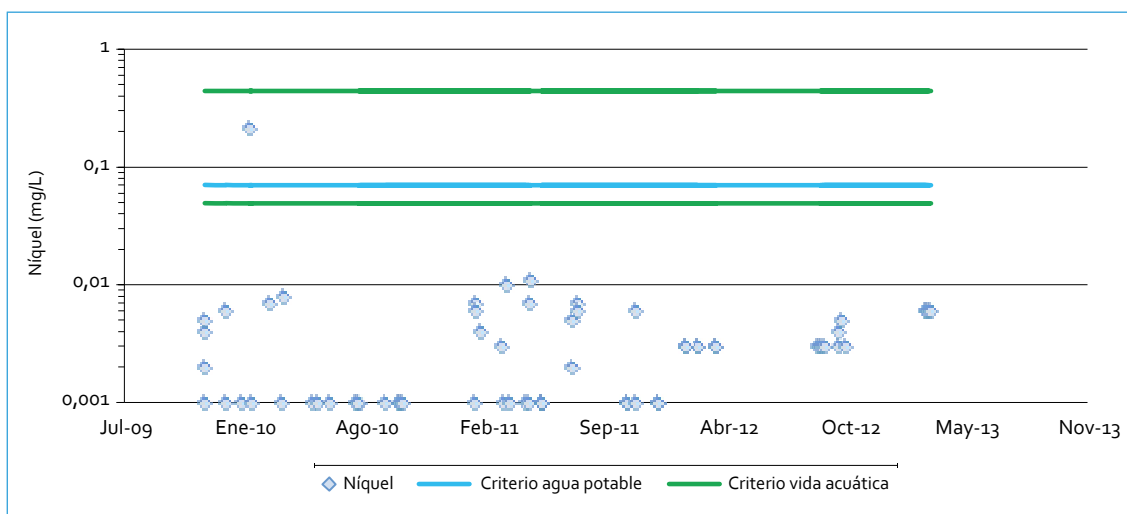


FIGURA 2.19. Perfil de níquel: río Torca

#### 2.1.1.14.7. Plomo

Las concentraciones de plomo en el río Torca muestran que hacia la parte alta hay una tendencia a valores más bajos (figura 2.20). Las concentraciones más altas se presentaron con mayor frecuencia en Jardines de Paz y San Simón, y en menor proporción, en Calle 161. En Bosque de Pinos, y antiguamente en Canal El Cedro, las concentraciones de plomo fueron las

menores del río Torca, muy cercanas al límite de detección (0,003 mg/L), lo que denota la buena calidad del punto, incluso para proteger la vida acuática (efecto agudo 0,5 mg/L) y como fuente para agua potable (0,01 mg/L). En los demás puntos de la cuenca media y de la baja se notó un aumento con respecto al punto anterior, asociado a descargas de aguas residuales. Allí, cerca del 50 % de los datos excede el criterio para agua potable de

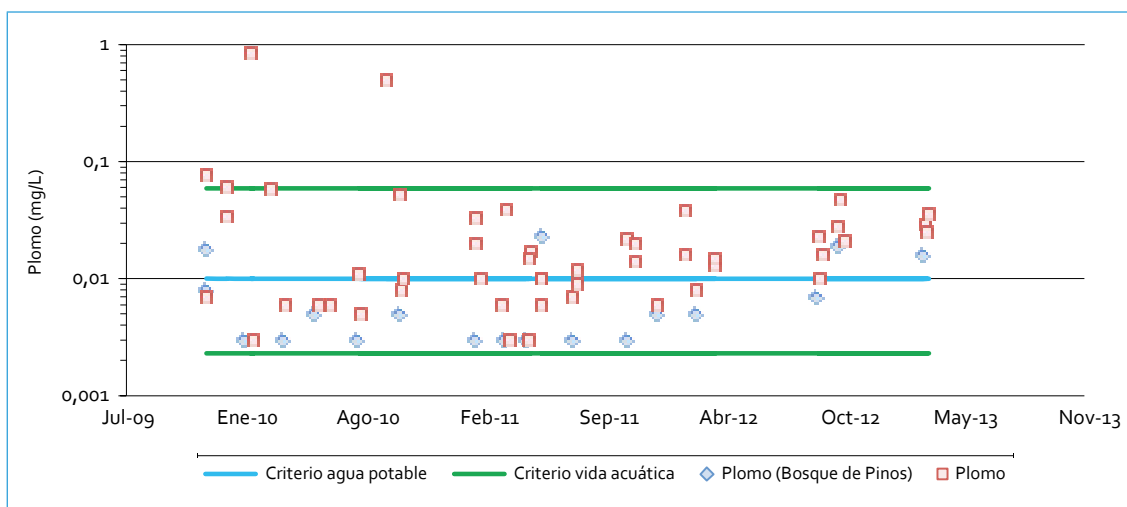


FIGURA 2.20. Perfil de plomo: río Torca



la OMS (0,01 mg/L), lo cual muestra que hay un impacto considerable en el agua del río. A lo largo de tiempo el plomo no ha variado significativamente en el río; a partir del segundo punto las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,05 mg/L.

2.1.2. Cargas contaminantes

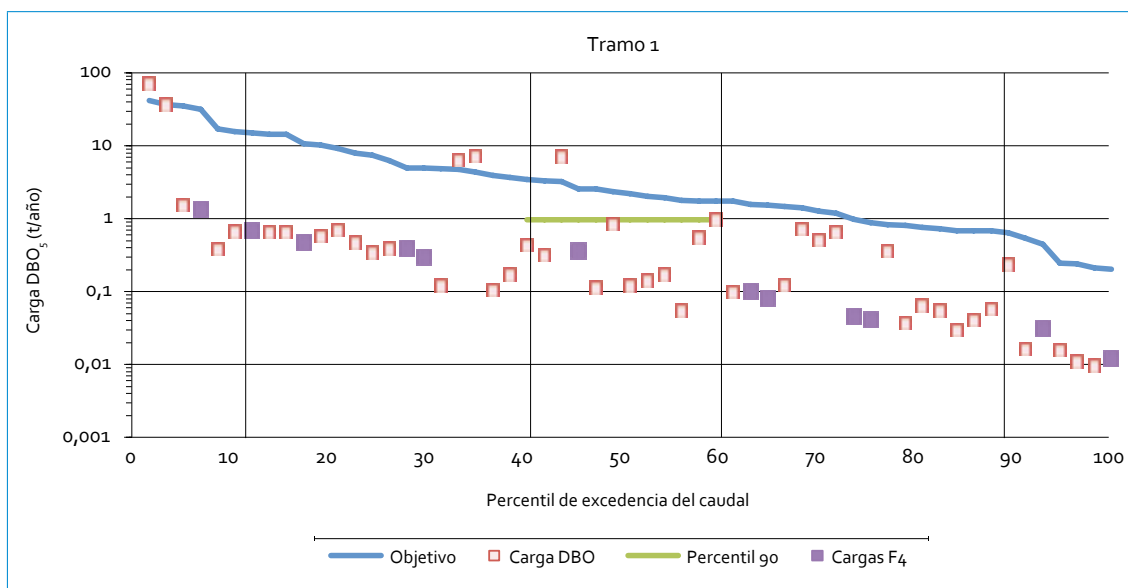
2.1.2.1. DBO<sub>5</sub>

La curva de duración de carga de DBO<sub>5</sub> en cada tramo del río Torca está en la figura 2.21, la cual presenta la carga máxima de DBO<sub>5</sub> sin exceder el criterio de calidad en el rango de condiciones de flujo (línea azul). Las cargas puntuales (cuadros rojos) representan las muestras individuales de DBO<sub>5</sub> desde noviembre de 2009 a junio de 2013, y las resaltadas en color azul son las cargas de DBO<sub>5</sub> obtenidas en el último año de monitoreo. Los puntos por encima de las curvas de duración indican que incumplieron el estándar en el momento del muestreo. Se puede apreciar un aumento significativo en las

cargas de DBO<sub>5</sub> en los dos tramos del río, lo cual evidencia el alto impacto de los vertimientos una vez el río entra al perímetro urbano. Es importante mencionar que la diferencia en carga de DBO<sub>5</sub> fue una de las más significativas. En la tabla 2.2 se puede observar el cambio de estas cargas promedio entre los dos tramos del río y sus diferencias con las metas.

TABLA 2.2. Carga DBO<sub>5</sub> (rango medio de caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
DBO <sub>5</sub>		
Percentil 90 (2009-2013)	1,00	549
Promedio (2009-2013)	0,90	294
Promedio (2012-2013)	0,36	321
<b>Carga curva duración (percentil 50)</b>	<b>2,30</b>	<b>1334</b>
PSMV	-	-
<b>Meta de reducción</b>	-	<b>45</b>
Línea base-promedio (2012-2013)	-	<b>11</b>



Continúa

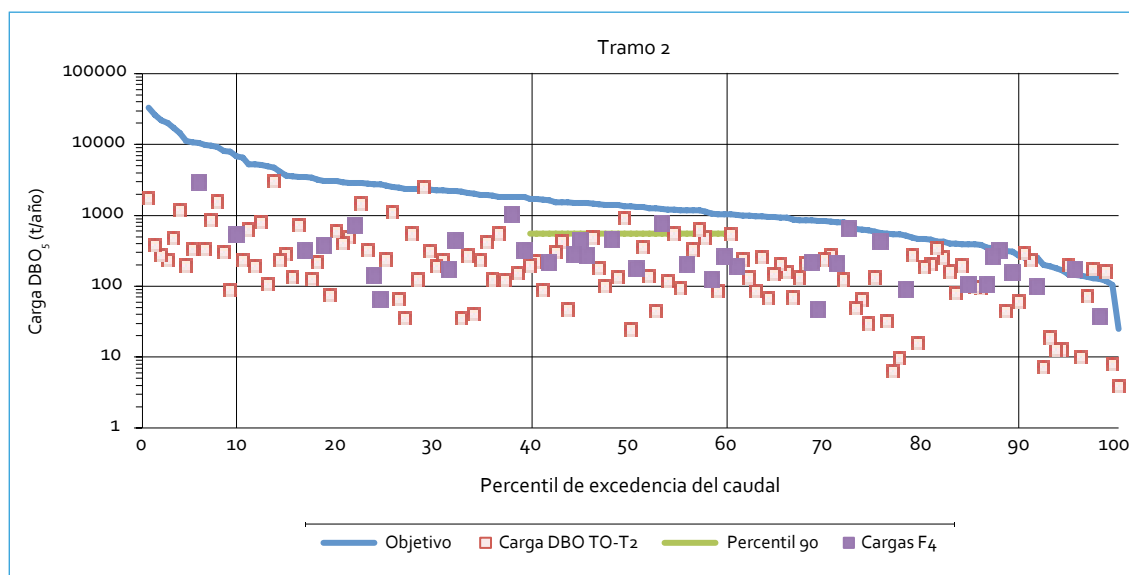


FIGURA 2.21. Curva de duración de carga  $DBO_5$ ; río Torca

Las cargas de  $DBO_5$  del tramo 1 corresponden al punto Bosque de Pinos donde se encontró variación en los datos entre 0,01 y 71 t/año. Al comparar estos resultados con el tramo 2 se destaca la buena condición del río antes de ser afectado por las descargas de agua residual. Frente a los resultados actuales (2012-2013), las cargas de  $DBO_5$  en Bosque de Pinos se presentaron en todas las condiciones de caudal. En este tramo la curva de duración de carga no fue excedida en ningún momento (es decir, a partir de julio de 2010); solamente en algunos monitoreos en Canal el Cedro la carga de  $DBO_5$  superó la carga objetivo en condiciones de caudales altos a rango medio.

Para el tramo 2 las cargas fueron más variables y más elevadas que las del tramo 1. En este último fluctuaron en un rango de 4 a 3079 t/año. Aun considerando la dispersión de los datos, se puede inferir que hay un comportamiento de las cargas acorde con la condición hidrológica, puesto que los datos más elevados tendieron a presentarse en condiciones húmedas, y las más bajas, en condiciones secas. En

condiciones medias de caudales, en ningún monitoreo se excedió la curva de duración y el percentil 90 de los datos estuvo alrededor de un 60% por debajo del percentil 50 de la carga objetivo. Por el contrario, en condiciones secas, las cargas en Calle 161 tendieron a superar la curva de duración y denotaron incumplimiento en algunas ocasiones.

También se debe resaltar que en el rango de caudales medios la mayor carga de  $DBO_5$  del río se presentó en el punto Jardines de Paz. En referencia a la meta de reducción (45 t) esta se ha venido cumpliendo, puesto que la diferencia entre la línea base y la carga actual es de 11 t.

#### 2.1.2.2. DQO

La figura 2.22 presenta las cargas de DQO en los dos tramos del río Torca con sus respectivas curvas de duración, siendo el segundo el principal participante en carga. Las diferencias de las cargas entre el tramo 1 y el 2 fueron en menor en magnitud para este parámetro que para la  $DBO_5$  (tabla 2.3).

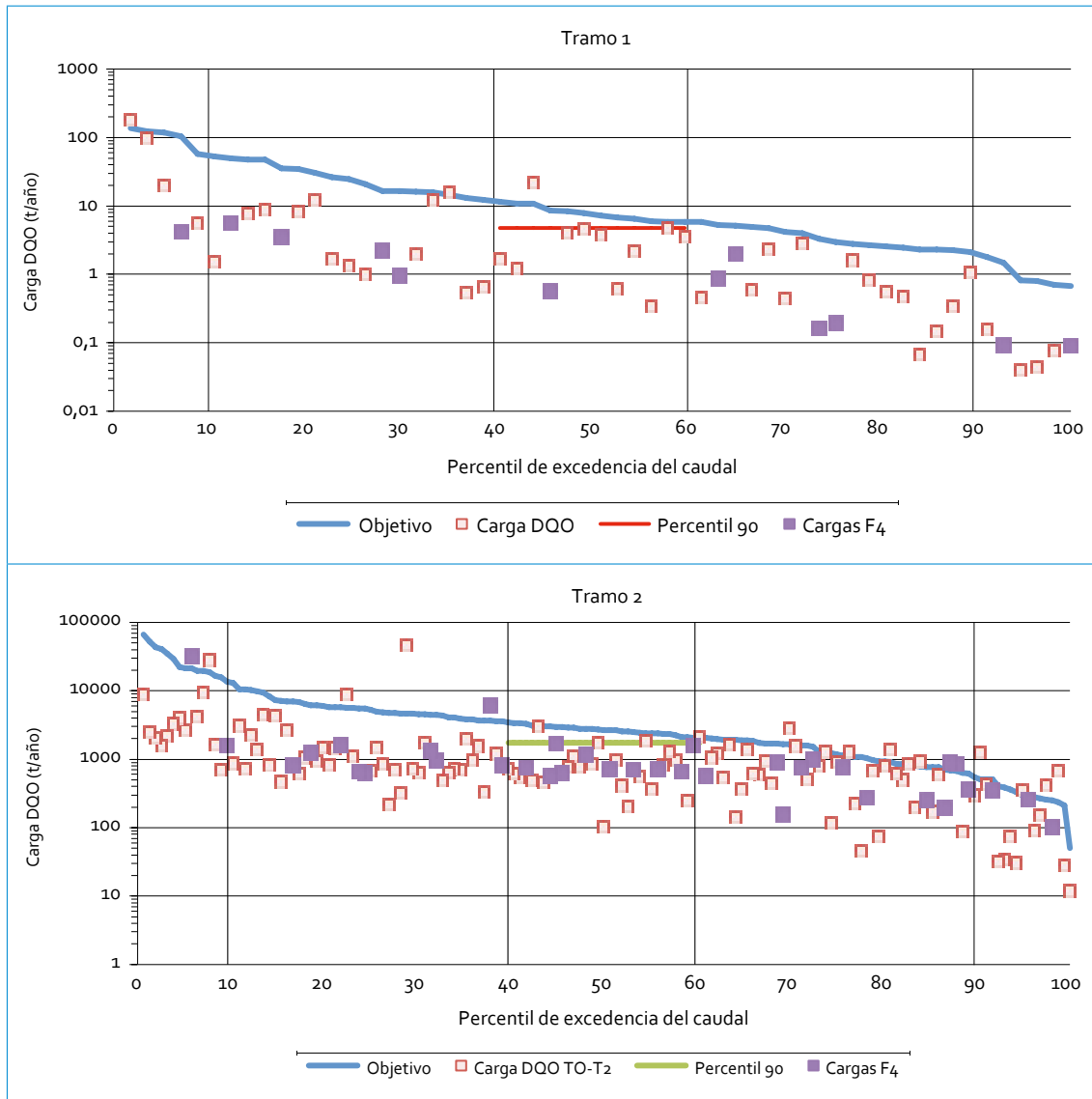


FIGURA 2.22. Curva de duración de carga DQO: río Torca

TABLA 2.3. Carga DQO (rango medio de caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
DQO		
Percentil 90 (2009-2013)	4,8	1743
Promedio (2009-2013)	4,1	919
Promedio (2012-2013)	0,6	923

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
Carga curva duración (percentil 50)		2669
PSMV		-
<b>Meta de reducción</b>		70
Línea base-promedio (2012-2013)	-	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio 2012-2013).

Como se puede ver en la figura, en el tramo 1 las cargas fueron casi despreciables en comparación con las del tramo 2; estas cargas variaron entre 0,04 y 183 t/año. Al igual que para la  $DBO_5$ , solo en algunos monitoreos en Canal El Cedro (3 de 15) la carga de DQO superó la carga objetivo en condiciones de caudales altos a rango medio y mostró una diferencia en las cargas entre Bosque de Pinos y Canal El Cedro, producto de las primeras descargas de aguas residuales que recibe el río.

En el tramo 2, la variabilidad de los datos fue alta, con oscilaciones entre 12 y 46305 t/año. A diferencia de la  $DBO_5$ , en los resultados de carga de DQO no se evidenció una tendencia hacia la curva de duración; en condiciones húmedas las cargas tendieron a estar por debajo de la curva de duración y en condiciones secas por encima, lo cual denota que, independientemente del periodo hidrológico, las cargas se mantuvieron alrededor de los 1000 t/año. Los mayores incumplimientos frente al estándar se presentaron entre el percentil 60 y 100 (condiciones secas). Cerca del 20% de las cargas estimadas para dichos percentiles superó la curva de duración. Estas cargas se presentaron mayoritariamente en el punto Calle 161 entre mayo y agosto de 2011 y en un par de monitoreos del último año. Este comportamiento denota la condición crítica en cargas contaminantes de la cuenca media del río.

Por otro lado, la diferencia entre la línea base y la carga promedio (en rango medio de caudales) del último periodo de monitoreo refleja que se han aumentado las cargas en el tiempo; por lo tanto, hacen falta aún más esfuerzos para lograr la meta de reducción (70 t) establecida en la Resolución 4328 de 2010.

### 2.1.2.3. SST

En Bosque de Pinos, las cargas variaron en el rango de 0,03 a 552 t/año y mostraron que este tramo del río se encuentra en buenas condiciones. Así como para la materia orgánica, las cargas de SST tendieron a variar según el caudal (figura 2.23); sin embargo, en condiciones húmedas se dispersaron un poco más los datos y registraron cargas por encima de la curva de duración. En condiciones medias de caudal solo un monitoreo excedió la curva de duración, el cual se presentó en el antiguo punto de monitoreo (Canal El Cedro). Además, el percentil 90 de los datos estuvo alrededor de un 10% por debajo del percentil 50 de la carga objetivo (tabla 2.4) y las cargas de 2012-2013 tendieron a estar muy por debajo de la curva de duración, lo cual denota que a lo largo del tiempo las cargas han disminuido.

TABLA 2.4. Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
SST		
Percentil 90 (2009-2013)	2,6	1870
Promedio (2009-2013)	1,3	1136
Promedio (2012-2013)	0,5	723
<b>Carga curva duración (percentil 50)</b>		1334
PSMV		-
<b>Meta de reducción</b>		60
Línea base-promedio (2012-2013)	-	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio 2012-2013).

El tramo 2 cuenta con cargas mucho más elevadas con rango entre 1,7 y 17 6791 t/año, con lo cual muestra una muy alta variabilidad

en los datos. Aun considerando su dispersión, se puede inferir que hay un comportamiento de las cargas acorde con la condición hidrológica, puesto que los datos más elevados tendieron a presentarse en condiciones muy húmedas y las más bajas en condiciones secas. En condiciones medias de caudales en varios monitoreos, se excedió la curva de duración y el percentil 90 de los datos estuvo alrededor de un 40% por encima del percentil 50 de la

carga objetivo, y esta situación se acentuó en condiciones secas, en la que hubo una mayor frecuencia de cargas por encima de la carga objetivo (curva de duración). La mayoría de las cargas que incumplen el estándar en el rango medio de caudales se presentaron en Jardines de Paz. Por último, en referencia a la meta de reducción (60 t), dado que la carga actual se ha aumentado con referencia a la carga base, todavía se incumple la meta (figura 2.23).

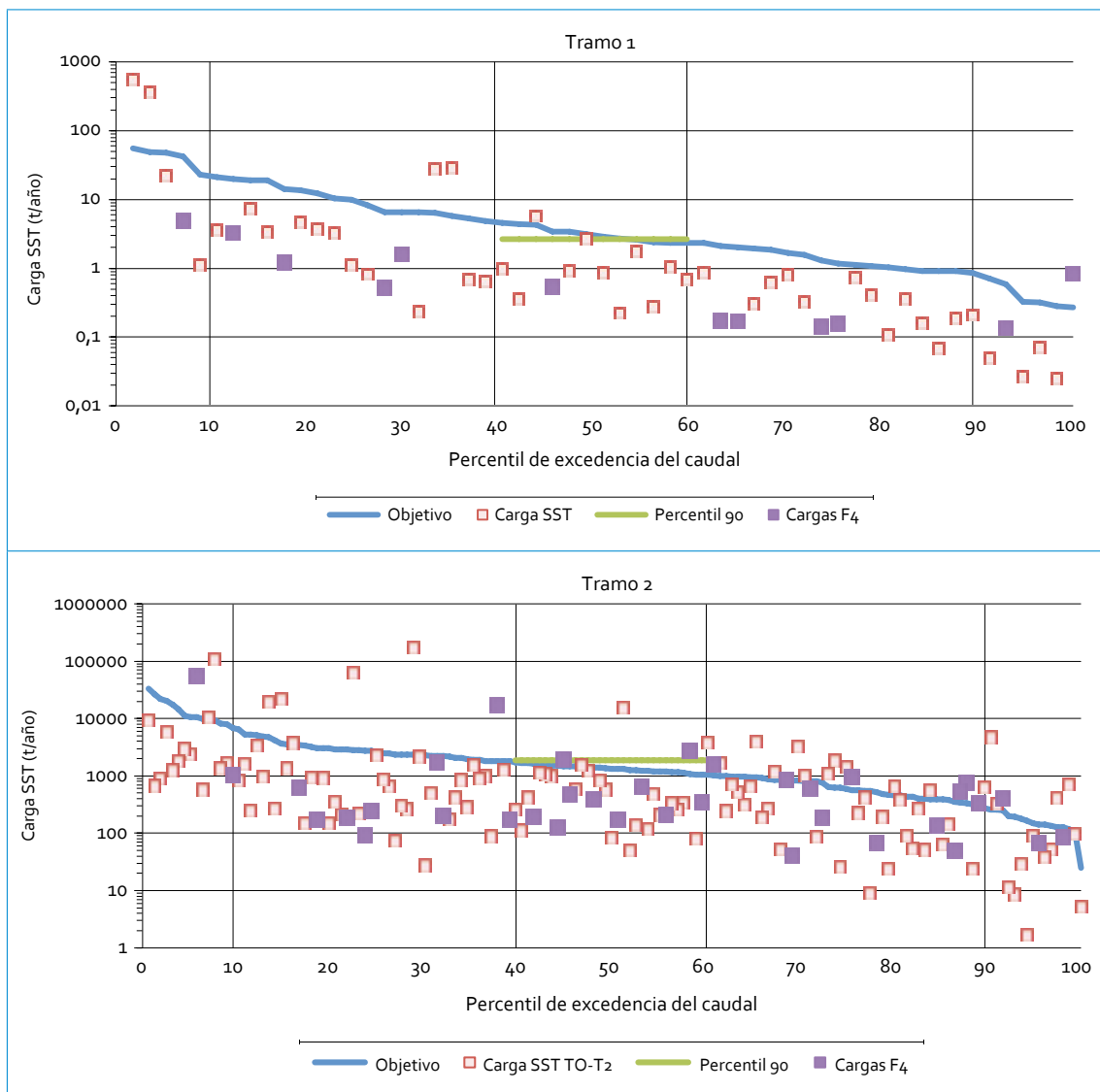


FIGURA 2.23. Curva de duración de carga SST: río Torca

#### 2.1.2.4. Nitrógeno total

En la figura 2.24 se presentan las cargas de  $N_{total}$  y sus respectivas curvas de duración por tramo del río Torca. A partir de la tabla 2.5 fue evidente notar que las cargas del tramo 2 son las de mayor participación en la carga total. Aunque la diferencia en carga entre el tramo 1 y el tramo 2 fue menos notable para  $N_{total}$  que para la materia orgánica, sigue siendo una diferencia muy marcada.

En el tramo 1, las cargas variaron entre 0,01 y 19 t/año y mostraron poca variabilidad en los datos y buena calidad del agua. Aunque las cargas de  $N_{total}$  tendieron a variar según el caudal, en condiciones secas se dispersaron un poco los datos, al registrar cargas por encima de la curva de duración. En el rango medio de caudales, el percentil 90 de las cargas fue levemente superior a la carga máxima, dado que en el antiguo punto monitoreo (Canal El Cedro) las cargas tendieron a ser altas. A par-

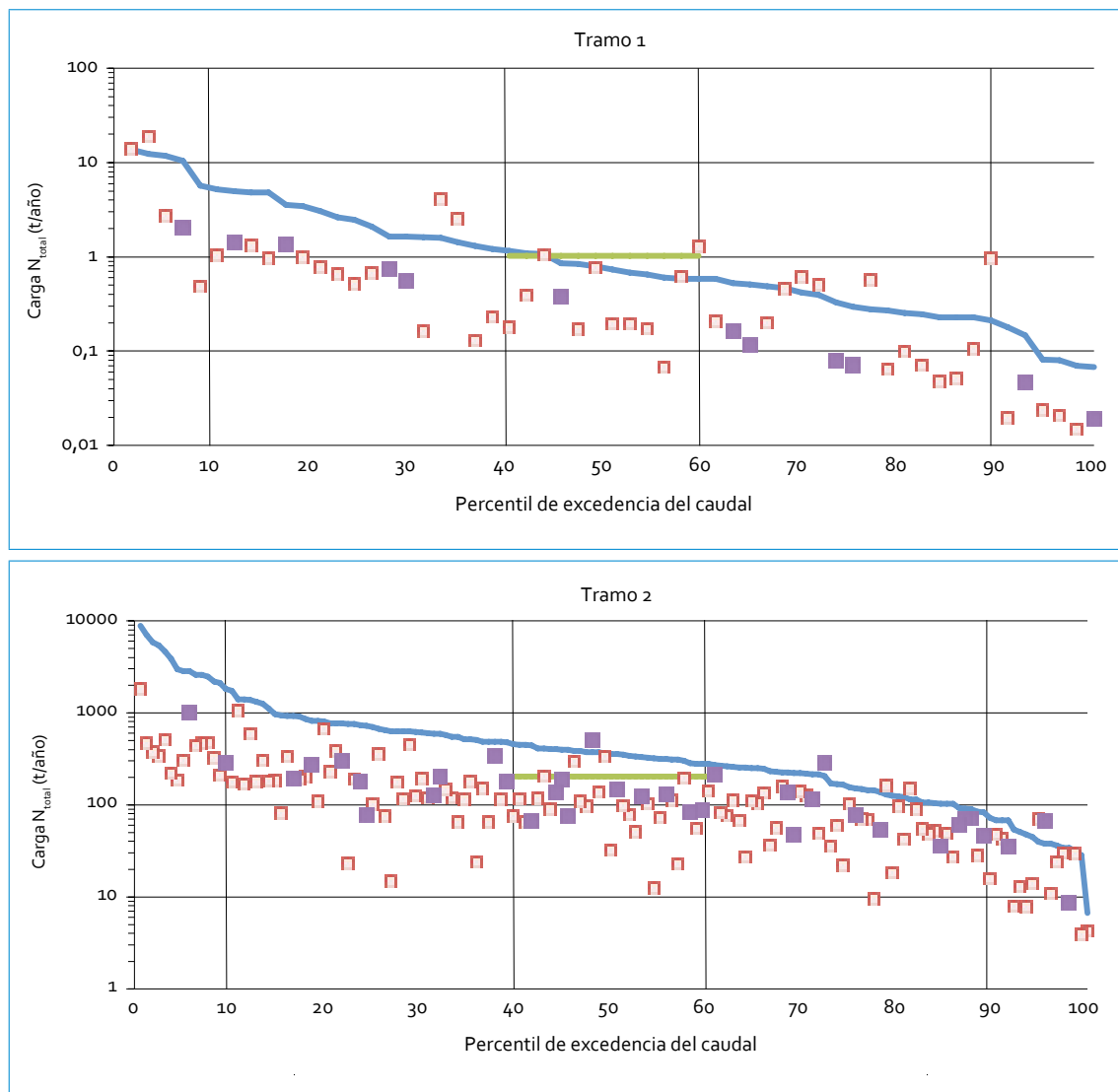


FIGURA 2.24. Curva de duración de carga  $N_{total}$ : río Torca

TABLA 2.5. Carga  $N_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca [t/año]	
	T1	T2
$N_{total}$		
Percentil 90 (2009-2013)	1,0	203
Promedio (2009-2013)	0,5	126
Promedio (2012-2013)	0,4	153
<b>Carga curva duración (percentil 50)</b>		356
PSMV		-
<b>Meta de reducción</b>		25
Línea base-promedio (2012-2013)	-	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio 2012-2013).

tir de los resultados de la fase 4 se notó que la mayoría de cargas se alejaron de la curva y cumplieron con el estándar.

Las cargas del tramo 2 corresponden a los puntos Calle 161, Jardines de Paz y San Simón, donde se encontró una dispersión en los datos entre 3,9 y 1812 t/año. Se observó una tendencia hacia la curva de duración, aunque en condiciones húmedas las cargas tendieron a estar por debajo de esta curva y en condiciones secas por encima o muy cercanas. El incumplimiento frente al estándar (reflejado en la curva de duración de carga) fue muy esporádico y se presentó entre el percentil 60 y 100 (condiciones secas y caudales bajos); tan solo el 8% de las cargas estimadas para dichos percentiles superó la curva de duración. En cuanto a la meta de reducción, la carga que debe ser reducida (25 t) mostrará cambios en la calidad del agua referente a este nutriente. Dado que la carga actual (promedio de la fase 4 en el rango medio de caudales) se ha mantenido relativamente constante con referencia

a la carga base, todavía hacen falta muchos esfuerzos para el cumplimiento de la meta.

#### 2.1.2.5. Fósforo total

Las cargas de fósforo por cada tramo del río Torca se presenta en la figura 2.25 con sus respectivas curvas de duración. La diferencia en cargas entre T1 y T2, así como para  $N_{total}$  fue significativa aunque en menor proporción, con mayor participación de la carga en T2 (tabla 2.6).

TABLA 2.6. Carga  $P_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
$P_{total}$		
Percentil 90 (2009-2013)	0,17	27
Promedio (2009-2013)	0,09	16
Promedio (2012-2013)	0,11	19
<b>Carga curva duración (percentil 50)</b>		53
PSMV		-
<b>Meta de reducción</b>		4
Línea base-promedio (2012-2013)	-	2

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio 2012-2013).

Las cargas en el tramo 1 del río (Bosque de Pinos) fueron muy pequeñas (0,004 a 3,3 t/año). Estas fueron las más bajas en comparación con los tramos siguientes. En caudales bajos y condiciones secas (percentil 60 a 100) las cargas fueron bajas, con promedio de 0,04 t/año; en el rango medio de caudales el promedio fue de 0,11 t/año; mientras que en condiciones húmedas y caudales altos (percentil 0 a 40) el promedio de carga de  $P_{total}$  fue de 0,5 t/año. En este tramo, la curva de duración de carga no

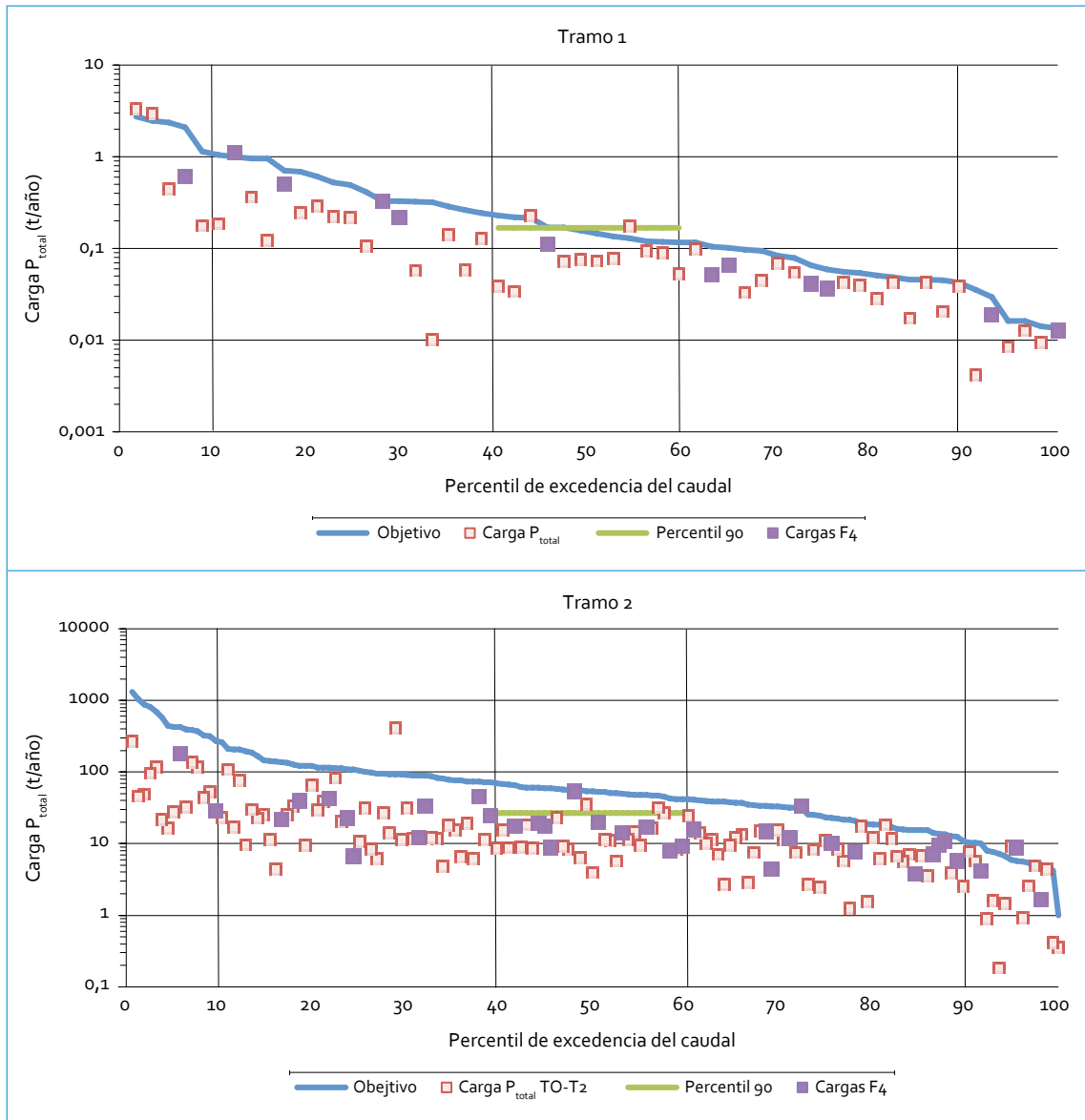


FIGURA 2.25. Curva de duración de carga  $P_{total}$ : río Torca

fue excedida en ningún momento y las cargas en la última campaña de monitoreo tendieron a ser similares a la curva.

En el tramo 2 las cargas fueron más variables y más elevadas que el tramo anterior, con rango entre 0,2 y 419 t/año. Esta variación está relacionada con las descargas de agua residual que se reciben a lo largo del río, que aumenta de manera considerable el transporte de nu-

trientes en la cuenca baja. Así como para el  $N_{total}$ , las cargas de  $P_{total}$  mostraron una variación en función del caudal, aunque en condiciones húmedas estas tendieron a estar por debajo de la curva de duración, y en condiciones secas, por encima o muy cercanas. El incumplimiento frente al estándar (reflejado en la curva de duración de carga) fue muy esporádico y se presentó entre el percentil 60



y 100 (condiciones secas y caudales bajos); tan solo el 6 % de las cargas estimadas para dichos percentiles superó la curva de duración y se encontraron principalmente en Calle 161.

Teniendo en cuenta las cargas reportadas para el último periodo de monitoreo (fase 4) en el rango medio de caudales, la meta de reducción (4 t) tiene un impacto leve en términos de reducción de carga; sin embargo, cabe resaltar que la meta se ha venido cumpliendo en un 50 % aproximadamente.

2.1.2.6. *Grasas y aceites*

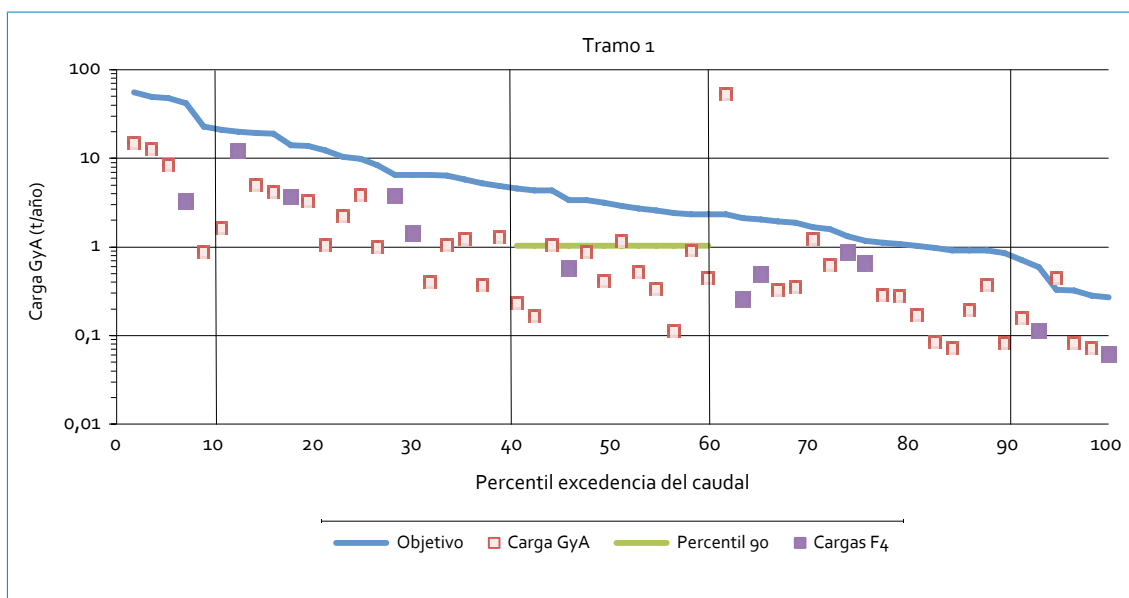
Las cargas de grasas y aceites en el río Torca se presentan en la figura 2.26 con sus respectivas curvas de duración, mostrando cambios importantes entre los tramos 1 y 2. Las diferencias de las cargas entre los dos tramos fueron de menor magnitud para este parámetro que para la materia orgánica (tabla 2.7), lo que indica una menor alteración de las condiciones naturales con respecto a grasas y aceites.

TABLA 2.7. Carga grasas y aceites (rango medio caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
GyA		
Percentil 90 (2009-2013)	1,00	315
Promedio (2009-2013)	0,56	122
Promedio (2012-2013)	0,57	214
<b>Carga curva duración (percentil 50)</b>		267

Las cargas en el tramo 1 del río fueron pequeñas y variaron entre 0,06 y 53 t/año. Así como la mayoría de parámetros, en el tramo 1 las cargas tendieron a variar en función del caudal; sin embargo, en el caso de grasas y aceites las cargas estuvieron muy por debajo de la curva de duración y ningún valor (excepto de una concentración atípica) excedió la carga objetivo.

En el tramo 2 la variabilidad de los datos fue alta: el rango osciló entre 0,7 y 2687 t/año. Así como para los nutrientes, en los resultados de carga de grasas y aceites se evidenció



Continúa

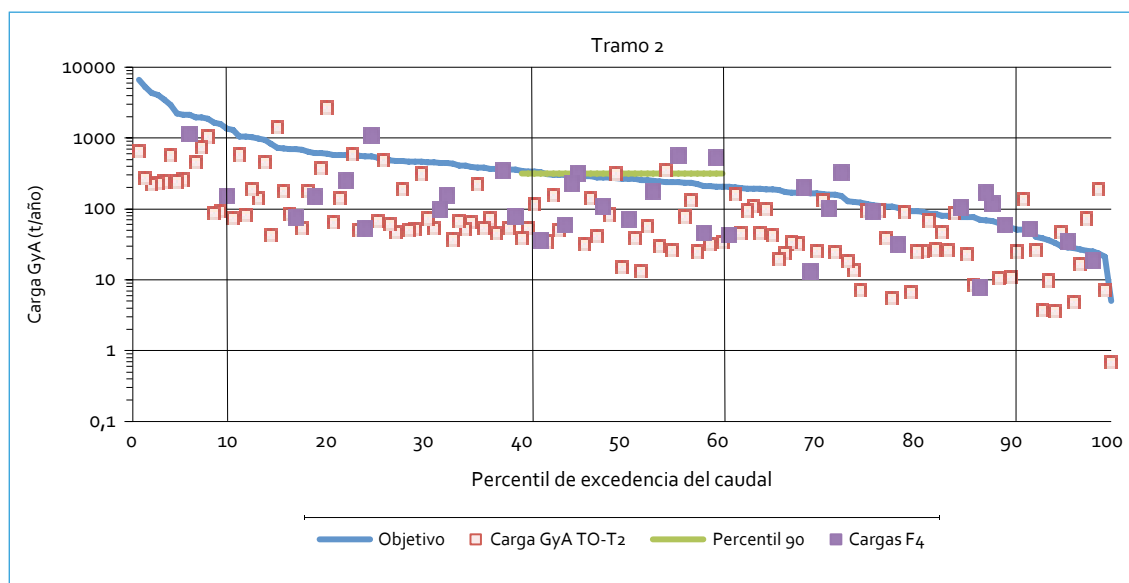


FIGURA 2.26. Curva de duración de carga grasas y aceites: río Torca

una tendencia hacia la curva de duración. En condiciones húmedas las cargas fueron más altas que en condiciones secas. Los mayores incumplimientos frente al estándar (reflejado en la curva de duración de carga) se presentaron entre el percentil 60 y 100 (condiciones secas), pues cerca del 20 % de las cargas estimadas para dichos percentiles superó la curva de duración. Estas cargas se presentaron mayoritariamente en el punto Calle 161.

#### 2.1.2.7. SAAM

En el tramo 1 las cargas variaron entre 0,0003 y 1,2 t/año con baja variabilidad en los resultados. Los datos fueron muy dispersos y, por lo tanto, no es posible correlacionar las cargas con el caudal. Sin embargo, si se enfoca en los resultados de la última fase de monitoreo (fase 4), las cargas variaron en función del caudal y se registraron las más altas en la condición húmeda y las más bajas en la seca (figura 2.27). Este comportamiento permite inferir que es posible que la dispersión se dé por la diferen-

cia tan marcada en las cargas registradas en el antiguo punto de monitoreo (Canal El Cedro) y el nuevo (Bosque de Pinos). A pesar de la dispersión, las cargas no excedieron la curva de duración y mostraron una condición óptima en cumplimiento con el estándar (tabla 2.8).

TABLA 2.8. Carga de SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Torca

Parámetro	Río Torca (t/año)	
	T1	T2
SAAM		
Percentil 90 (2009-2013)	0,090	31
Promedio (2009-2013)	0,100	19
Promedio (2012-2013)	0,003	17
<b>Carga curva duración (percentil 50)</b>		<b>36</b>

En el tramo 2 las cargas de SAAM fueron más elevadas que en el tramo 1 (tabla 2.8), y se notó un mejor ajuste al comportamiento de los caudales, porque mostró una relación directa entre la carga y el caudal. Así como para las grasas y aceites y los SST, en condiciones

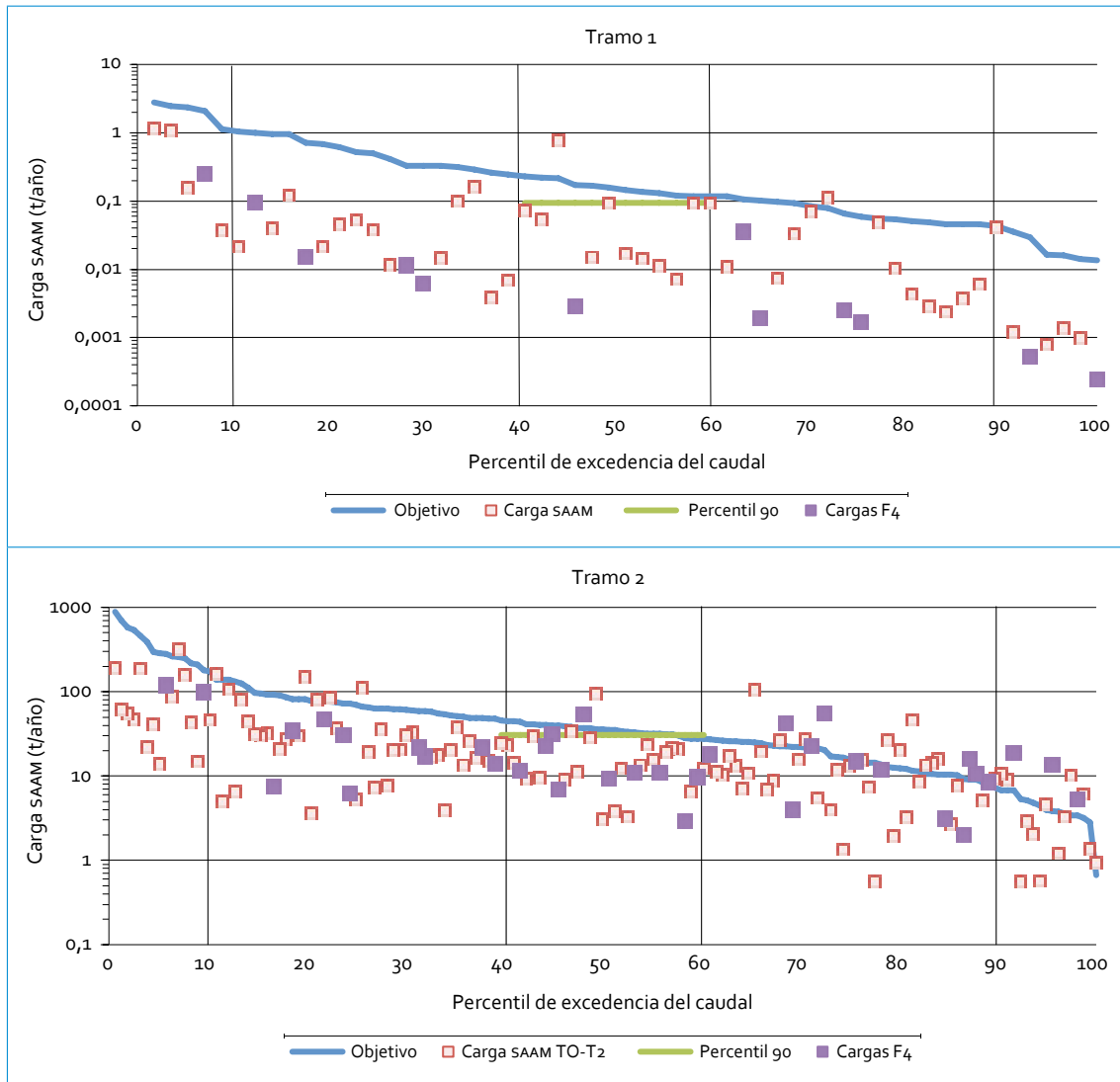


FIGURA 2.27. Curva de duración de carga SAAM: río Torca

medias de caudales en un par de monitoreos se excedió la curva de duración y el percentil 90 de los datos estuvo por encima del percentil 50 de la carga objetivo, y esta situación se acentúa en condiciones secas, en la que hubo una mayor frecuencia de cargas por encima de la carga objetivo (curva de duración). La mayoría de las cargas que incumplen el estándar, en las condiciones secas y caudales bajos (percentil 60 al 100 en la curva de duración) se presentaron en Jardines de Paz.

## 2.2. Calidad del agua

En el tramo 1 de este río hay un punto de monitoreo (Bosque de Pinos) con un total de datos de 102, de los cuales todos alcanzaron los objetivos de calidad (Resolución 5731 de 2008). El índice de calidad del agua (wqi) en el tramo 1 para el periodo evaluado fue **excelente** (tabla 2.9).

TABLA 2.9. WQI río Torca: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	0	F1	0,00
DBO <sub>5</sub>	0	F2	0,00
DQO	0	NSE	0,00
N <sub>total</sub>	0	F3	0,00
P <sub>total</sub>	0	WQI	100
SST	0		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	0		
SAAM	0		

En comparación con los resultados obtenidos anteriormente (2011-2012), el WQI se ha mantenido en la misma categoría **excelente**. Frente a los resultados 2010-2011, la calidad mejoró pasando de **buena** a **excelente**, aunque el valor del WQI no varió significativamente (pasó de 94 a 100). La única diferencia que tuvieron los datos de un periodo a otro fue en P<sub>total</sub>, ya que para 2010-2011 se encontró un valor que excedió el objetivo; mientras que en este periodo (2012-2013) todos los valores de P<sub>total</sub> estuvieron por debajo del objetivo.

En el tramo 2 de este río hay tres puntos de monitoreo (Calle 161, Jardines de Paz y San Simón) con un total de datos de 305 datos, de los cuales 44 no satisficieron los objetivos de calidad. El WQI para este tramo fue **marginal**. En este caso, los únicos parámetros que alcanzaron el objetivo en un 100 % fueron SST y pH; entre tanto, los parámetros que más veces incumplieron los objetivos fueron coliformes fecales y SAAM, evidenciado en que

el deterioro de la calidad del agua en este tramo se da principalmente por las descargas de aguas residuales domésticas (tabla 2.10). En cuanto a los coliformes fecales, el 66 % de los datos de esta variable estuvieron por encima del objetivo de calidad ( $1 \times 10^6$  NMP/100 mL); estos datos se distribuyeron de manera similar en los tres puntos (Calle 161, Jardines de Paz y San Simón) y mostraron el efecto de las aguas residuales vertidas sobre la calidad del tramo 2 del río. Los tensoactivos presentes en este tramo también fueron críticos para la calidad del agua, especialmente en el punto Calle 161, donde el 64 % de los datos de SAAM en dicho punto superó lo establecido en la Resolución 5731 de 2008.

TABLA 2.10. WQI río Torca: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	5	F1	80,00
DBO <sub>5</sub>	1	F2	14,40
DQO	1	NSE	0,04
N <sub>total</sub>	1	F3	3,78
P <sub>total</sub>	1	WQI	53,01
SST	0		
Grasas y aceites	5		
Coliformes fecales	19		
pH	0		
SAAM	11		

En comparación con los resultados obtenidos previamente (2011-2012), la calidad del agua del tramo 2 se ha mantenido en la misma categoría **marginal**, aunque el valor de WQI aumentó (pasó de 47 en el 2011-2012 a 53 en el 2012-2013), lo que muestra una posible me-

jora entre los dos periodos. Se notó que dicha mejora está relacionada con la cantidad de variables y cantidad de datos que no alcanzaron los objetivos: en 2011-2012 las variables que excedieron los objetivos de calidad fueron 9, en tanto para 2012-2013 la cantidad disminuyó a 8; igualmente, la cantidad de datos que no alcanzaron los objetivos pasó de un 16 % a un 14 %. Por otro lado, comparando los resultados obtenidos en 2010-2011 con este periodo, la calidad del agua del tramo 2 tuvo un deterioro, pasando de una categoría **regular** a **marginal** (al cambiar de un WQI de 71 en 2010-2011 a 53 en 2012-2013). Este deterioro está relacionado con la cantidad de variables y cantidad de datos que no alcanzaron los objetivos; en 2010-2011 las variables que excedieron los objetivos de calidad fueron 5, y la cantidad de datos que no alcanzaron los objetivos en dicho periodo fue de un 8 %. Para este periodo el oxígeno disuelto fue crítico en la determinación de la calidad del

tramo 2 como se había presentado en periodos anteriores; en cambio, los coliformes fecales y SAAM siguieron siendo las variables más críticas del tramo. Adicionalmente, el punto con mayor frecuencia de incumplimiento ha sido Calle 161, lo que denota un sector con alto impacto por las descargas de agua residual.

En general, se pudo notar que para el tramo 1 no hubo una variable crítica y la calidad del agua fue **excelente**; mientras que para el tramo 2 los coliformes fecales y los tensoactivos fueron las variables más críticas, al mostrar una calidad **marginal**. En comparación con los resultados obtenidos en el periodo anterior (2011-2012), la calidad del agua se ha mantenido constante.

A continuación se presenta el mapa de calidad para el río Torca.

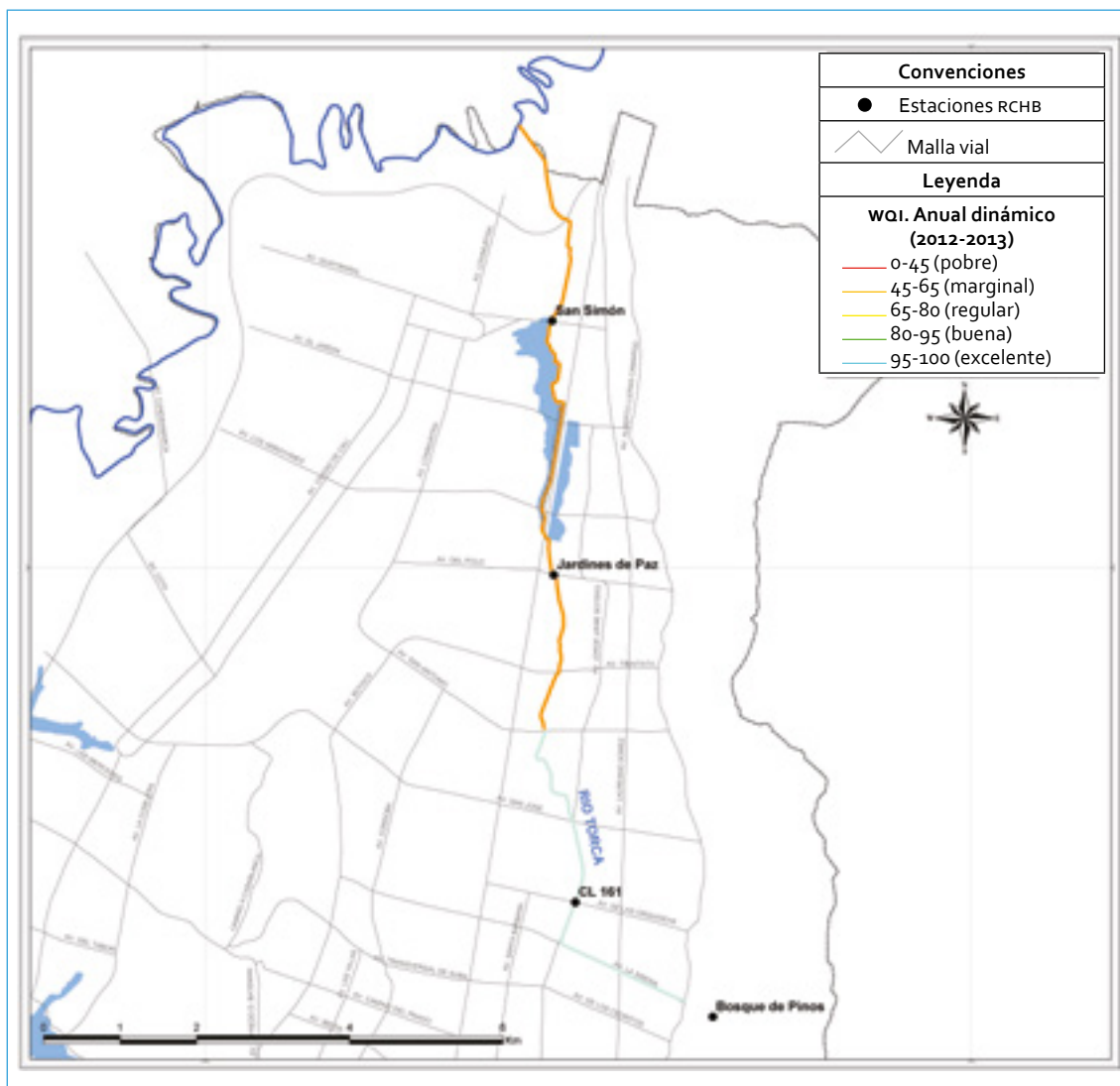


FIGURA 2.28. Mapa de calidad: río Torca

## 3. RÍO SALITRE

### 3.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico

#### 3.1.1. Validación de datos: diagramas de cajas

##### 3.1.1.1. pH

En la figura 3.1 se presenta el comportamiento de pH en el río Salitre. En la cuenca alta, especialmente en Parque Nacional, se pueden apreciar los valores más bajos posiblemente por una baja presencia de calcio (o bases alcalinas) en el lecho del río. El valor promedio en esta cuenca fue de 6,9 unidades, y el rango de

variación estuvo entre 4,4 y 8,8 unidades. La mayoría de valores por encima de 8 unidades se registró en el punto Arzobispo Carrera 7ª, lo que refleja el efecto de las primeras descargas de agua residual. Los valores más bajos de pH se registraron en un monitoreo en febrero de 2011. Esta situación no se ha repetido en el tiempo, lo que permite pensar que los valores de pH en la cuenca alta no alcanzan valores tan bajos en condiciones normales.

En la cuenca media se nota un incremento del pH por el efecto de las descargas de aguas residuales. Aunque los dos puntos de monitoreo de esta cuenca (NQS Calle 53 y Carrefour) se ven afectados por la descargas,

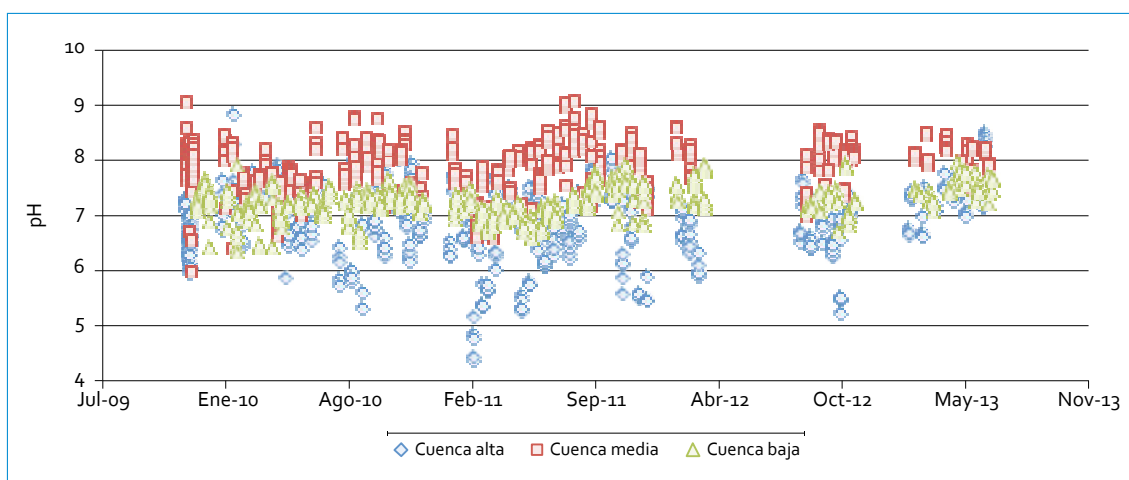


FIGURA 3.1. Perfil de pH: río Salitre

en el punto NQS con Calle 53 se registró una mayor frecuencia de datos de pH por encima de 8 unidades. El valor promedio del pH en la cuenca media fue de 7,9, y los datos variaron entre 6 y 9,1 unidades.

Finalmente, en la cuenca baja, la descomposición anaerobia de la materia orgánica genera una cantidad suficiente de ácidos grasos volátiles para disminuir el pH y muestra un equilibrio del pH en el último tramo del río. El valor promedio fue de 7,3 unidades y el rango de variación de esta cuenca fue el más pequeño (entre 6,4 y 8 unidades). En general, a lo largo del tiempo se ha podido notar que los valores de pH se han mantenido sin presentar cambios significativos.

### 3.1.1.2. Conductividad

En la cuenca alta se observa la diferencia en las conductividades de los dos puntos (Parque Nacional y Arzobispo Carrera 7ª); los valores más bajos se registraron en la parte más alta de la cuenca y no superaron los 53  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en el punto Arzobispo, donde se han recibido algunas descargas de aguas residuales, las conductividades varían entre 39 y 409

$\mu\text{S}/\text{cm}$ , y se asemejan más a las magnitudes encontradas en la cuenca media (figura 3.2). Aunque las conductividades en la cuenca alta no cambiaron significativamente en el tiempo, los datos registrados en Arzobispo Carrera 7ª fueron más altos entre febrero de 2010 y diciembre de 2011, al mostrar que hacia el primer semestre de 2011 las conductividades en este punto han tendido a disminuir.

En la cuenca media y baja se registraron las conductividades más altas del río y la variación de los datos no permite establecer una diferencia entre las dos cuencas; los valores medios fueron muy similares (cuenca media 451  $\mu\text{S}/\text{cm}$  vs. cuenca baja 487  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Las conductividades en las dos cuencas estuvieron entre 102 y 954  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y evidenciaron una alta dispersión ligada a la dinámica de las descargas de aguas residuales. En la cuenca media, Carrefour Avenida 68 fue el punto que con más frecuencia mostró conductividades por encima de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que refleja el alto y constante impacto que tienen las descargas de agua residual en este sector del río.

A lo largo del tiempo, en las cuencas media y baja se notó un comportamiento relativamente constante. Entre enero y noviembre de

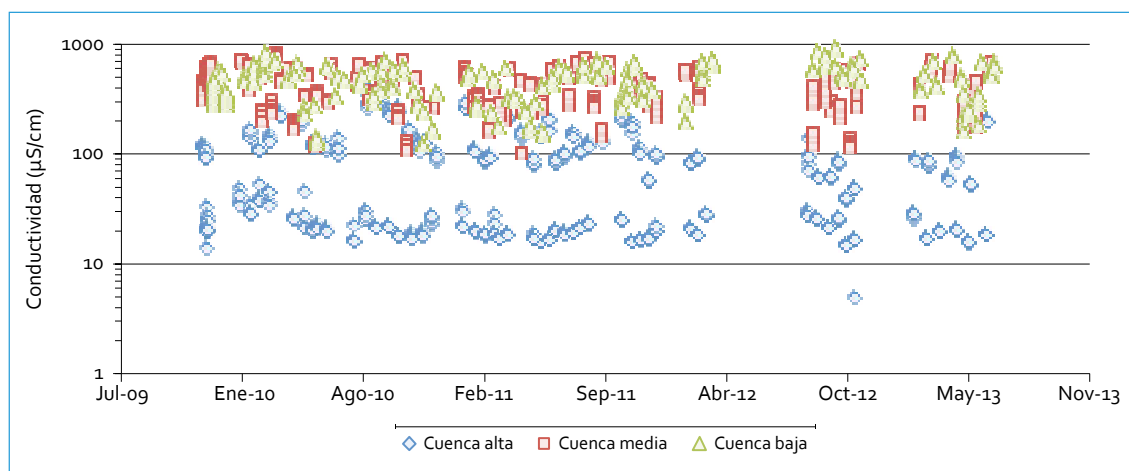


FIGURA 3.2. Perfil de conductividad: río Salitre



2010 hubo una mayor frecuencia en encontrar conductividades altas (superiores a  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) y mostraron posiblemente un periodo crítico en el río; sin embargo, en septiembre de 2012 se registraron las conductividades más altas en la cuenca baja.

### 3.1.1.3. Oxígeno disuelto

La figura 3.3 presenta el comportamiento de oxígeno disuelto en el río Salitre. Se observa que las concentraciones de oxígeno siguen disminuyendo a lo largo de su recorrido por la ciudad, al mostrar altos consumos de oxígeno en la cuenca media y condiciones anaerobias en la cuenca baja. En el punto más alto de la cuenca alta (Parque Nacional) los valores de oxígeno disuelto por debajo de  $6 \text{ mg/L}$  se presentaron en las primeras fases de monitoreo, entre noviembre de 2009 y mayo de 2010, cuando se analizaba el oxígeno disuelto por un método analítico en el laboratorio y no medición *in situ* por medio de sonda. A partir de junio de 2010 los valores oscilaron entre  $6,6$  y  $8,6 \text{ mg/L}$ , lo que indica muy buenas condiciones de calidad; sin embargo, en el punto más bajo de esta cuenca (Arzobispo Carrera 7ª) se

alcanzaron valores un poco más bajos (entre  $5,2$  y  $8,2 \text{ mg/L}$ ) que mostraron afectación.

En la cuenca media se ve una alta variabilidad de los datos ( $0,03$ - $8,2 \text{ mg/L}$ ) que refleja el efecto en el consumo de oxígeno disuelto en función de las descargas de agua residual a lo largo del día y a lo largo de la cuenca. El punto más bajo de la cuenca media (Carrefour Avenida 68) empieza a mostrar condiciones de anaerobiosis, por lo que el punto de esta cuenca es el que con más frecuencia presentó valores por debajo de  $0,5 \text{ mg/L}$ . En el comportamiento a lo largo del tiempo se notó que en los años 2010 y 2011 fue cuando se registraron con más frecuencia las concentraciones más bajas.

Finalmente, en la cuenca baja (Transversal 91 y Salitre Alameda) las concentraciones de oxígeno se acercaron a los  $0,1 \text{ mg/L}$ , que muestran la pérdida de capacidad autodepuradora del río como consecuencia de una alta cantidad de materia orgánica que agota rápidamente el oxígeno. La condición más crítica se presentó en 2011, ya que a partir de 2012 se han encontrado menos cantidad de datos por debajo de  $0,1 \text{ mg/L}$ , aun cuando todavía siguen siendo bajos y muestran condiciones anóxicas.

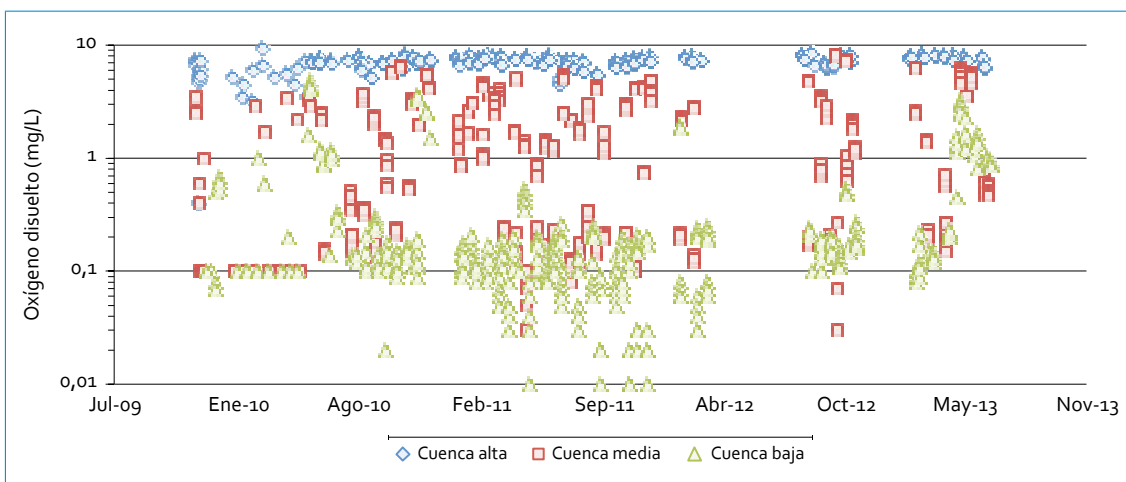
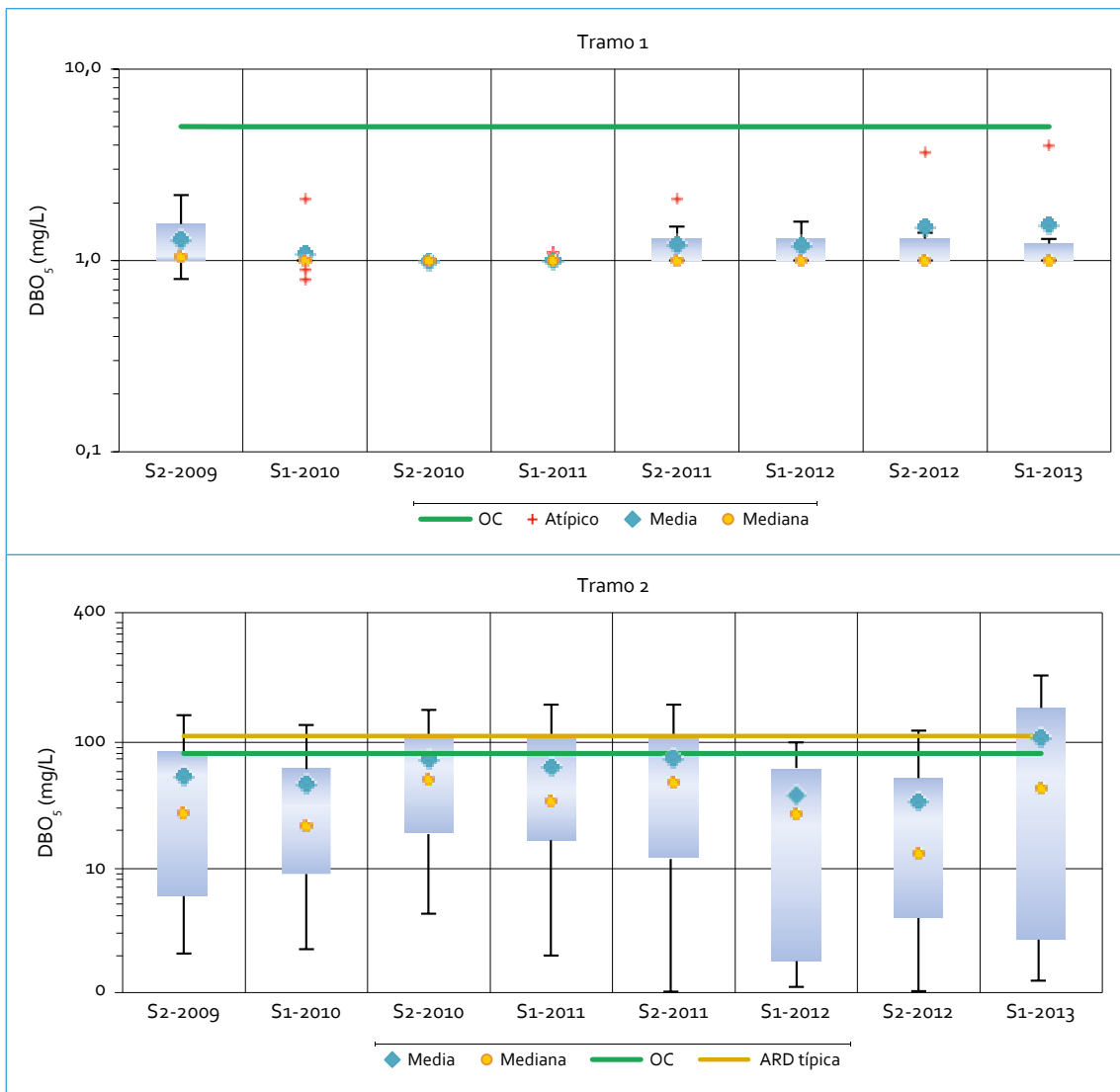


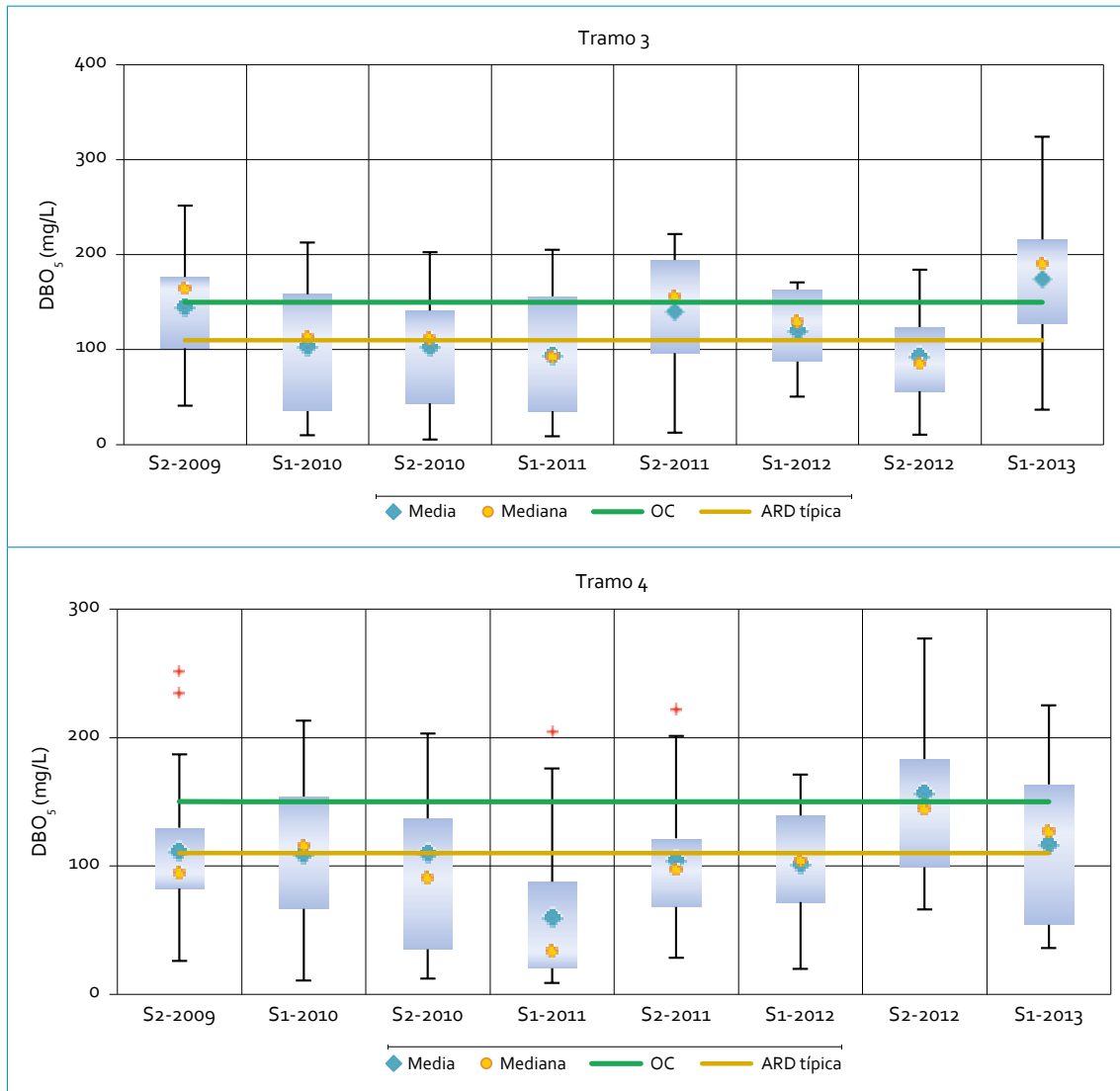
FIGURA 3.3. Perfil de oxígeno disuelto: río Salitre

3.1.1.4.  $DBO_5$

El comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) en el río Salitre muestra que las mayores concentraciones a lo largo del río se presentaron en los tramos 3 y 4, que son los sectores más críticos, aunque los mayores valores medio de  $DBO_5$  estuvieron en el tramo 3 (figura 3.4). El cambio más significativo de las concentraciones se presentó entre el tramo 1 (Parque Nacional) y el tramo 2 (Arzobispo Carrera 7ª y NQS Calle 53), donde las concentra-

ciones pasaron del orden de 1 mg/L a valores por encima de 50 mg/L. Este tramo presentó las concentraciones más bajas de  $DBO_5$  en el río, pues muy pocos valores superaron el límite de detección (1 mg/L), comportamiento que evidencia la buena calidad del tramo y la no afectación por actividades antropogénicas. Ningún valor ha excedido hasta el momento el objetivo de calidad (5 mg/L). A lo largo del tiempo, la  $DBO_5$  se ha mantenido relativamente constante.



FIGURA 3.4. Perfil de  $DBO_5$ : río Salitre

En el tramo 2 (Arzobispo Carrera 7ª y NOS Calle 53) las concentraciones de  $DBO_5$  muestran una alta variabilidad, que oscila en rangos muy amplios entre 1 y 106 mg/L. Una cantidad no despreciable de datos superó el objetivo de calidad (80 mg/L), lo que permite asegurar que la capacidad autodepuradora y de asimilación del río se ve muy disminuida y que el agua transportada no se diferencia sustancialmente de cuanto se transporta en la red de alcanta-

rillado combinado. Este comportamiento se presentó en el punto NOS Calle 53, ya que en Arzobispo Carrera 7ª las concentraciones de  $DBO_5$  son más bajas. El S1-2013 fue el periodo más crítico, cuando el valor medio fue muy similar a la concentración de agua residual doméstica (ARD). En el tramo 3 las concentraciones de  $DBO_5$  aumentan de tal forma que la frecuencia de encontrar valores por encima del ARD diluida fue más alta; alrededor de la

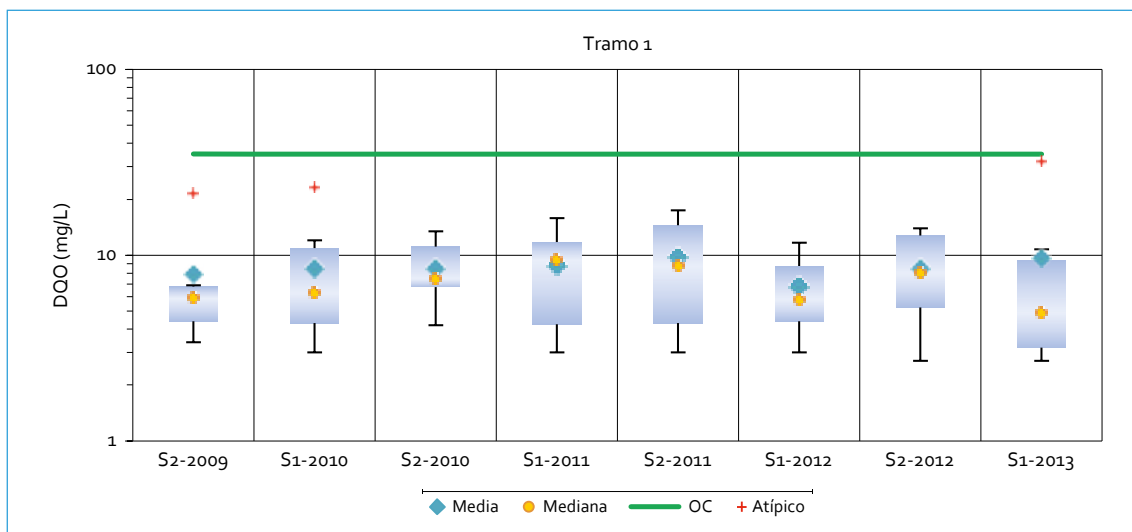
mitad de los datos superaron los 110 mg/L y un 40 % superó el objetivo de calidad (150 mg/L). Al igual que el tramo anterior, la variabilidad de los datos (entre 5,5 y 324 mg/L) permite asumir que los niveles de  $DBO_5$  en este sector del río son dependientes de las descargas de aguas residuales y su dinámica en el día. A lo largo del tiempo, los valores medios han tendido a ser muy similares o superiores a la concentración del ARD; sin embargo, se registraron más datos con concentraciones no tan elevadas en S1-2011 y S2-2012. Por el contrario, en S2-2009, S2-2011 y S1-2013 se alcanzaron concentraciones altas.

Por último, en el tramo 4, las concentraciones de  $DBO_5$  no fueron tan altas como en el tramo anterior y la cantidad de datos por encima del objetivo de calidad (150 mg/L) y de la concentración típica del ARD no superaron el 20 % y el 40 %, respectivamente. Este comportamiento permite inferir que el último tramo ha amortiguado un poco más la cantidad de materia orgánica, y puede no estar tan afectado por las zonas de mezcla. Aunque se notan pequeñas variaciones en el tiempo, las concentraciones de  $DBO_5$  son similares entre

los semestres a excepción del S1-2011, cuando se presentaron los valores más bajos, y del S2-2012, con los valores más altos.

### 3.1.1.5. DQO

Este parámetro mostró un comportamiento similar a la  $DBO_5$ : las mayores concentraciones a lo largo del río se presentaron en los tramos 3 y 4 y mostraron ser el sector más crítico del río, aunque los mayores valores medio de demanda química de oxígeno (DQO) estuvieron en el tramo 3 (figura 3.5). En el tramo 1 (Parque Nacional) las condiciones óptimas de calidad lo hacen un referente para los siguientes puntos de monitoreo a lo largo del río. Las concentraciones de DQO, casi despreciables en comparación con el resto del río, variaron entre 2,7 y 32 mg/L, manteniendo sus condiciones relativamente constante en el tiempo. Además, ningún valor ha excedido hasta el momento el objetivo de calidad (35 mg/L). En el tramo 2 se notó un aumento en relación con el tramo anterior, con concentraciones entre 3,5 y 880 mg/L, que evidencian una alta variabilidad en los datos.



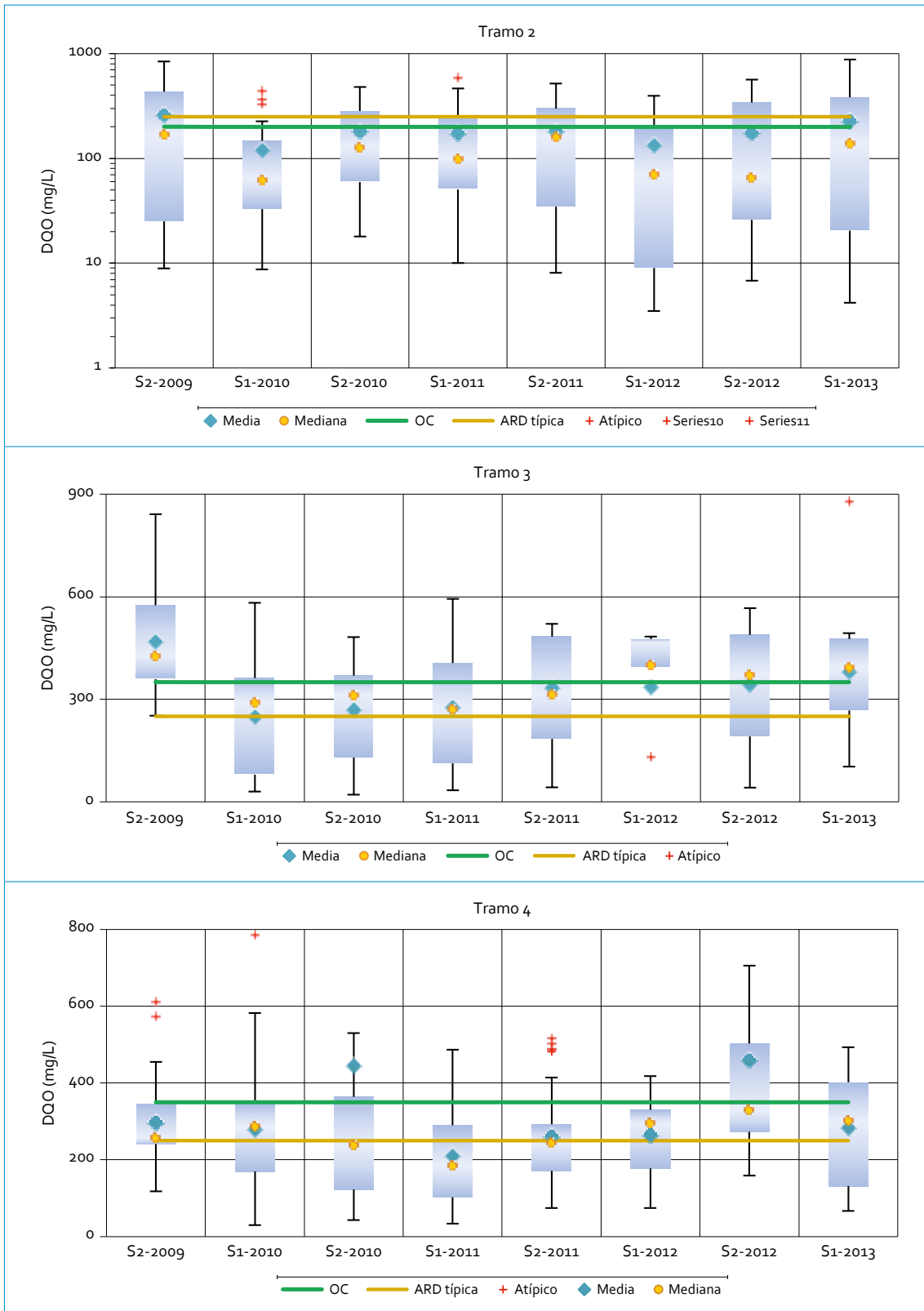


FIGURA 3.5. Perfil de DDO: río Salitre

Alrededor del 30 % de los datos excedió la concentración típica de ARD y el 36 % incumplió el objetivo de calidad (200 mg/L). Ello señala que este punto está altamente afectado por las descargas de agua residual, sin dar espacio a la dilución y la asimilación. Los semestres más críticos, cuando el valor medio excedió o estuvo muy cerca de la concentración del ARD o del objetivo de calidad, fueron S2-2009 y S1-2013. En los tramos 3 y 4 las concentraciones de DQO aumentan de tal forma que la frecuencia de encontrar valores por encima del ARD es más alta; más de la mitad de los datos superaron los 110 mg/L (el 67 % en el tramo 3). La variabilidad de las concentraciones de DQO en el tramo 3 fue la más alta del río, con un rango entre 21 y 842 mg/L, la cual está sujeta a la dinámica de las descargas de agua residual durante el día. A lo largo del tiempo, los valores medios han tendido a ser muy similares o superiores a la concentración del ARD; sin embargo, en el S2-2009, S1-2012 y S1-2013 se alcanzaron concentraciones altas y los valores superaron el objetivo de calidad, lo que denota su mayor incumplimiento.

En el tramo 4, las concentraciones de DQO no fueron tan altas como en el tramo anterior (rango 30-706 mg/L), y la cantidad de datos por encima del objetivo de calidad (350 mg/L) y de la concentración típica del ARD no superaron el 22 % y 52 %, respectivamente. Este comportamiento permite sugerir que el último tramo ha amortiguado un poco más la cantidad de materia orgánica, y puede no estar tan afectado por las zonas de mezcla. Aunque se notan pequeñas variaciones en el tiempo, las concentraciones de DQO son similares entre los semestres, a excepción del S2-2010 y S2-2012, cuando los valores medios tendieron a ser altos por dos datos atípicos muy elevados.

### 3.1.1.6. SST

El comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) en el río Salitre (figura 3.6) muestra que los mayores niveles de sólidos se encuentran en los tramos 2 y 3, sector donde se recibe la gran mayoría de las descargas de agua residual del río. Los niveles de SST en el tramo 1 (Parque Nacional) fueron muy bajos: variaron entre 1,6 y 8 mg/L, y ningún dato incumplió el objetivo de calidad. Para poder mantener la vida acuática, más que una concentración, se requiere que la cantidad de sólidos no reduzca la profundidad para lograr la fotosíntesis, condición que se da de manera óptima en Parque Nacional.

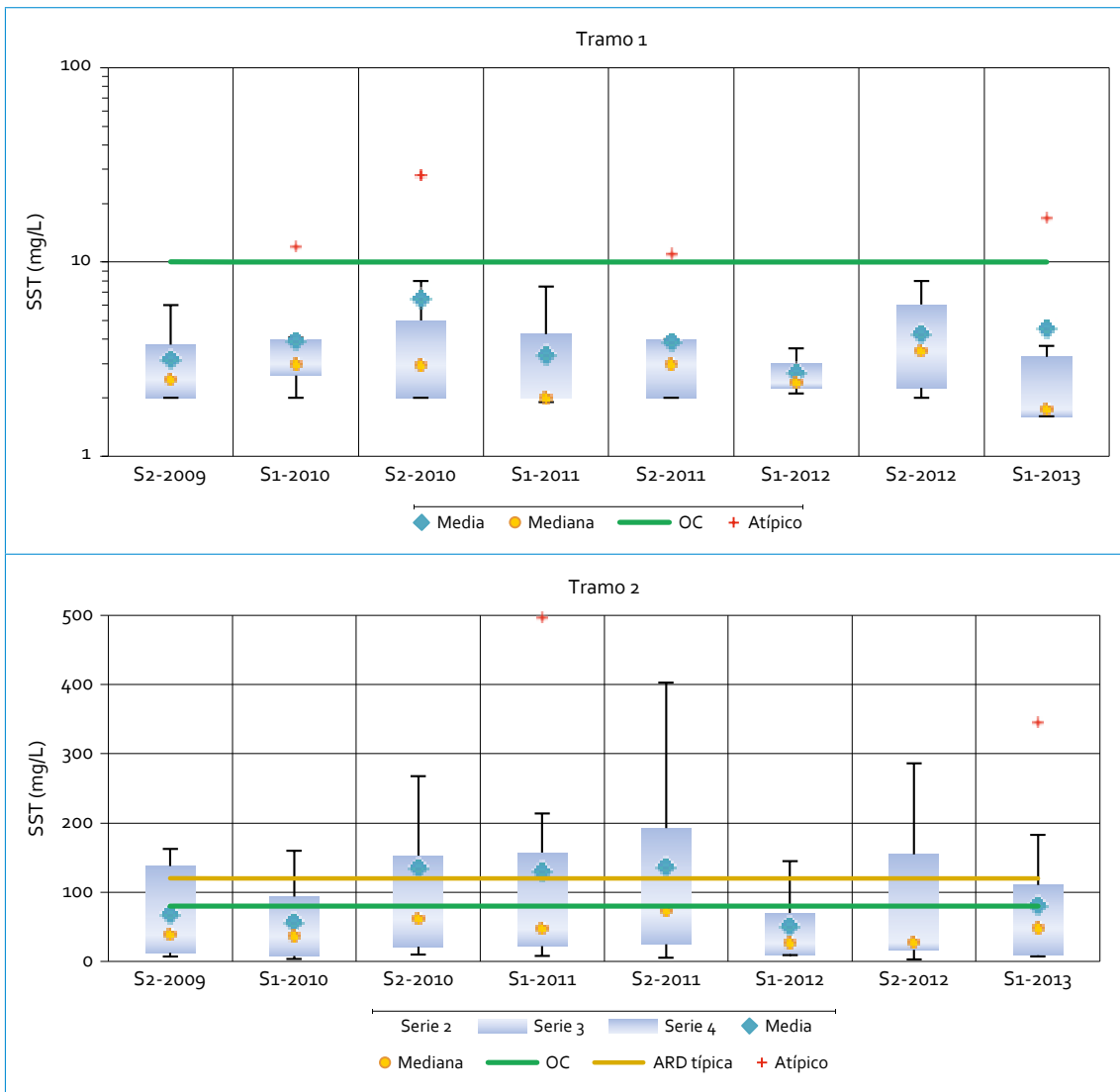
En los tramos 2 y 3 se notó un aumento importante de los SST en relación con el tramo 1, al pasar de concentraciones de 4 mg/L en Parque Nacional a valores que superan los 100 mg/L en los dos tramos; el tramo 3 tiende a una mayor frecuencia de concentraciones altas. Este aumento fue similar al de la materia orgánica, lo que ratifica el efecto de las aguas residuales en la mayoría de determinantes de calidad del agua en el río. En el tramo 2, un poco más del 20 % de los datos (correspondientes al punto NSQ Calle 53) fue más alto que la concentración típica del ARD, y en el tramo 3, el porcentaje fue de casi el 50 %, y se presentó en los dos puntos NSQ Calle 53 y Carrefour Avenida 68. Ello muestra ser el sector más crítico del río. En estos dos tramos los objetivos de calidad se incumplieron en varias ocasiones; sin embargo, el incumplimiento no fue más del 37 %. Los semestres con los valores medios de SST más altos fueron S2-2010, S1-2011 y S2-2011, lo que permite ver que se presentó un periodo en el que hubo más presencia de sólidos asociado con la época invernal del 2011.

Finalmente, en el tramo 4 la variabilidad de los datos fue menos notoria (4-307 mg/L) y una menor cantidad de datos se acercó o excedió la concentración típica del ARD (21%), lo que indica que hacia aguas abajo el río encuentra una manera de amortiguar o diluir el efecto de las altas concentraciones de sólidos. Los semestres con las medianas de las concentraciones de SST (no se tomaron los promedio porque fueron afectados por valores atípicos muy altos) más altos fueron S1-2012, S2-2012 y

S1-2013, y refleja que en las últimas campañas de monitoreo ha habido una leve tendencia de aumento.

### 3.1.1.7. Nitrógeno

Dado que el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) es una medida del nitrógeno orgánico y del ion amonio mayoritariamente, los tramos en los que se presentan mayores concentraciones están relacionados con descargas de ARD. Así



Continúa

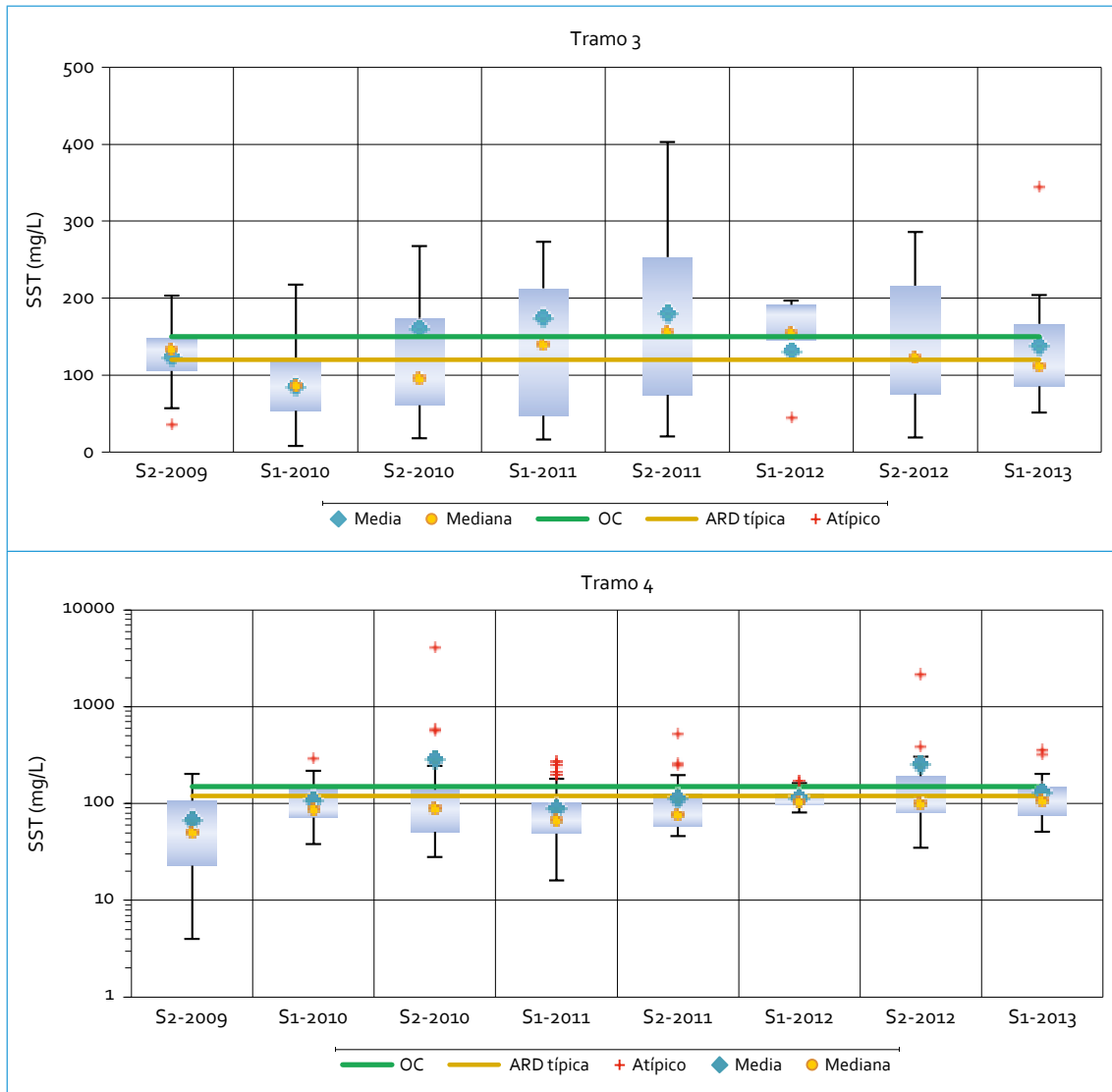


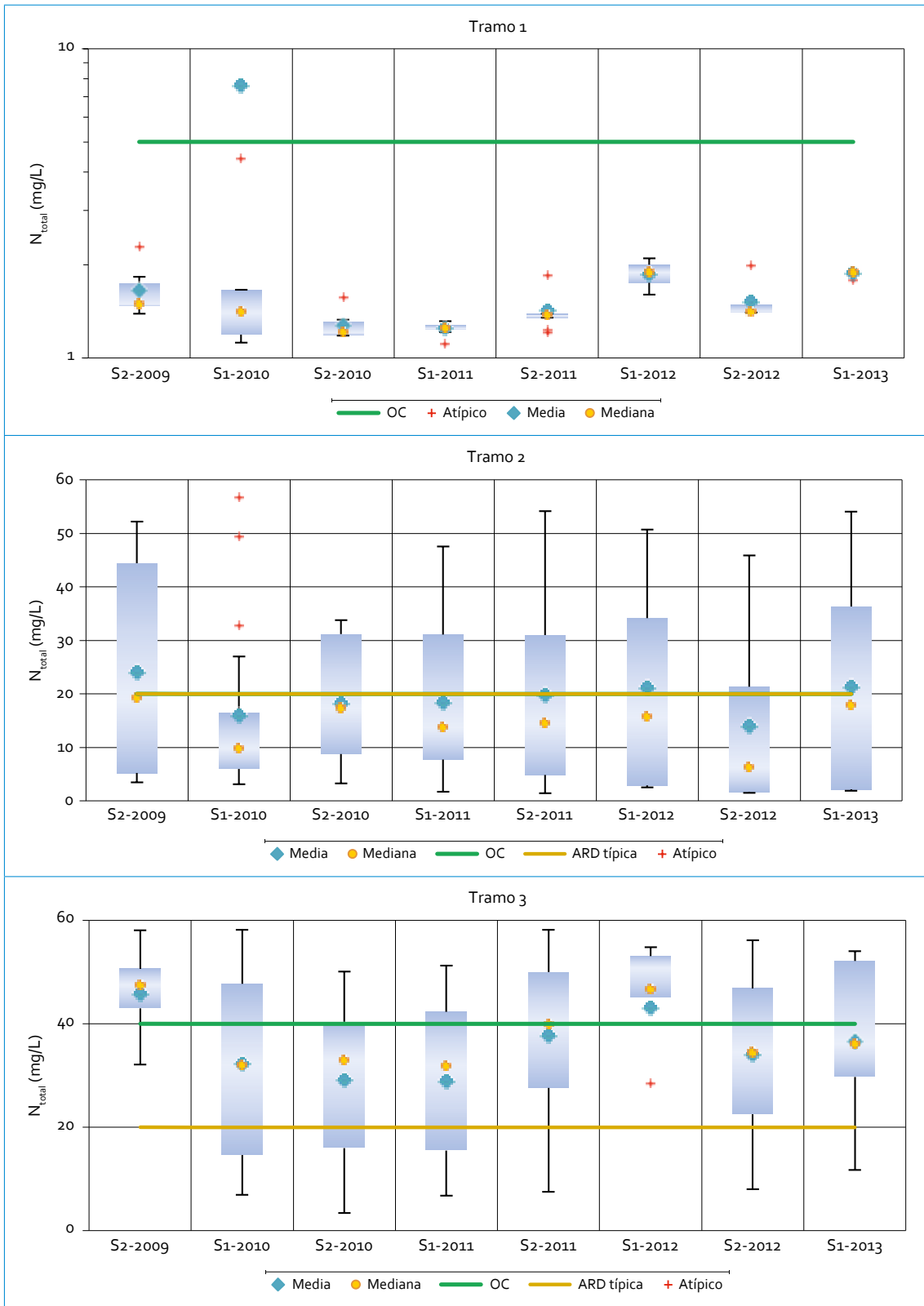
FIGURA 3.6. Perfil de SST: río Salitre

como para la materia orgánica y los sólidos, se notó un aumento importante en las concentraciones de nitrógeno total ( $N_{total}$ ) entre los tramos 1 y 2 (figura 3.7). Los niveles de  $N_{total}$  pasaron de un promedio de 1,5 mg/L en Parque Nacional a valores por encima de 20 mg/L en el tramo 2. A lo largo del tiempo, los valores medios y las medianas han fluctuado entre 1,2 y 1,9 mg/L. Aunque las diferencias no son significativas, estas variaciones se dan

por la dinámica de los nitratos y nitritos por procesos de nitrificación y denitrificación en esta parte del río.

En los tramos 2, 3 y 4, las concentraciones de nitrógeno tuvieron un comportamiento variable (1,5-69 mg/L), que refleja el efecto de la dinámica de las descargas de aguas residuales en las concentraciones en el río. En el tramo 2 los datos que estuvieron por encima (37%) de la concentración típica de  $N_{total}$  en el ARD y del





Continúa

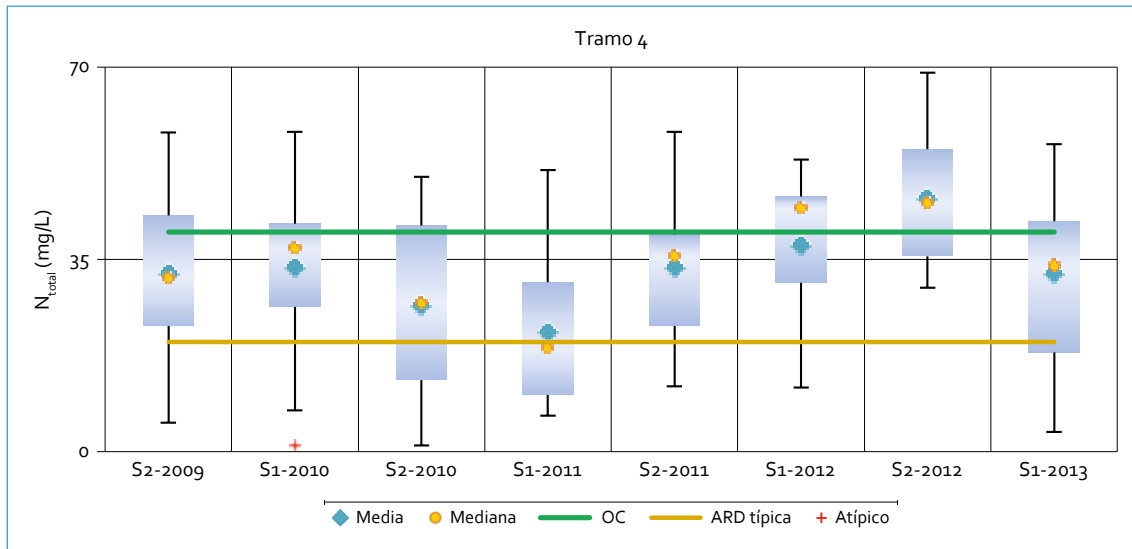


FIGURA 3.7. Perfil de  $N_{total}$ : río Salitre

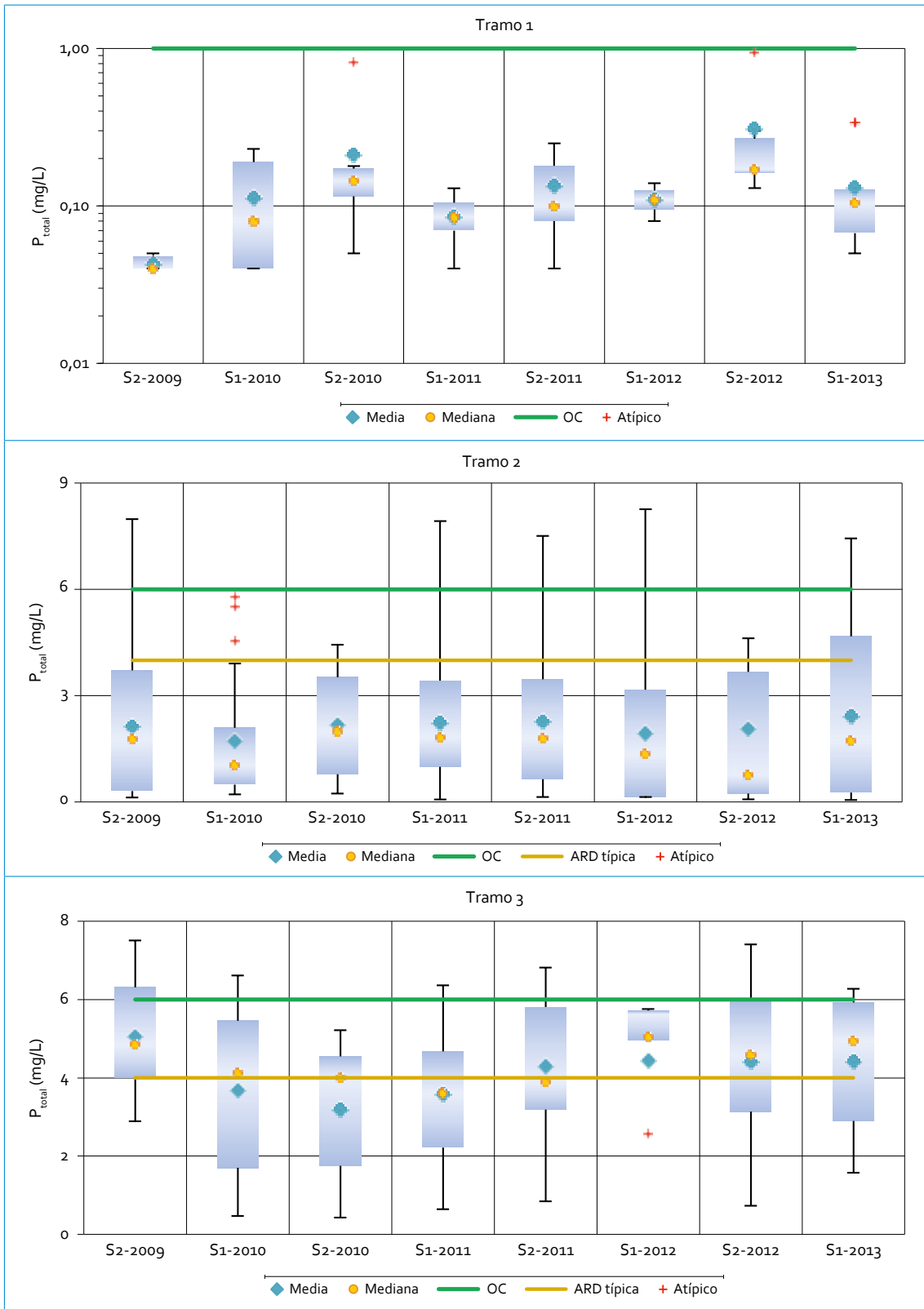
objetivo de calidad (20 mg/L) se presentaron en el punto NQS Calle 53, lo que representa que en este punto, una vez se reciben las descargas, el río pierde su capacidad de asimilación y en algunos momentos del día transporta el agua con una calidad semejante a la del agua residual sin tratar.

En el tramo 3 se suman más descargas de agua residual, lo que aumenta la cantidad de datos por encima de los 20 mg/L (79 %) y acentúa más la calidad pobre en referencia al nitrógeno que tiene el agua del río. Aproximadamente el 40 % de los datos de  $N_{total}$  en el tramo 3 incumplen el objetivo de calidad, que para este caso es más laxo (40 mg/L). Y en el tramo 4, aunque no hay una cantidad significativa de descargas, el alto porcentaje de valores por encima del ARD (72 %) se mantiene similar al tramo anterior, por la falta de oxígeno disuelto en el agua y la gran cantidad de materia orgánica que se degrada. No hay lugar para la oxidación del amonio, por lo que las concentraciones de nitrógeno se asemejan cada vez más al agua residual sin tratar.

Con relación a los datos históricos, en el tramo 2 los datos de  $N_{total}$  se mantuvieron relativamente constantes en el tiempo, aunque en los semestres S1-2010 y S2-2012 se registraron valores no tan altos y, por lo tanto, la mediana y el promedio tendieron a alejarse de la concentración típica del ARD. Por el contrario, en S2-2009, S1-2012 y S1-2013 las concentraciones medias se igualaron o superaron el ARD. En los tramo 3 y 4 hubo una mayor variación a lo largo del tiempo que no permite establecer una tendencia. Sin embargo, las condiciones más críticas se dieron para el tramo 3, en S2-2009 y S1-2012, y en el tramo 4, en S2-2012.

### 3.1.1.8. Fósforo

En la figura 3.8 se presenta el comportamiento de las concentraciones de fósforo total ( $P_{total}$ ) en el río Salitre. En general, se presentó el mismo comportamiento que para la materia orgánica y nitrógeno: concentraciones que aumentan abruptamente después del tramo 1 como consecuencia de la acumulación de las



Continúa

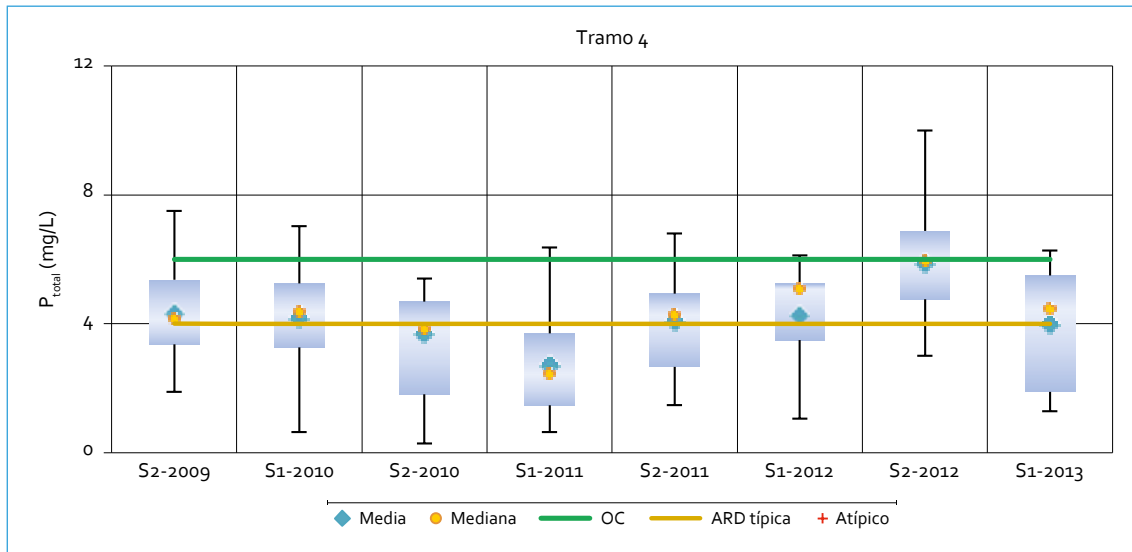


FIGURA 3.8. Perfil de  $P_{total}$ : río Salitre

descargas de agua residual recibidas a lo largo del río. En el tramo 1 las concentraciones de fósforo fueron muy bajas (0,04-0,3 mg/L); ningún dato excedió el objetivo de calidad (1 mg/L). Dado que este punto cuenta con una muy buena calidad, los máximos valores reportados podrían atribuirse a los valores normales en el río como consecuencia de los procesos de mineralización y descomposición natural. Las medianas de los datos (las cuales no están afectadas por valores extremos) se acercaron a 0,1 mg/L, sin contar los semestres S2-2010 y S2-2012, concentración que permite mantener la vida acuática y no potencia la eutroficación.

En el tramo 2, los niveles de fósforo aumentaron con respecto al tramo anterior, al pasar de valores del orden de 0,1 mg/L a concentraciones por encima de 2 mg/L. La mayoría de los datos cumplieron con el objetivo de calidad (6 mg/L); sin embargo, el 20% superó la concentración típica de  $P_{total}$  en el ARD. Estos niveles de fósforo en el río potencian problemas de eutroficación aguas abajo, ya que el fósforo —en muchos casos— es el nutriente

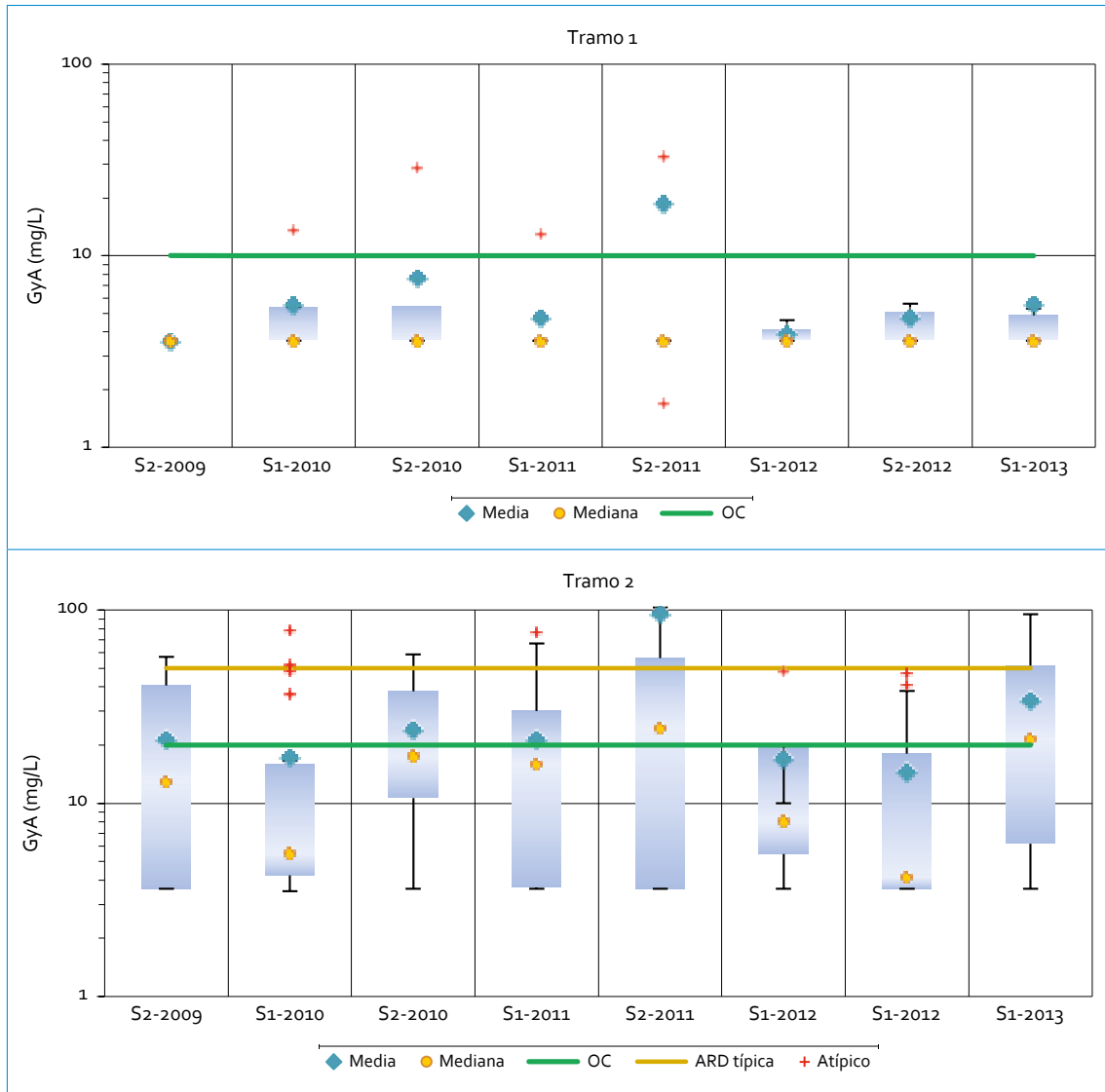
limitante para el crecimiento descontrolado de macrófitas. Las concentraciones más altas, por encima de 4 mg/L, se presentaron en NOS Calle 53 y reflejan el impacto de las primeras descargas importantes de aguas residuales en el río. A lo largo del tiempo, los valores medios se han mantenido constantes, aunque en los semestres S1-2010 y S2-2010 las medianas tendieron a ser bajas y reflejan una mayor frecuencia con concentraciones bajas.

Para los tramos 3 y 4 las concentraciones variaron entre 0,4 y 10 mg/L, se asemejaron más a la calidad del ARD (un poco más del 50% de los datos excedieron los 4 mg/L) e incumplieron con mayor frecuencia el objetivo de calidad (alrededor del 15% de los datos superó los 6 mg/L). En la mayoría de semestres, las concentraciones promedio superaron la concentración típica del ARD y mostraron que, al igual que los demás parámetros analizados, el sector NOS Calle 53 y Carrefour Av. 68 es el que más concentración de contaminantes presenta el río.

3.1.1.9. Grasas y aceites

El comportamiento de las concentraciones de grasas y aceites (GyA) en el río Salitre, al igual que la mayoría de los parámetros, muestra que los mayores niveles se encontraron a partir del tramo 2 (figura 3.9). En el tramo 1 se registraron las concentraciones más bajas del río, valores muy cercanos al límite de detección (3,6 mg/L). Las medianas de las concentraciones de GyA en el tramo 1 se han mantenido

constantes (no se tomó el promedio porque en algunos semestres se vio afectado por los valores atípicos), y en ninguna ocasión se superó el objetivo de calidad (10 mg/L). A partir del tramo 2 se empiezan a registrar concentraciones más altas; los datos oscilaron entre 3,6 y 103 mg/L con una alta variabilidad; un poco más del 30% de los valores incumplió el objetivo de calidad (20 mg/L) y se presentó con mayor frecuencia en NOS Calle 53, donde se han recibido gran parte de las descargas



Continúa

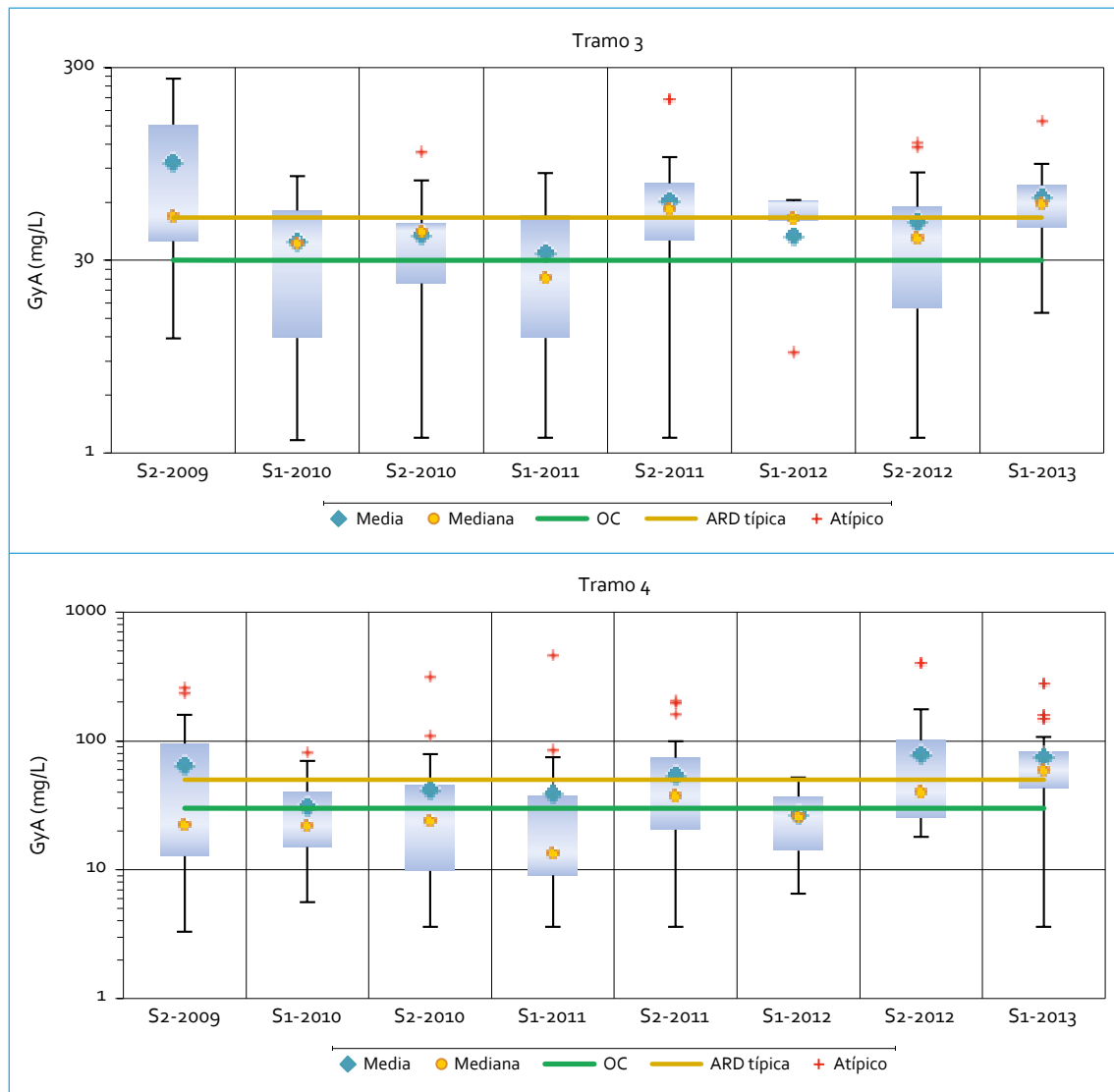


FIGURA 3.9. Perfil de grasas y aceites: río Salitre

más significativas del río. En los semestres S2-2011 y S1-2013 los valores medios tendieron a ser más altos que en los demás semestres; sin embargo, en el 2011 el valor estuvo sesgado hacia arriba por un valor atípico. En general, las concentraciones se han mantenido constantes con amplios rangos de variación.

En los tramos 3 y 4 las concentraciones variaron entre 3,6 y 263 mg/L, lo que refleja valores más altos que el tramo anterior y se

asemeja más a la calidad del ARD (un poco más del 30% de los datos excedieron los 50 mg/L en el tramo 3) e incumple con mayor frecuencia el objetivo de calidad (alrededor del 65% de los datos superó los 30 mg/L en el tramo 3). En la mayoría de semestres, las concentraciones promedio de GyA del tramo 3 se acercaron a la concentración típica del ARD y mostraron que el sector NOS calle 53 y Carrefour Av. 68 es el más crítico del río, ya que, a pesar de encon-

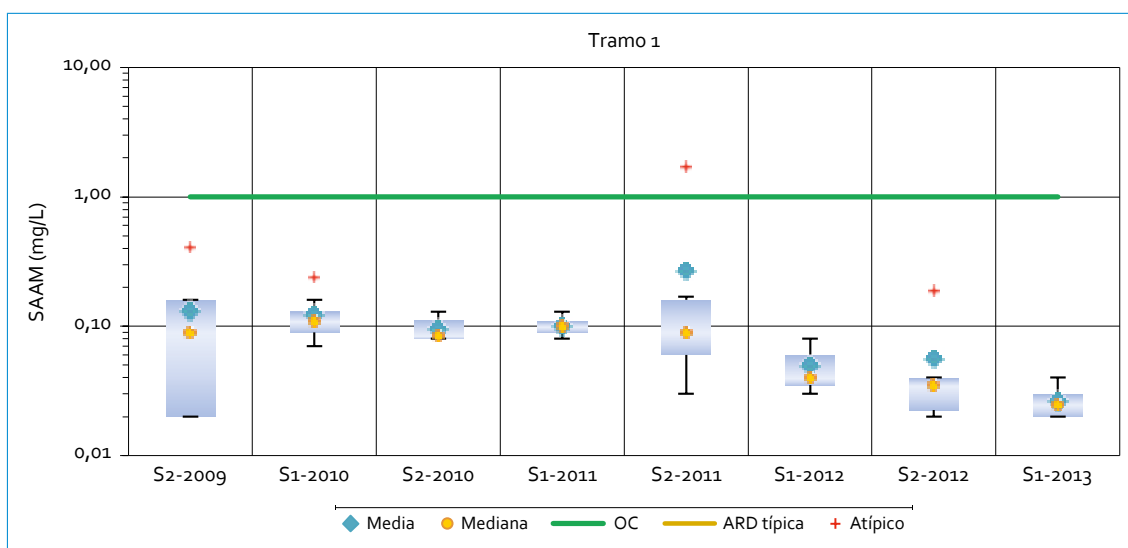
trar datos muy cercanos al ARD en Calle 53 en Carrefour Av. 68, se acentúa más la situación y la frecuencia de encontrar valores por encima de 50 mg/L se hace más alta. Los periodos que presentaron mejores condiciones con respecto a este parámetro fueron el S1-2010 y S1-2011. En el tramo 4, las concentraciones promedio muestran que los periodos más críticos fueron en las últimas campañas de monitoreo S2-2012 y S1-2013.

### 3.1.1.10. SAAM

Al igual que en otros parámetros, el aumento más significativo en las concentraciones de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) se presentó entre los tramos 1 y 2, y a partir del tramo 3 los valores se mantuvieron elevados (figura 3.10). En el tramo 1 se observaron condiciones óptimas de calidad, con concentraciones de SAAM casi despreciables, que variaron entre 0,02 y 0,17 mg/L y ningún dato excedió el objetivo de calidad (1 mg/L). En el tramo 2 (Arzobispo Carrera 7ª y NOS Calle 53) se cuantificó un aumento importante y

una mayor dispersión de los datos, oscilando en rangos entre 0,02 y 10 mg/L. Alrededor del 35 % de los datos incumplieron el objetivo de calidad (3 mg/L). Este comportamiento se presentó con mayor frecuencia en el punto NOS Calle 53, ya que en Arzobispo Carrera 7ª las concentraciones de SAAM tendieron a ser más bajas. A pesar de la variabilidad de los datos, las concentraciones promedio se mantuvieron relativamente constantes y muy cercanas al objetivo de calidad; el S2-2010 fue el periodo más crítico.

En los siguientes tramos (3 y 4), la variabilidad de las concentraciones de SAAM fue igualmente importante (0,26-15,3 mg/L) siendo Carrefour Avenida 68 el punto más crítico en el tramo 3. Este comportamiento evidencia que los surfactantes en el río Salitre se van acumulando. El incumplimiento del objetivo de calidad en el tramo 3 se empieza a notar más que en el tramo anterior, pues cerca del 40 % de los datos supera los 3 mg/L. En el tramo 4 el incumplimiento se hace más importante y el 70 % de los datos excede el objetivo de calidad. La alta variabilidad en los datos de los tramos 3 y 4



Continúa

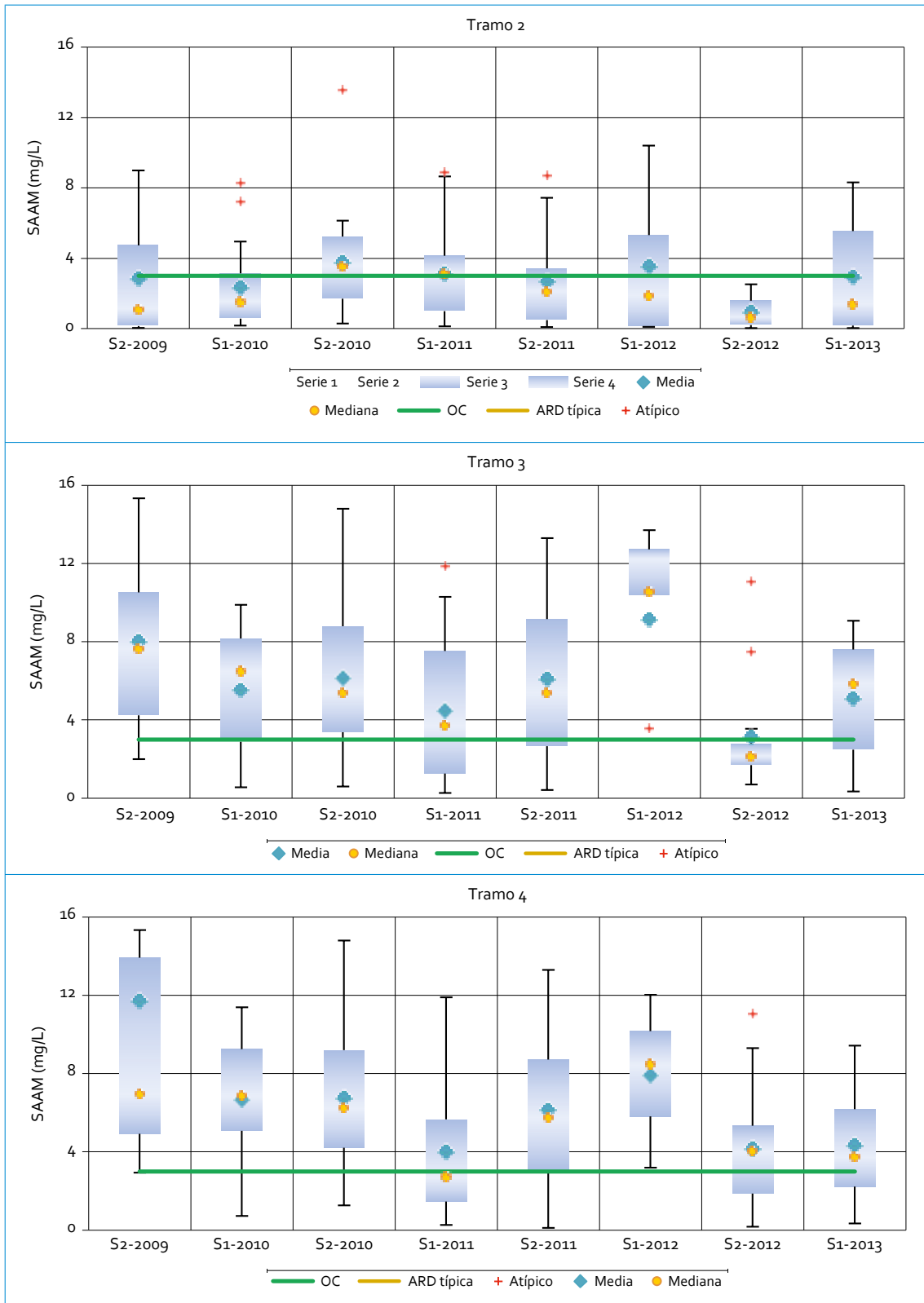


FIGURA 3.10. Perfil de SAAM: río Salitre



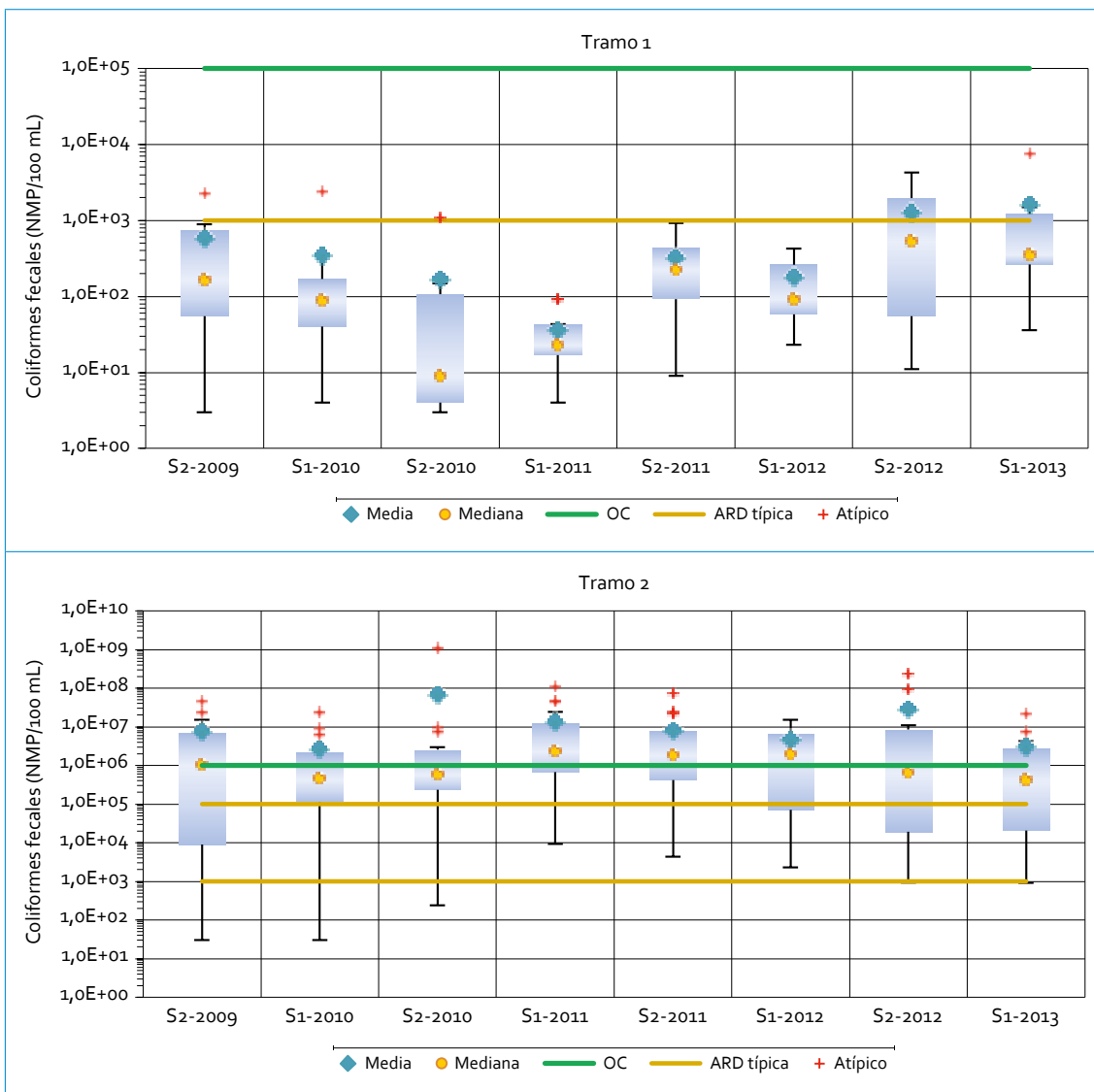
no permite establecer un comportamiento específico a lo largo del tiempo, aunque se identificó que los semestres más críticos fueron S2-2009 y S1-2012.

3.1.1.11. *Coliformes fecales*

El comportamiento de los coliformes fecales en el río Salitre muestra que las mayores concentraciones se presentaron en los tramos 3 y 4. Aunque los mayores niveles de coliformes

fecales estuvieron en la parte baja, el aumento más significativo estuvo entre el tramo 1 y el 2 (figura 3.11).

En el tramo 1 (Parque Nacional) se presentaron las concentraciones más bajas de coliformes fecales en el río Salitre, al variar entre  $3$  y  $4,3 \times 10^3$  NMP/100 mL. Las medianas de las concentraciones se mantuvieron siempre por debajo de  $10^2$  NMP/100 mL y ningún valor estuvo por encima del objetivo de calidad ( $10^5$  NMP/100 mL). Los niveles de coliformes feca-



Continúa

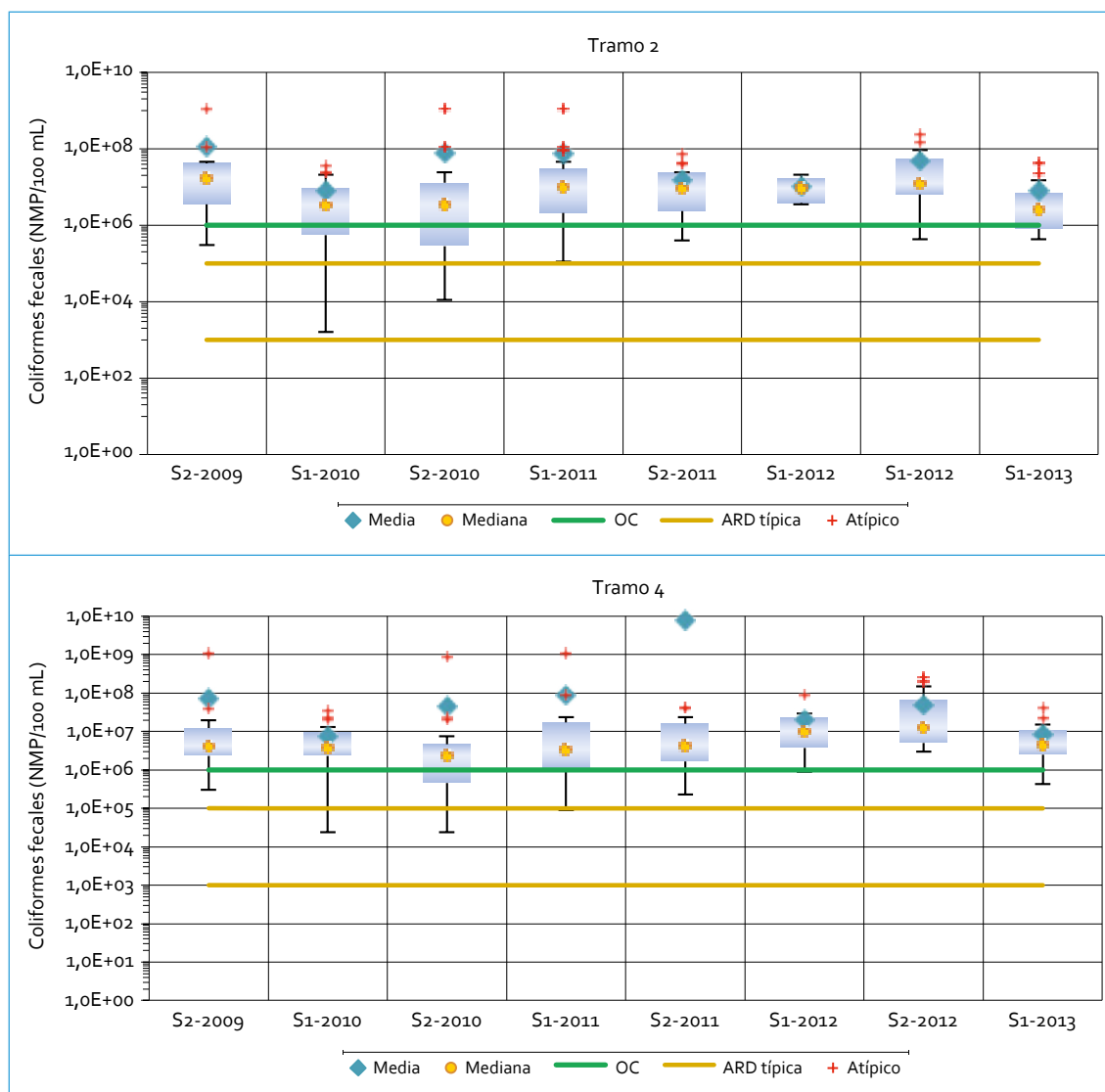


FIGURA 3.11. Perfil de coliformes fecales: río Salitre

les en el tramo 2 aumentan notablemente en comparación con el tramo anterior; varían entre  $3 \times 10^1$  y  $2,4 \times 10^7$  NMP/100 mL, que refleja el impacto de las descargas de agua residual. Un poco más del 70% de los datos supera el rango superior de concentraciones típicas del ARD, y ello ratifica el origen doméstico de las descargas. Además, alrededor del 40% de los datos incumplió el objetivo de calidad ( $10^6$  NMP/100 mL). A diferencia de los demás parámetros

analizados, tanto en Arzobispo como en NOS Calle 53 se presentaron una gran cantidad de datos de coliformes fecales por encima de  $10^5$  NMP/100 mL. Esto muestra que las primeras descargas de agua residual aumentan la cantidad de coliformes fecales en el río y se van acumulando hacia aguas abajo. A lo largo del tiempo, las medianas de las concentraciones estuvieron muy cercanas al objetivo de calidad y los promedios por encima, lo que mostró, a

pesar de la variabilidad, un comportamiento constante en este sector del río.

En los tramos 3 y 4, la variabilidad de las concentraciones de coliformes fecales fue igualmente importante,  $1,6 \times 10^3$ - $1,5 \times 10^8$  NMP/100 mL. En todos los puntos de estos tramos, al igual que el tramo anterior, se presentó una cantidad homogénea de datos por encima de  $10^5$  NMP/100 mL (cerca del 97% de los datos en cada tramo) y mostró la acumulación de coliformes fecales en el río producto de las descargas de ARD. La condición de los coliformes fecales a partir del tramo 2 del río es alarmante, no hay espacio en el río para la asimilación o dilución de las altas cantidades de patógenos y ello supera la que usualmente se encuentra en las ARD sin tratar.

### 3.1.1.12. Sulfuros

En la figura 3.12 se presentan las concentraciones de sulfuros en todos los puntos de monitoreo del río Salitre, donde se observa que varios datos se mantuvieron muy cerca al límite de detección (0,5 mg/L). El rango de variación de los sulfuros estuvo entre 0,5 y 4,4 mg/L, lo que

muestra el efecto de las descargas de aguas residuales en las concentraciones de sulfuro en el río, especialmente a partir del tercer punto de monitoreo. En el primer y segundo puntos, Parque Nacional y Arzobispo, los sulfuros fueron los más bajos del río, y la mayoría de los datos (el 70%) fueron cercanos o inferiores al límite de detección (0,5 mg/L). Este primer sector del río no representa un riesgo para el ecosistema acuático, puesto que no hay perturbaciones que alteren la calidad natural del río; así, el criterio de vida acuática de efecto crónico de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (US EPA) (0,002 mg/L) sea más bajo que lo que logra cuantificar el método analítico. Dado que el criterio es más bajo que el límite de detección, cerca del 65% de las concentraciones de sulfuros del río Salitre fue superior al límite de detección, lo que evidencia que a partir del punto NOS Calle 53 el río no cuenta con las condiciones óptimas de sulfuros para soportar la vida acuática. A lo largo de tiempo los sulfuros no han variado sustancialmente en el río; las concentraciones se han mantenido por el orden de 0,6 mg/L.

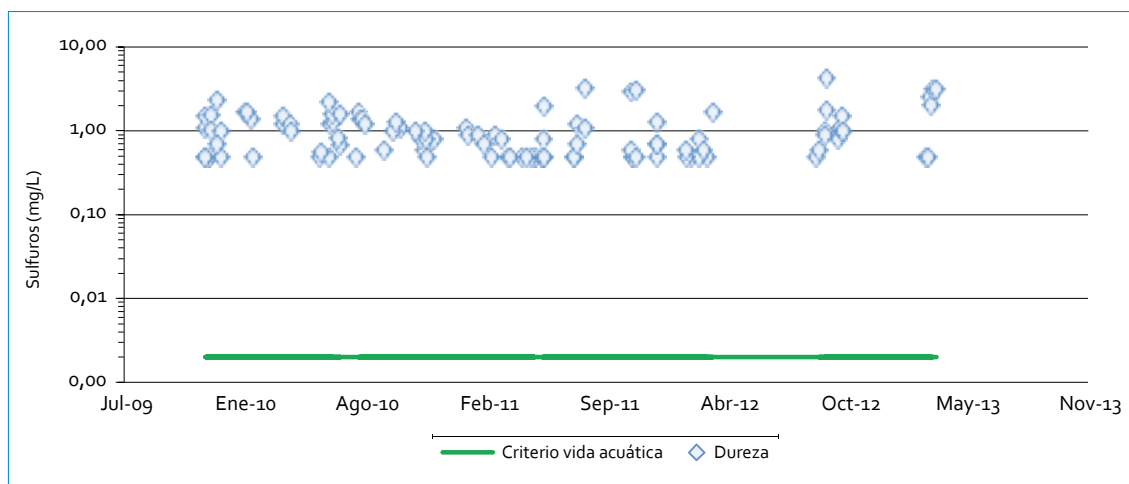


FIGURA 3.12. Perfil de sulfuros: río Salitre

### 3.1.1.13. Fenoles

Las concentraciones de fenoles en todos los puntos de monitoreo del río variaron entre 0,02 y 0,84 mg/L; sin embargo, en los puntos Parque Nacional y Arzobispo Carrera 7ª las concentraciones fueron muy cercanas o inferiores al límite de detección (0,02 mg/L) y reflejan ser el sector con las mejores condiciones respecto a fenoles en el río. Tan solo el 7% de los datos excedió el criterio establecido por la US EPA para producir un efecto organoléptico en el agua (0,3 mg/L), pues, a pesar de la variabilidad de los fenoles por el efecto de las descargas de agua residual, no hay un impacto considerable en el agua del río. A lo largo de tiempo los fenoles no han variado significativamente en el río; las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,07 mg/L (figura 3.13).

### 3.1.1.14. Metales

#### 3.1.1.14.1. Bario

Las concentraciones de bario en el río Salitre no presentan variaciones importantes; los va-

lores estuvieron entre 0,01 y 0,89 mg/L (figura 3.14). Los valores de bario no son críticos, ya que la Organización Mundial de la Salud (OMS) tiene como límite máximo permisible 0,7 mg/L de bario para el agua potable, y la US EPA, 1 mg/L para la salud humana. Es importante mencionar que solo un dato excedió el criterio de la OMS y ninguno el de la US EPA, lo cual señala que, a pesar de la variabilidad del bario, no hay un impacto considerable en el agua del río. A lo largo del tiempo, este no ha variado significativamente en el río, aunque entre septiembre de 2010 y julio de 2011 hubo una tendencia de datos un poco más altos. Las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,067 mg/L.

#### 3.1.1.14.2. Cadmio

En la figura 3.15 se presentan las concentraciones de cadmio en el río Salitre; la mayoría de los datos estuvieron muy cerca al límite de detección (0,001, 0,003 y 0,006 mg/L, según el periodo). El rango de variación del cadmio estuvo entre 0,001 y 0,012 mg/L. Dado que el criterio de vida acuática (efecto agudo) es

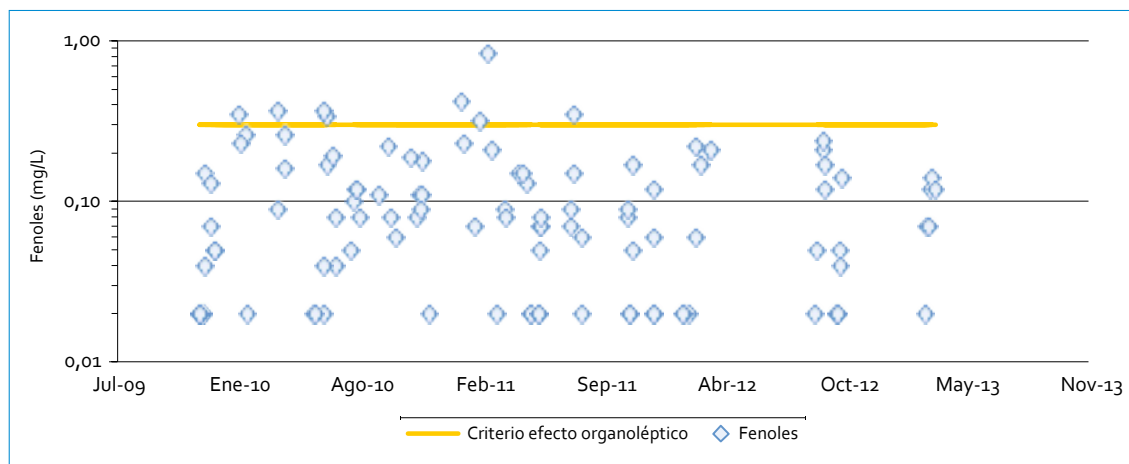


FIGURA 3.13. Perfil de fenoles: río Salitre

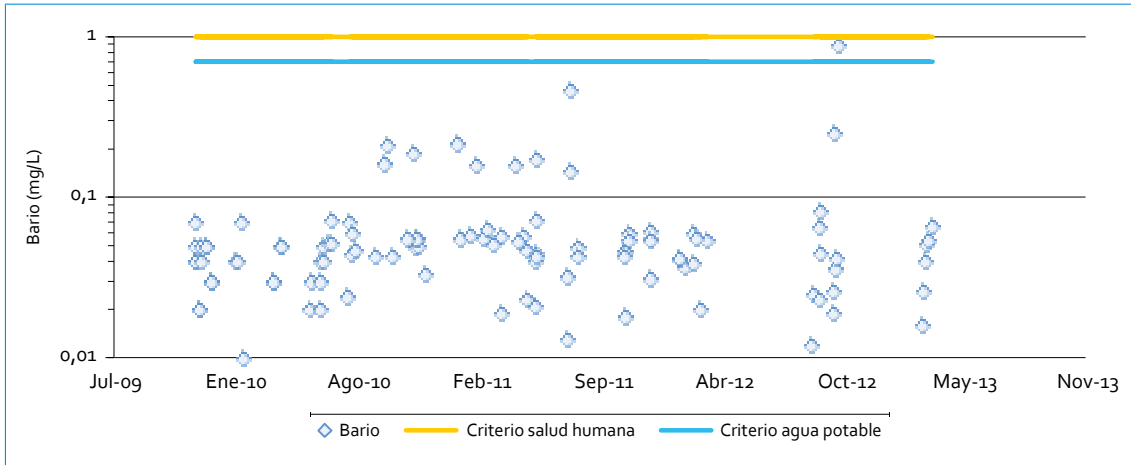


FIGURA 3.14. Perfil de bario: río Salitre

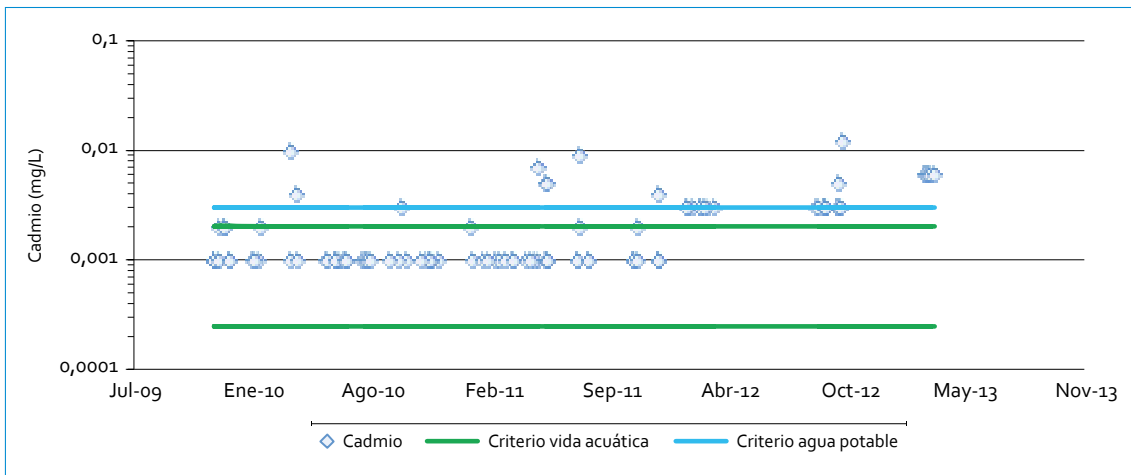


FIGURA 3.15. Perfil de cadmio: río Salitre

más bajo que el límite de detección, cerca del 9% de las concentraciones de cadmio del río Salitre fue superior a los límites de detección, por lo tanto, superiores al criterio de agua potable de la OMS (0,003 mg/L). Ello muestra que el río cuenta posiblemente con las condiciones óptimas para soportar la vida acuática con referencia a este parámetro. A lo largo de tiempo las concentraciones de cadmio no han variado sustancialmente en el río.

### 3.1.1.14.3. Cinc

Las concentraciones de cinc en todos los puntos de monitoreo del río Salitre se presentan en la figura 3.16, donde se puede observar que no hay variaciones importantes en los datos. El rango estuvo entre 0,001 y 1,7 mg/L. Los puntos que registraron una mayor frecuencia con concentraciones bajas fueron Parque Nacional, Arzobispo Carrera 7ª y Transversal 91, donde se podría mantener la vida acuática

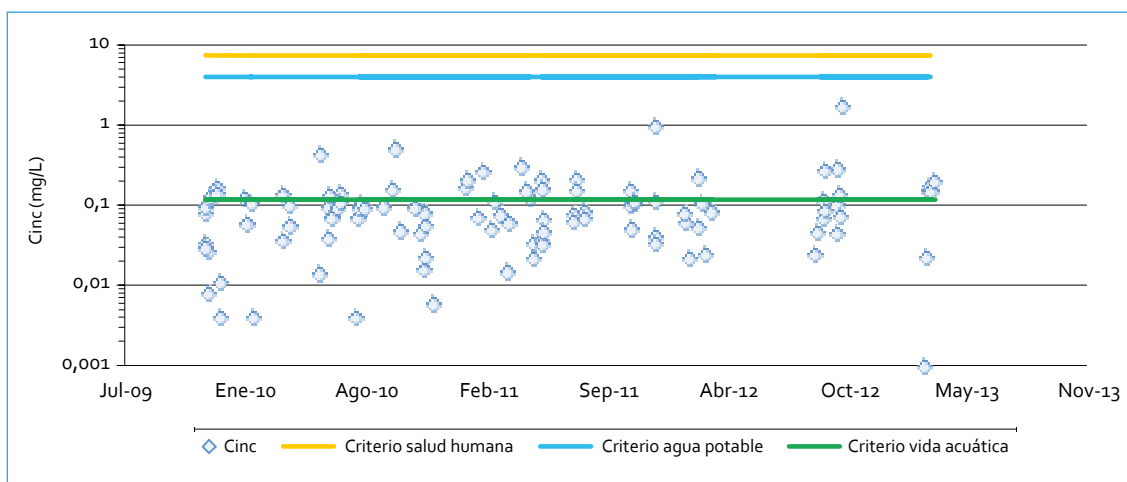


FIGURA 3.16. Perfil de cinc: río Salitre

según el criterio establecido por la US EPA (0,12 mg/L). Cerca del 30 % de las concentraciones de cinc del río Salitre fueron superiores al criterio establecido por la US EPA para la vida acuática (efecto agudo o crónico), las cuales se registraron mayoritariamente en NQS Calle 53 y en menor proporción en Carrefour Avenida 68 y Salitre Alameda. Por otro lado, todos los valores cumplen con los demás criterios (salud humana y agua potable) y muestran que respecto al cinc el río puede no tener todo el tiempo las condiciones óptimas para soportar la vida acuática, pero puede ofrecer otros usos como para agua potable. A lo largo de tiempo, el cinc no ha variado de manera significativa; en promedio, las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,12 mg/L.

#### 3.1.1.14.4. Cobre

Las concentraciones de cobre en el río Salitre, al igual que los demás metales, no muestran una variabilidad significativa (figura 3.17); los datos en todos los puntos de monitoreo se encontraron entre el límite de detección (0,001 mg/L) y 0,37 mg/L. La mayor frecuencia de

concentraciones altas se dio en el punto Salitre Alameda seguido de NQS Calle 53 y Carrefour Av. 68. Ningún dato excede los criterios de calidad establecidos por US EPA o la OMS para la protección de la vida humana (1,3 mg/L), efecto organoléptico (1 mg/L) o agua potable (2 mg/L). Ello muestra que los niveles de cobre en el río no representan un verdadero impacto en la calidad.

#### 3.1.1.14.5. Cromo total

Las concentraciones de cromo total, en todos los puntos de monitoreo del río Salitre, al igual que los demás metales, no presentan variaciones importantes; los valores estuvieron entre el límite de detección y 0,09 mg/L (figura 3.18). La gran mayoría de datos se mantuvo cerca de los límites de detección (0,006; 0,007 y 0,032 mg/L, según el periodo). Tan solo el 13 % de los datos sobrepasó estos valores y la mayoría se presentó en el punto NQS Calle 53. Teniendo en cuenta el criterio para el agua potable de la OMS (0,05 mg/L), los niveles de cromo total no generan una alarma de impacto en la calidad.

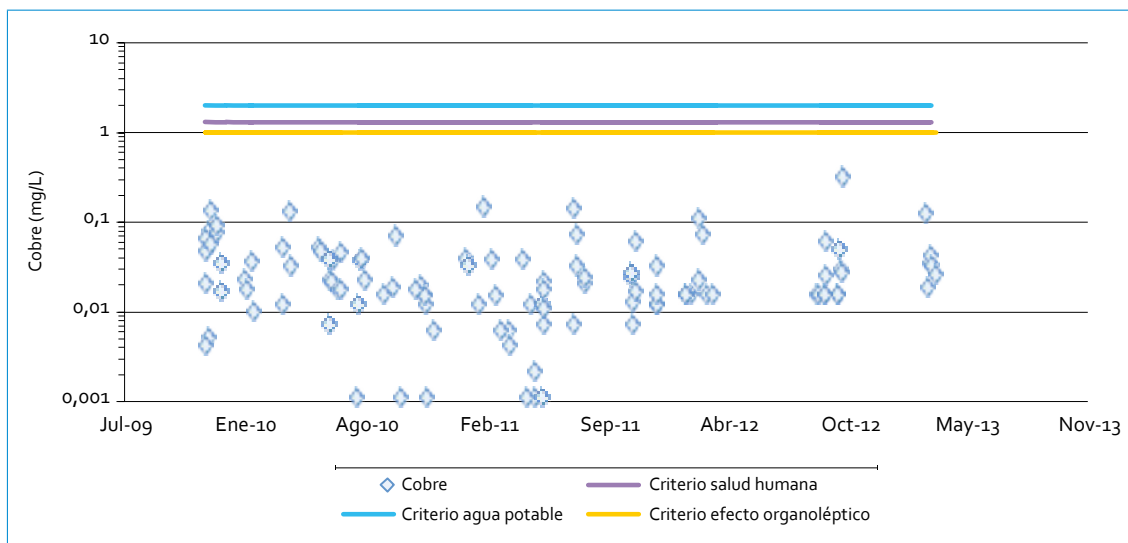


FIGURA 3.17. Perfil de cobre: río Salitre

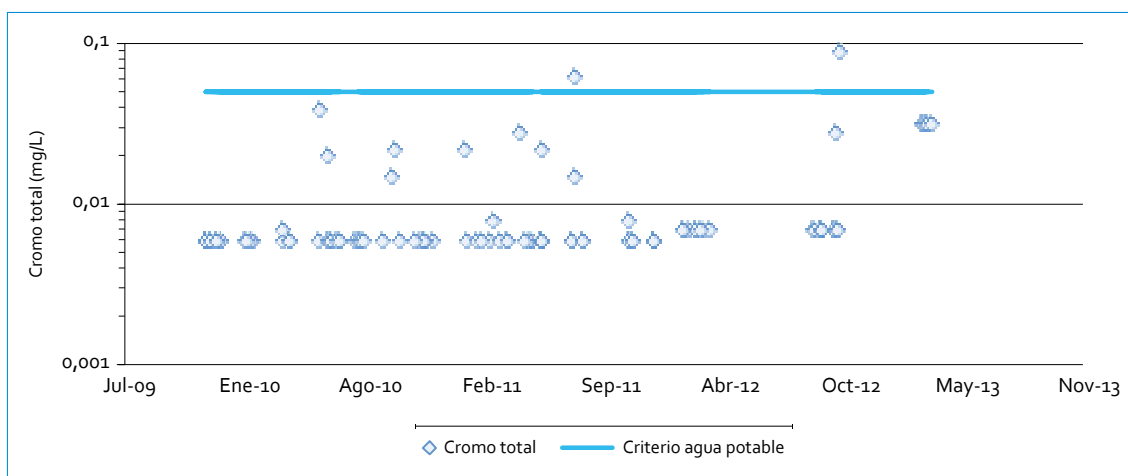


FIGURA 3.18. Perfil de cromo total: río Salitre

### 3.1.1.14.6. Níquel

Las concentraciones de níquel en todos los puntos de monitoreo del río Salitre no presentan variaciones importantes; la gran mayoría de los datos se mantuvieron muy cerca al límite de detección (0,001; 0,003 y 0,006 mg/L, según el periodo). Las concentraciones por encima del límite de detección se registraron especialmente en NOS Calle 53, seguido de Carrefour Av. 68 y Salitre Alameda. En promedio, todos

los puntos presentaron niveles homogéneos de níquel y evidenciaron una baja variabilidad a lo largo del río (figura 3.19). Ningún dato excedió los criterios establecidos por la OMS para agua potable (0,07 mg/L) y la US EPA para la vida acuática (rango entre 0,052 y 0,5 mg/L); de este modo, no hay un impacto considerable en el agua del río respecto a los niveles de níquel. A lo largo de tiempo, el níquel no ha variado significativamente; las concentraciones se han mantenido por el orden de los 0,005 mg/L.

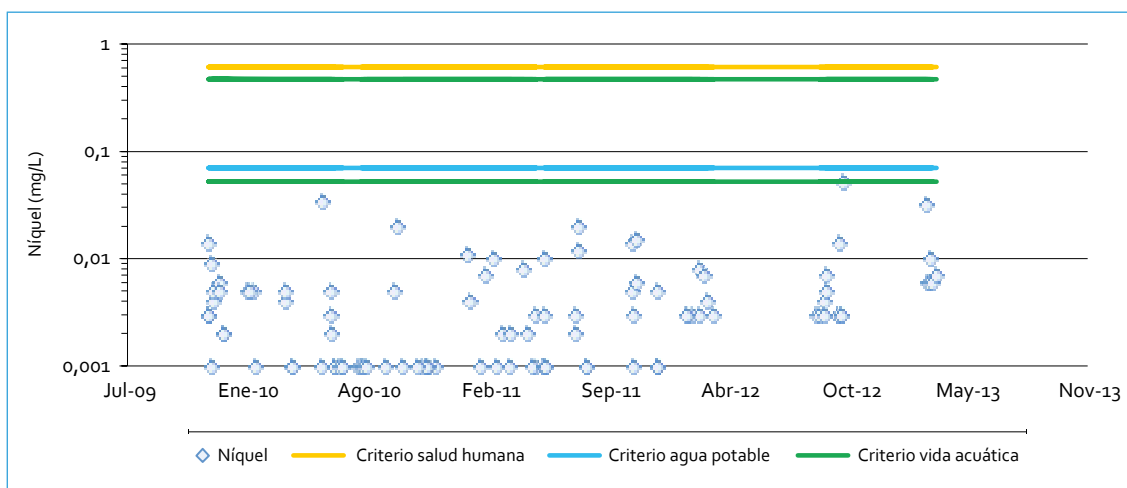


FIGURA 3.19. Perfil de níquel: río Salitre

#### 3.1.1.14.7. Plomo

El plomo en el río Salitre hacia la parte alta registra las más bajas concentraciones (figura 3.20). Las más altas se presentaron con mayor frecuencia en las cuencas media y baja (NOS Calle 53, Carrefour Av. 68, Transversal 91 y Salitre Alameda). En el primer punto de monitoreo (Parque Nacional), las concentraciones de plomo tendieron a ser las menores del río Salitre, muy cercanas al límite de de-

tección (0,003 mg/L), lo cual denota la buena calidad del punto, incluso para proteger la vida acuática (efecto agudo 0,06 mg/L) y su potencial uso para agua potable (0,01 mg/L). En los demás puntos de las cuencas media y baja se encontró un aumento con respecto al tramo 1, lo que evidencia que las descargas de aguas residuales cuentan con niveles de plomo que impactan la calidad del agua en este punto. Cerca del 45% de los datos excede el criterio para agua potable de la OMS (0,01

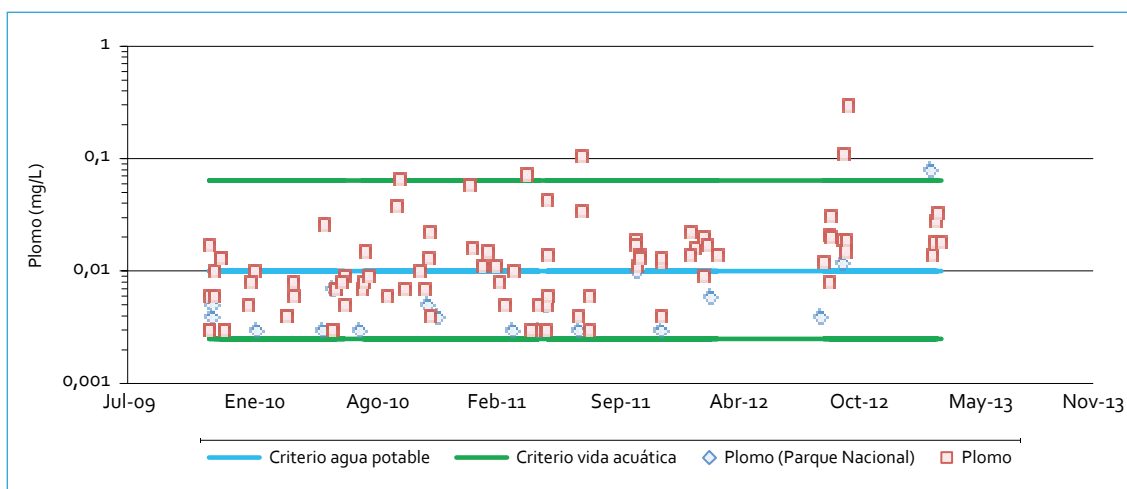


FIGURA 3.20. Perfil de plomo: río Salitre



mg/L) y muestra un impacto considerable en el agua del río. A lo largo de tiempo el plomo no ha variado significativamente. A partir del segundo punto las concentraciones se han mantenido alrededor de 0,02 mg/L.

### 3.1.2. Cargas contaminantes

#### 3.2.2.1. DBO<sub>5</sub>

En la tabla 3.1 se puede apreciar un aumento gradual en la magnitud de las cargas de DBO<sub>5</sub>, especialmente entre el tramo 1 y el 2, lo cual pone en evidencia el alto impacto de los vertimientos una vez el río entra en el perímetro urbano y la condición con la que desemboca en el río Bogotá. Igualmente, se puede observar el cambio de las cargas promedio entre los tramos del río y sus diferencias con las metas.

Las cargas del tramo 1 corresponden a Parque Nacional, donde se encontró poca variación de los datos, con un rango entre 0,04 y 7 t/año. Las cargas en este punto son insignificantes en comparación con los demás tramos, lo cual resalta la buena condición del río antes

de ser afectado por la urbanización. Se puede observar el efecto del caudal en las cargas del tramo; en caudales bajos y condiciones secas (percentil 60 a 100) las cargas fueron bajas, el promedio fue de 0,5 t/año; en el rango medio de caudales el promedio fue de 1,5 t/año (figura 3.21); y en condiciones húmedas y caudales altos (percentil 0 a 40) el promedio de carga de DBO<sub>5</sub> fue de 3,8 t/año. En este tramo la curva de duración de carga no fue excedida en ningún momento.

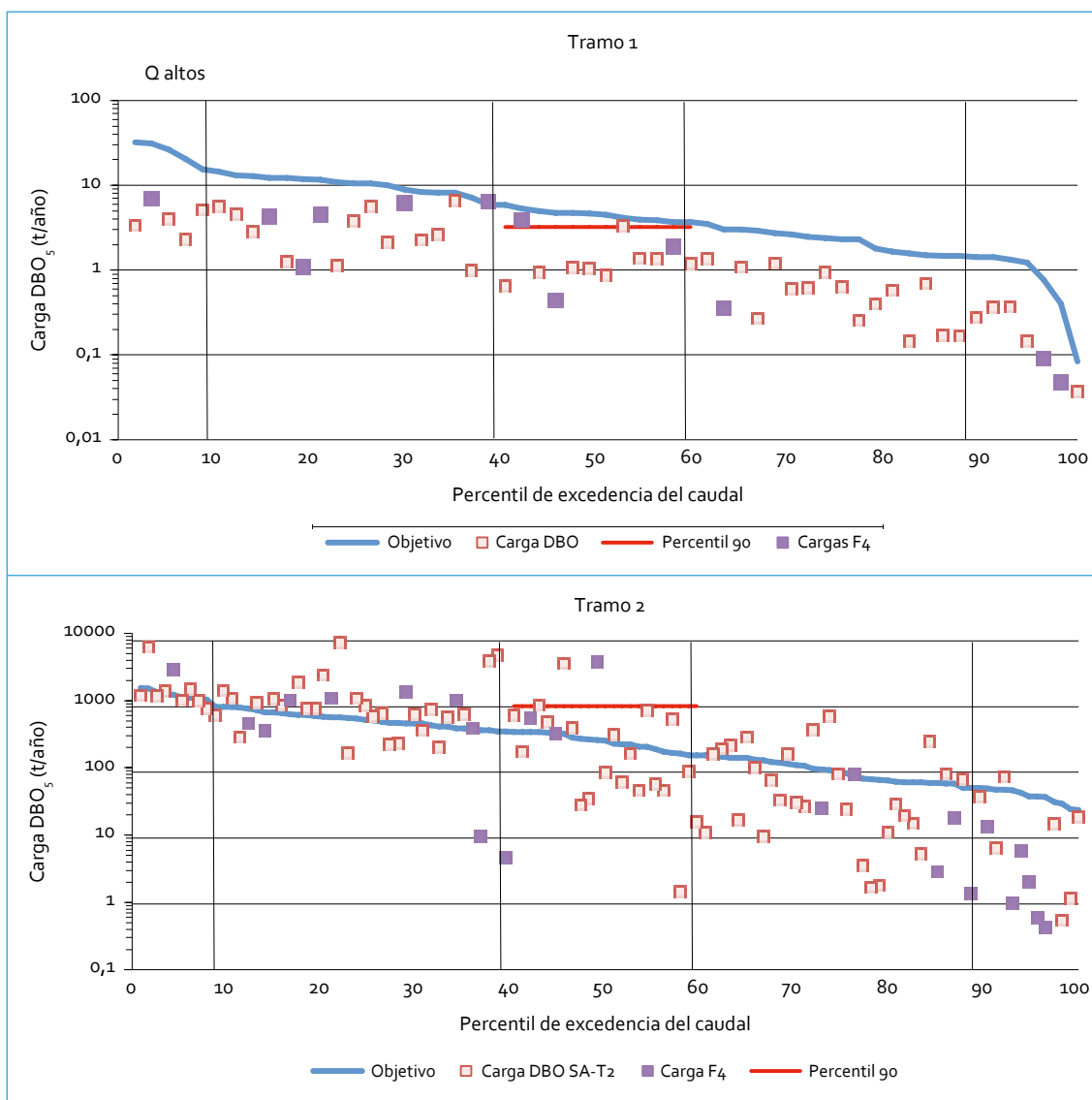
Para el tramo 2 (puntos NOS Calle 53 y Carrefour), las cargas son las más dispersas (0,4-7226 t/año) y se alejan considerablemente de la condición natural del río, como consecuencia de los vertimientos, especialmente de alivios en mal funcionamiento. La carga promedio en el rango medio de caudales (559 t/año) fue muy distante a la curva de duración, lo cual refleja que en repetidas ocasiones se incumplió el objetivo de calidad.

Las cargas de DBO<sub>5</sub> del tramo 2 obtenidas en el rango medio de caudales, en condición seca y caudales bajos (percentil 40 a 100), muestran una mayor dispersión. La diferen-

TABLA 3.1. Carga DBO<sub>5</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T2
DBO <sub>5</sub>				
Percentil 90 (F1-F4)	3,2	828	2815	11858
Promedio (F1-F4)	1,5	559	3796	6820
Promedio (F4)	2,1	1549	1667	7011
Carga curva duración (percentil 50)	4,6	254	2003	7108
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	850	4750	4950
Línea base-promedio F4	-	(-)	5373	1190

[ - ] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).



Continúa

cia entre la línea base y la carga promedio (en rango medio de caudales) del último periodo de monitoreo (F<sub>4</sub>) refleja que se han aumentado las cargas en el tiempo; por lo tanto, hacen falta aún más esfuerzos para lograr la meta de reducción (850 t) establecida en la Resolución 4328 de 2010.

En el tramo 3 se presentaron cargas de DBO<sub>5</sub> más elevadas que en el tramo anterior, que varían entre 18 y 15 114 t/año, y registran

la carga máxima del río Salitre. Las cargas estuvieron relativamente cerca a la curva de duración (figura 3.21), sobre todo en el rango medio de caudales (entre 289 y 33 636 t/año). Se obtuvieron dos datos muy altos de cargas en Carrefour que influyeron en el promedio; estos dos datos y el valor máximo del tramo se consiguieron en monitoreos de madrugada que reflejan en periodos anteriores la sensibilidad de las curvas 24 horas para la extrapolación

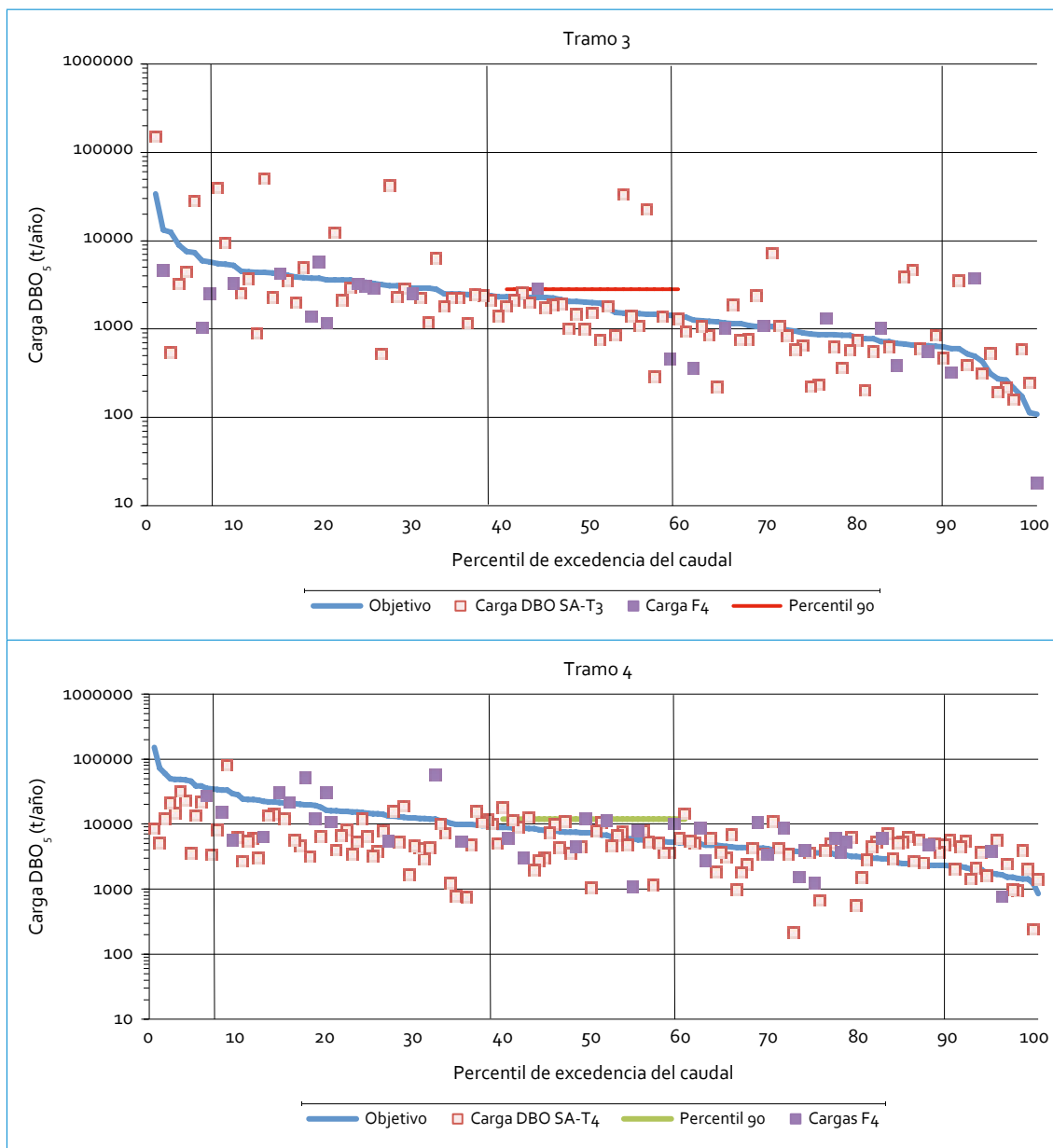


FIGURA 3.21. Curva de duración de carga DBO<sub>5</sub>: río Salitre

de las cargas. Por otro lado, se notó una disminución de las cargas de DBO<sub>5</sub> en el tramo 3 a lo largo del tiempo, pues se observó que la carga promedio (en el rango medio de caudales de la F<sub>4</sub>) fue inferior a la línea base, por lo que bajo este escenario la meta de reducción (4750 t) se está cumpliendo en un 100 % (figura 3.21).

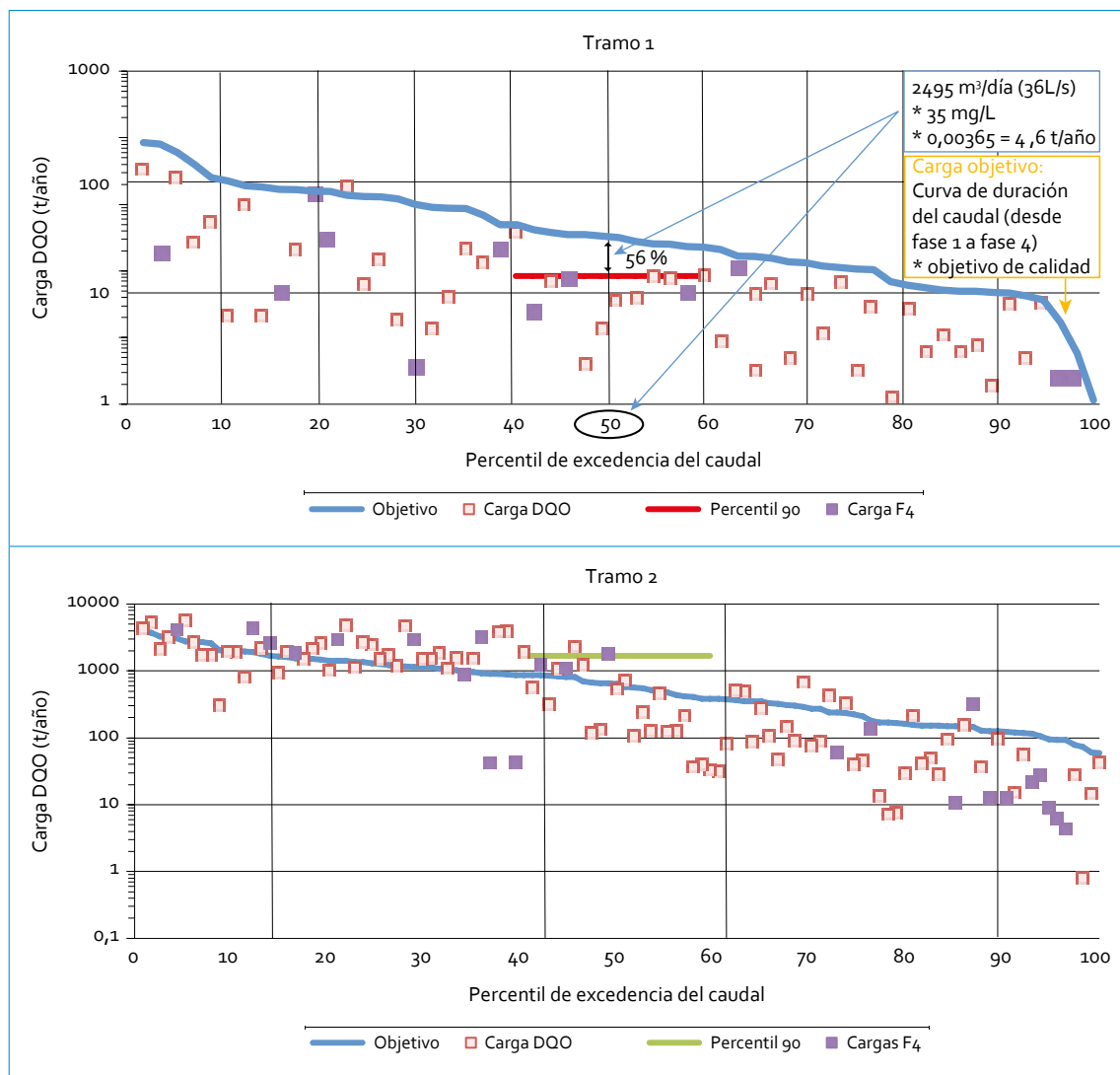
Por último, en el tramo 4 (puntos Carrefour, Transversal 91 y Salitre Alameda) se observó una mayor tendencia a encontrar cargas de DBO<sub>5</sub> más elevadas (rango entre 211 y 80 707 t/año), las cuales no se alejaron significativamente del comportamiento de la curva de duración. En caudales bajos y condiciones

secas (percentil 60 a 100) las cargas fueron las más bajas del tramo; el promedio fue de 3883 t/año, en el rango medio de caudales el promedio fue de 6820 t/año y en condiciones húmedas y caudales altos (percentil 0 a 40) el promedio de carga de DBO<sub>5</sub> fue de 12 070 t/año. El percentil 90 de las cargas en el rango medio de caudales fue distante a la carga objetivo (curva de duración); sin embargo, el promedio fue levemente inferior y mostró que hubo muestreos en los que la cargas de DBO<sub>5</sub> fue muy elevada. La carga promedio de la F4

fue muy inferior a la línea, por lo que se puede afirmar que aunque no se ha logrado la meta en un 100 %, se ha evidenciado una reducción de cargas de DBO<sub>5</sub> en el tramo.

3.2.2.2. DQO

En la figura 3.22 se muestran las cargas de DQO en el río Salitre con sus respectivas curvas de duración por tramo. De acuerdo con los resultados, se notó un incremento en las cargas de DQO a medida que el río atraviesa la ciudad; no



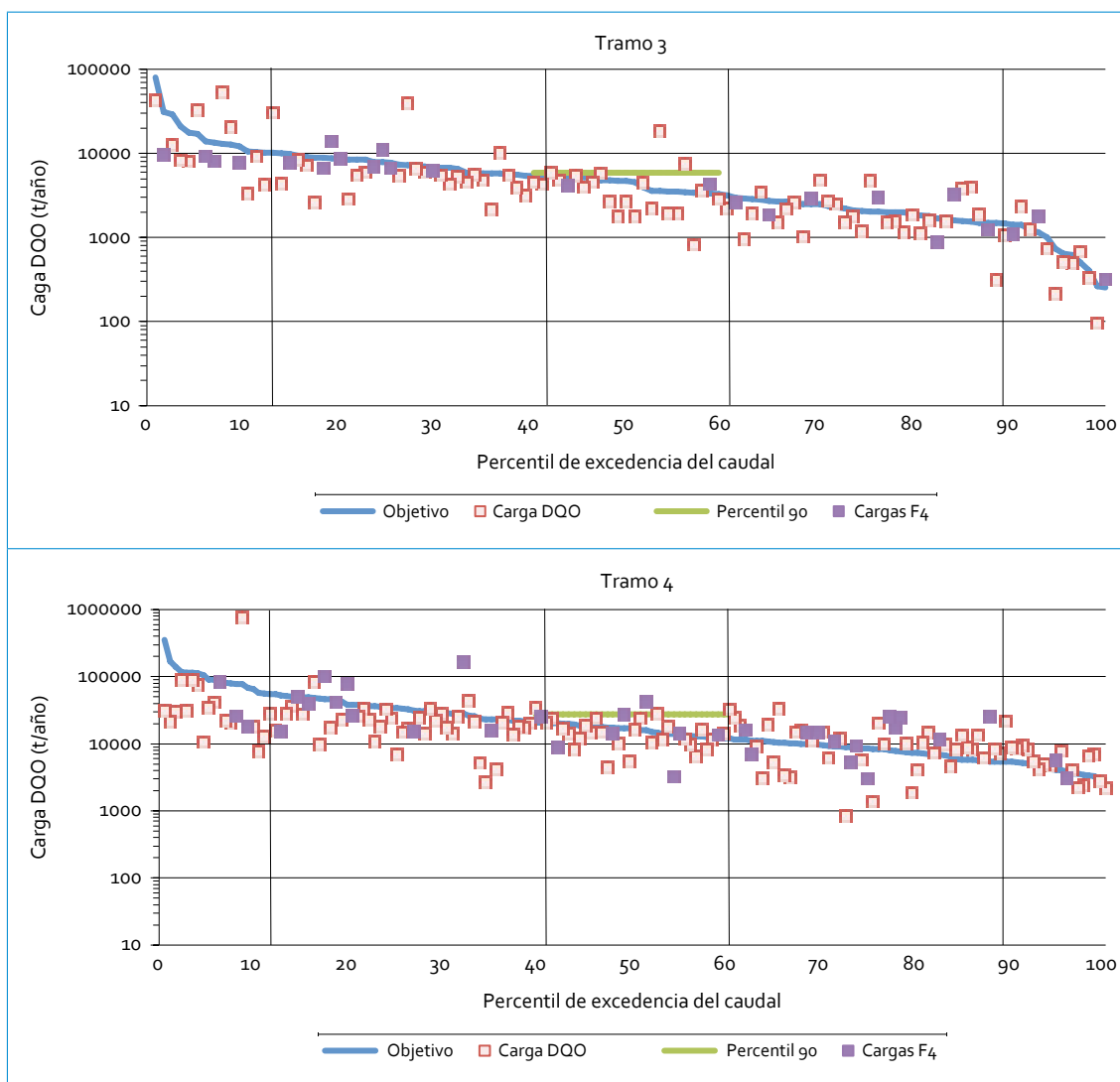


FIGURA 3.22. Curva de duración de carga DQO: río Salitre

obstante, el cambio más drástico se dio entre tramo 1 y el 2 (tabla 3.2), donde se reciben las primeras descargas que alteran negativamente las condiciones naturales del río.

En el tramo 1, las cargas de DQO fueron las más bajas en comparación con los siguientes tramos, que variaron entre 0,1 y 145 t/año. Así como para la DBO<sub>5</sub>, las cargas de DQO tendieron a variar según el caudal; pero en las condiciones húmedas se alejaron un poco de la curva de duración. En condiciones medias de caudales,

en ningún monitoreo se excedió la curva de duración y el percentil 90 de los datos estuvo alrededor de un 56 % por debajo del percentil 50 de la carga objetivo.

En el tramo 2 se presentó un incremento significativo en las cargas de DQO con respecto al tramo anterior, lo cual está asociado con los vertimientos directos o vía conexión errada de ARD. Las cargas mostraron una variación importante entre 0,8 y 5757 t/año. La carga media en el rango de caudales medios fue muy similar

TABLA 3.2. Carga DQO (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T2
DQO				
Percentil 90 (F1-F4)	14	1677	5894	27485
Promedio (F1-F4)	12	653	4365	16391
Promedio (F4)	9,8	1377	4214	18542
Carga curva duración (percentil 50)	32	635	4673	16586
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción		1100	5500	5900
Línea base-Promedio F4	-	78	6658	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

a la carga máxima (curva de duración percentil 50); sin embargo, el percentil 90 y el promedio de la fase 4 se alejaron significativamente, al mostrar que en varias ocasiones y especialmente en la última campaña se incumplió el estándar (reflejado en la curva de duración de carga) y ser el tramo que con mayor frecuencia y magnitud excedió la carga objetivo.

Las cargas obtenidas en condición seca y caudales bajos muestran una mayor dispersión que en la condición húmeda. Por otra parte, la meta de reducción para este tramo (1100 t) significaría una alta remoción de la carga actualmente transportada. A partir de los resultados de la F4 en el rango de caudales medios aún faltan esfuerzos para el cumplimiento de la meta, puesto que la carga media actual solo se ha reducido en 78 t respecto a la línea base.

Para el tramo 3 también se presentó un incremento de las cargas de DQO, de menor magnitud, respecto al tramo anterior, igualmente asociado con los vertimientos de ARD. La mayor dispersión de los datos se presentó en el rango de caudales altos. Las cargas estuvieron relativamente cerca a la curva de

duración, al variar entre 95 y 52 816 t/año. En el rango medio de caudales se obtuvieron varios datos elevados de carga que superaron la curva de duración (aproximadamente el 35 %). Dichas cargas se presentaron, sobre todo, en Carrefour, y dos de estos datos (los máximos) se obtuvieron en monitoreos de madrugada, que reflejaron la sensibilidad de las curvas 24 horas para la extrapolación de las cargas. Se observó que, bajo los resultados de la fase 4, en el rango medio de caudales, la meta de reducción (5500 t) se encuentra en cumplimiento, ya que la diferencia entre la carga actual y la línea base fue de 6658 t.

Finalmente, en el tramo 4 también se presentó un incremento en las cargas respecto al tramo anterior, pues después de los primeros vertimientos, el aumento de las cargas a lo largo del río se hace de forma gradual. Las cargas en el tramo 4 fueron menos variables, con un rango entre 837 y 766 386 t/año, y no se alejaron del comportamiento de la curva de duración. En caudales bajos las cargas fueron las más bajas del tramo, y el promedio fue de 9903 t/año. En el rango medio de caudales el

promedio fue de 16 391 t/año; y en condiciones húmedas el promedio de carga de DQO fue de 42 264 t/año. El percentil 90 de las cargas en el rango medio de caudales superó en más de 60% la carga objetivo (percentil 50 de la curva de duración), lo que denota un bajo cumplimiento con el estándar. A partir de los resultados de carga en la fase 4 en el rango medio de caudales aún no se evidencia un cumplimiento de la meta de reducción (5900 t), puesto que las cargas han aumentado entre la línea base y la carga actual.

### 3.2.2.3. SST

Las cargas de SST del río Salitre y sus curvas de duración se presentan en la tabla 3.3. La diferencia en cargas entre los tramos del río fue significativa, por ser uno de los parámetros que presentó mayor diferencia entre el tramo 1 y el 2. A diferencia de la mayoría de parámetros, el aumento de las cargas de SST en el río Salitre no fue muy importante entre los tramos 3 y 4.

En el tramo 1 las condiciones de calidad frente a este parámetro fueron buenas. Las

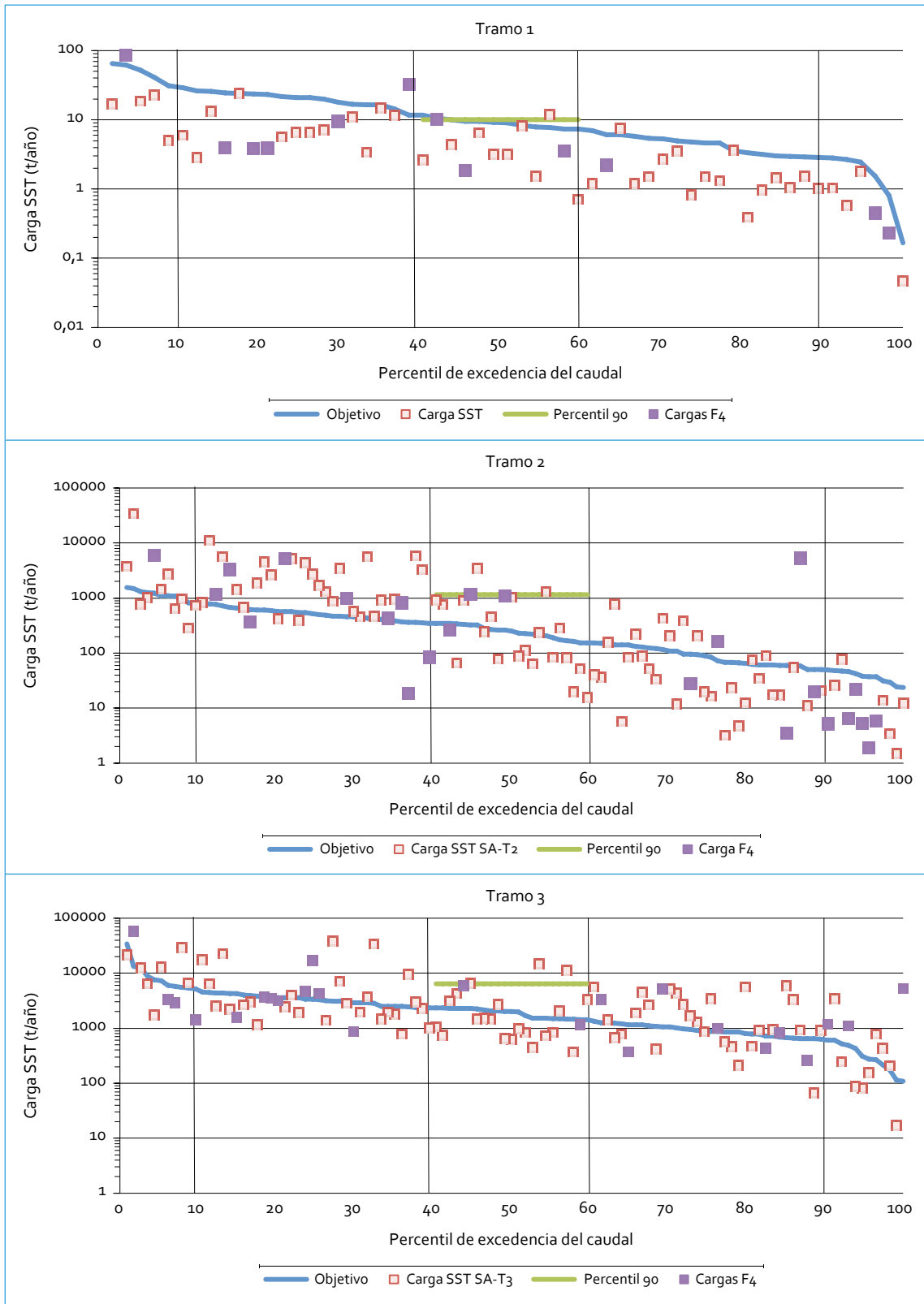
cargas de SST respecto a los otros tramos fueron pequeñas, al oscilar entre 0,05 y 85 t/año. Aunque las cargas variaron en función del caudal (figura 3.23), los datos fueron más dispersos que para DBO<sub>5</sub> y DQO, al mostrar que en varias ocasiones las cargas superaron la curva de duración. En el rango medio de caudales se presentó una carga por encima de la carga máxima, la cual fue producto de una concentración elevada de SST (28 mg/L), la cual se alejó bastante de la concentración promedio del tramo (3,7 mg/L).

En el tramo 2 (puntos de monitoreo Arzobispo Carrera 7ª y NOS Calle 53), las cargas oscilaron entre 1,5 y 34 191 t/año, que se constituyó en el tramo con la dispersión de cargas de SST más alta del río Salitre. Se notó un cambio drástico en las cargas del punto Arzobispo (que tendieron a ser bajas) y las de Calle 53, que dejaron en evidencia el alto impacto de las descargas de aguas residuales en la concentración de sólidos en el río. En el rango medio de caudales, el percentil 90 (1153 t/año) y el promedio (556 t/año) de los datos se alejaron considerablemente de la curva de duración (percentil 50 = 254 t/año), y así fue el tramo

TABLA 3.3. Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>
SST				
Percentil 90 (F1-F4)	10	1153	6397	6648
Promedio (F1-F4)	4,8	556	2915	5651
Promedio (F4)	5,2	841	3515	5077
Carga curva duración (percentil 50)	9,1	254	2003	7108
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	1100	6050	6600
Línea base-promedio F4	-	385	4821	7993

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).





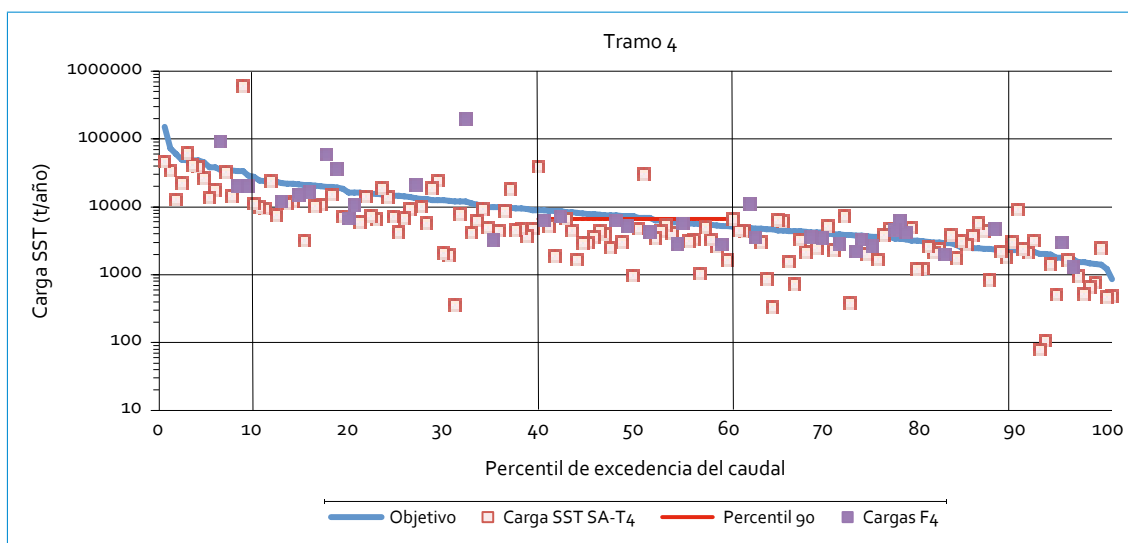


FIGURA 3.23. Curva de duración de carga SST: río Salitre

con el incumplimiento más alto. De los datos que incumplieron, dos de ellos (los máximos) se obtuvieron en monitoreos de madrugada en Calle 53, que reflejaron la sensibilidad de las curvas 24 horas para la extrapolación de las cargas.

Con los resultados de la fase 4 de carga de SST en el rango medio de caudales se observa un cumplimiento de un poco más del 30 % de la meta de reducción del tramo 2 (1100 t), ya que la diferencia entre la carga promedio actual y la línea base fue de 385 t. Para el caso del tramo 3, se notó un aumento frente a las cargas del tramo anterior. También se observó una variación de los datos, aunque en menor proporción, ya que el rango estuvo entre 17 y 56 724 t/año. Dado que las cargas fueron menos variables, el comportamiento de las cargas se ajustó más a la curva de duración y mostraron una mejor correlación entre las cargas y el caudal. Sin embargo, al igual que para el tramo, se presentó una alta frecuencia de datos por encima de la curva (especialmente en condiciones secas), lo que denota incumplimiento frente al estándar. En el rango medio de caudales, el percentil

90 y el promedio de las cargas se alejaron de forma significativa de la carga máxima (curva de duración); de las cargas que incumplieron la mayoría se obtuvieron en Carrefour. A partir de estos resultados, la meta de reducción (6050 t) se encuentra en cumplimiento (en un 80 %), puesto que la diferencia entre la carga promedio que se transporta actualmente en el tramo y la carga base es de 4821 t.

En el tramo 4 se transportan cargas de SST similares al tramo anterior, e igualmente la variabilidad de los datos fue importante con un rango de 80 a 606 771 t/año. El comportamiento de las cargas de SST del tramo 4 fue el que más se asemejó a la curva de duración de carga, y la frecuencia de incumplimiento fue menor que para los tramos 2 y 3. En el rango medio de caudales, las cargas de SST tendieron a estar por debajo de la carga objetivo (curva de duración), lo que refleja un mejor cumplimiento. Bajo estos resultados se notó una disminución de las cargas de SST en el tramo 4 a lo largo del tiempo, pues se observó que la carga promedio (en el rango medio de caudales de la F4) fue inferior a la línea base,

por lo que la meta de reducción (4750 t) se está cumpliendo en un 100 %.

### 3.2.2.4. Nitrógeno total

Similar a los demás parámetros, las cargas de  $N_{total}$  aumentan a lo largo del río, especialmente a partir del tramo 2, donde se incrementan significativamente. Las cargas del tramo 1 corresponden a Parque Nacional, donde se encontró poca variación de los datos, con un rango de 0,02 a 31 t/año. A diferencia de los demás parámetros, las cargas de  $N_{total}$  en el tramo 1 del río muestran una tendencia a estar por encima de la curva de duración, lo que refleja que en la mayoría de monitoreos se incumple el estándar (tabla 3.4). Dado que en este punto no se han registrado actividades antropogénicas que puedan aportar cargas de nutrientes al río, es difícil explicar el comportamiento de este parámetro por causas exógenas. A pesar del incumplimiento, las cargas variaron en función del caudal, es decir, en condiciones húmedas se obtuvieron las cargas más elevadas y lo contrario en condiciones secas, lo cual permite inferir que la variabilidad de cargas

obedece a fenómenos naturales. La mayoría de cargas obtenidas en la fase 4 exceden la carga máxima; sin embargo, se encuentran muy cercanas a la curva de duración y ello denota que es posible que el objetivo de calidad sea muy exigente para las condiciones naturales del río.

A partir del tramo 2, las cargas de  $N_{total}$  en el río aumentan considerablemente, y aunque la diferencia en carga de  $N_{total}$  entre los dos primeros tramos no fue tan importante como para la  $DBO_5$ , se notó incumplimiento recurrente en las cargas del tramo y una fuerte dispersión en los datos. En caudales altos fue donde con mayor frecuencia se obtuvieron cargas por encima de la carga máxima (reflejada en la curva de duración), lo que revela ser una condición crítica en el cumplimiento. En este tramo el rango de cargas de  $N_{total}$  estuvo entre 0,6 y 3920 t/año, y muestra ser el tramo con mayor variabilidad. A partir de estos resultados, se notó un aumento de las cargas de  $N_{total}$  en el tramo 2 a lo largo del tiempo, pues se observó que la carga promedio (en el rango medio de caudales de la F4) fue superior a la línea base, por lo que la meta de reducción (135 t) no se está cumpliendo.

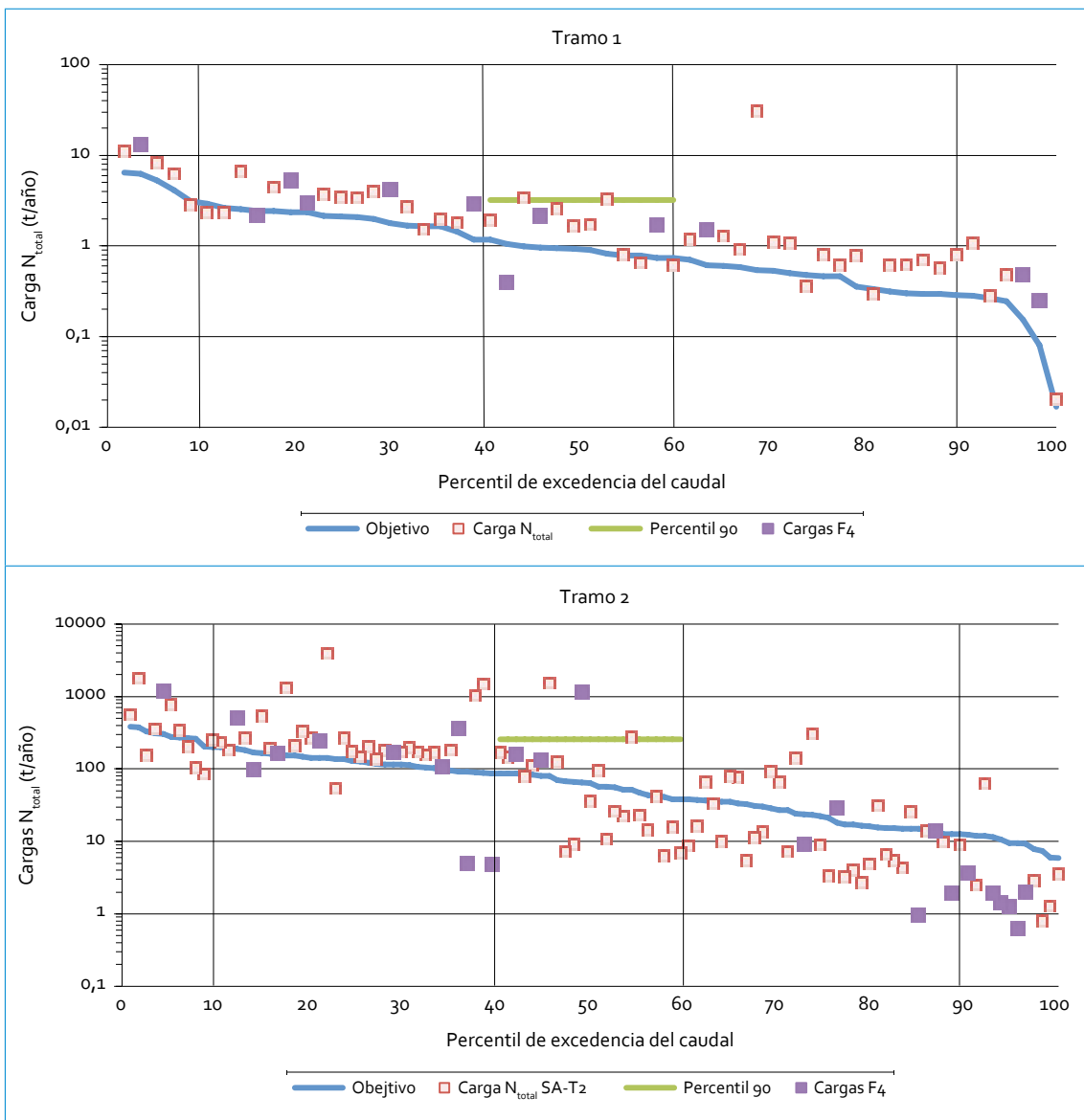
TABLA 3.4. Carga  $N_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T2
$N_{total}$				
Percentil 90 (F1-F4)	3,2	254	1115	2832
Promedio (F1-F4)	1,7	183	934	1771
Promedio (F4)	1,4	483	854	1898
Carga curva duración (percentil 50)	0,9	63	534	1896
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	135	950	950
Línea base-promedio F4	-	[-]	698	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

Para el tramo 3 también se presentó un incremento en la carga media respecto al tramo anterior, aunque en menores proporciones. Es de esperar que los niveles de nitrógeno se eleven como efecto de las descargas de ARD que se vierten a lo largo del río. En este tramo se observó una menor variabilidad en los datos, con un rango de 14 a 15 757 t/año. Las cargas estuvieron relativamente cerca a la curva de duración (figura 3.24). En el rango medio de

caudales se obtuvieron dos datos elevados de carga de  $N_{total}$  en Carrefour que influyeron en el promedio (lo cual explica la diferencia con el percentil 90); estos dos datos (valores máximos) fueron producto de la extrapolación de las cargas de monitoreos en la madrugada. Bajo estos resultados se encontró una disminución de las cargas de  $N_{total}$  en el tramo 3 a lo largo del tiempo, pues la carga promedio (en el rango medio de caudales de la  $F_4$ ) fue inferior



Continúa

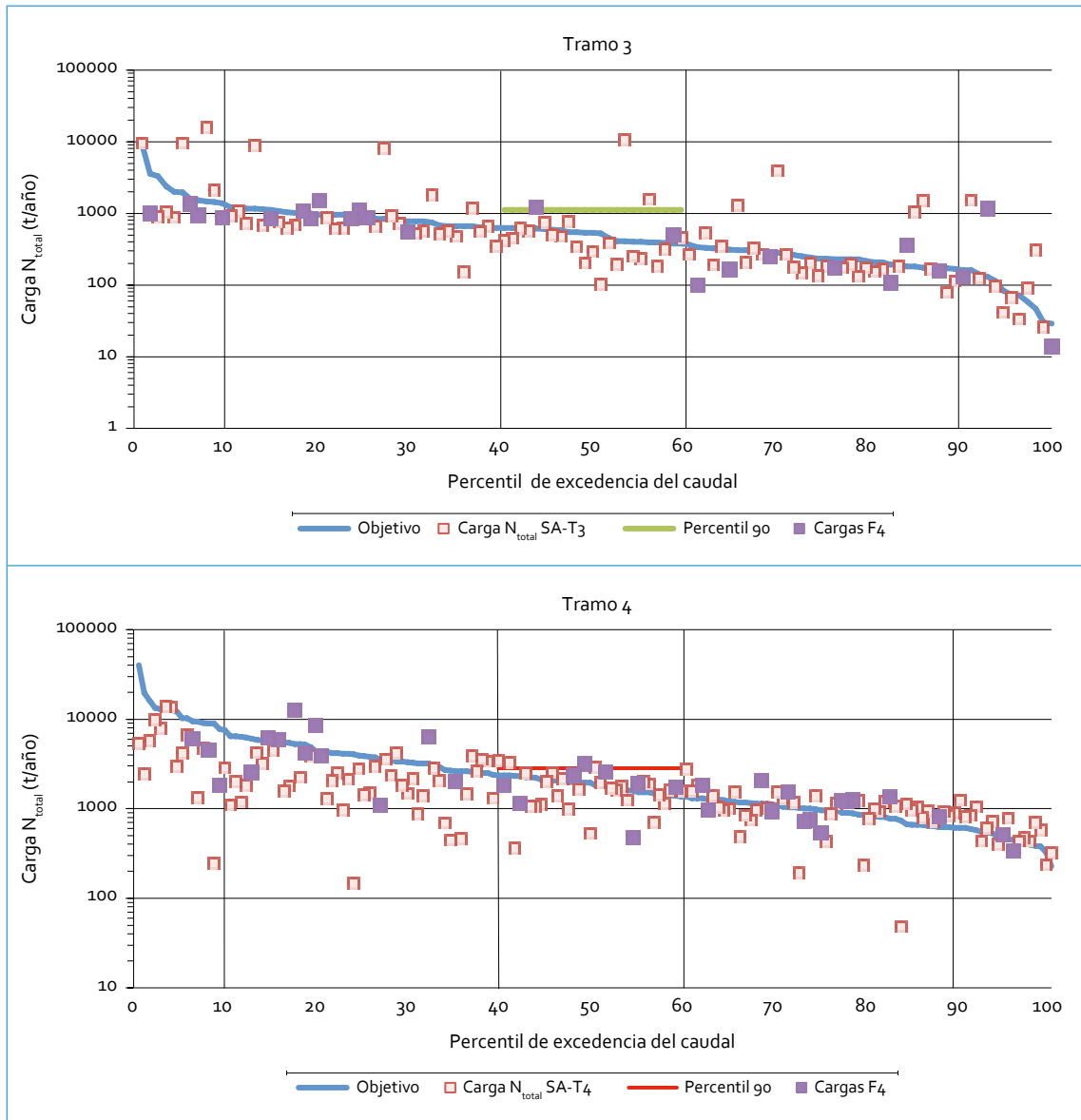


FIGURA 3.24. Curva de duración de carga  $N_{total}$ : río Salitre

a la línea base; por lo tanto, la meta de reducción (950 t) se está cumpliendo en casi un 70 %.

Finalmente, en el tramo 4 se observó un leve incremento en las cargas con respecto al tramo anterior. El rango estuvo entre 49 y 13 998 t/año y mostró una mejor correlación entre las cargas y los caudales. Aunque para este tramo también se presentó una alta

frecuencia de cargas por encima de la carga máxima, en el rango medio de caudales el percentil 90 de las cargas se alejó en un 50 % de la carga objetivo (percentil 50 de la curva de duración). Se observa cumplimiento nulo de la meta de reducción, ya que la carga se ha aumentado en el tiempo.

### 3.2.2.5. Fósforo total

En el tramo 1, el comportamiento de las cargas tuvo una variabilidad relativamente alta: el rango estuvo entre 0,001 y 1,9 t/año. Se pudo observar el efecto del caudal sobre las cargas del tramo; en caudales bajos (percentil 60 a 100) las cargas fueron bajas, el promedio fue de 0,06 t/año; en el rango medio de caudales el promedio fue de 0,17 t/año (tabla 3.5), y en condiciones húmedas (percentil 0 a 40) el promedio de carga de  $P_{total}$  fue de 0,4 t/año. En este tramo la curva de duración de carga no fue excedida en ningún momento y las cargas en la última campaña de monitoreo no variaron significativamente respecto a las demás.

En el tramo 2 se incrementaron de forma significativa las cargas de  $P_{total}$  respecto al tramo anterior, lo cual está asociado, como se mencionó, con los primeros vertimientos de agua residual. Las cargas muestran una alta variación, entre 0,04 y 132 t/año, que registran —así como para otros parámetros— la dispersión de cargas más alta del río. Cabe resaltar que la mayor variabilidad se dio en condiciones secas (entre el percentil 60 a 100), ya que en

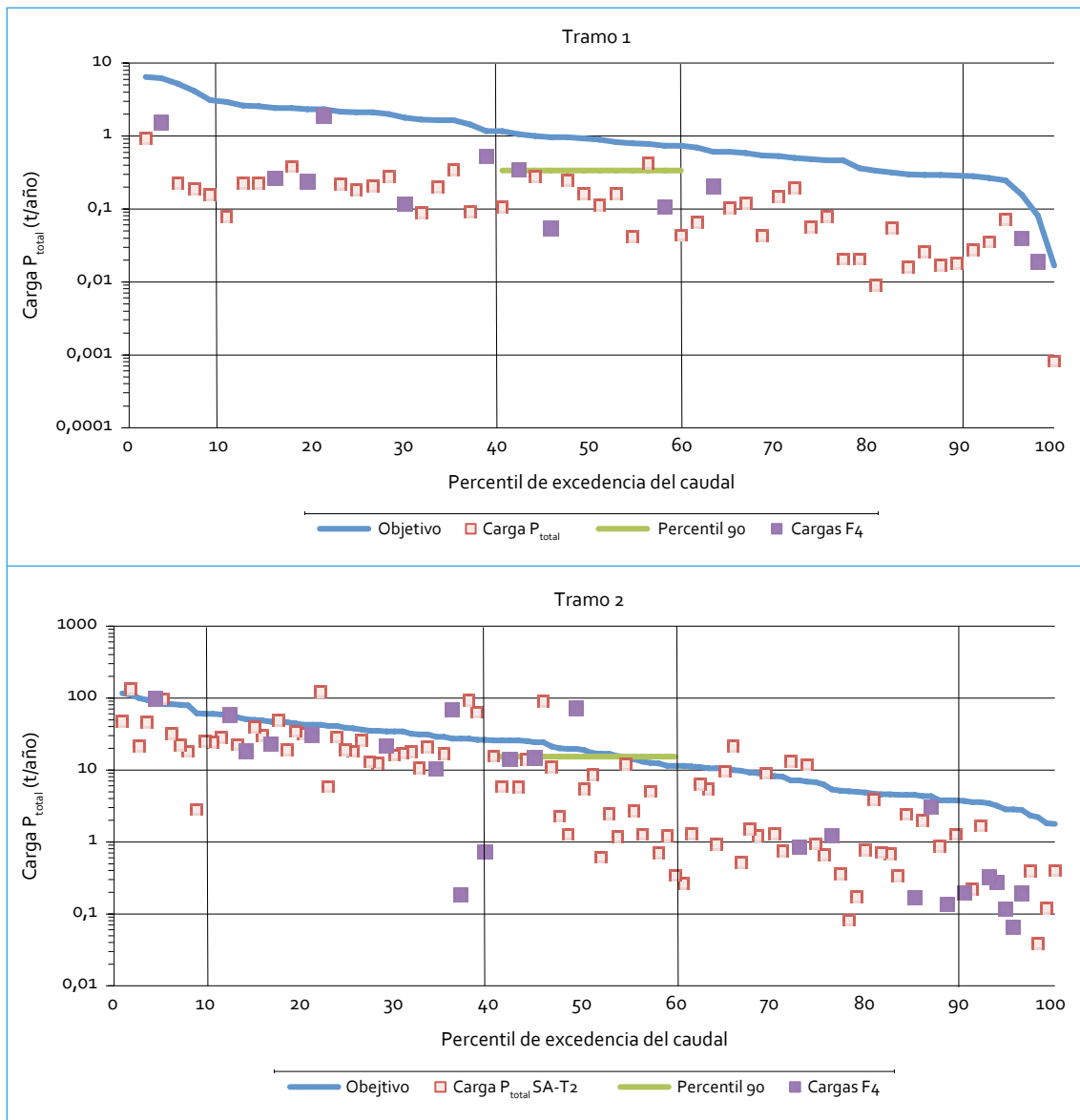
condiciones húmedas las cargas fueron muy similares a la curva de duración, lo que mostró una mejor correlación con el caudal. Se notó un bajo incumplimiento en el rango medio de caudales; el percentil 90 de las cargas excedió levemente la carga objetivo; sin embargo, el promedio de cargas de  $P_{total}$  de todas las fases y el promedio solo de la última fase se encuentran dentro de lo proyectado en la curva de duración, y ello refleja que por un par de monitoreos en la madrugada (en NQS Calle 53) el percentil 90 se sesgó hacia un valor más alto como consecuencia de la sensibilidad a las curvas de 24 horas. A partir de los datos de la fase 4 en el rango medio de caudales, la meta de reducción (20 t) todavía no se encuentra en cumplimiento, puesto que la carga actual es muy similar a la carga base.

Para el tramo 3 se notó un aumento importante frente a las cargas del tramo anterior. Aquí las cargas fueron menos variables (pasaron de 2,4 a 963 t/año) y estuvieron relativamente cerca de la curva de duración (figura 3.25). En el rango medio de caudales se obtuvieron varios datos elevados de carga de  $P_{total}$  en Carrefour y NQS Calle 53 que influyeron en el promedio

TABLA 3.5. Carga  $P_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T2
$P_{total}$				
Percentil 90 (F1-F4)	0,34	15	97	362
Promedio (F1-F4)	0,17	13	71	229
Promedio (F4)	0,17	33	77	236
Carga curva duración (percentil 50)	0,91	19	80	284
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	20	250	250
Línea base-promedio F4	-	[-]	259	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).



Continúa

(lo cual explica la diferencia con el percentil 90); estos dos datos (valores máximos) fueron producto de la extrapolación de las cargas de monitoreos en la madrugada. Bajo estos resultados se notó una disminución de las cargas de  $P_{total}$  a lo largo del tiempo, ya que la carga promedio (en el rango medio de caudales de la F<sub>4</sub>) fue inferior a la línea base; por lo tanto, la meta de reducción (250 t) se está cumpliendo en más de un 100% (véase tabla 3.5).

Por otra parte, en el tramo 4, las cargas de  $P_{total}$  siguen aumentando respecto a los tramos previos; sin embargo, la variación de los datos fue la más baja en el río, con un rango entre 17 y 3166 t/año. Las cargas se ajustaron más al comportamiento de la curva de duración en caudales bajos, es decir, entre los percentiles 60 a 100, ya que en condiciones húmedas las cargas estuvieron más dispersas y muy por debajo de la curva. Lo anterior explica el ma-

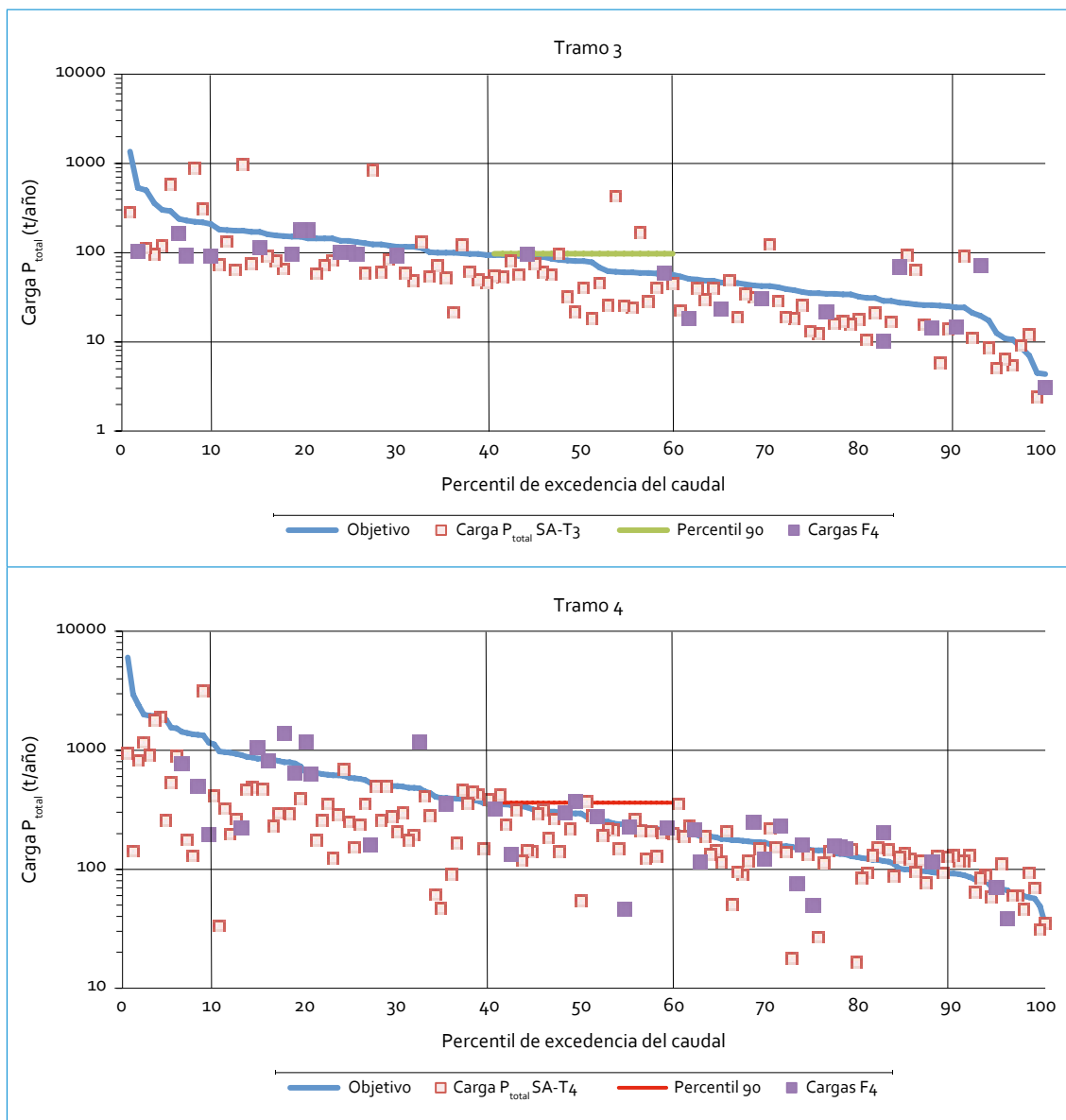
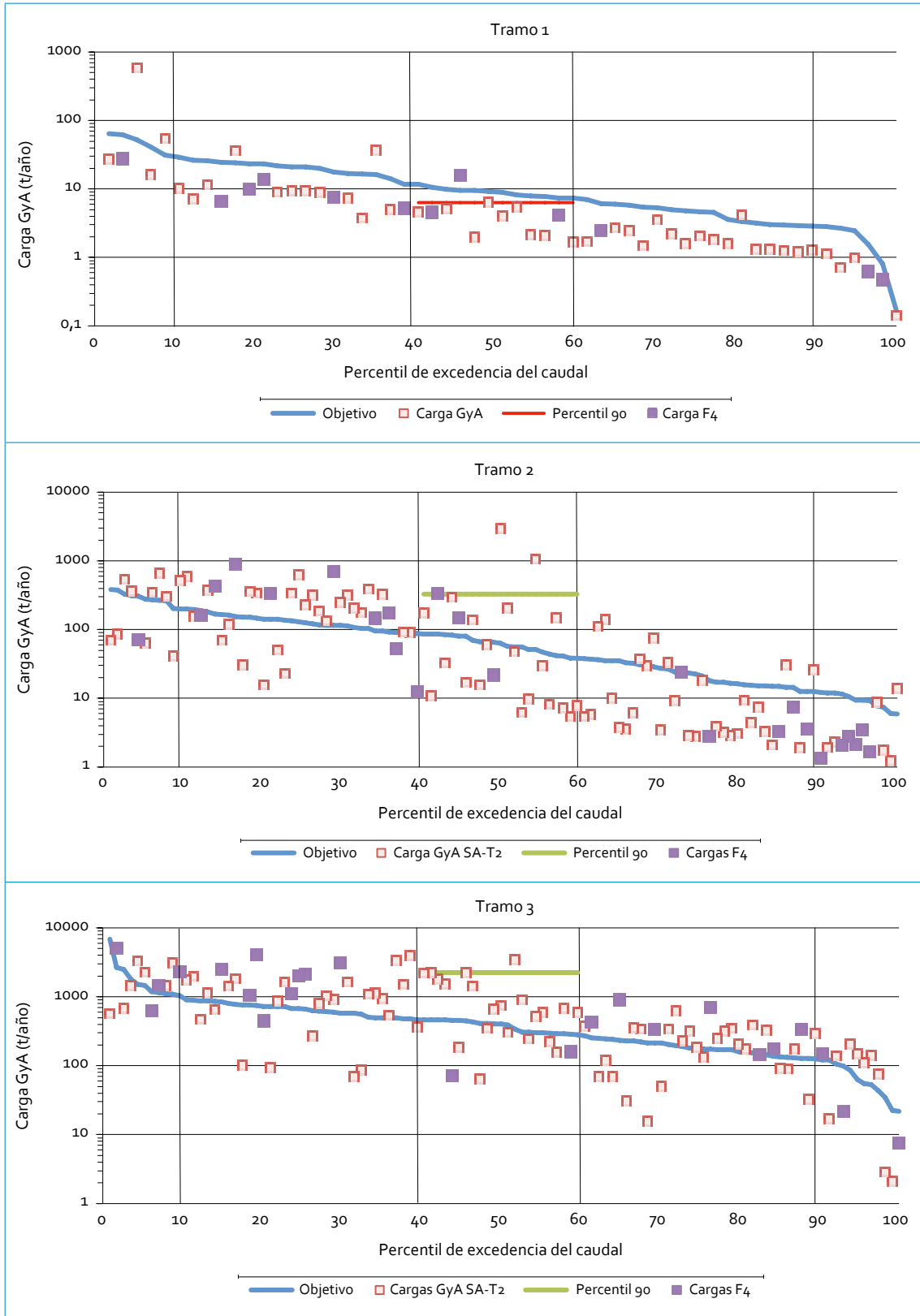


FIGURA 3.25. Curva de duración de carga  $P_{total}$ : río Salitre

por incumplimiento en las cargas obtenidas en caudales bajos. En el rango medio de caudales, el percentil 90 estuvo un 50 % por encima de la carga objetivo (curva de duración percentil 50). En cuanto a la meta de reducción (250 t) no se encuentra aún en cumplimiento, puesto que la carga promedio de la fase 4 (en el rango medio de caudales) fue superior a la carga base.

### 3.2.2.6. Grasas y aceites

Las cargas de GyA en el río Salitre se presenta en la figura 3.26 con sus respectivas curvas de duración. Igualmente, en la tabla 3.6 se puede observar el cambio de las cargas entre los tramos del río. Cabe resaltar que todos los parámetros analizados presentaron una fuerte diferencia entre el tramo 1 y el 2, lo cual





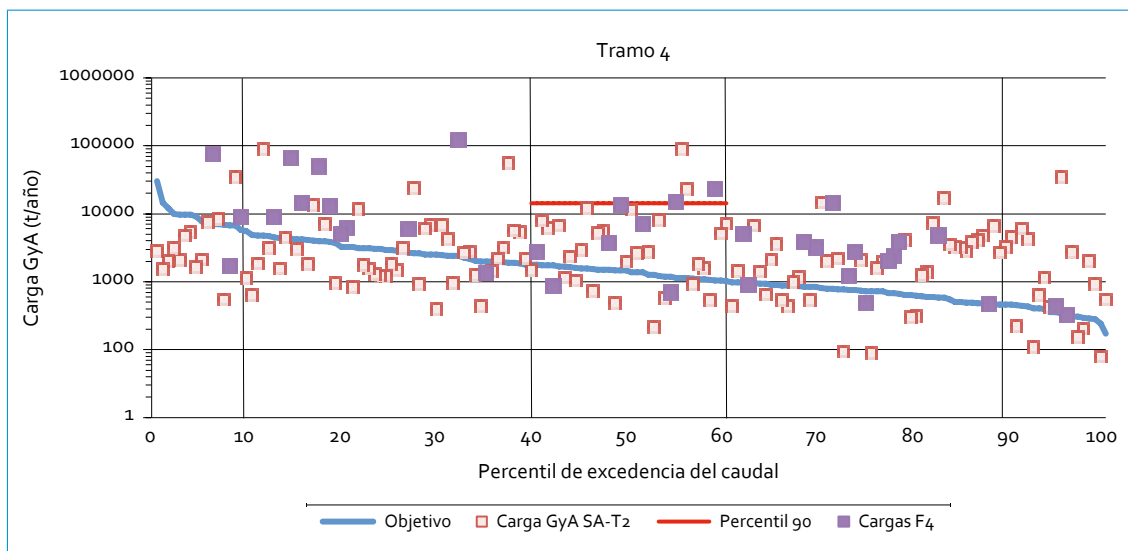


FIGURA 3.26. Curva de duración de carga GyA: río Salitre

TABLA 3.6. Carga GyA (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T2
GyA				
Percentil 90 (F1-F4)	6,3	329	2231	14177
Promedio (F1-F4)	4,8	251	930	7760
Promedio (F4)	8,1	169	116	8356
Carga curva duración (percentil 50)	9,1	63	401	1422

evidencia un sector del río con alto impacto de las descargas de aguas residuales sobre las condiciones naturales del río; sin embargo, para el caso de las cargas de GyA la diferencia entre el tramo 1 y el 2 fue una de la más pequeñas (junto con nutrientes), en contraste con las cargas de materia orgánica y sólidos.

Las cargas de GyA en el tramo 1 fueron poco variables, pues en la mayoría de los monitoreos las concentraciones fueron no detectables y mostraron que esta parte del río no es afectada por este parámetro y las cargas varían en función del caudal. En algunos monitoreos

del segundo semestre de 2011, en el rango de caudales altos se presentaron concentraciones elevadas de GyA para el tramo, que resultaron en cargas altas por encima de la curva de duración. Se debe resaltar que el percentil 90 de las cargas del rango medio de caudales estuvo por debajo de la carga máxima, lo que denota un buen cumplimiento bajo condiciones normales de caudal. Para el tramo 2 las cargas variaron entre 1,2 y 2963 t/año. Ello muestra un aumento frente al tramo anterior. En el rango medio de caudales, las cargas se alejaron considerablemente de la carga objetivo, que evidencia un

constante incumplimiento del estándar. Este fue gradual y en función del caudal. En condiciones secas se presentaron menos cargas por encima de la curva de duración; por el contrario, en condiciones húmedas la frecuencia de incumplimiento fue la más alta. La dispersión de los datos no permite establecer una buena correlación entre el caudal y las cargas. Respecto a las cargas de GyA obtenidas en la última campaña de monitoreo (fase 4) se observó que los datos registrados en condiciones secas fueron bajos (en Arzobispo Carrera 7ª), por lo que la mayoría se encontró muy por debajo de la carga máxima, mientras que en condiciones húmedas la mayoría de cargas superaron la curva de duración (registrados en NQS Calle 53).

En el tramo 3 se observó una menor dispersión en las cargas de GyA en comparación con el tramo anterior y un aumento significativo de las cargas, y así es uno de los parámetros que mayor diferencia presentaron entre el tramo 2 y el 3. A diferencia del tramo anterior, el comportamiento de las cargas de GyA fue semejante a la curva de duración, aunque se encontró una cantidad importante de datos por encima de la carga máxima. En este tramo, el incumplimiento fue homogéneo en los diferentes rangos de caudal. En el rango medio de caudales los datos elevados de carga de GyA se presentaron en su mayoría en Carrefour. Para el tramo 4 las cargas presentaron una variabilidad menor, aunque al igual que el tramo 2 los datos fueron dispersos. La gran mayoría de cargas de GyA tendieron a sobrepasar la curva de duración, independiente de la condición hidrológica. También se apreció una alta cantidad de datos por encima de la carga máxima; en condiciones secas, las cargas tendieron a estar por encima de la curva de duración, por lo que su comportamiento fue distante al comportamiento del caudal.

### 3.2.2.7. SAAM

Las cargas de SAAM por tramo y sus curvas de duración en el río Salitre están en la figura 3.27 y muestran un aumento de la carga a lo largo de su recorrido por la ciudad. Los cambios en carga en el rango medio de caudales se presentan en la tabla 3.7. Al igual que para los demás parámetros, la diferencia más importante en carga se dio entre el tramo 1 y el 2.

Las cargas del tramo 1 corresponden a Parque Nacional, donde se encontró poca variación de los datos, con un rango de 0,001 a 2,9 t/año. Así como para los demás parámetros, las cargas de SAAM en el tramo 1 del río muestran una tendencia a estar por debajo de la curva de duración, lo que refleja que en la mayoría de monitoreos se cumple el estándar. Las cargas variaron en función del caudal, es decir, en condiciones húmedas se obtuvieron las cargas más elevadas y lo contrario en condiciones secas. La mayoría de cargas obtenidas en la fase 4 se encuentran muy por debajo de la carga máxima. En el tramo 2 se presentó un incremento significativo en las cargas de SAAM respecto al tramo anterior. Las cargas muestran una alta variación, entre 0,01 y 77 t/año, y eso registra —así como para otros parámetros— la variabilidad de cargas más alta del río. Cabe resaltar que la mayor dispersión se presentó en condiciones secas y caudales bajos, ya que en condiciones húmedas las cargas se comportaron acorde con la curva de duración, aunque tendieron a estar por encima. Se notó un incumplimiento no despreciable, en el rango medio de caudales; el percentil 90 de las cargas excedió la carga objetivo (figura 3.27); sin embargo, el promedio de cargas de SAAM en todas las fases se encuentra dentro de lo proyectado en la curva de duración, y se refleja en que en NQS Calle 53 las cargas tendieron a ser las más altas.

Para el tramo 3 se notó un aumento importante frente a las cargas del tramo anterior. Las cargas en este fueron menos variables, al pasar de 0,4 a 1254 t/año. Las cargas se comportaron acorde con la curva de duración; pero la gran mayoría superó la carga objetivo (tabla 3.7). En el rango medio de caudales se obtuvieron varios datos elevados de carga de SAAM en Carrefour que influyeron en el promedio (lo cual explica la diferencia con el percentil 90). En el tramo 4 se transportan cargas de SAAM mucho más elevadas que el tramo anterior y la variabilidad de los datos fue importante con un rango de 4,9 a 4375 t/año. Las cargas de SAAM

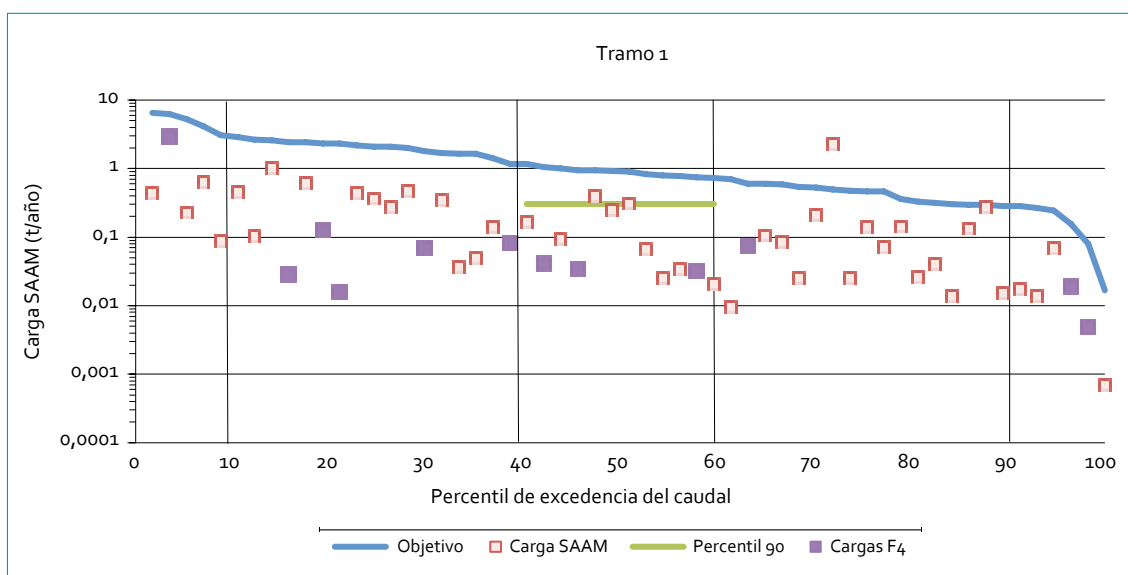
se alejaron del límite de la curva de duración. Aunque en caudales bajos y condiciones secas las cargas fueron bajas, en condiciones húmedas también se registraron cargas muy bajas. En el rango medio de caudales las cargas de SAAM tendieron a estar por encima de la carga objetivo (curva de duración), lo que refleja un mayor incumplimiento hacia aguas abajo del río.

### 3.2. Calidad del agua (WQI)

En el tramo 1 del río Salitre solo se encuentra un punto de monitoreo (Parque Nacional); sobre

TABLA 3.7. Carga SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Salitre

Parámetro	Río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T2
SAAM				
Percentil 90 (F1-F4)	0,30	25,0	172	592
Promedio (F1-F4)	0,12	8,5	95	360
Promedio (F4)	0,04	13,0	20	291
Carga curva duración (percentil 50)	0,91	9,5	40	142



Continúa

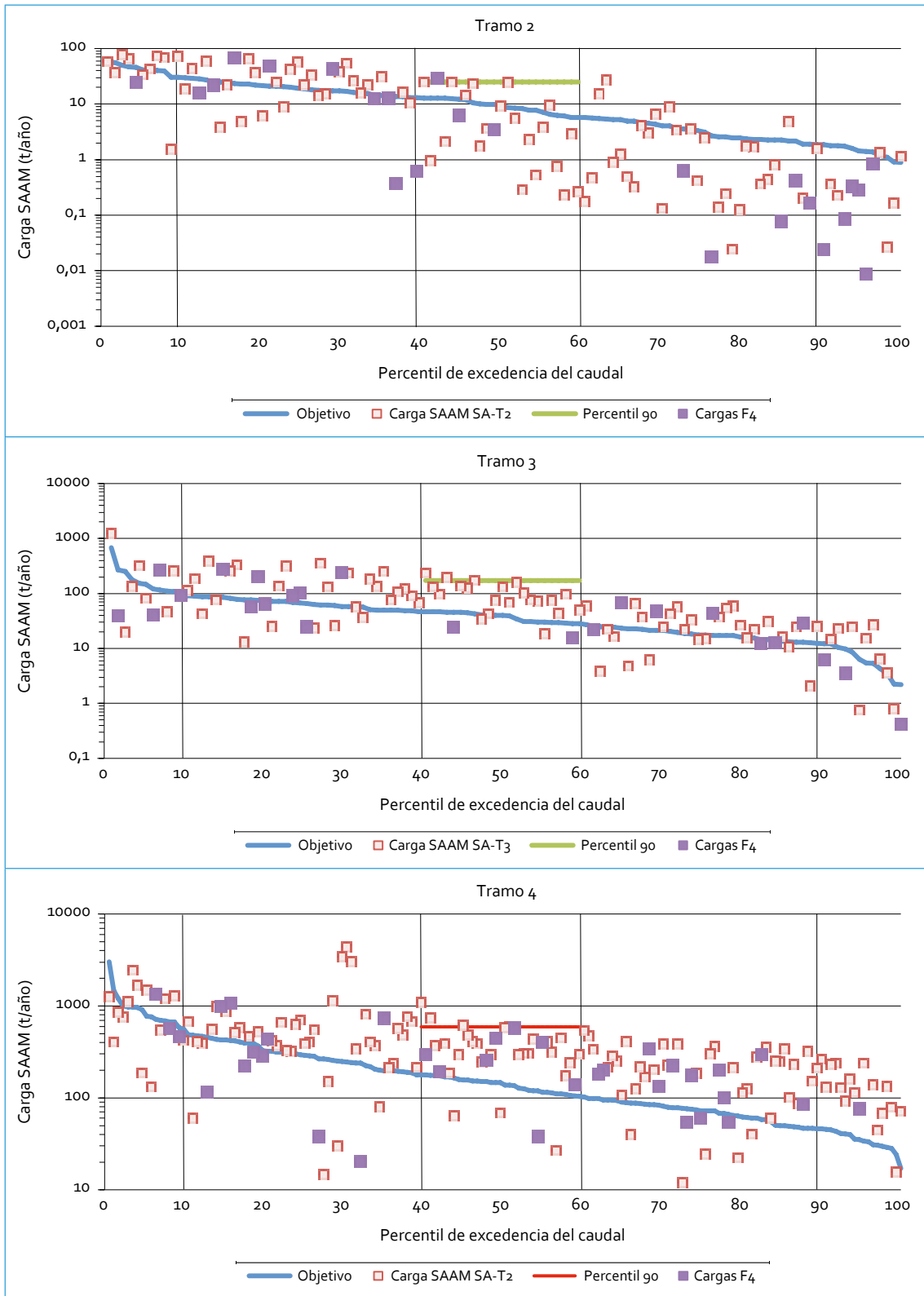


FIGURA 3.27. Curva de duración de carga SAAM: río Salitre

este punto se obtuvieron 101 datos, de los cuales uno no alcanzó los objetivos de calidad. A partir de la estimación del índice de calidad del agua (WQI), el agua en este tramo 1 fue **buena**. El único parámetro que no logró el objetivo de calidad fue oxígeno disuelto (tabla 3.8).

TABLA 3.8. WQI río Salitre: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	1	F1	10,00
DBO <sub>5</sub>	0	F2	0,99
DQO	0	NSE	0,0001
N <sub>total</sub>	0	F3	0,01
P <sub>total</sub>	0	WQI	94,20
SST	0		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	0		
SAAM	0		

La frecuencia que tuvo el oxígeno disuelto en no alcanzar el objetivo de calidad fue mínima; solo un dato fue inferior a lo establecido en la Resolución 5731 de 2008 (7 mg/L), que estuvo (6,92 mg/L) muy cercano al límite. Estos resultados ponen en evidencia la buena calidad del agua en este punto del río y reiteran que es un referente de calidad hacia aguas abajo. Al comparar el WQI de este periodo (2012-2013) con el WQI 2011-2012, la calidad de este tramo se ha mantenido en la misma categoría (**buena**), y el valor del valor del WQI se mantuvo constante (el WQI en los dos periodos fue 94).

Por otro lado, al contrastar el WQI 2012-2011 con el WQI 2010-2011, la calidad de este tramo se ha mantenido **buena**; sin embargo, el

valor del valor del WQI aumentó de un periodo a otro (WQI 2012-2013 = 94 vs. WQI 2010-2011 = 88). Este pequeño cambio en la calidad está relacionado con la disminución de variables que no alcanzan los objetivos; para el 2013-2012 solo se obtuvo un parámetro (oxígeno disuelto) por fuera del objetivo, mientras que para 2010-2011 se encontraron dos parámetros (oxígeno disuelto y pH).

En el tramo 2 de este río hay 2 puntos de monitoreo (Arzobispo y Carrera 30 con Calle 53), con un total de datos de 198, de los cuales 41 no lograron los objetivos de calidad. La calidad de agua de este tramo fue **marginal**, muy cercana al límite inferior de la categoría (45-64) y muestra que está muy cerca de ser **pobre**. Todos los parámetros, excepto pH, sobrepasaron los objetivos de calidad, siendo DQO, N<sub>total</sub>, GyA y SST los más críticos (tabla 3.9). Entre el 28% y 38% de los datos de estos parámetros excedieron los objetivos de calidad.

TABLA 3.9. WQI río Salitre: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	2	F1	90,0
DBO <sub>5</sub>	4	F2	20,7
DQO	8	NSE	0,16
N <sub>total</sub>	8	F3	14,13
P <sub>total</sub>	1	WQI	46,06
sst	5		
Grasas y Aceites	6		
Coliformes fecales	4		
pH	0		
SAAM	3		

A diferencia del tramo 1, el 2 tuvo una alta frecuencia en no alcanzar los objetivos de calidad y, además, algunos de valores que excedieron se alejaron en gran cuantía de los objetivos, especialmente en GyA, oxígeno disuelto y SST. El punto Arzobispo presentó una mejor calidad que Calle 53; ningún dato de calidad de este punto sobrepasó lo establecido en la Resolución 5731 de 2008; por el contrario, en Calle 53 el 43% de los datos excedió los objetivos. Del total de datos de DQO y  $N_{total}$  en Calle 53, el 80% estuvo por encima del objetivo de calidad (200 mg/L y 20 mg/L, respectivamente), y fueron las variables más críticas.

Tanto SST y GyA mostraron una cantidad relativamente alta de datos en exceder los objetivos de calidad, es especial en Calle 53, lo cual evidencia que este punto es el más afectado por las descargas de aguas residuales del tramo 2. En el caso de los coliformes fecales y la  $DBO_5$ , también excedieron los objetivos en varios monitoreos; sin embargo, la frecuencia fue levemente inferior, por lo que no se consideran variables verdaderamente críticas para el tramo pero importantes en la definición de la calidad del agua. Al comparar el WQI de este periodo con el WQI 2011-2012, la calidad del agua de este tramo mejoró, al pasar de una categoría **pobre** a **marginal**. Es importante notar que la calidad en 2012-2013 mostró una cercanía al límite inferior de la categoría y el valor del WQI no varió de manera importante entre los dos periodos (pasó de 44 a 46); por lo tanto, el cambio de categoría no necesariamente muestra diferencias significativas en la calidad del agua del tramo. Sin embargo, se notaron algunas diferencias que favorecieron la calidad en 2012-2013, ya que la cantidad de valores que excedió los objetivos fue de un 21%, mientras que en 2011-2012 fue de un 30%.

Además, algunos valores se alejaron un poco más de los objetivos en 2011-2012, por ejemplo, los que excedieron los objetivos de SST y GyA en 2011-2012 (rango SST 84-497 mg/L, rango GyA 29-103 mg/L) fueron superiores a los que superaron la norma en 2012-2013 (rango SST 89-286 mg/L, rango GyA 38-68 mg/L). A pesar de las diferencias entre los dos periodos las variables críticas siguen siendo GyA,  $N_{total}$  y SST. Al comparar el WQI actual con el WQI 2010-2011, la calidad del agua de este tramo se mantuvo constante (categoría **marginal**). Es importante notar que el valor del WQI fue superior en 2010-2011 (WQI = 49). La cantidad de variables que no lograron los objetivos fue menor en 2010-2011, ya que todos los valores de  $P_{total}$  y pH se mantuvieron dentro de lo establecido, mientras que para 2012-2013 el único parámetro que estuvo dentro de los objetivos fue pH.

En el tramo 3 están los puntos Carrera 30 Calle 53 y Carrefour Avenida 68, con 193 datos en total, de los cuales 72 no alcanzaron los objetivos de calidad. De acuerdo con el cálculo del WQI, la calidad del agua en este tramo fue **pobre** (tabla 3.10). El punto Calle 53 presentó una mejor calidad que Carrefour Avenida 68; el 26% de los datos de calidad en Calle 53 sobrepasó lo establecido en la Resolución 5731 de 2008; mientras que en Carrefour el 48% de los datos excedió los objetivos.

Los parámetros más críticos fueron coliformes fecales, GyA y DQO, de los cuales los primeros constituyen el parámetro que más veces excedió el objetivo de calidad (el 71% de los datos de coliformes superaron los  $1 \times 10^6$  NMP/100 mL). A diferencia de los tramos 1 y 2, en el tramo 3 el alto porcentaje de datos coliformes fecales que excedió el objetivo muestra la afectación de las descargas de ARD en este tramo del río. Por otro lado, también se presentó una cantidad importante de datos de GyA y

TABLA 3.10. WQI río Salitre: tramo 3

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	VARIABLES	Valor
Oxígeno disuelto	5	F1	90,0
DBO <sub>5</sub>	6	F2	37,30
DQO	10	NSE	0,23
N <sub>total</sub>	7	F3	18,86
P <sub>total</sub>	5	WQI	42,71
SST	5		
Grasas y Aceites	14		
Coliformes fecales	12		
pH	0		
SAAM	8		

DQO, por encima del objetivo, y algunos datos de oxígeno disuelto y SAAM se alejaron en gran cantidad del objetivo e influyeron en la calidad pobre del tramo. La mayoría de los datos en exceder los objetivos de oxígeno disuelto, N<sub>total</sub>, P<sub>total</sub> y coliformes fecales se presentaron en Carrefour Avenida 68. Se debe resaltar que para el oxígeno disuelto se notó una marcada diferencia, ya que el 100 % de los datos en Calle 53 estuvo por encima de 5 mg/L (objetivo de calidad); mientras que en Carrefour el 56 % de los datos de oxígeno disuelto estuvo por debajo del objetivo.

En el tramo 3 se notó una pequeña variación en el valor del WQI 2012-2013 y el reportado para 2011-2012 (al pasar de 38 a 43); sin embargo, la categoría continúa siendo **pobre** en los dos periodos. Se notaron diferencias que muestran una leve mejora en la calidad en el periodo 2012-2013; el porcentaje de datos que incumplió los objetivos fue de 37 % en 2012-2013; mientras que en 2011-2012 fue del 51 %.

Con referencia al WQI reportado para el 2010-2011, se notó un empeoramiento de la calidad, que cambió de categoría **marginal** a **pobre**. El valor del WQI se modificó entre los dos periodos (pasó de 50 a 43) y se notaron diferencias que muestran una mayor afectación en la calidad en el 2012-2013. Las variables que no lograron los objetivos del tramo 3 fue menor en 2010-2011, ya que todos los valores de P<sub>total</sub> y pH se mantuvieron dentro de lo establecido; mientras que para 2012-2013 el único parámetro que estuvo dentro de los objetivos fue pH. También se observó que la cantidad de valores que excedieron los objetivos fue mayor en el 2011-2012 (un 30 % de los datos incumplió los objetivos). En todos los periodos evaluados, los parámetros críticos fueron coliformes fecales y GyA.

Por último, en el tramo 4 (Carrefour Avenida 68, Transversal 91 y Salitre Alameda), el WQI mostró una calidad del agua **pobre**. Este tramo contó con un total de 283 datos, de los cuales 140 no alcanzaron los objetivos. Al igual que en el tramo anterior, todos los parámetros, a excepción de pH, sobrepasaron los objetivos de calidad al menos una vez, como se puede ver en la tabla 3.11. El WQI para este tramo fue de 38.

Los parámetros que con más frecuencia superaron los objetivos de calidad fueron coliformes fecales, oxígeno disuelto, GyA y SAAM. El 92 % de los datos de coliformes fecales fue superior a  $1 \times 10^6$  NMP/100 mL; el 81 % de los datos de oxígeno disuelto fue inferior a 0,5 mg/L; el 63 % de los datos de SAAM estuvieron por encima de 3 mg/L, y el 64 % de los datos de GyA excedió 30 mg/L. Ello evidencia que en la gran mayoría de monitoreos la calidad del agua fue muy baja en relación con estos parámetros. Los valores de oxígeno disuelto y GyA que incumplieron se alejaron significativamente

TABLA 3.11. WQI río Salitre: tramo 4

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	22	F1	90,00
DBO <sub>5</sub>	12	F2	49,50
DQO	11	NSE	0,41
N <sub>total</sub>	15	F3	29,20
P <sub>total</sub>	11	WQI	38,35
SST	9		
Grasas y aceites	18		
Coliformes fecales	23		
pH	0		
SAAM	19		

de los objetivos (rango de oxígeno disuelto 0,09-0,23 mg/L y rango de GyA 33-278 mg/L) e hicieron de ellos los más críticos del tramo.

Los tres puntos que conforman el tramo 4 presentaron condiciones de calidad homogéneas, ya que de todos los valores reportados en Carrefour Avenida 68, el 48% no alcanzó los objetivos de calidad; en Transversal 91 fue el 47%, y en Salitre Alameda fue el 54%. Se debe resaltar que Transversal 91 y Salitre Alameda presentaron los niveles más bajos de oxígeno en el tramo, y que Carrefour Avenida 68 y Salitre Alameda tuvieron las concentraciones más altas de DQO y GyA.

Al comparar el WQI de este periodo con el WQI del 2011-2012, la calidad de este tramo se mantuvo en la misma categoría **pobre**. El valor del WQI fue muy similar en los dos perio-

dos (WQI actual = 38 vs. WQI 2011-2012 = 39) y mostró una condición constante de calidad en el tramo. En los dos periodos las variables críticas fueron las mismas (oxígeno disuelto, coliformes fecales, GyA y SAAM) y se observó que la cantidad de valores que excedieron los objetivos fue mayor en 2012-2013 (un 49% vs. 40% en 2011-2012); sin embargo, los datos que incumplieron se alejaron más de los objetivos en 2011-2012 y mostraron que en dicho periodo los niveles contaminantes fueron más altos.

Luego de contrastar el WQI actual con el WQI 2010-2011, la calidad de este tramo, al igual que el anterior, cambió de categoría **marginal** a **pobre**. Se notó un cambio en los valores del WQI (WQI actual = 38 vs. WQI 2010-2011 = 48), lo cual está relacionado principalmente con un aumento en la cantidad de variables y datos que no alcanzaron los objetivos. Al igual que en los dos tramos anteriores, en 2010-2011 todos los valores de P<sub>total</sub> y pH se mantuvieron dentro de lo establecido; mientras que para este periodo el único parámetro que estuvo dentro de los objetivos fue pH. Además, se observó que la cantidad de valores que excedió los objetivos fue menor en 2010-2011 (con un 30%). Es importante resaltar que aun cuando la frecuencia de incumplimiento fue menor en 2010-2011, los datos que incumplieron en dicho periodo se alejaron más de los objetivos de calidad y mostraron que en algunos monitoreos los niveles contaminantes fueron superiores a los de 2012-2013, especialmente en el caso del oxígeno disuelto y SAAM.

A continuación se presenta el mapa de calidad para el río Salitre.



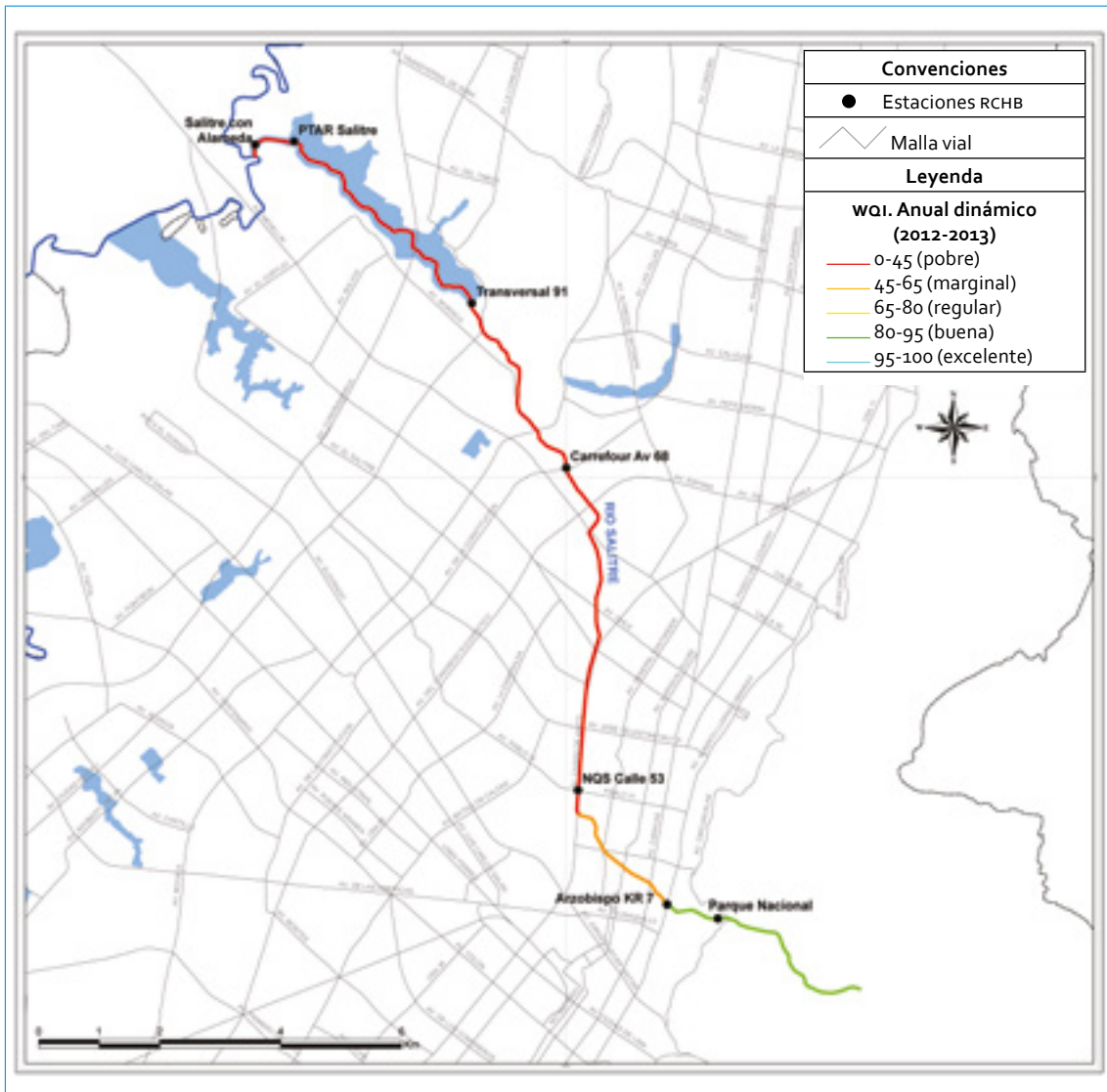


FIGURA 3.28. Mapa de calidad: río Salitre



## 4. RÍO FUCHA

### 4.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico

#### 4.1.1. Validación de datos: diagramas de cajas

##### 4.1.1.1. pH

La figura 4.1 refleja el comportamiento de pH en los tres tramos del río Fucha para el periodo considerado entre el segundo semestre de 2009 y el primer semestre de 2013 (fases 1 a 4). La cuenca alta, compuesta por los puntos de monitoreo El Delirio y Carrera 7ª, ha presentado valores de pH que han variado desde 5 a

9 unidades, y que se encuentran en promedio alrededor de 7,3 unidades, lo que la hace el tramo con las mejores condiciones de calidad de agua del río. En el caso del tramo medio, que incluye los puntos Ferrocarril, Américas y Boyacá, el rango de pH varía de 4,6 a 9,4 unidades con un promedio de 7,7 unidades; mientras que el tramo bajo (Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda) evidencia valores de pH que fluctúan entre 6,3 y 9,1 unidades, y que presenta un promedio de 7,5. Esto permite identificar el tramo medio como el más variable y el que ha tenido los valores más elevados, lo que lo hace el trayecto más crítico en términos de pH. En relación al cambio de pH en el tiempo,

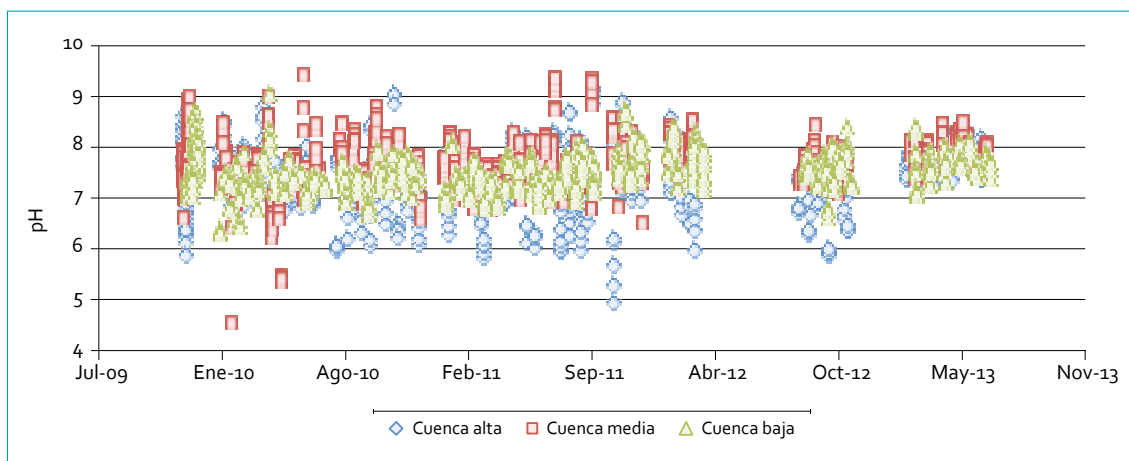


FIGURA 4.1. Perfil de pH: río Fucha

se observa cómo en el periodo comprendido entre febrero y junio de 2013, los valores de pH de todos los tramos del río se encuentran en un rango de valores más reducido y definido que el de los periodos anteriores, correspondiente a 7-8,5 unidades.

#### 4.1.1.2. Conductividad

Se observa cómo en el río Fucha los valores de conductividad sufren un incremento a medida que el cauce del río avanza (figura 4.2). De esta manera, el tramo alto presenta los valores de conductividad más reducidos, representados por una mediana de 46,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un rango de 12,2-534  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ello denota un muy alto grado de calidad de agua. La zona media, que incluye los puntos de monitoreo Ferrocarril, Américas y Boyacá, tiene una mediana de 439  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un rango de conductividad de 79,7-1754  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; en tanto que el último tramo ha tenido valores extremadamente elevados de conductividad, caracterizados por una mediana de 888  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un rango de 208-1582  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A través del tiempo se observa un comportamiento constante en el perfil de conductividad en todos los tramos, lo que refleja poca variación en la calidad de agua del río.

#### 4.1.1.3. Oxígeno disuelto

El río Fucha evidencia un reducción en las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) a largo de su trayectoria. La cuenca alta, compuesta por los puntos de monitoreo El Delirio y Carrera 7ª, indica óptimas concentraciones de OD que permanecen constantes a través del tiempo; presenta una mediana de 7,7 mg/L y un rango que varía de 0,1 a 9,1 mg/L. La cuenca media presenta concentraciones de OD bastante bajas, caracterizadas por una mediana de 0,8 mg/L y un rango de concentraciones que ha permanecido relativamente constante a través del tiempo (0,1-8 mg/L). En el caso más crítico se encuentra la cuenca baja (Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda), con las concentraciones más inferiores del río, representadas por una mediana de 0,1 mg/L y un rango de 0-4 mg/L. En relación con esta última cuenca, las concentraciones más bajas las presentó en el periodo comprendido entre marzo de 2011 y enero de 2012; mientras que dentro del periodo agosto de 2012 y junio de 2013 esta cuenca experimentó cierta tendencia a concentraciones de OD más altas de lo habitual, cercanas a 4 mg/L. Se ratifica cómo las condiciones de calidad del río aguas abajo

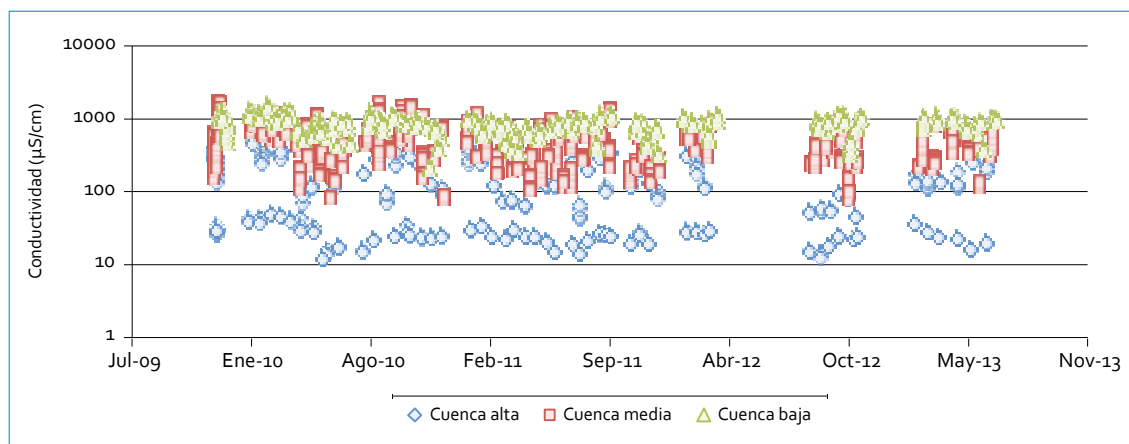


FIGURA 4.2. Perfil de conductividad: río Fucha

llegan a un estado precario por efecto de los vertimientos de agua residual (figura 4.3).

4.1.1.4.  $DBO_5$

El tramo 1 del río Fucha, punto de monitoreo El Delirio, ha presentado baja concentración de la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) a través del tiempo. Durante el periodo S2-2009 y S1-2013, las concentraciones de  $DBO_5$  nunca

incumplieron el objetivo de calidad (5 mg/L) y en el tiempo han permanecido constantes en un rango de valores comprendido entre 0,7 y 2 mg/L, exceptuando el S1-2010, en el cual se detectó el mayor rango de concentraciones (0,6-4,2 mg/L). Respecto a los resultados obtenidos en los semestres S2-2012 y S1-2013, el tramo 1 reflejó buenas condiciones de calidad, con una media de 1 mg/L (figura 4.4).

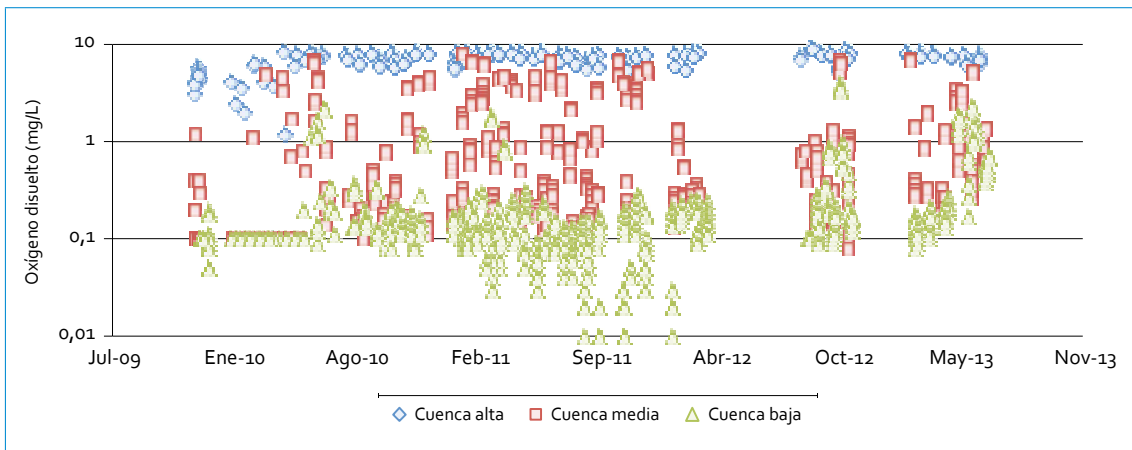
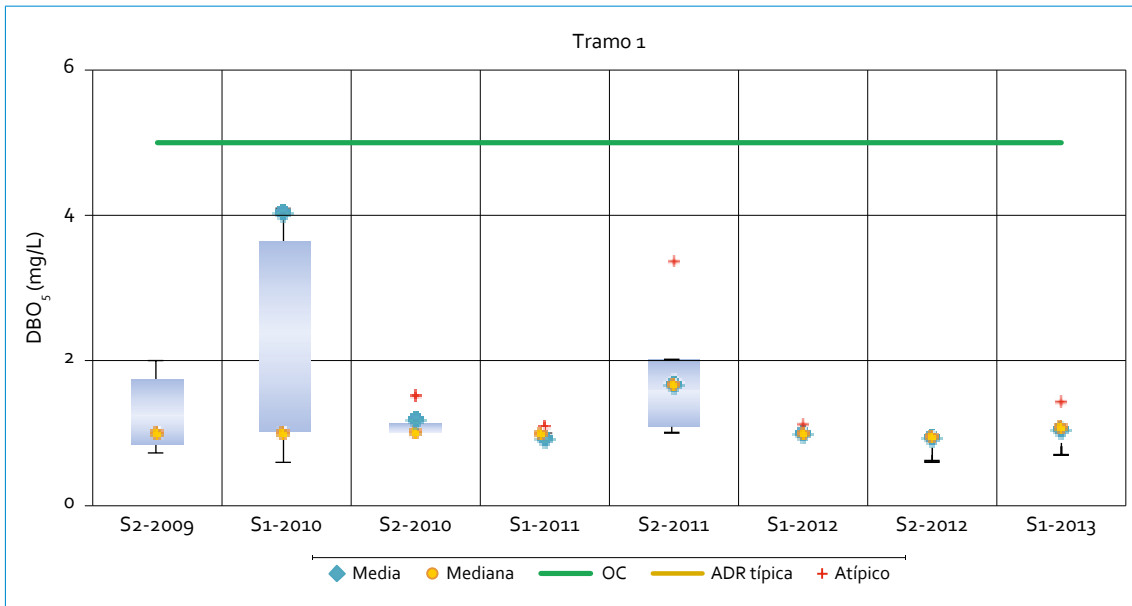
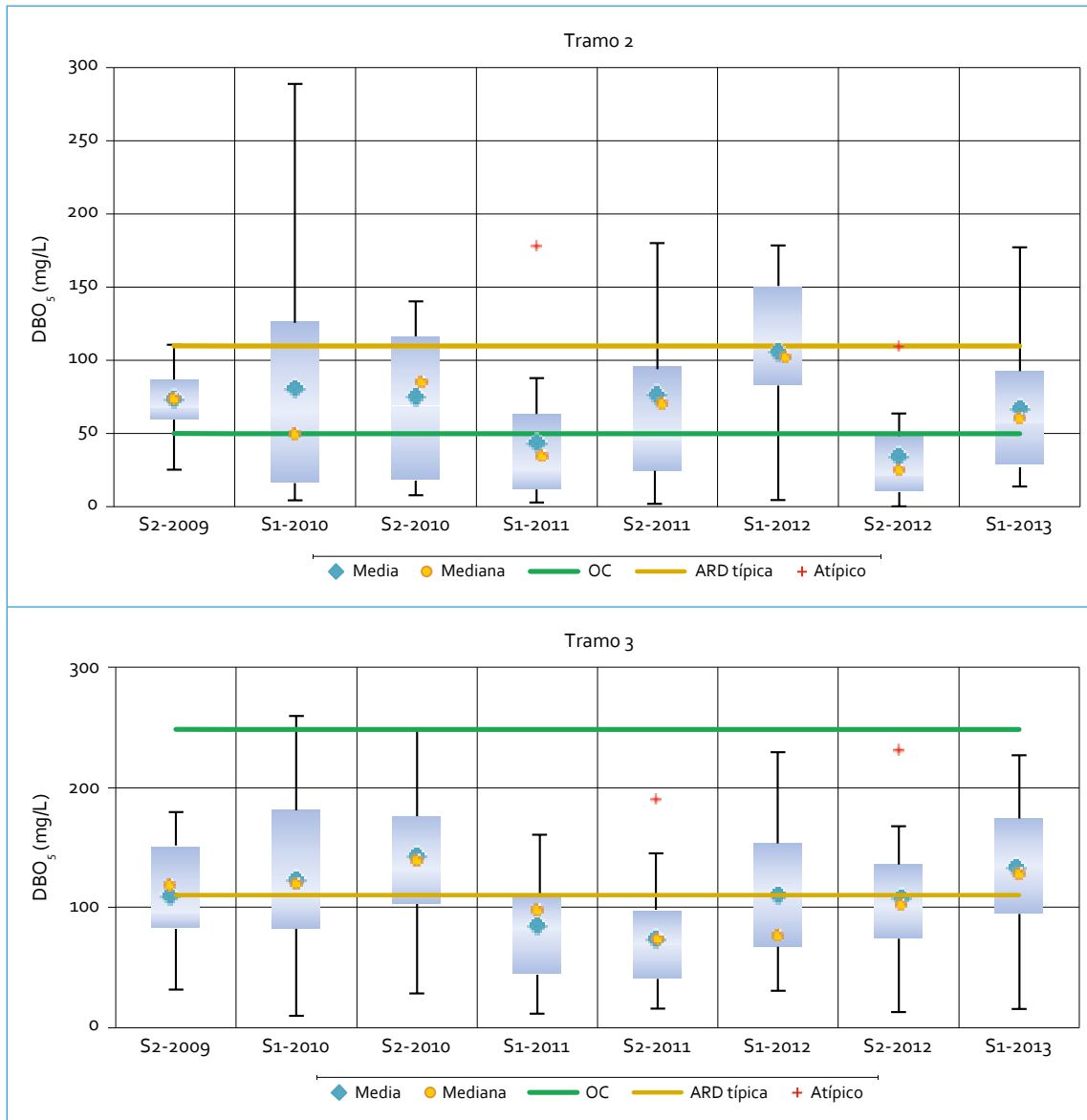


FIGURA 4.3. Perfil de oxígeno disuelto: río Fucha



Continúa



Continúa

En cuanto se refiere al tramo 2 (Carrera 7ª y Av. Ferrocarril), las concentraciones de  $DBO_5$  empiezan a reflejar los primeros impactos generados en el río Fucha debido a los vertimientos provenientes del área urbana de la ciudad de Bogotá. Durante todos los semestres se han encontrado concentraciones de  $DBO_5$  que han sobrepasado el objetivo de calidad (50 mg/L) y que incluso, en algunas ocasiones, han llegado a presentar valores superiores al

de agua residual doméstica (ARD) diluida, como en S1-2010, cuando la concentración de  $DBO_5$  alcanzó valores de hasta 288 mg/L. En lo que concierne al comportamiento de las concentraciones de  $DBO_5$  a través del tiempo, se pueden evidenciar significativas fluctuaciones que no reflejan tendencia hacia un rango específico. Las más altas se presentaron en los semestres S2-2010 y S1-2012, con medianas de 89 y 98 mg/L, respectivamente. Mientras que

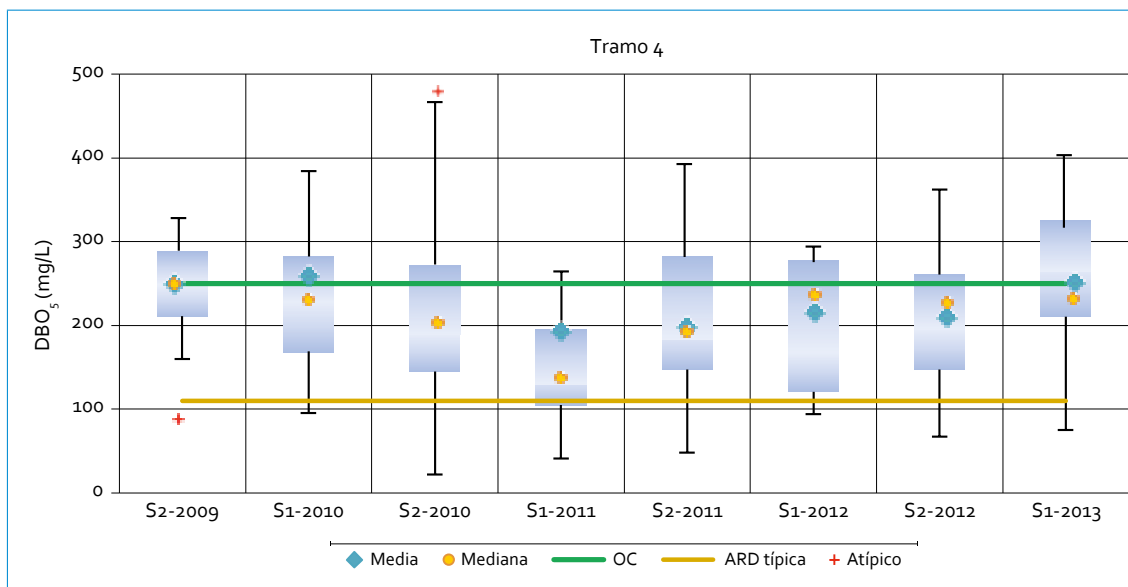


FIGURA 4.4. Perfil de  $DBO_5$ : río Fucha

las concentraciones más bajas estuvieron en los periodos S1-2011 y S2-2012, con medianas de 34 y 22 mg/L, respectivamente. Este tramo presentó rangos de  $DBO_5$  de 1,3-63 mg/L para el S2-2012 y de 16,4-176 mg/L para el S1-2013, con medianas de 22 y 65 mg/L, respectivamente. El evidente aumento en las concentraciones de  $DBO_5$  de un semestre a otro pudo ser por una disminución en los caudales en el S1-2013, y no necesariamente por un aumento en las descargas de ARD.

En lo que respecta al tramo 3 (Av. Américas y Av. Boyacá), es importante resaltar que su objetivo de calidad (250 mg/L) es superior a la concentración de  $DBO_5$  de un ARD típica, lo que refleja el sustancial incremento en las descargas de agua residual hacia el río Fucha una vez inicia este tramo. Respecto al objetivo de calidad, solo un periodo (S1-2010) presentó valores superiores, en el que se identificó un valor máximo de 260 mg/L. En comparación con el valor de  $DBO_5$  en un ARD típica, solo dos periodos son menores a dicho valor (S1-2011 y el S2-2011). A lo largo del tiempo es claro que

no se presenta un comportamiento uniforme: los periodos con mayores concentraciones se encontraron en el S2-2010 y el S1-2013, con medianas de 137 y 122 mg/L, respectivamente. Las concentraciones más bajas se presentaron entre el S2-2011 y S1-2012 con medianas de 80 mg/L.

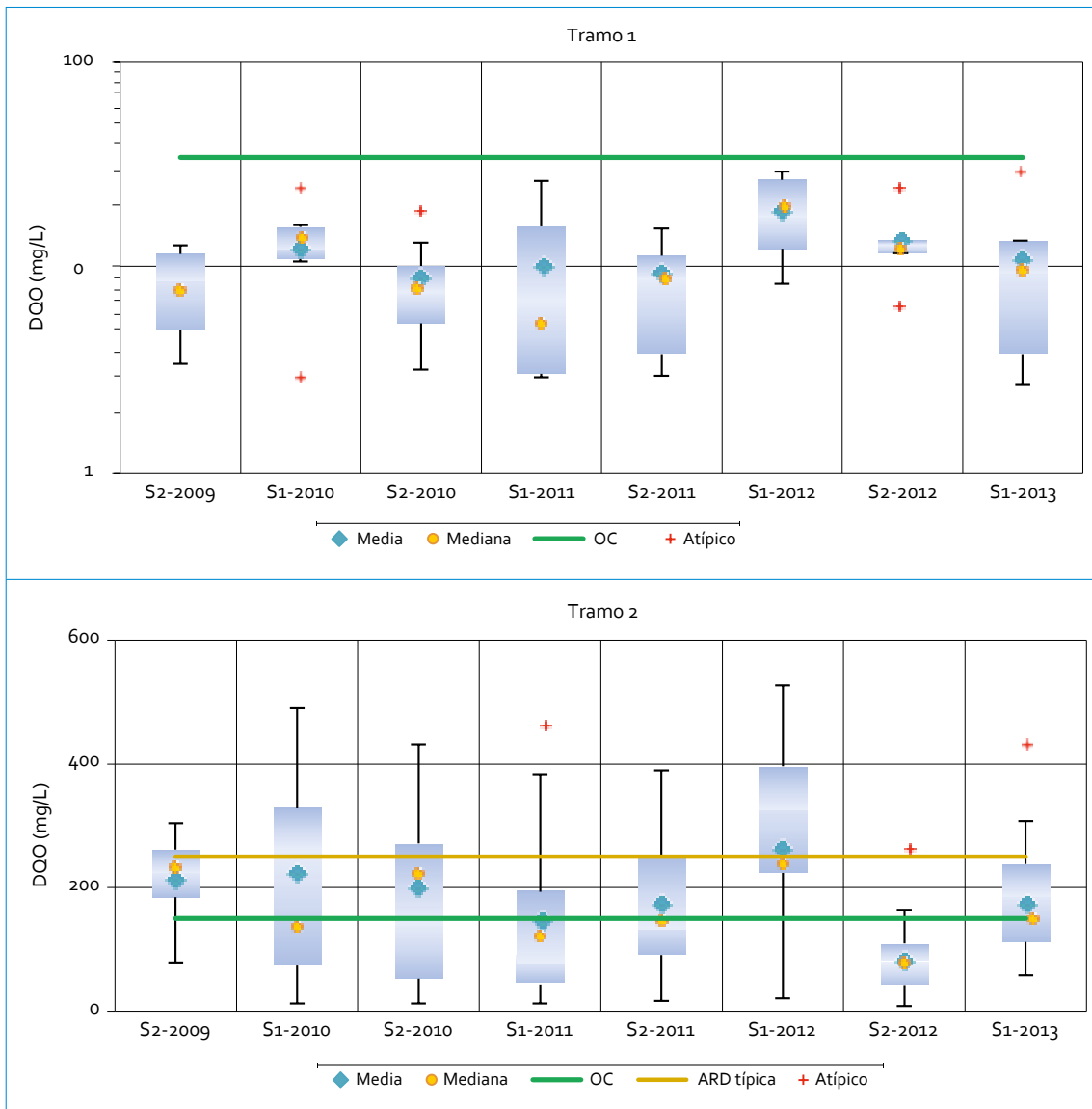
Las concentraciones de  $DBO_5$  para los periodos S2-2012 y S1-2013 se encontraron dentro del de 12-168 mg/L y 15-228 mg/L, respectivamente. Las medianas presentaron un comportamiento ascendente a lo largo de estos dos periodos y aumentaron de 103 mg/L (S2-2012) a 122 mg/L (S1-2013). Es de hacer notar que este último valor ha sido el más alto desde el segundo semestre de 2011, lo que podría indicar un aumento progresivo en los vertimientos del tramo 3 o un aumento en los caudales desde 2011.

Por último, el tramo 4, que posee el mismo objetivo de calidad del tramo 3 (250 mg/L), presenta las más elevadas concentraciones de  $DBO_5$  de todo el río. Todos los semestres tienen concentraciones superiores al valor de

DBO<sub>5</sub> de un ARD típica, y bastante cercanas al objetivo de calidad. Las concentraciones más altas se identificaron en el S1-2013, con una media de 232 mg/L y un rango de concentraciones de 76-404 mg/L. El único semestre que evidenció concentraciones relativamente bajas fue S1-2011, el cual tuvo una mediana de 143 mg/L y un rango de concentraciones de 41-265 mg/L.

4.1.1.5. DQO

El tramo 1 del río Fucha refleja un comportamiento altamente variable en las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) a través del tiempo (figura 4.5). Las concentraciones más bajas se presentaron en el S1-2011, con una mediana y un valor mínimo de 6,1 mg/L y 3 mg/L, respectivamente; mientras que las más altas se registraron en el S1-2012,





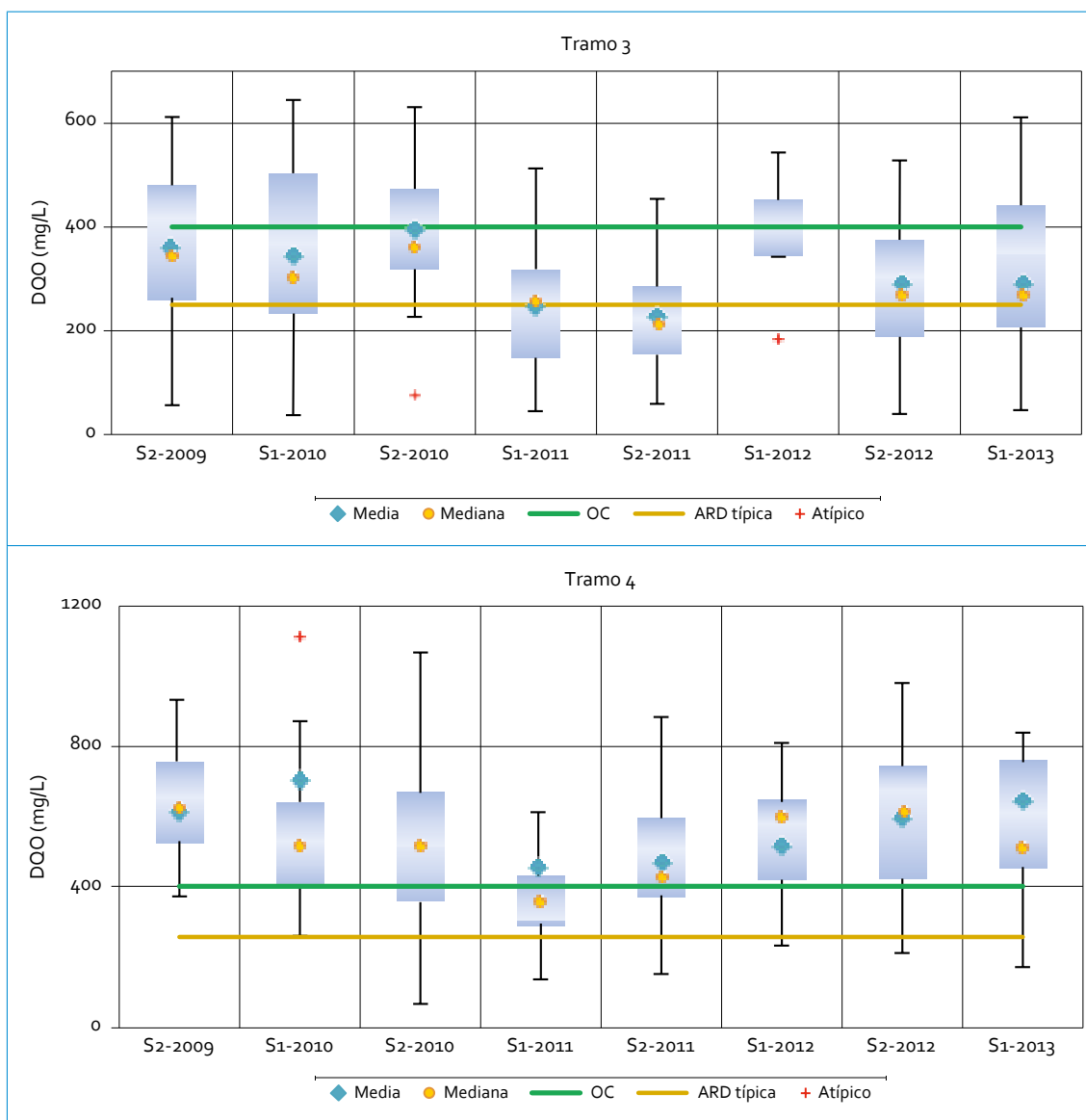


FIGURA 4.5. Perfil de DQO: río Fucha

con una mediana de 21 mg/L y un valor máximo registrado de 29 mg/L. En relación con el objetivo de calidad de este tramo (35 mg/L), todos los periodos han tenido concentraciones por debajo de dicho objetivo, lo cual refleja las óptimas condiciones de calidad en las que se encuentra el río en su cauce más alto.

El tramo 2 presenta un comportamiento bastante fluctuante en lo referente a las

concentraciones de DQO. Las más altas se registraron en el S1-2012, con una mediana de 238 mg/L y un valor máximo de 528 mg/L; mientras que las más bajas se presentaron en el S2-2012, con una mediana de 96 mg/L y un valor mínimo de 13 mg/L. El S2-2012, además de haber presentado los valores más bajos, fue el único que cumplió con el objetivo de calidad del tramo (150 mg/L) y el que más se alejó

del valor típico de DQO en un ARD diluida (250 mg/L). S2-2009, S2-2010 y S1-2012 fueron los periodos que con más frecuencia presentaron concentraciones por encima del objetivo y los que más se acercaron al valor típico de DQO en un ARD. En el tramo 3 las concentraciones de DQO no presentan tendencia hacia un rango específico. Los registros máximos se presentaron en el S2-2010, con una mediana de 366 mg/L y un valor máximo de 631 mg/L, mientras que las concentraciones mínimas se encontraron en el S2-2011 con una mediana de 218 mg/L y un valor mínimo de 57 mg/L. En general, todos los semestres tuvieron concentraciones superiores al DQO típico en un ARD diluida, pero ninguno incumplió con el objetivo de calidad; los semestres S2-2009 y S2-2010 fueron los que registraron las medianas más cercanas al objetivo, junto con el mayor porcentaje de datos por encima de este objetivo.

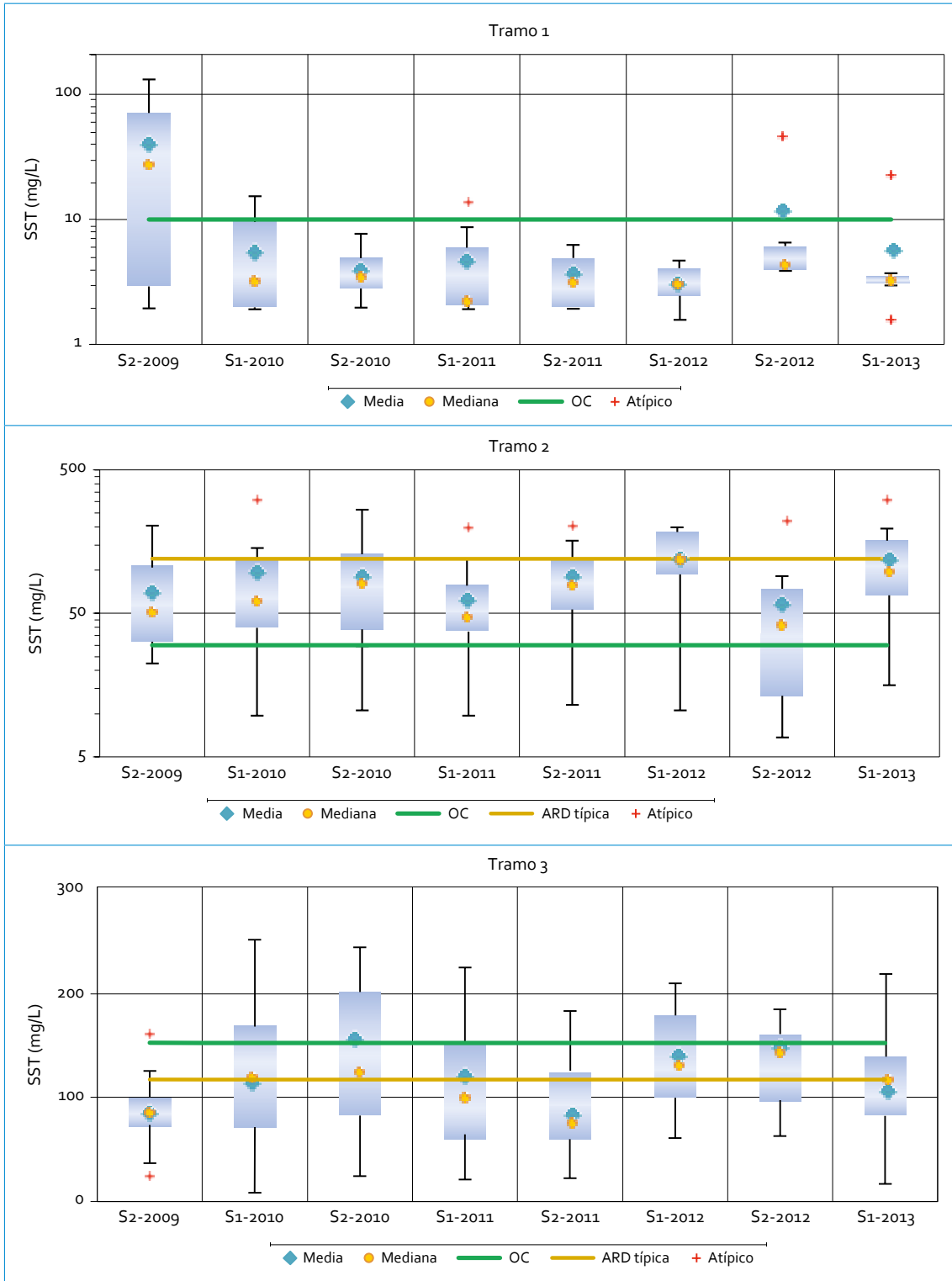
Por último, el tramo 4 refleja las concentraciones de DQO más elevadas del río Fucha, razón por la cual el objetivo de calidad (400 mg/L), al igual que el tramo 3, sigue siendo superior al valor de referencia de DQO (250 mg/L). El alto grado de contaminación de este tramo se ve evidenciado, pues todos los semestres, a diferencia del S1-2011, presentan casi hasta el 75 % de los datos por encima del objetivo y, por ende, por encima del DQO típico. Las concentraciones más altas se reportaron en el periodo S2-2012, con una mediana de 608 mg/L y un valor máximo de 981 mg/L. Entre tanto, las concentraciones más bajas se encontraron en el S1-2011, con una mediana de 361 mg/L y un valor mínimo de 141 mg/L.

#### 4.1.1.6. SST

El tramo 1 del río Fucha presenta gran variabilidad de datos de sólidos suspendidos totales

(SST). La mayoría de los periodos cumple con el objetivo de calidad (5 mg/L). El único lapso que sobrepasó el objetivo de calidad fue S2-2009, el cual presenta una mediana de 15 mg/L y un valor máximo de 134 mg/L. El semestre en el cual se encontraron las concentraciones más bajas fue S1-2011, en el cual la mediana y el valor mínimo correspondieron a 2 mg/L. S1-2013 fue el semestre que menos variabilidad de datos presentó, con valores de SST que alternaban en un rango de concentraciones de 3,1-3,7 mg/L (figura 4.6). El tramo 2 (Carrera 7ª y Av. Ferrocarril) refleja un gran aumento en las concentraciones de SST respecto al tramo anterior. Todos los periodos presentan concentraciones superiores al objetivo de calidad (30 mg/L), pero no en tan alta magnitud como para sobrepasar el valor típico del ARD. De todos los periodos, el que presentó las concentraciones más altas fue S1-2012, con una mediana de 125 mg/L y una concentración máxima de 197 mg/L. El semestre en el cual se encontraron las concentraciones más bajas fue S2-2012 con una mediana de 40 mg/L y una concentración mínima de 7 mg/L. En cuanto al último periodo (F4), se evidenció un ligero aumento en las concentraciones de SST en comparación con el año anterior.

En cuanto al tramo 3, las concentraciones de SST han variado a lo largo de todos los semestres sin corresponder a ninguna tendencia. Solo en algunos de los periodos en estudio se encontraron concentraciones superiores al objetivo; el más representativo fue S2-2010, con cerca del 45 % de sus datos por encima del objetivo y con valores máximos de 243 mg/L. En comparación con el valor típico de SST, solo 2 semestres tuvieron entre el 75 y 100 % de sus datos por debajo de dicho valor, los cuales fueron S2-2009 y S2-2011, con valores mínimos de 37 y 21 mg/L. La mediana más baja de todos los periodos se encontró en el S2-2011 (84



Continúa

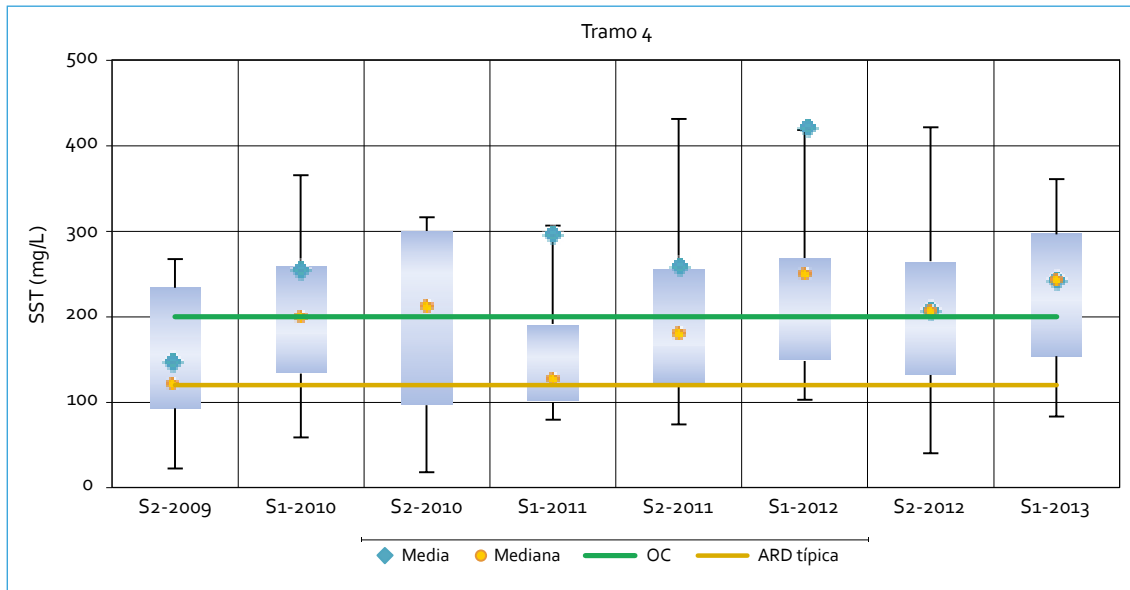


FIGURA 4.6. Perfil de SST: río Fucha

mg/L), mientras que la más alta se evidenció en el S2-2012 (142 mg/L).

Por último, las elevadas concentraciones de SST en Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda reflejan la grave situación de contaminación que sufre el río durante este tramo. Las concentraciones son tan elevadas que la mayoría de los periodos tienen entre el 50% y 60% de sus datos por encima del objetivo de calidad (150 mg/L); los semestres con las concentraciones más bajas fueron S2-2009 y S1-2011 con cerca del 25% y 30% de sus datos por encima del objetivo. El semestre S2-2009 obtuvo las más reducidas de todos los periodos, al presentar una mediana de 120 mg/L y un valor mínimo de 21 mg/L; mientras que S1-2012 fue el periodo con la mayor mediana y la máxima concentración registrada, 240 y 416 mg/L, respectivamente.

#### 4.1.1.7. Nitrógeno

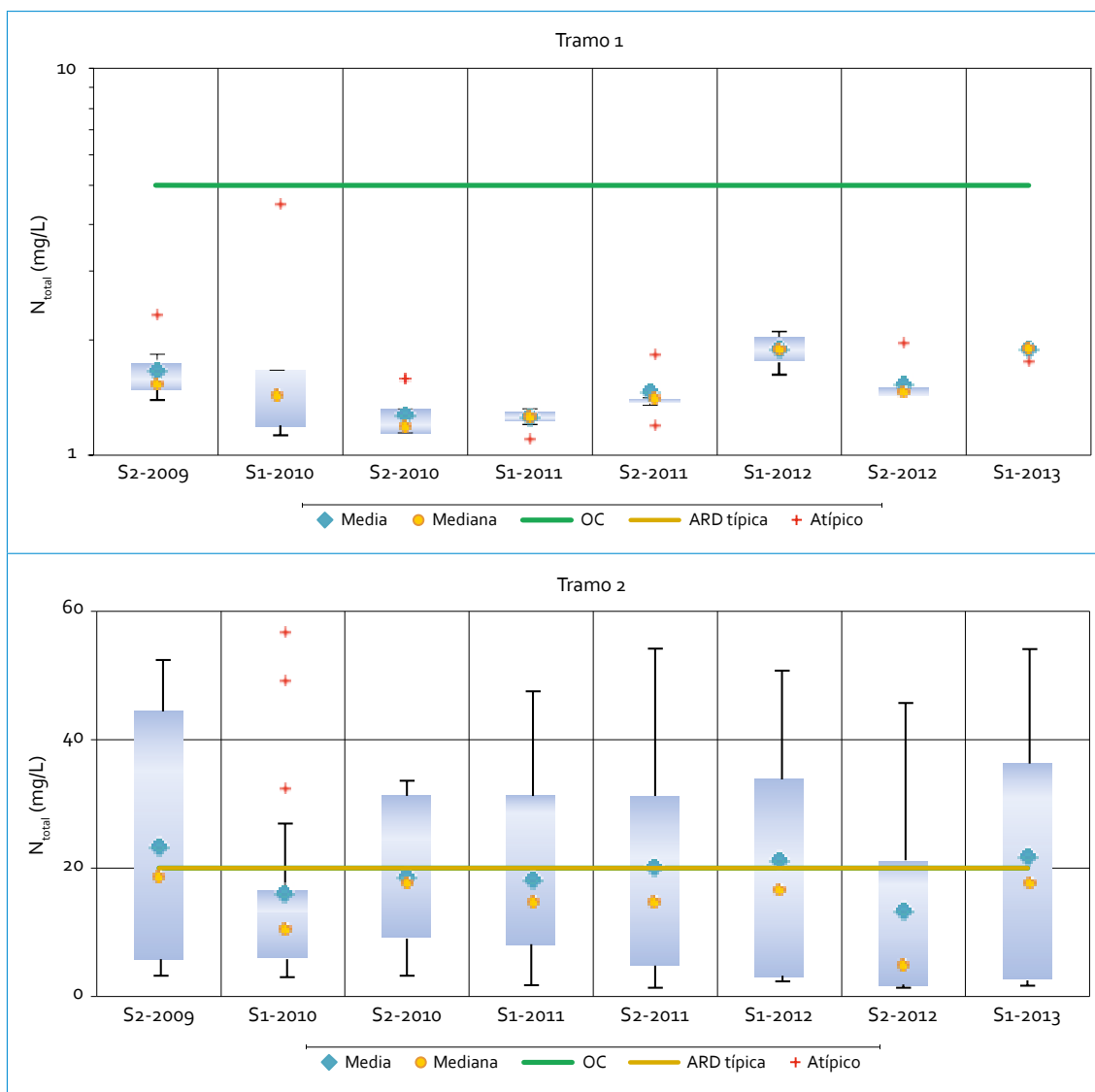
El tramo 1 del río Fucha presenta, en la mayoría de los periodos de estudio, una reducida

variación de datos. De hecho, las concentraciones de nitrógeno total ( $N_{total}$ ) tienden a encontrarse dentro de un rango de 1-2 mg/L, lo que ha permitido el cumplimiento de objetivo de calidad del presente tramo (3 mg/L). Los periodos con las concentraciones reportadas más bajas se encuentran en S1-2011, con una mediana y un valor mínimo de 1,14 y 1,11 mg/L, respectivamente. Las concentraciones más altas se registraron en S1-2013, con una mediana y un valor máximo de 1,90 y 1,91 mg/L. El tramo 2 sí presenta gran variabilidad de datos; las concentraciones de  $N_{total}$  alcanzan valores mínimos y máximos de hasta 1,2 y 57 mg/L, con registros en S2-2010 y S1-2010, respectivamente. La mitad de los periodos tienen entre el 50% y el 80% de sus datos por encima del objetivo de calidad, mientras que la otra mitad presenta entre el 15% y el 45% de sus datos por encima del objetivo de calidad. El periodo con la mayor cantidad de datos (80%) por encima del objetivo fue S2-2009, en el cual se encuentra una mediana de 32 mg/L y un valor máximo de 44 mg/L;

mientras que el periodo con la menor cantidad de datos (15 %) por encima del de este objeto fue S2-2012, con una mediana de 9 mg/L y una concentración mínima de 1,4 mg/L (figura 4.7).

En el tramo 3 no existe tendencia hacia un rango específico de valores. El aumento en las concentraciones frente a los tramos anteriores hace que el objetivo de calidad (40 mg/L) sea superior a la concentración típica de  $N_{total}$  en un ARD diluida (20 mg/L). En comparación con

el ARD, todos los periodos, excepto S1-2011 y S2-2011, tienen cerca del 75 % y el 100 % de sus datos por encima de dicho valor de referencia; mientras que en relación con el objetivo de calidad, solo 2 periodos tienen entre el 50 % y el 70 % de sus datos incumpliendo con el objetivo. El periodo más crítico, con el 100 % y el 70 % de sus datos por encima del objetivo, fue S1-2012, el cual presenta una mediana y un valor máximo de 46 y 49 mg/L. En el último periodo (F4) se encontró la concentración más



Continúa

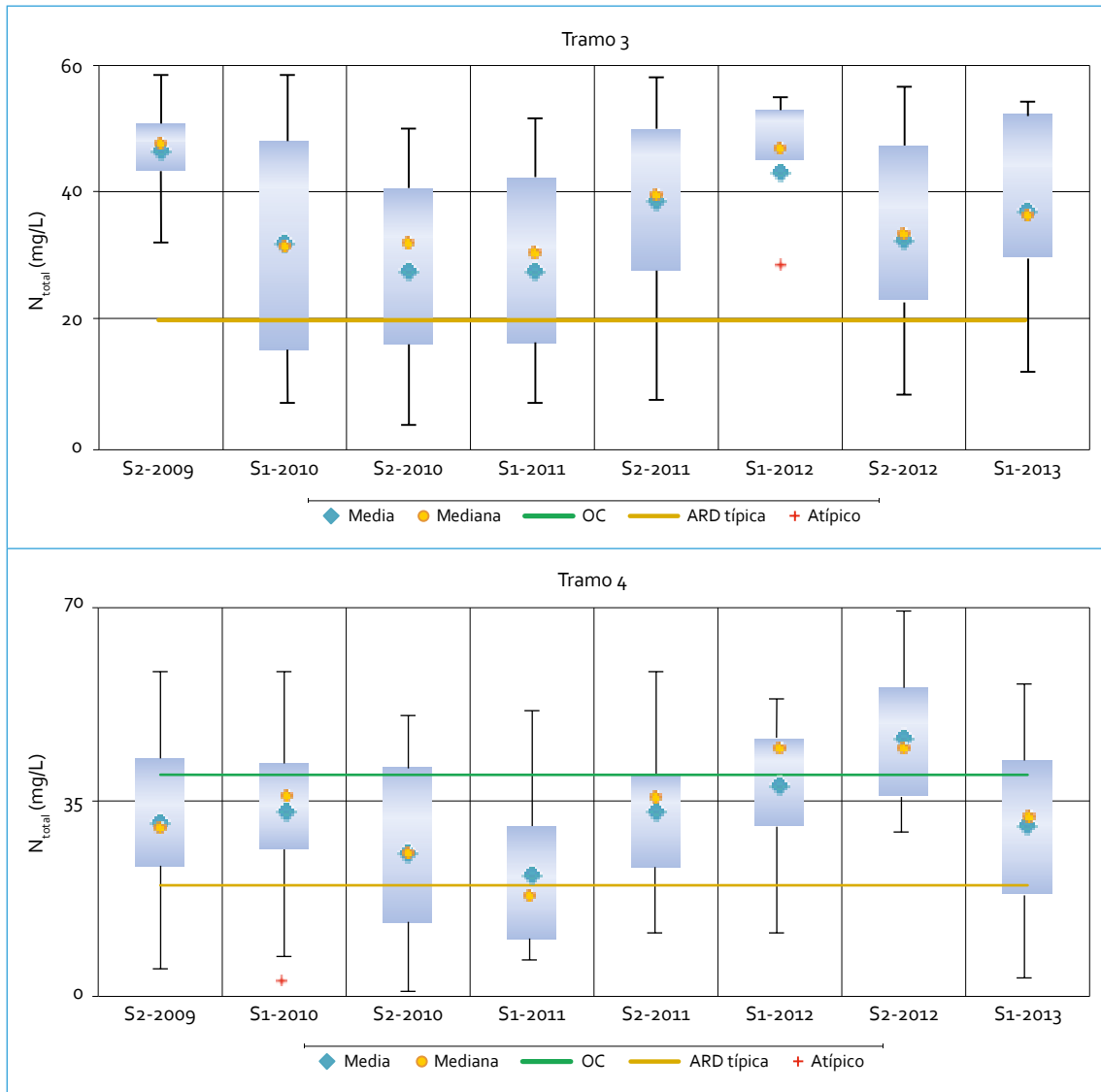


FIGURA 4.7. Perfil de  $N_{total}$ : río Fucha

alta de  $N_{total}$  registrada de todos los periodos (70 mg/L).

Por último, en el tramo 4 se puede observar que las concentraciones se han incrementado de modo significativo. El objetivo de calidad sigue siendo el mismo del tramo 3 pero el porcentaje de incumplimiento ha aumentado. En relación con el ARD diluida, todos los periodos tienen entre el 87% y el 100% de sus datos por

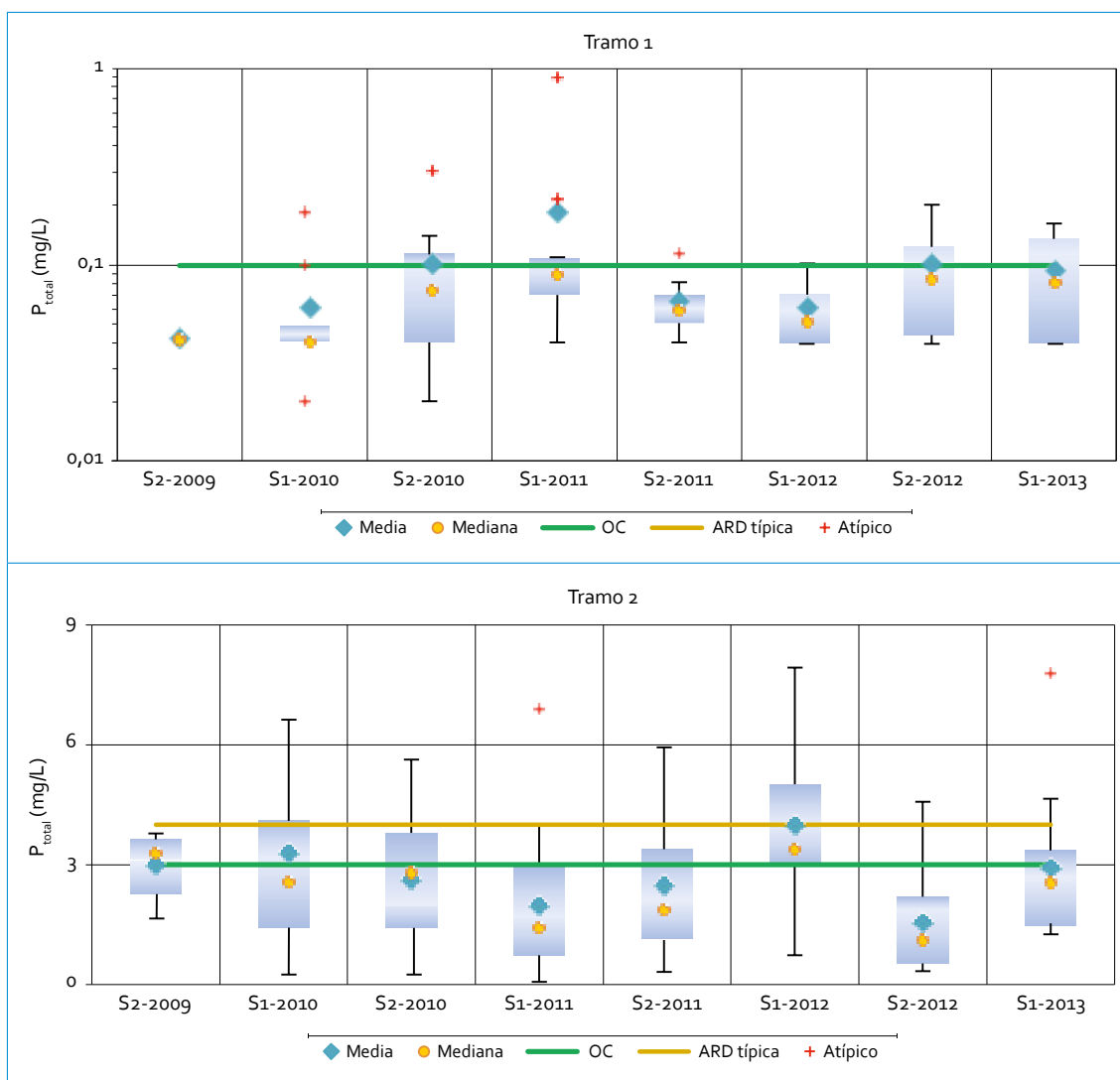
encima de dicho valor; entre el 55% y 100% de los datos de la mayoría de los periodos incumplían el objetivo. El periodo más crítico fue S2-2009, con el 100% de sus datos lo que superaron. Dicho periodo presentó una mediana y un valor máximo de 66 y 79 mg/L. S1-2011 fue el periodo con menor porcentaje de incumplimiento, pues cerca del 87% y el 30% de sus datos supera el ARD y el objetivo de ca-

lidad; la mediana y concentración mínima de este semestre fueron 37 y 12,4 mg/L.

#### 4.1.1.8. Fósforo

El tramo 1 del río Fucha muestra las concentraciones más bajas del río, aunque en ciertos periodos se incumplió con el objetivo de calidad (0,1 mg/L), como es el caso del S2-2010, S1-2011, S2-2012 y S1-2013 (figura 4.8). De estos, los que corresponden a la última campaña de monitoreo presentan el mayor porcentaje

de datos por encima del objetivo y los valores más altos de fósforo total ( $P_{total}$ ) (cerca del 40% de los datos para ambos semestres). Dichos periodos presentan medianas de 0,09 y valores máximos de 0,2 mg/L (S2-2012) y 0,16 mg/L (S1-2013). El semestre en cual se presentaron los valores más bajos fue en el S2-2009, con el 100% de sus concentraciones por debajo del límite de detección (0,04 mg/L). El tramo 2 tiene un objetivo de calidad de 3 mg/L, concentración que se encuentra por debajo del valor típico de  $P_{total}$  en ARD. Del 15% al 75% de los



Continúa

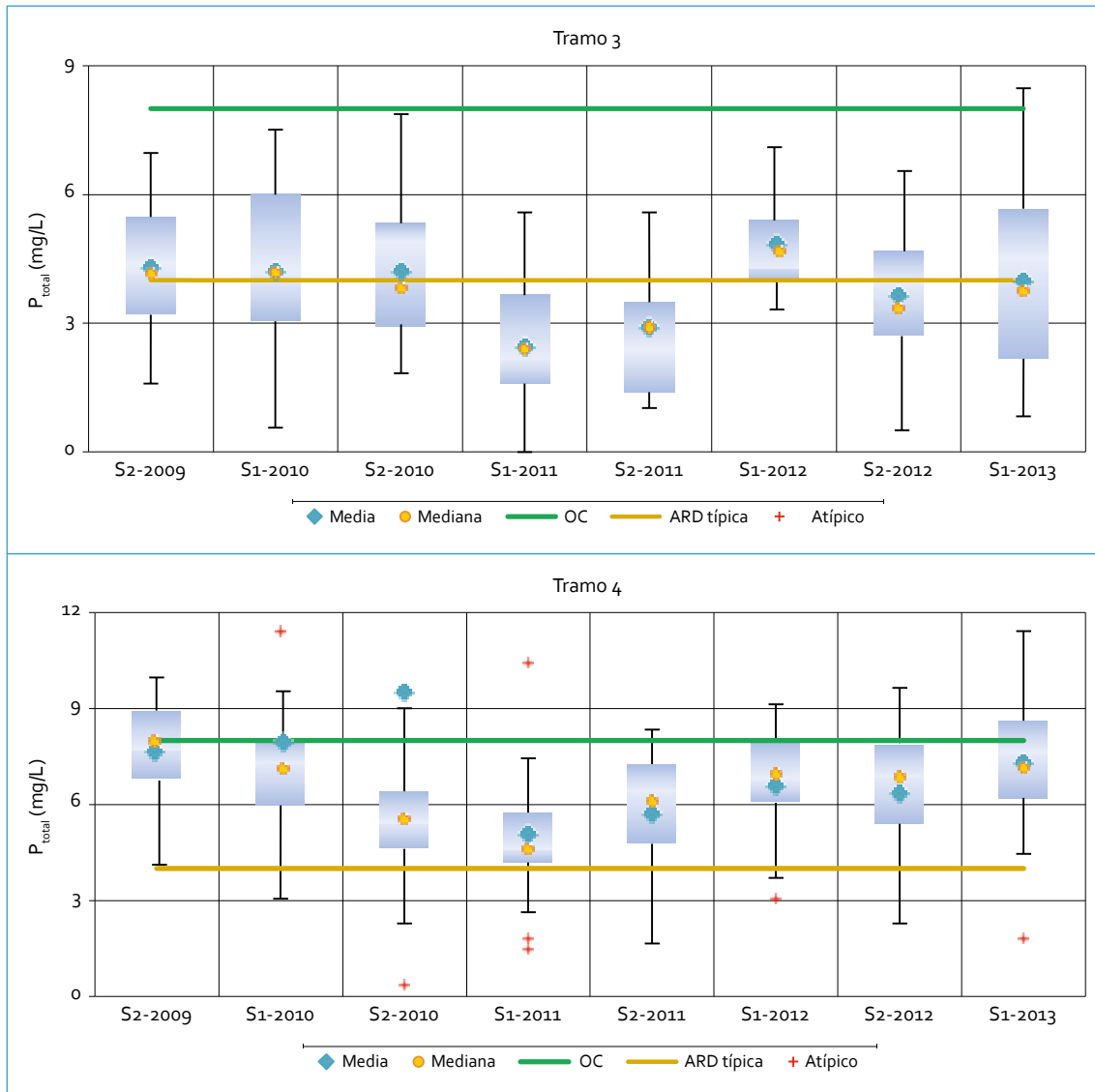


FIGURA 4.8. Perfil de  $P_{total}$ : río Fucha

datos de los periodos incumplieron el objetivo de calidad. El periodo con las concentraciones más elevadas fue S1-2012, con una mediana de 3,4 mg/L y la concentración más alta registrada de todos los periodos de 7,9 mg/L. S1-2011 fue el semestre con las concentraciones más bajas (0,04 mg/L) y cuya mediana correspondió a 1,27 mg/L.

El tramo 3 presenta un objetivo de calidad poco restrictivo (8 mg/L); solo un periodo (S1-

2013) llegó a presentar concentraciones que superaron dicho valor, con una máxima de 8,5 mg/L. Respecto al valor típico de  $P_{total}$  del ARD diluida, la mayoría de los periodos, excepto S1-2011, S2-2011 y S2-2012, tienen entre el 50% y el 75% de sus datos por encima de dicho valor. El semestre con mayor porcentaje (75%) de datos que sobrepasaban el ARD fue S1-2012, periodo para el cual se presentó una mediana de 5,4 mg/L y una concentración máxima de

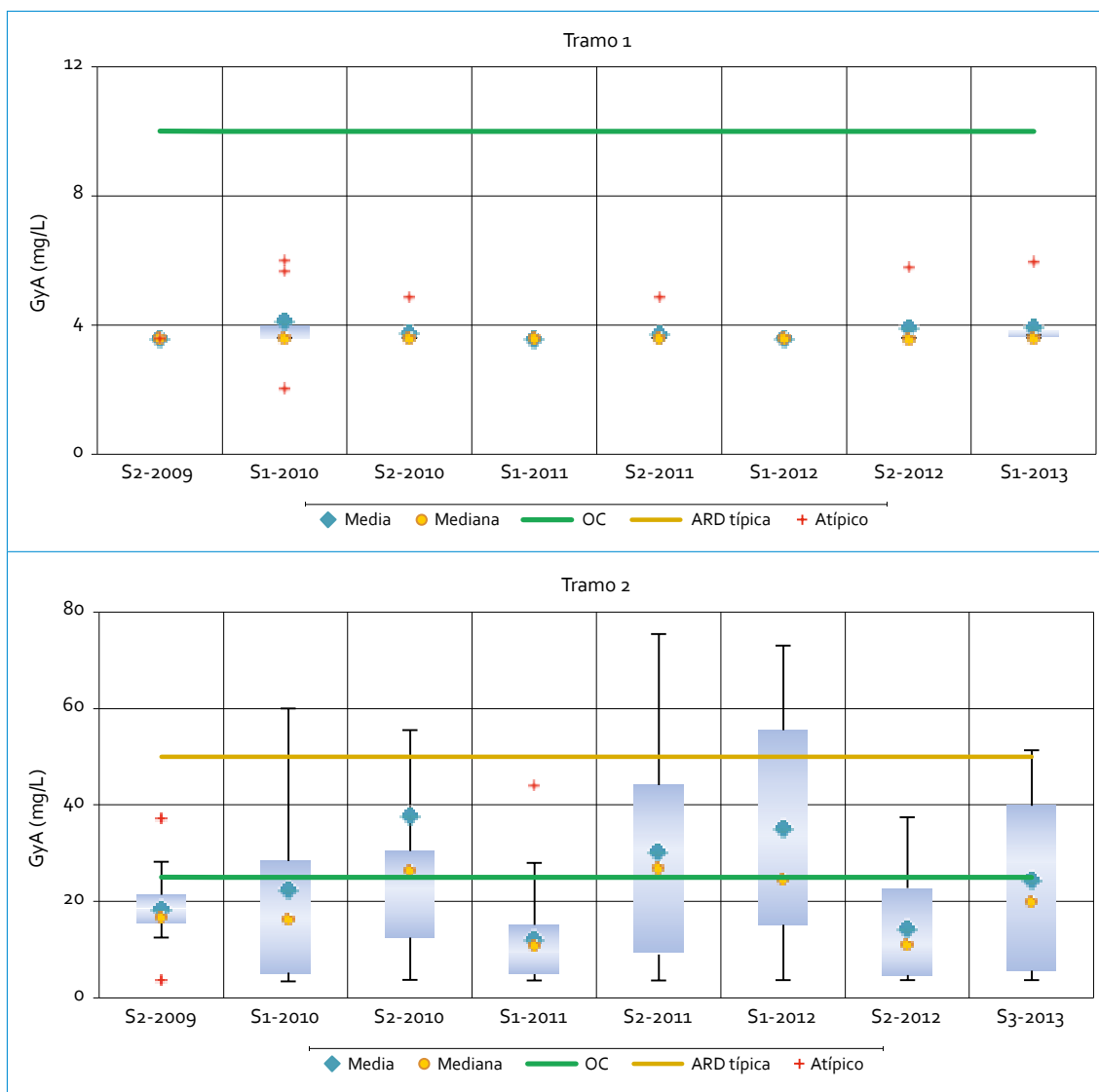


7,1 mg/L. S1-2011 fue el semestre con los mejores resultados, pues solo cerca del 20 % de sus datos sobrepasó el ARD, su mediana fue de 2,64 mg/L y su dato mínimo (0,05 mg/L) fue la concentración más baja reportada de todos los periodos. Por último, el tramo 4, que mantiene el mismo objetivo de calidad del tramo 3, cumple en su mayoría con este objetivo a lo largo del tiempo. De hecho, el periodo que incumple con la mayor cantidad de datos es S2-2009. En los demás semestres solo entre

el 12 % y el 35 % de sus datos incumple el objetivo de calidad.

#### 4.1.1.9. Grasas y aceites

El tramo 1 presenta una concentración bastante uniforme de grasas y aceites (GyA) a través del tiempo (figura 4.9). Todas las concentraciones se encuentran entre el límite de detección (3,6 mg/L) y 4,0 mg/L, lo que refleja una buena calidad del agua y un excelente cumplimiento



Continúa

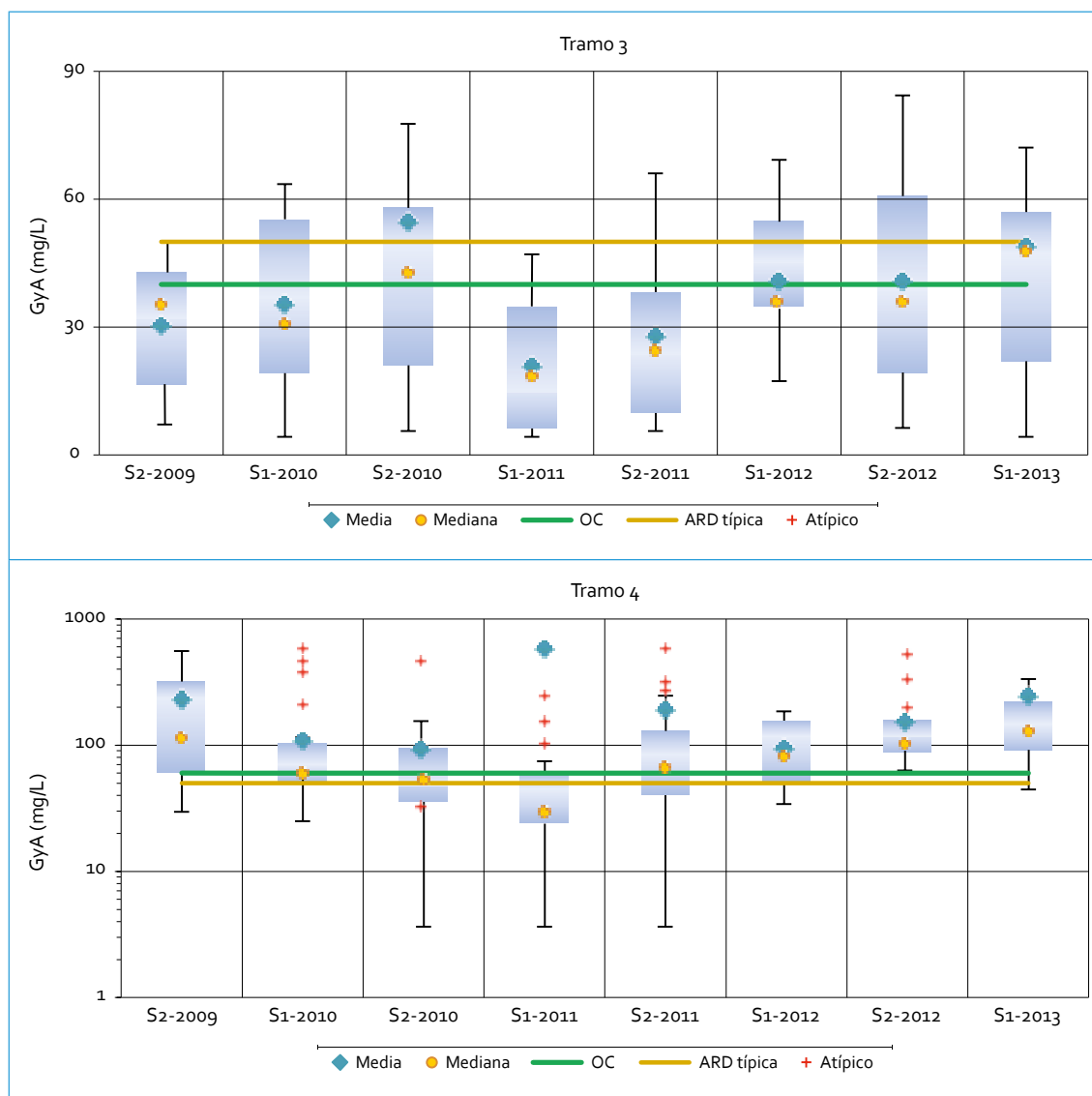


FIGURA 4.9. Perfil de grasas y aceites: río Fucha

con el objetivo de calidad (10 mg/L). El tramo 2 (Carrera 7ª y Av. Ferrocarril) presenta gran variabilidad de datos. El objetivo de calidad (25 mg/L) se encuentra muy debajo de la concentración típica de GyA en aguas residuales domésticas (50 mg/L). El periodo más crítico fue S1-2012, ya que entre el 50 % y 35 % de sus datos incumplieron el objetivo y superaron la concentración de referencia del ARD, respectivamente. Este periodo presentó una mediana

de 25 mg/L y una concentración máxima de 73 mg/L. El periodo con las concentraciones más bajas fue S1-2011 con tan solo 5 % de sus datos por encima del objetivo; este semestre tuvo una mediana de 11 mg/L y una concentración mínima de 3,6 mg/L. El tramo 3 (Av. Américas y Av. Boyacá) no presenta ninguna tendencia hacia algún tipo de rango de concentraciones. El objetivo de calidad (40 mg/L) es superado en la mayoría de los semestres; el periodo que

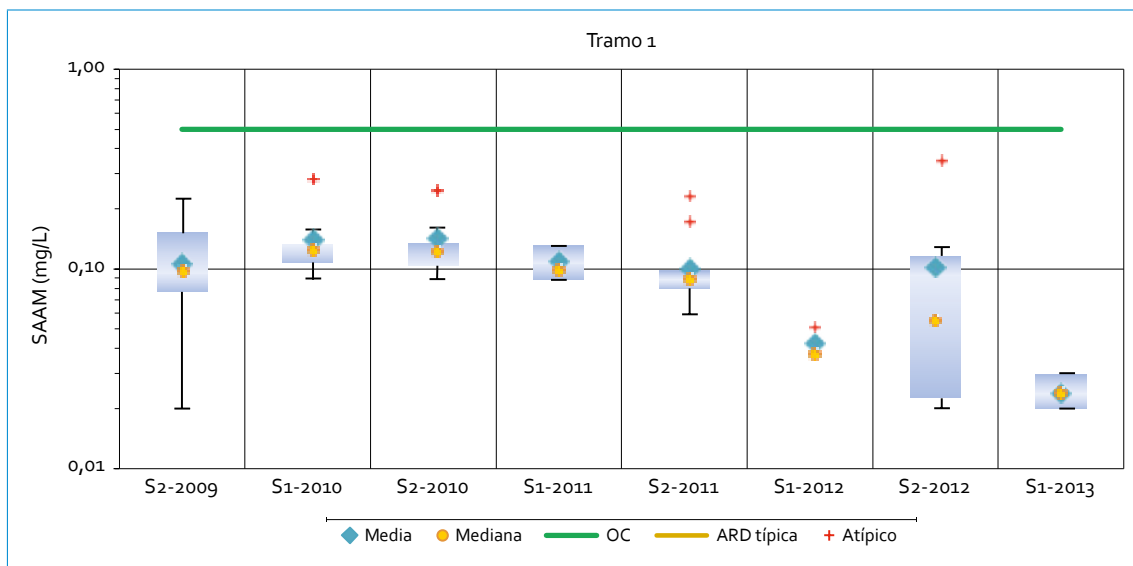
incumplió en mayor proporción el objetivo fue S1-2013, con cerca del 57% de sus datos por encima de dicho valor. Adicionalmente, este periodo presentó una mediana de 48 mg/L y un valor máximo de 72 mg/L. Por lo contrario, S1-2011 fue el semestre con la menor cantidad de datos que incumplieron con el objetivo, aproximadamente el 13%; su mediana fue de 19 mg/L y su concentración mínima (la más baja de todos los periodos) correspondió a 3,6 mg/L.

Finalmente, el tramo 4 presentó las concentraciones de GyA más elevadas de todo el río. En este el objetivo de calidad (60 mg/L) supera la concentración típica de GyA en ARD (50 mg/L). El periodo que presentó la mayor cantidad de datos (100%) y superó el objetivo y, por ende, el valor del ARD, fue el semestre S2-2012. Este periodo presentó una mediana de 107 mg/L y una concentración máxima de 164 mg/L. El periodo con la mayor cantidad de datos (75%) por debajo del objetivo y el valor del ARD fue S1-2011. Este periodo tuvo una mediana de 32 mg/L y una concentración mínima de 3,6 mg/L. La concentración regis-

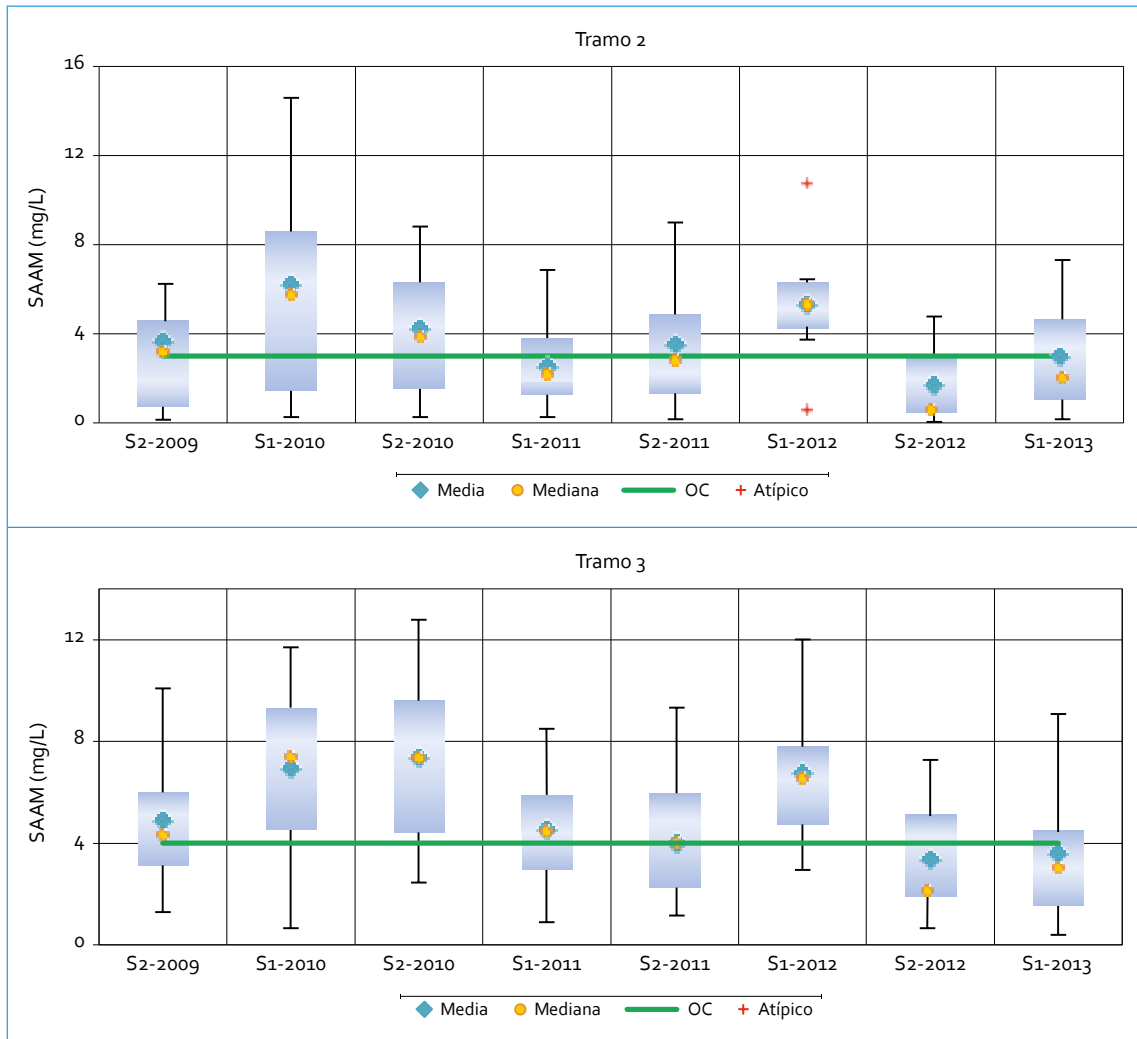
trada más alta de todos los periodos (550 mg/L) estuvo en S2-2009, mientras que la más baja (3,6 mg/L) se encontró en tres semestres, S2-2010, S1-2011 y S2-2011.

#### 4.1.1.10. SAAM

El tramo 1 del río Fucha durante todos los periodos presentó concentraciones de sustancias activas de azul de metileno (SAAM) muy por debajo del objetivo de calidad (0,5 mg/L), lo que denota las buenas condiciones en la parte alta del río. Dichas concentraciones tendieron a un comportamiento descendente a lo largo del tiempo, exceptuando S2-2012, en el cual se presentó un amplio rango de concentraciones (figura 4.10). Las concentraciones más altas se encontraron en S2-2009, con una mediana de 0,1 mg/L y una máxima de 0,23 mg/LM mientras que el periodo en el que se encontraron los valores más bajos fue en S1-2013, cuando hubo una mediana de 0,03 mg/L y una concentración mínima de 0,02 mg/L. El tramo 2 durante todos los semestres presentó concentraciones que superaron el objetivo



Continúa



Continúa

de calidad (3 mg/L). El periodo S1-2012 fue el semestre que en mayor proporción incumplió, al tener el 100% de sus datos por encima de este valor; este periodo tuvo una mediana de 6 mg/L y un valor máximo de 6 mg/L; mientras que S2-2012 fue el que presentó los mejores resultados, al tener el 75% de sus datos por debajo del objetivo, una mediana de 1 mg/L y la concentración más baja de todos los periodos (0,1 mg/L), a diferencia del S1-2010 que tuvo la concentración más alta registrada de todos los periodos (15 mg/L).

El tramo 3 presenta un objetivo de calidad (4 mg/L), superado por la gran mayoría de los periodos. El semestre más crítico fue S2-2010, al presentar el 80% de sus datos que incumplían, al tener una mediana de 7 mg/L y una concentración máxima de 13 mg/L. El semestre que presentó una mayor frecuencia de concentraciones bajas fue S2-2012, al tener aproximadamente el 68% de sus datos por debajo del objetivo y presentar una mediana de 2 mg/L y una concentración mínima de 0,5 mg/L. Por su parte, el tramo 4 presenta

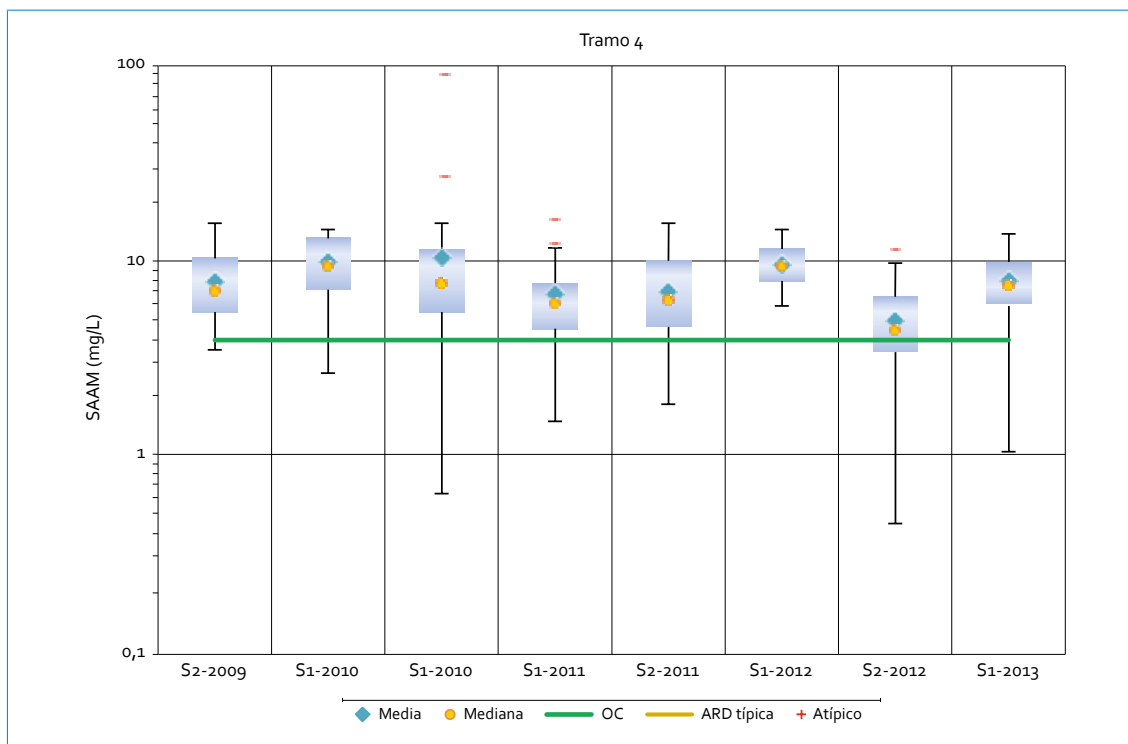


FIGURA 4.10. Perfil de SAAM: río Fucha

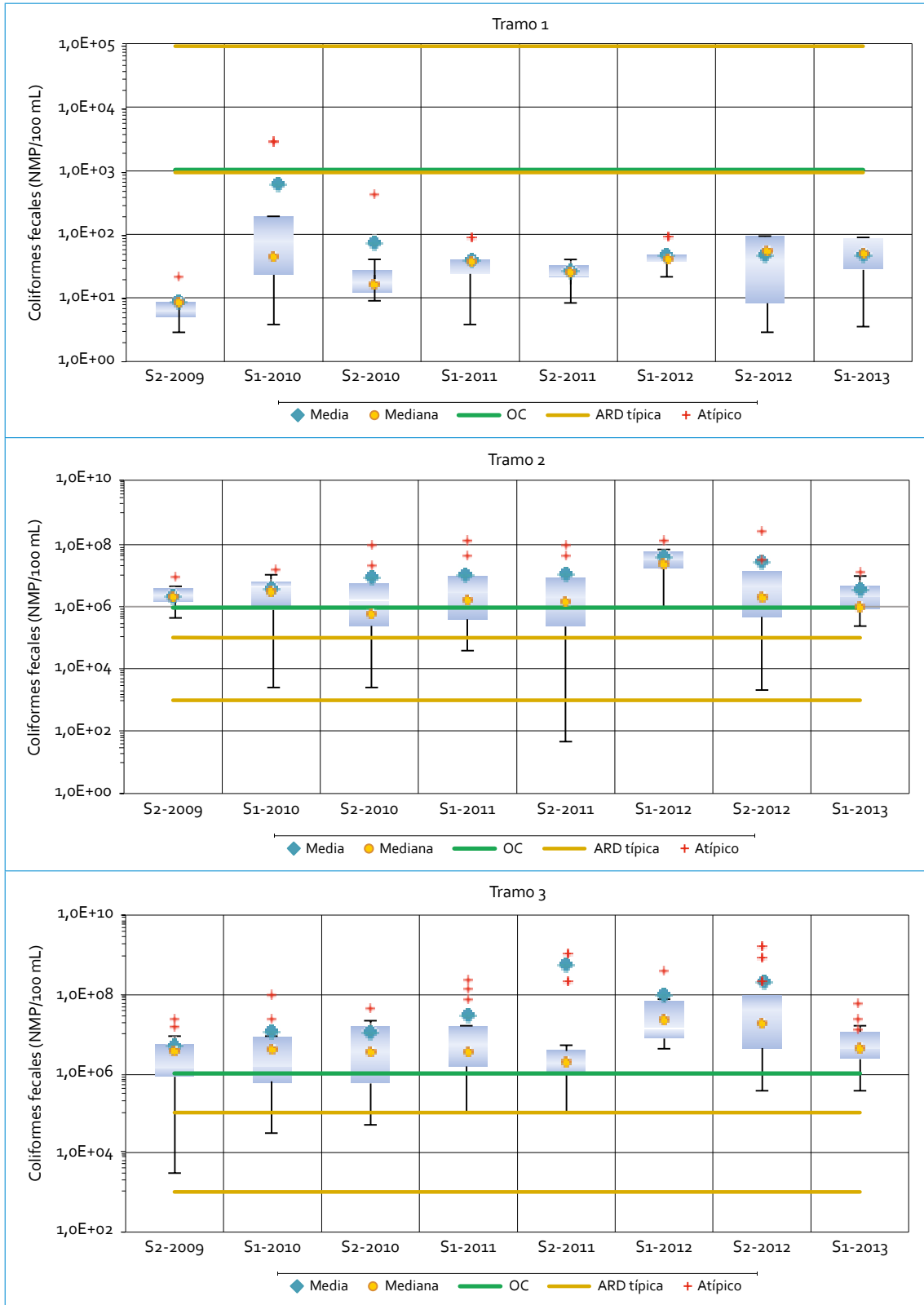
las concentraciones más críticas. Todos los semestres tienen entre el 70 y el 100 % de sus datos incumpliendo con el objetivo de calidad (4 mg/L). El semestre que reflejó los peores resultados fue S1-2012, con el 100 % de sus datos por encima del objetivo y tuvo una mediana de 10 mg/L y una concentración máxima de 15 mg/L, no muy distante de la más alta registrada de todos los semestres (16 mg/L) reportada en S2-2009 y S2-2011.

#### 4.1.1.11. Coliformes fecales

En las concentraciones de coliformes fecales del río Fucha se observan sus bajos índices en el tramo 1 y un aumento abrupto en los demás tramos del río. El tramo 1 tiene un objetivo de calidad de  $1 \times 10^3$  NMP/100 mL, el cual coincide con el límite mínimo de concentraciones típico en ARD diluidas ( $1 \times 10^3$  NMP/100 ml) (fi-

gura 4.11). A lo largo del tiempo se aprecia el cumplimiento del objetivo de calidad en este. El semestre que presentó las concentraciones más cercanas al objetivo fue el S1-2010, con una concentración máxima de  $2 \times 10^2$  NMP/100 mL, mientras que S2-2009 fue el semestre que presentó los niveles más bajos de coliformes fecales, al registrar una mediana de 9 NMP/100 mL y una concentración mínima de 3 NMP/100 mL.

Para el tramo 2 todos los periodos superan el objetivo de calidad con entre el 50 % y el 100 % de sus datos; es más crítico el S1-2012, con el 100 % de sus datos incumpliendo, una mediana de  $2,6 \times 10^7$  NMP/100 mL y una concentración mínima y máxima de  $9,3 \times 10^5$  y  $7,5 \times 10^7$  NMP/100 mL. El periodo que evidenció los mejores resultados fue S2-2010, con el 50 % de sus datos por encima del objetivo de calidad, una mediana de  $7,8 \times 10^5$  NMP/100



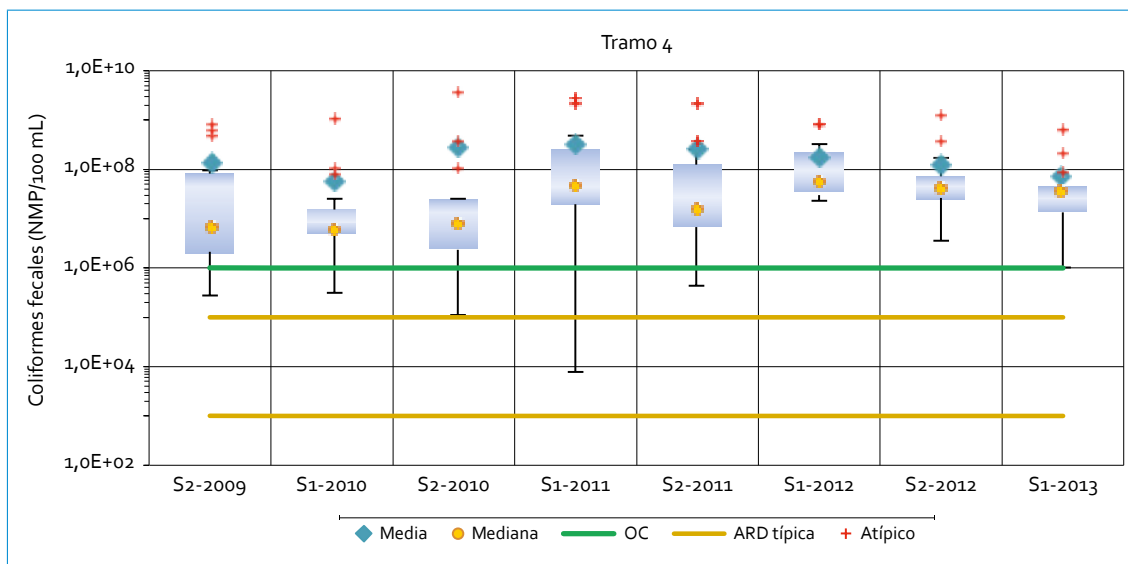


FIGURA 4.11. Perfil de coliformes fecales: río Fucha

mL, y una concentración mínima de  $2,4 \times 10^3$  NMP/100 mL. El tramo 3 presenta un aumento en las concentraciones de coliformes fecales en relación con el trayecto previo. El periodo que más excede el objetivo es S1-2012, con el 100 % de sus datos por encima de este valor, una mediana de  $2,6 \times 10^7$  NMP/100 mL y un rango de concentraciones de  $4,3 \times 10^6$ - $7,5 \times 10^7$  NMP/100 mL. Los semestres que registraron la menor cantidad de concentraciones de coliformes fecales por debajo del objetivo fueron S2-2009 y S2-2011, con cerca del 25 % de sus datos cumpliendo; ambos presentan medianas de  $3,3 \times 10^6$  y  $2,3 \times 10^6$  NMP/100 mL, y concentraciones mínimas de  $3 \times 10^3$  y  $9 \times 10^4$  NMP/100 mL.

Por último, el tramo 4, manteniendo el mismo objetivo de calidad de los tramos 2 y 3, evidencia las concentraciones más elevadas de todo el río. Todos los periodos superan el objetivo con entre el 80 % y el 100 % de incumplimiento. El periodo más crítico fue S1-2012, con el 100 % de sus datos incumpliendo, una mediana de  $4,3 \times 10^7$  NMP/100 mL y un rango de concentraciones de  $2,3 \times 10^7$ - $3 \times 10^8$  NMP/100

mL. Aun así, el semestre en el cual se registró la concentración más alta de todos los periodos fue S1-2011 con registros de  $4,7 \times 10^8$  NMP/100 mL. El periodo en el que se recopilaban los mejores resultados fue S1-2010, con el 10 % de sus datos cumpliendo con el objetivo; en este periodo se presentó una mediana de  $4,9 \times 10^6$  NMP/100 mL y una concentración mínima de  $3 \times 10^5$  NMP/100 mL.

#### 4.1.1.12. Sulfuros

Las concentraciones de sulfuros en todo el trayecto del río Fucha se encuentran por encima del criterio de vida acuática ( $0,002$  mg/L) establecido por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (figura 4.12). Lo anterior no significa que ningún tramo del río tenga las condiciones adecuadas para el desarrollo de vida acuática, pues tramos como El Delirio, en su mayoría de veces, presenta concentraciones que se encuentran por debajo del límite de detección ( $0,5$  mg/L), por lo que resulta complicado comparar un criterio

menor al valor límite de detección. Aun así, sí existen puntos de monitoreo que evidencian elevadas concentraciones de sulfuros, como son Zona Franca (6,2 mg/L) y Fucha Alameda (4,9 mg/L). En relación con el cambio en las concentraciones de sulfuros totales a través del tiempo, se observa que existe un comportamiento constante, tendiente a variar en un rango de concentraciones de 0,5-2,8 mg/L.

#### 4.1.1.13. Fenoles

Todos los puntos de monitoreo del río Fucha (excluyendo Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda) contienen el 100 % de sus datos por debajo del criterio organoléptico (0,3 mg/L) y, por ende, del criterio para la salud humana (10 mg/L) establecido por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (figura 4.13). Dichos puntos alcanzan concentraciones mínimas de hasta 0,02 mg/L, que resulta ser el valor límite de detección de sulfuros. En el caso de los puntos Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda, solo un pequeño porcentaje de sus datos sobrepasan el criterio para un efecto organoléptico, al

presentar concentraciones máximas de 0,61 mg/L, razón por la cual no se puede asegurar que durante dichos tramos el efecto de los fenoles sea tal que afecte las condiciones de calidad del agua. A través del tiempo se puede observar cómo las concentraciones varían dentro un mismo rango (0,02-0,28 mg/L).

#### 4.1.1.14. Metales

##### 4.1.1.14.1. Bario

Respecto al bario en el río Fucha, este presenta concentraciones relativamente bajas durante toda su trayectoria, inferiores al criterio de agua potable (0,7 mg/L) establecido por la Organización Mundial de la Salud. En general, las concentraciones de bario aumentan a medida que el río avanza; de esta manera, en el punto de monitoreo El Delirio se pueden identificar las concentraciones más bajas (valores inferiores al límite de detección = 0,003 mg/L), mientras que en los últimos puntos (Zona Franca y Fucha Alameda) se encuentran concentraciones más elevadas (figura 4.14). Existió solo un dato por fuera de la tendencia

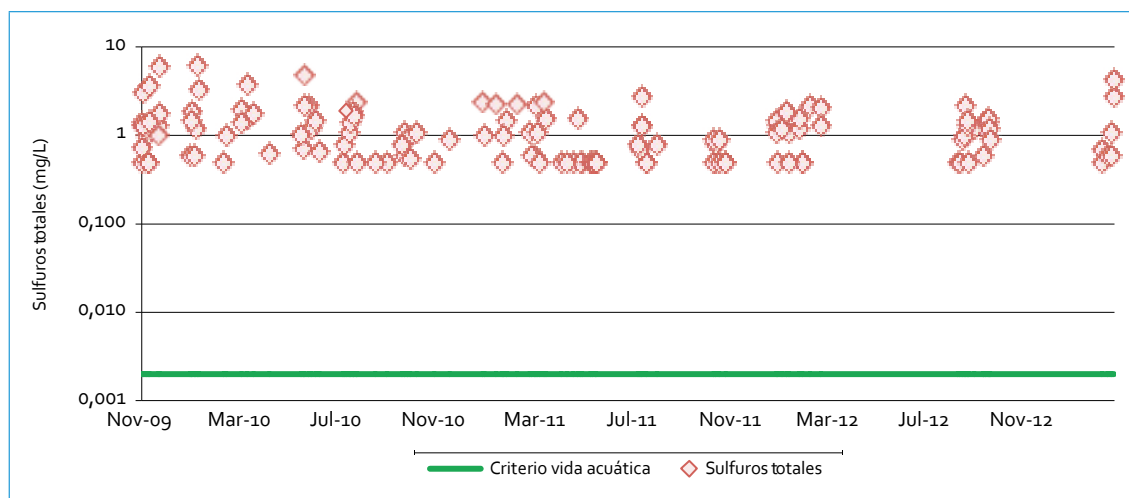


FIGURA 4.12. Perfil de sulfuros: río Fucha



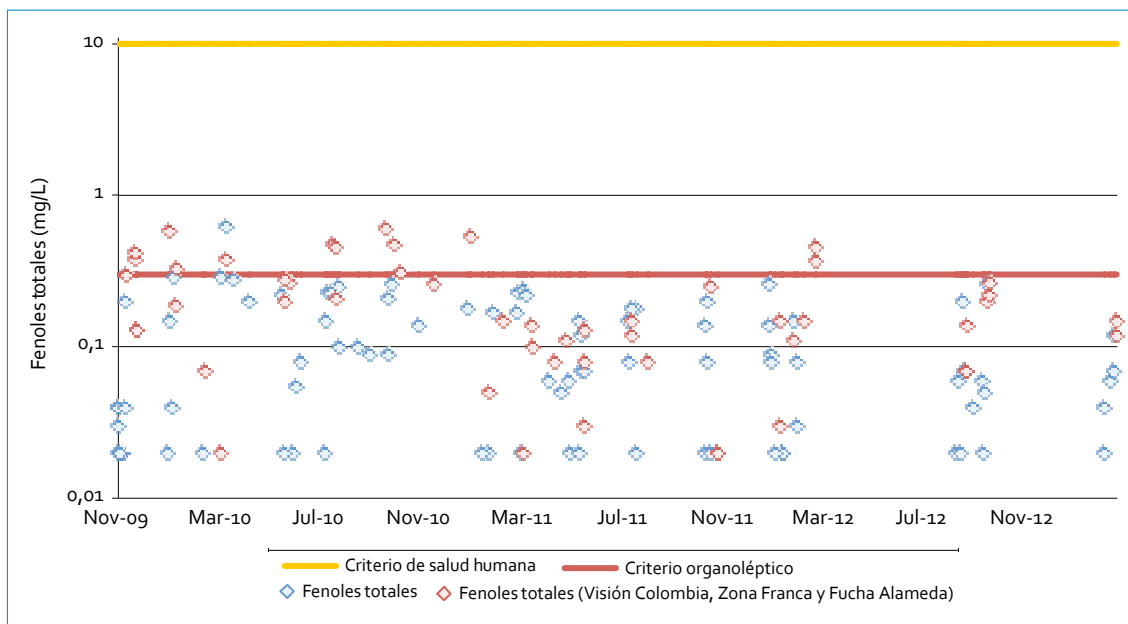


FIGURA 4.13. Perfil de fenoles: río Fucha

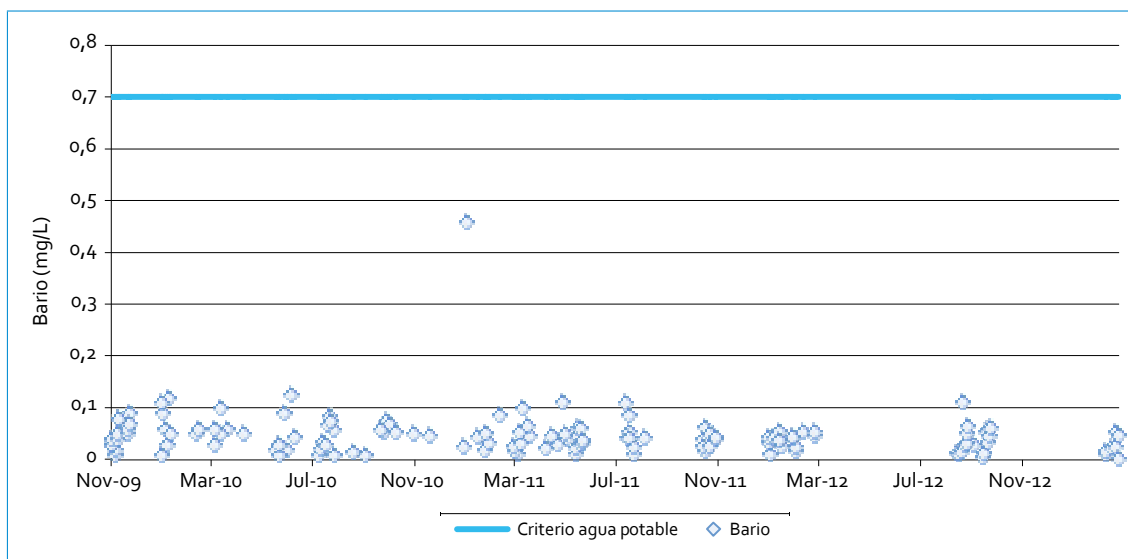


FIGURA 4.14. Perfil de bario: río Fucha

de concentraciones del río, cuyo valor fue de 0,46 mg/L y correspondió al punto Zona Franca, en enero de 2011. A través del tiempo, las concentraciones de bario reflejaron un comportamiento constante.

#### 4.1.1.14.2. Cadmio

El río Fucha presenta, en su mayoría, concentraciones que se encuentran por debajo del límite de detección (0,001-0,006 mg/L, según el periodo), por lo que resulta complicado com-

parar dichas concentraciones con el criterio de vida acuática (0,0002-0,002 mg/L) y el criterio de agua potable (0,003 mg/L), ambos establecidos por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (figura 4.15). Tan solo existen tres datos que resultaron ser superiores al límite de detección, los cuales se registraron en Zona Franca (0,009 mg/L y 0,012 mg/L), en 2011, y Fucha Alameda (3,26 mg/L), en 2009. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de datos que se encuentra por debajo del límite de detección, se sabe que dichas concentraciones son lo suficientemente bajas como para no afectar significativamente al río.

#### 4.1.1.14.3. Cinc

El río Fucha presenta concentraciones elevadas de cinc en la mayoría de sus tramos. Respecto a los criterios de vida acuática (0,1 mg/L) y agua potable (4 mg/L), solo dos puntos de monitoreo (El Delirio y Carrera 7ª) evidencian concentraciones inferiores a dichos criterios; en estos dos puntos estas varían dentro de un

rango de 0,004 a 0,099 mg/L. Los demás puntos de monitoreo registran concentraciones que tienden a variar de 0,04 a 1,1 mg/L, con valores mínimos y máximos de 0,001 y 4,5 mg/L. Las concentraciones de cinc presentan un comportamiento ascendente a medida que el cauce del río aumenta; de esta manera, las más elevadas se encuentran en Zona Franca (2,7 mg/L) y Fucha Alameda (4,5 mg/L). Las concentraciones de cinc a través del tiempo no presentan cambios significativos (figura 4.16).

#### 4.1.1.14.4. Cobre

El cobre en el río Fucha presenta concentraciones relativamente bajas durante su recorrido, inferiores al criterio de agua potable (2 mg/L) establecido por la Organización Mundial de la Salud (figura 4.17). Las concentraciones varían de 0,001 mg/L (valor del límite de detección) a 0,86 mg/L. Los distintos puntos de monitoreo presentan fluctuaciones de concentraciones, que no permiten la identificación del punto más crítico. Las concentraciones no han evidenciado cambio histórico alguno.

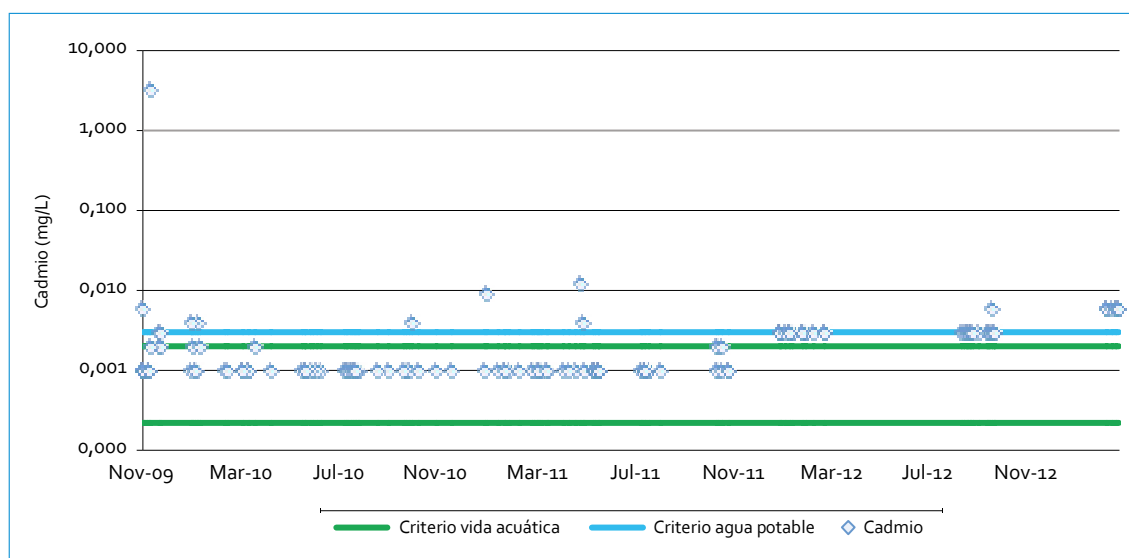


FIGURA 4.15. Perfil de cadmio: río Fucha

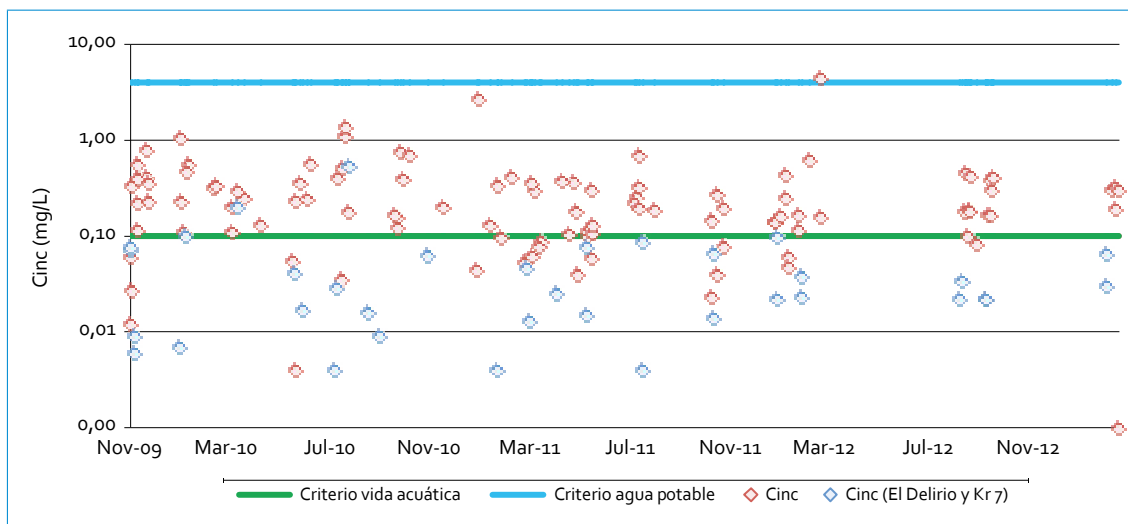


FIGURA 4.16. Perfil de cinc: río Fucha

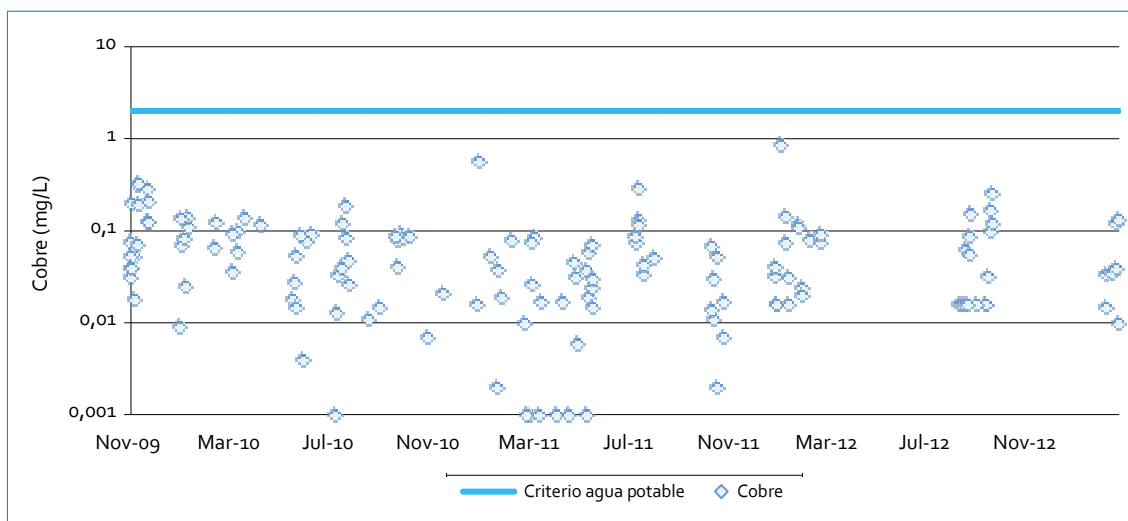


FIGURA 4.17. Perfil de cobre: río Fucha

#### 4.1.1.14.5. Cromo total

En cromo total, el río presenta gran variabilidad de datos, al registrar concentraciones de 0,006 mg/L (límite de detección) a 0,32 mg/L. Los puntos de monitoreo El Delirio, Carrera 7ª, Av. Ferrocarril y Av. Américas tienden hacia concentraciones por debajo del criterio de agua potable (0,05 mg/L) establecido por la Orga-

nización Mundial de la Salud; mientras que a partir del punto Av. Boyacá las concentraciones de cromo total empiezan a sobrepasar dicho criterio (figura 4.18). Los puntos en los cuales se encuentran las máximas concentraciones son Visión Colombia (0,15 mg/L) y Zona Franca (0,32 mg/L). A través del tiempo las concentraciones de cromo total se mantienen dentro del mismo rango.

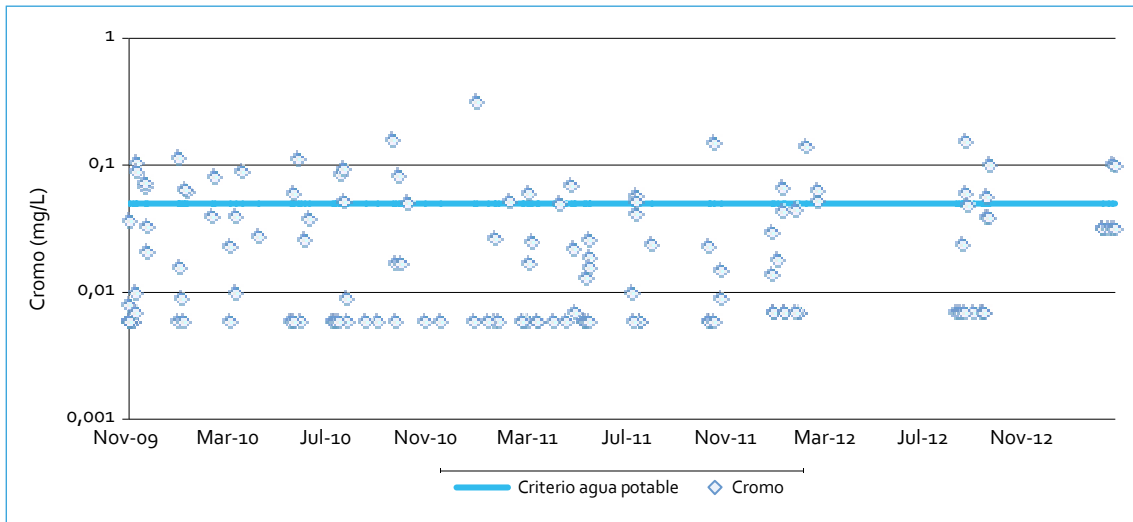


FIGURA 4.18. Perfil de cromo total: río Fucha

4.1.1.14.6. Níquel

Las concentraciones de níquel en todos los puntos de monitoreo del río Fucha muestran gran variabilidad histórica. El punto de monitoreo Fucha Alameda y los puntos de monitoreo desde El Delirio hasta Av. Boyacá las mantienen por debajo de los criterios de agua potable (0,07 mg/L) y vida acuática (0,05 mg/L),

variando con valores de 0,001 a 0,056 mg/L, mientras que los demás puntos (Av. Boyacá, Visión Colombia y Zona Franca), a pesar de presentar valores que se encuentran también por debajo de dichos criterios, tienen cantidades que los superan. Las concentraciones de estos últimos puntos varían de 0,001 a 0,24 mg/L, siendo Zona Franca el punto donde se presentó la máxima histórica (figura 4.19).

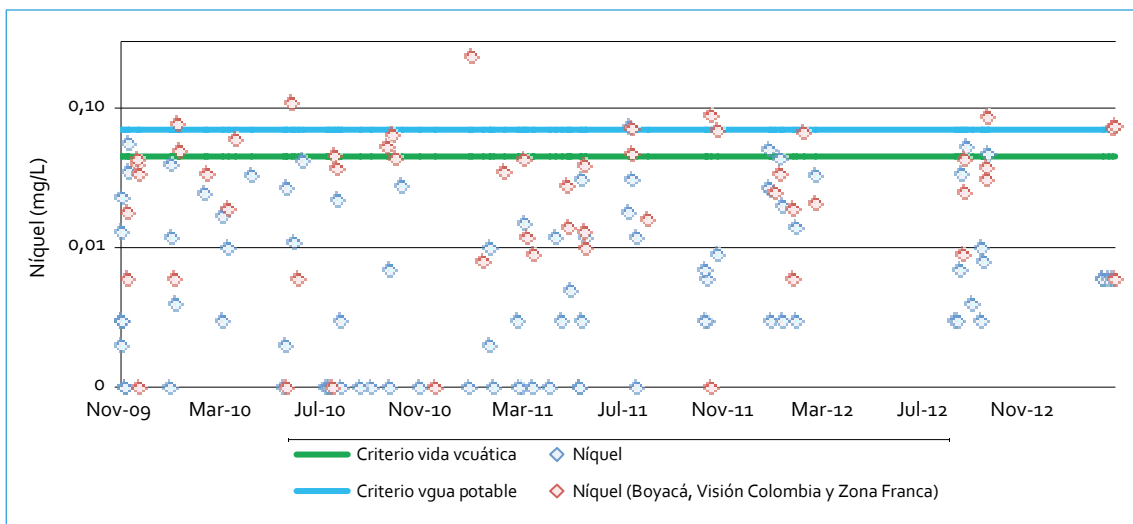


FIGURA 4.19. Perfil de níquel: río Fucha

## 4.1.1.14.7. Plomo

Respecto al parámetro plomo, el río Fucha presenta cambios en sus concentraciones a medida que aumenta su cauce. En lo que se refiere a El Delirio y Carrera 7ª, estos son los dos únicos puntos con la mayor cantidad de datos y cumplen con el criterio de agua potable (0,01 mg/L); sin embargo, tienen un rango de concentraciones que varía de 0,003 (valor límite de detección) a 0,025 mg/L. A diferencia de los demás puntos de monitoreo, que evidencian concentraciones de 0,03 a 0,203 mg/L, pero donde la mayor parte de sus datos se encuentra por encima del parámetro de agua potable. En lo referente al criterio de vida acuática (0,002-0,053 mg/L), todos los puntos de monitoreo tienen la mayor parte de sus datos entre dicho rango, exceptuando los puntos Ferrocarril (0,116 mg/L), América (0,077 mg/L), Visión Colombia (0,109 y 0,149 mg/L) y Zona Franca (0,203 mg/L). En lo referente al cambio en la concentración a través del tiempo, se puede observar que las concentraciones se mantienen dentro de un mismo rango (figura 4.20).

## 4.1.2. Cargas contaminantes

4.2.1.1.  $DBO_5$ 

La figura 4.21 presenta la curva de duración de carga de  $DBO_5$  (línea azul) en cada uno de los tramos del río Fucha. Esta curva refleja la carga máxima de  $DBO_5$  que el río Fucha puede mantener sin necesidad que se exceda el criterio de calidad. Las cargas puntuales (cuadrados) son las muestras individuales de  $DBO_5$  que se obtuvieron en el periodo comprendido entre noviembre de 2009 y junio de 2013, mientras que los puntos resaltados son las cargas de  $DBO_5$  obtenidas en la última fase de monitoreo (fase 4). Los puntos que se encuentran por encima de la curva de duración indican que incumplieron el estándar en el momento de muestreo. Adicionalmente, en la tabla 4.1 se pueden observar las cargas promedio del rango medio de caudales de cada uno de los tramos y sus diferencias con las metas de reducción.

En el tramo 1 del río (El Delirio) el 96% de las cargas de  $DBO_5$  se mantuvieron por debajo del objetivo y así demostraron las óptimas condiciones de calidad en la que se encuentra la cuenca

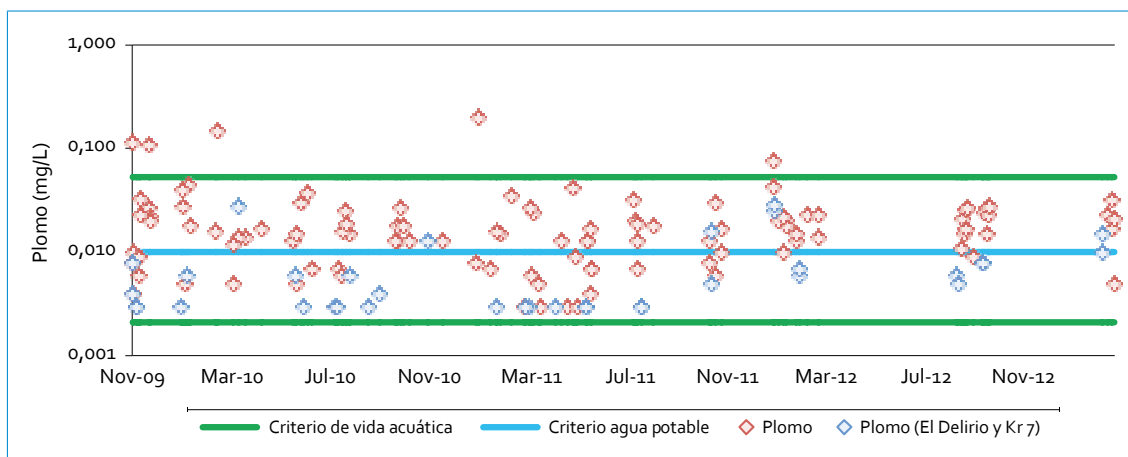


FIGURA 4.20. Perfil de plomo: río Fucha

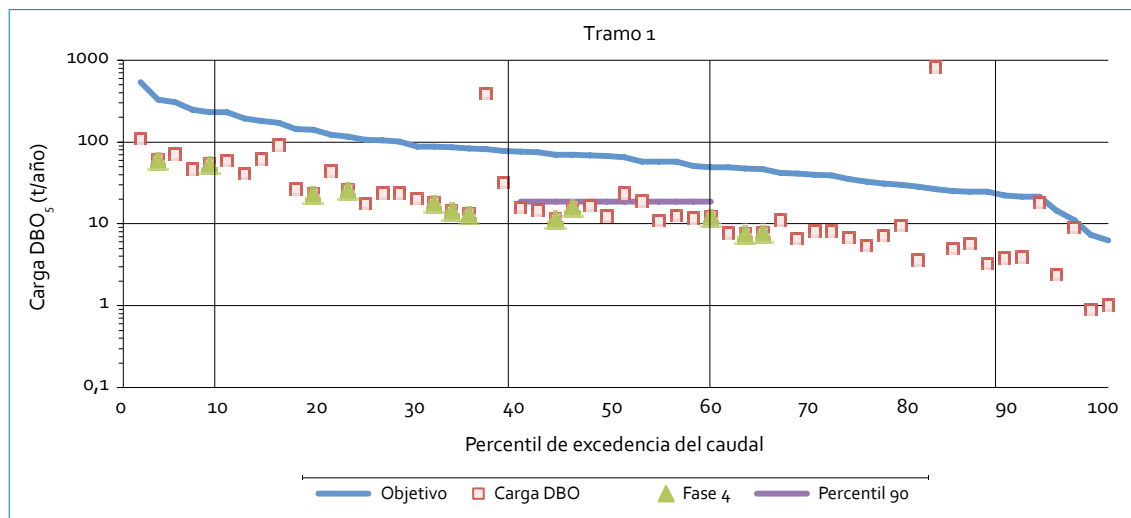
TABLA 4.1. Carga DBO<sub>5</sub> (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DBO <sub>5</sub>				
Percentil 90 (F1-F4)	19	4900	16340	78731
Promedio (F1-F4)	15	2772	6616	37853
Promedio (F4)	13	2153	10409	40404
Carga curva duración (percentil 50)	66	1246	9844	46601
PMSV	-	-	-	43728
Meta de reducción	-	1750	2150	58500
Línea base-promedio F4	-	160	[-]	30190

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

alta del río. Solo se presentaron dos casos en los que las cargas superaron el objetivo, con valores de 396 y 827 t/año. Exceptuando estos dos valores, el rango de cargas se encontró entre 1 y 110 t/año. Durante condiciones secas (percentil 60 a 100) las cargas se encontraron dentro de un promedio de 42 t/año, en el rango medio de caudales (percentil 40 a 60) el promedio fue de 15 t/año; mientras que en condiciones con caudales altos (percentil 0 a 40) el promedio de carga de DBO<sub>5</sub> correspondió a 58 t/año.

Las cargas de DBO<sub>5</sub> en el tramo 2 (Carrera 7ª y Av. Ferrocarril) reflejan los impactos generados por los vertimientos de agua residual una vez el río ingresa en el perímetro urbano, pues las cargas de DBO<sub>5</sub> en repetidas ocasiones se encuentran por encima de la curva de duración (figura 4.21), lo que refleja incumplimiento de los objetivos de carga. El rango de cargas en este tramo varía de 75 a 20 106 t/año, y el valor máximo se da en el punto de monitoreo Carrera 7ª. En condiciones secas, las cargas superaron



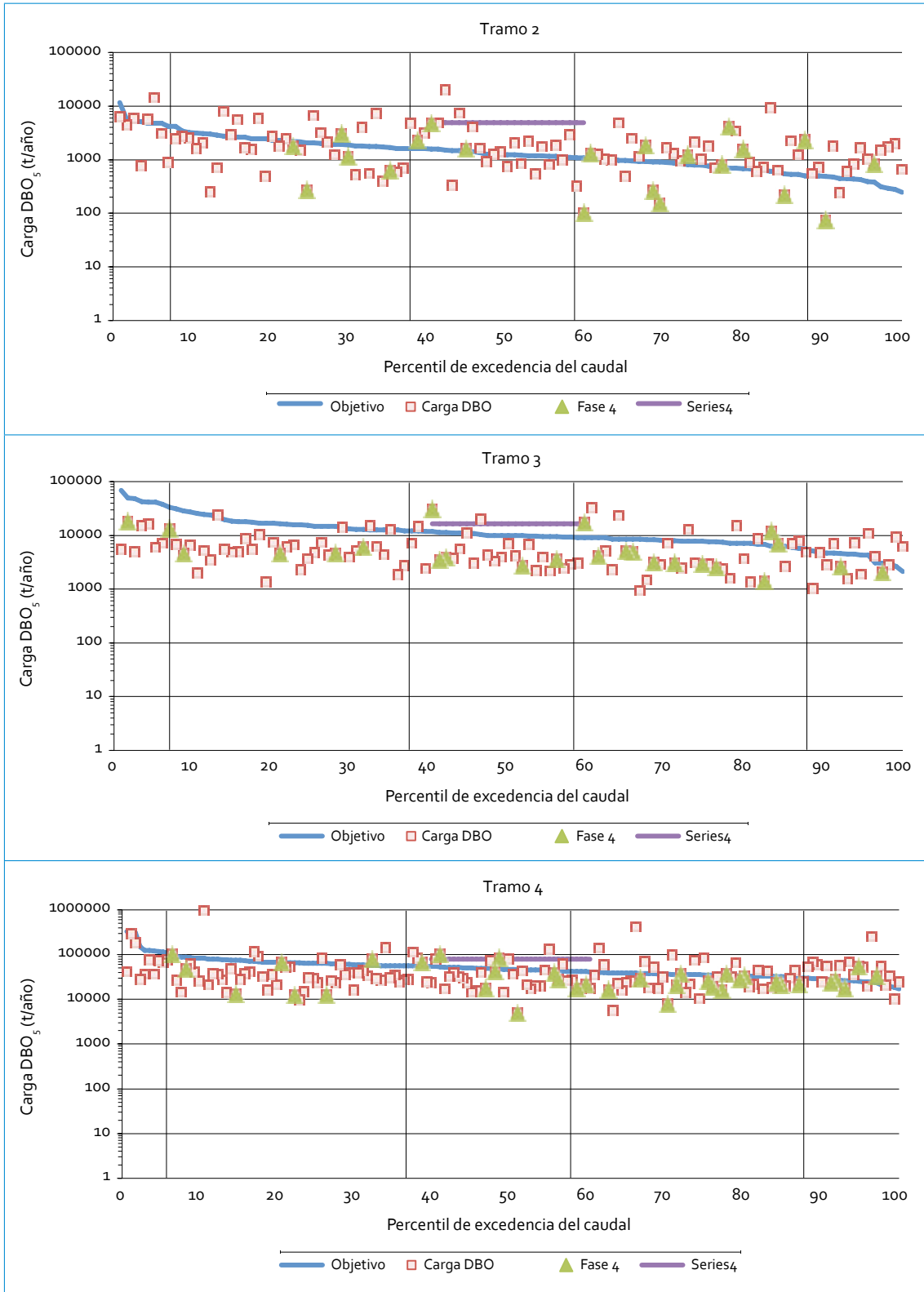


FIGURA 4.21. Curva de duración de carga DBO<sub>5</sub>: río Fucha

en mayor proporción la curva de duración, con un promedio de 1506 t/año, a diferencia de las cargas encontradas en condiciones húmedas, donde el promedio (2970 t/año) estuvo por debajo de la curva de duración.

La diferencia entre la línea base y la carga promedio (en rango medio de caudales) del último periodo de monitoreo (el 4) refleja una disminución en la cargas de  $\text{DBO}_5$  en el tramo 2 a través del tiempo (160 t), que aunque no cumple con la meta de reducción, muestra una mejoría en la calidad del agua.

En lo que respecta al tramo 3, este presenta concentraciones mucho más elevadas que las del tramo 2, porque varían entre 947 y 32 534 t/año. La concentración máxima se registró en el punto Av. Boyacá en horas de la madrugada, lo que refleja la sensibilidad de las curvas 24 horas para la extrapolación de las cargas. En general, las cargas de  $\text{DBO}_5$  se mantuvieron por debajo de la curva de duración solo en caudales bajos, y donde se presentó un promedio de 5733 t/año, las cargas superaron en algunas ocasiones el objetivo. Por otro lado, en relación con el cambio en las cargas de  $\text{DBO}_5$  a través del tiempo, se puede observar que las cargas aumentaron (tabla 4.1) e incumplieron de esta manera con la meta de reducción estipulada por la Resolución 4328 de 2010. En el tramo 4 se registraron las cargas de  $\text{DBO}_5$  más altas de todo el río, al variar dentro de un rango de 4881 a 969 585 t/año. Con frecuencia las cargas se encontraron por debajo de la curva de duración; sin embargo, en las condiciones secas y más reducidas de caudal, las cargas tendieron a encontrarse por encima del objetivo, con un promedio de 44 904 t/año. La carga más elevada se registró en el punto Fucha Alameda durante condiciones húmedas y altos caudales (969 585 t/año). En relación con la meta de reducción, es importante señalar que aunque

no cumplió en su totalidad con lo estipulado (58500 t), sí cumplió con cerca del 52 % de dicha meta, lo que evidencia un progreso en la calidad del agua.

#### 4.2.1.2. DQO

El tramo 1 del río Fucha presenta cargas de DQO que, en su gran mayoría, se encuentran debajo de la curva de duración. Ello muestra cumplimiento de los objetivos de calidad y, por supuesto, la gran calidad de agua que presenta el río en su zona alta. Este tramo presenta las menores cargas de DQO de todo el río; en el rango medio de caudales, el promedio de cargas fue de 119 t/año (tabla 4.2), mientras que en los rangos de percentiles 0 a 40 (caudales altos) y 60 a 100 (caudales bajos) el promedio correspondió a 176 y 431 t/año. Solo se presentaron dos ocasiones en las cuales las cargas superaron la curva de duración, con valores de 216 y 2761 t/año, que se registraron durante las condiciones secas del tramo (figura 4.22). El tramo 2, por lo contrario, evidencia gran variabilidad de datos (293-69 163 t/año) y la mayor parte del tiempo se encuentra superando la curva de duración, lo cual refleja el cambio que sufre el río una vez este entra la ciudad y empieza a recibir las descargas de ARD.

En este tramo, las cargas se encuentran directamente relacionadas con el caudal del río; así, en las condiciones altas de caudal aparecen las cargas más elevadas, representadas por un promedio de 11 307 t/año. Entre tanto, en las condiciones más secas las cargas son las más reducidas del tramo, con un promedio de 4975 t/año. En el rango medio de caudal, el percentil 90 de las cargas se aleja considerablemente de la curva de duración, lo cual evidencia el incumplimiento en repetidas ocasiones del objetivo de calidad. Además, el aumento en carga con-

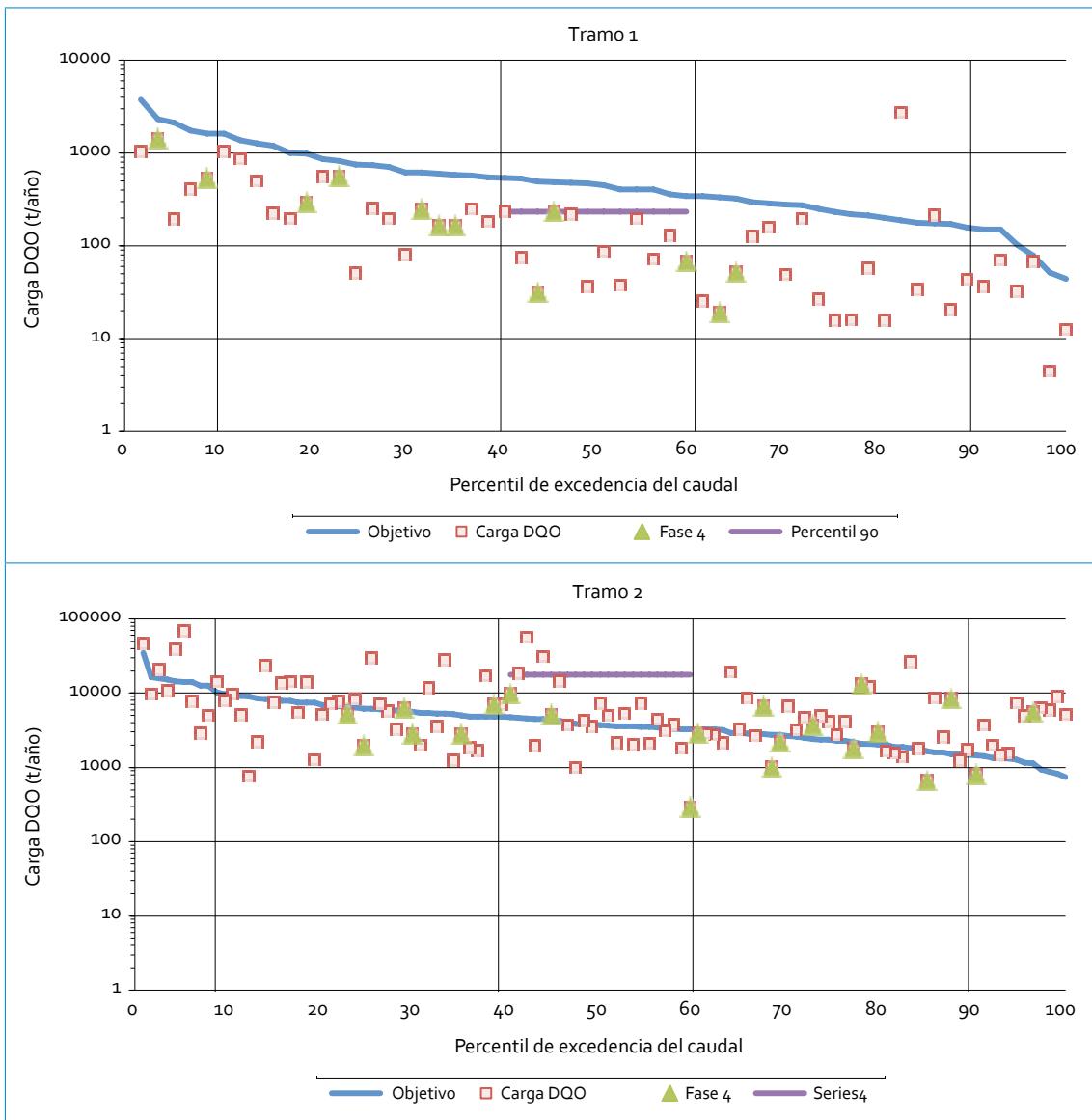


taminante que se ha presentado a través del tiempo (Línea Base-promedio F<sub>4</sub>, véase tabla 4.2) muestra lo distante que se encuentra el tramo de cumplir con las metas de reducción establecidas por la Resolución 4328 de 2010.

El tramo 3 muestra cargas más elevadas que las de tramo 2, con una variación de cargas de DQO de entre 1833 y 141 415 t/año. Solo durante caudales elevados, las cargas tendieron a encontrarse por debajo de la curva de dura-

ción, con un promedio de 27304 t/año, y así cumplieron el objetivo asociado con dilución de carga, a diferencia del rango de caudales encontrados entre el percentil 40 y 100, donde la curva de duración fue excedida en mayor proporción, al alcanzar valores máximos de hasta 14 1415 y 84 459 t/año.

En relación con el cambio en las cargas de DQO a través del tiempo, estas aumentaron alrededor de 13 000 t en la fase 4 y se alejaron



Continúa

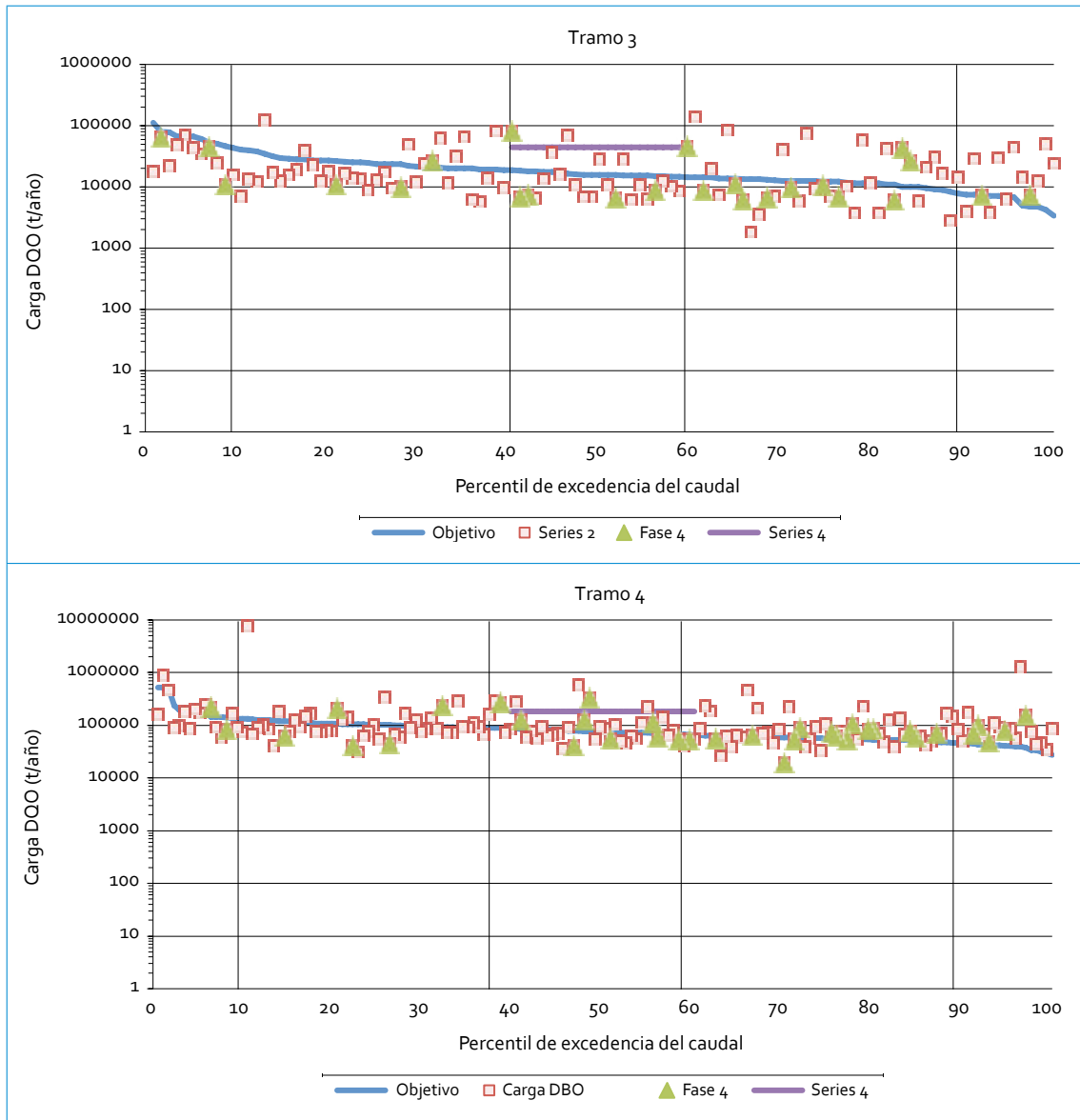


FIGURA 4.22. Curva de duración de carga DDO: río Fucha

del cumplimiento de la meta de reducción (6200 t). Por último, en el caso del tramo 4, el aumento en las cargas de DDO es tan significativo que las cargas promedio se incrementan alrededor de tres órdenes de magnitud en relación con la cuenca más alta del río, lo cual trae como consecuencia la disminución sustancial de la capacidad de resiliencia que podría presentar el río.

En la figura 4.22 se observa cómo las cargas de DDO tienden a permanecer por encima de la curva de duración para los distintos rangos de caudal y ello refleja un continuo incumplimiento de los objetivos de calidad. Durante la condición seca (percentil 60-100) se observa la mayor cantidad de cargas que supera el objetivo, con un promedio de 109 173 t/año y junto con la mayor cantidad de cargas provenientes

de la fase 4 (53 %). Por otro lado, la carga más elevada registrada en el tramo 4 correspondió a 7670705 t/año, la cual estuvo en el punto Fucha Alameda durante el rango de caudales altos (percentil 10-40). A través del tiempo se evidenció una disminución en la carga de DQO que, aun cuando no cumplió en su totalidad con la meta de reducción establecida para el presente tramo, sí reflejó una reducción del 25 % en la fase 4 (tabla 4.2).

#### 4.2.1.3. SST

El tramo 1 del río Fucha, caracterizado por poseer el estado más natural y menos inalterado de todo el río, presenta las cargas de SST más reducidas de todos los tramos, al variar entre 2 y 3036 t/año y tener una carga promedio (49 t/año) inferior a la curva de duración (132 t/año) en el rango de caudales medios (tabla 4.3); ello refleja un cumplimiento constante de

TABLA 4.2. Carga DQO (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DQO				
Percentil 90 (F1-F4)	233	17556	44298	183504
Promedio (F1-F4)	119	8510	19481	106645
Promedio (F4)	112	5114	26259	107340
Carga curva duración (percentil 50)	463	3738	15750	74562
PMSV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	2950	6200	75300
Línea base-promedio F4	-	[-]	[-]	19056

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

TABLA 4.3. Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SST				
Percentil 90 (F1-F4)	82	6740	13905	125481
Promedio (F1-F4)	49	3092	5832	49740
Promedio (F4)	56	2181	7710	39403
Carga curva duración (percentil 50)	132	748	5906	37281
PMSV	-	-	-	22879
Meta de reducción	-	2150	2250	39300
Línea base-promedio F4	-	324	[-]	64124

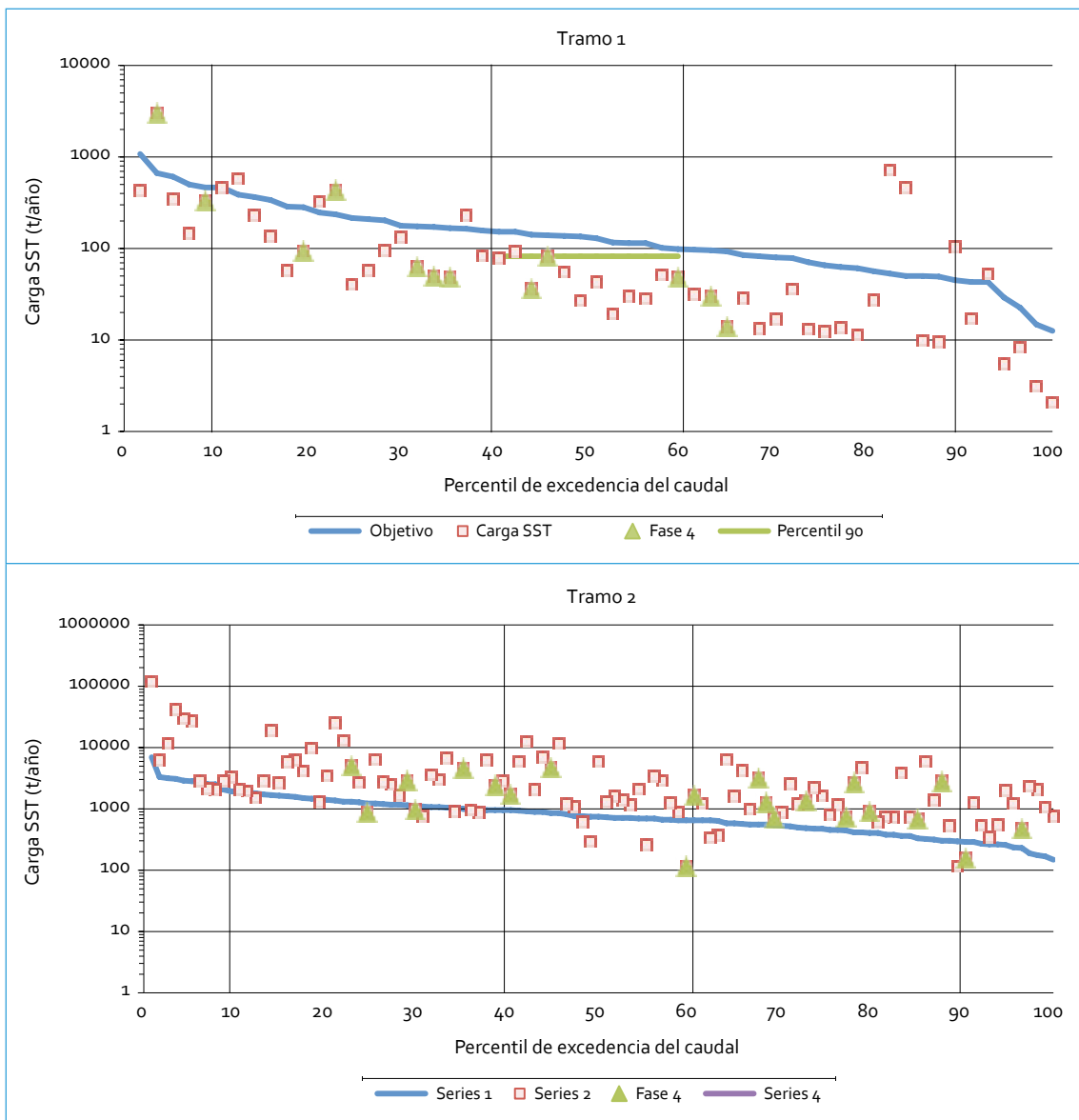
[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

los objetivos de carga. En relación con el comportamiento de las cargas de SST en el último periodo (fase 4), es posible identificar que de dichas cargas el 83 % tendió hacia condiciones húmedas y medias de caudal, y una de ellas fue la carga más elevada registrada hasta la actualidad, siendo de 3036 t/año (figura 4.23).

En el tramo 2 del río Fucha las cargas incrementan en tal magnitud que, en referencia al escenario de caudales medios, el promedio de carga del tramo 1 resulta ser tan solo el 2 %

de la presentada en el tramo 2 (3092 t/año). Adicionalmente, este aumento en cargas resulta tan elevado que los objetivos de carga son incumplidos en repetidas ocasiones. Las cargas estimadas en la fase 4 tienden a permanecer en mayor proporción dentro de las condiciones húmedas y secas, y se alejan del rango medio de caudal.

En lo que se refiere al tramo 3, las cargas de SST varían dentro de un rango de 166 a 105 009 t/año, y ello refleja un aumento en



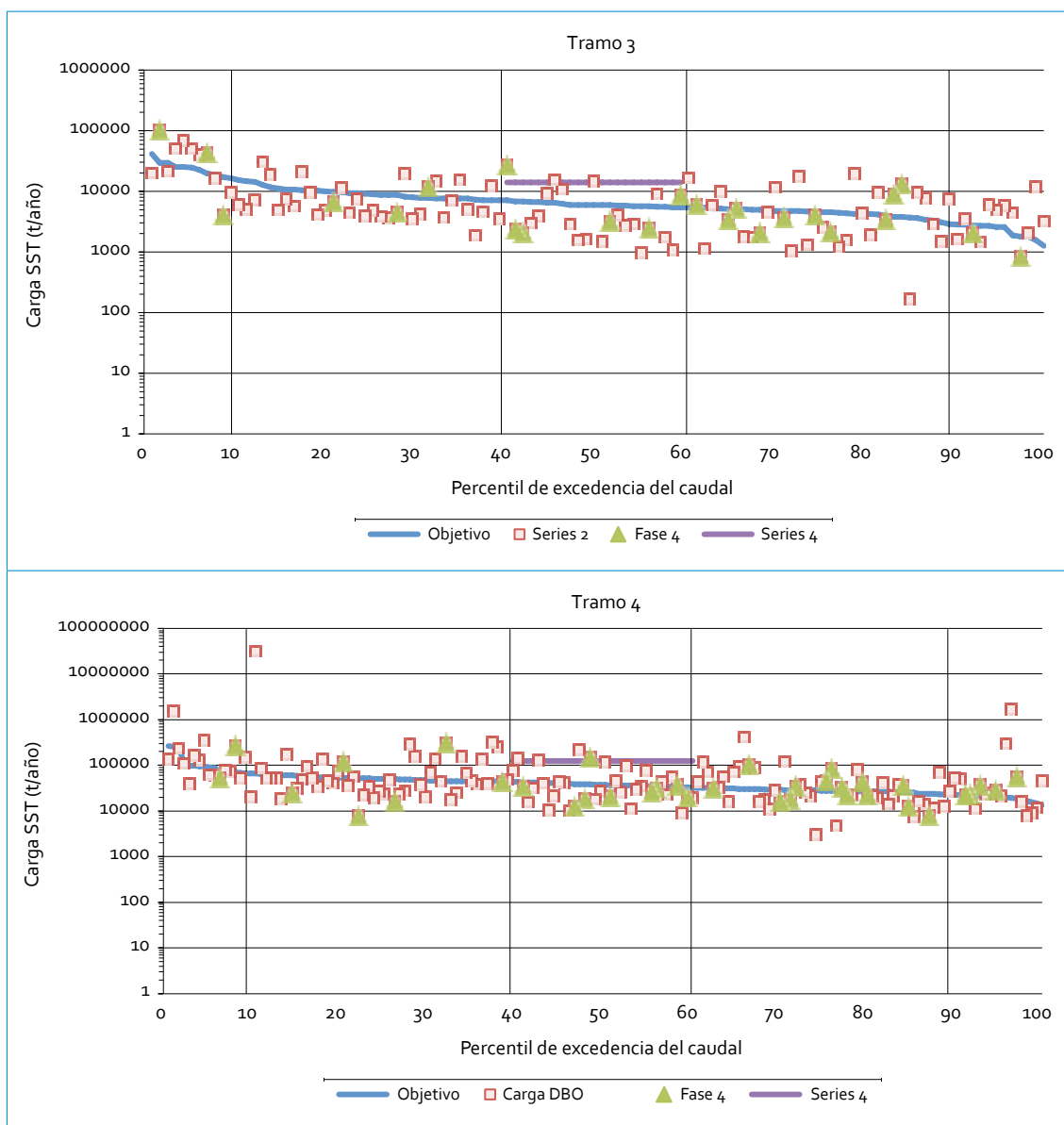


FIGURA 4.23. Curva de duración de carga SST: río Fucha

las descargas de ARD en relación con el tramo anterior. En condiciones húmedas, el promedio de cargas fue de 15 896 t/año; en el rango medio de caudal el promedio correspondió a 5832 t/año, mientras que durante las condiciones secas y de caudal bajo las cargas fueron similares a las del escenario de caudal medio, con un promedio de 5314 t/año. En cuanto a

las metas establecidas por la Resolución 4328 de 2010, el tramo no cumple con los objetivos establecidos, pues las cargas aumentaron en la fase 4 a 2868 t en relación con la línea base.

El último tramo del río Fucha, compuesto por los puntos de monitoreo Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda, refleja el impacto final de todos los vertimientos realizados

en el río. En este tramo se encuentran las cargas más elevadas, que varían entre 3066 y 31652 867 t/año. El percentil 90 de las cargas dentro del rango medio de caudales excede la curva de duración aproximadamente en un 200 %, lo cual no se debe a un incumplimiento repetitivo del objetivo, sino a la presencia de cierta cantidad de cargas con valores considerablemente elevados, como es el caso de la carga máxima encontrada durante la fase 4, correspondiente a 149 432 t/año, la cual —cabe aclarar— se presentó en el punto más bajo del río, Fucha Alameda. El promedio de cargas de SST durante las condiciones más húmedas fue de 582 562 t/año. Durante el rango de caudal medio, dicho promedio disminuyó a 49 740 t/año, mientras que durante las condiciones secas el promedio cambió a 70 009 t/año. En lo que se refiere al cumplimiento de la Resolución 4328 de 2010, existió un importante avance, pues las cargas disminuyeron 64 124 t en la fase 4 y cumplieron con el 100 % de la meta de reducción para el presente tramo (tabla 4.3).

#### 4.2.1.4. Nitrógeno total

Las óptimas condiciones de calidad de agua del tramo 1 del río Fucha se evidencian por medio de las cargas tan reducidas que este presenta en el caso del  $N_{total}$ , con un promedio de 28 t/año. En relación con el comportamiento de las cargas de  $N_{total}$  todas, a excepción de una (232 t/año), se encuentran por debajo de la curva de duración (figura 4.24), mientras que dentro del rango medio de caudales, el percentil 90 (22 t/año) de las cargas se encontró un 45 % por debajo de la curva de duración, lo cual demuestra satisfactoriamente el cumplimiento de los objetivos (tabla 4.4).

Las adecuadas condiciones del río resultan ser perjudicadas por las descargas de ARD de la ciudad, las cuales manifiestan sus primeros impactos por medio de los significativos aumentos en cargas que se generan en el tramo 2 (Carrera 7ª y Av. Ferrocarril). Las cargas de  $N_{total}$  presentan promedios de 860, 615 y 349 t/año, para los percentiles 0-40, 40-60 y 60-80, respectivamente. En lo relacionado con el rango medio de caudales, el percentil 90

TABLA 4.4. Carga  $N_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$N_{total}$				
Percentil 90 (F1-F4)	22	1189	2043	14717
Promedio (F1-F4)	17	615	1395	8443
Promedio (F4)	21	304	1541	10658
Carga curva duración (percentil 50)	40	498	1575	7456
PMSV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	350	350	8200
Línea base-promedio F4	-	266	[-]	2173

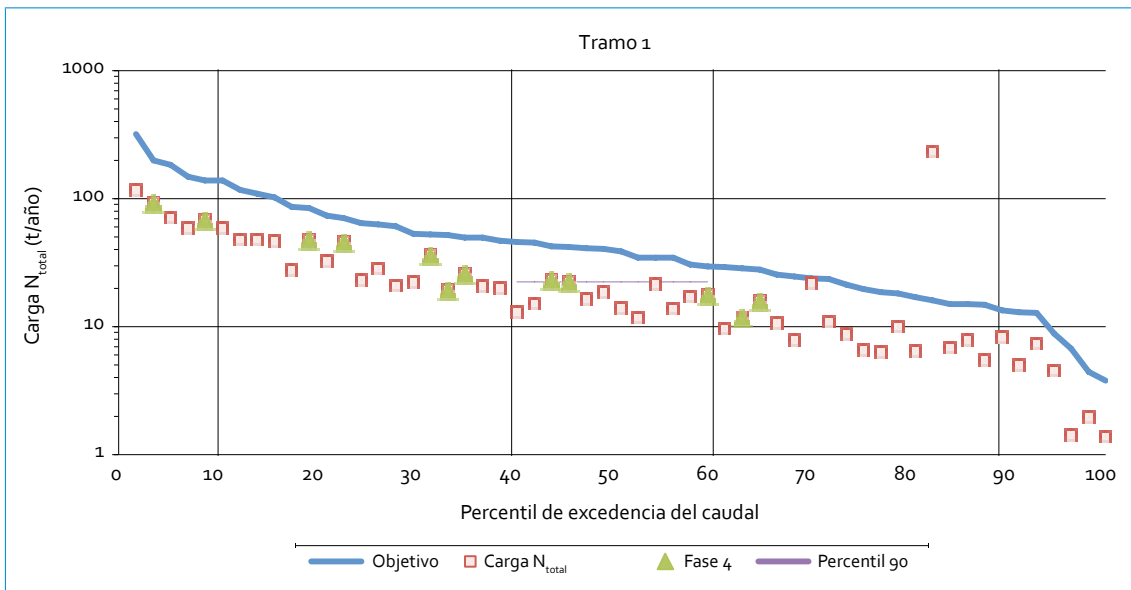
[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

(1189 t/año) de las cargas se aleja bastante de la curva de duración (489 t/año), lo cual evidencia el incumplimiento de los objetivos de carga. Sin embargo, a pesar de la diferencia en cargas con el tramo 1, a través del tiempo se ha encontrado una reducción en la carga contaminante de  $N_{total}$  que, aun cuando no corresponde al 100 % de la meta de reducción planteada, sí cumple con el 76 % de ella, siendo este un aspecto positivo en el camino hacia la recuperación del río.

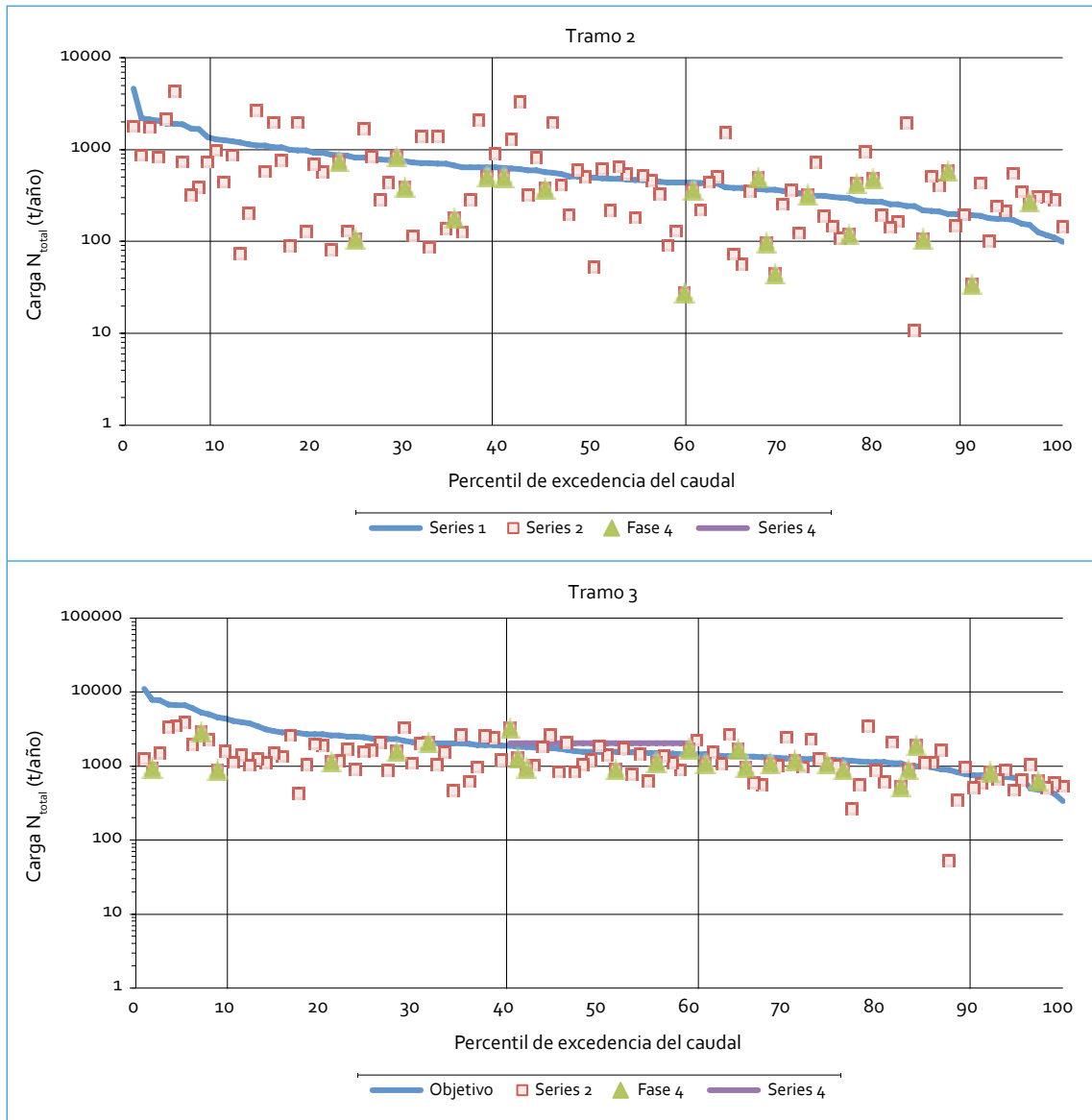
En cuanto al tramo 3 del río Fucha, se observa cómo las cargas contaminantes siguen aumentando entre un tramo y otro. En términos del rango medio de caudales, las cargas promedio aumentaron un 127 % en relación con el tramo 2. Las cargas de  $N_{total}$  presentaron valores de entre 53 y 3957 t/año. El percentil 90 (2043 t/año) de las cargas dentro del rango medio de caudales no se distanció significativamente de la curva de duración (1575 t/año) y el promedio de cargas (1395 t/año) dentro de dicho rango resultó ser inferior a la curva de duración. Ello demuestra un reducido in-

cumplimiento de los objetivos (tabla 4.4). Aun así, en relación con el tiempo transcurrido, se observó que existió un aumento en las cargas contaminantes de  $N_{total}$  (495 t/año) en la fase 4 que resulta en incumplimiento de las metas de reducción.

En último lugar se encuentra el tramo 4, cuyas condiciones de calidad terminan siendo las más precarias del río. Las cargas de  $N_{total}$  han aumentado de tal manera que se alcanzan cargas máximas de hasta 180 989 t/año (figura 4.24). El promedio de las cargas en caudales elevados es de 13 706 t/año, en condiciones secas es de 7966 t/año, mientras que durante el escenario de caudales medios las cargas presentan un promedio de 8443 t/año, un 13 % por encima de la curva de duración, lo cual no demuestra un incumplimiento realmente significativo en los objetivos. Es importante resaltar en este tramo que las cargas registraron una reducción de 2173 t, que equivalen al 26 % de la meta de reducción, lo cual sugiere la implementación de mayores esfuerzos para el logro de la meta establecida.



Continúa



Continúa

#### 4.2.1.5. Fósforo total

Respecto a las cargas de  $P_{total}$  en el río Fucha, es posible observar que presenta junto con SAAM las cargas más reducidas de todos los contaminantes analizados. La máxima carga de  $P_{total}$  que se ha registrado en el río resulta ser de 35 566 t/año, valor reducido en comparación al máximo encontrado en otros parámetros, por ejemplo SST, de 31 652 867 t/año. De esta

manera, en el tramo 1 del río Fucha, como era de esperarse, se encuentran las cargas más bajas de todos los tramos, propias del óptimo estado en el que se encuentra el río en este punto, con cargas que varían de 0,02 a 12 t/año (figura 4.25), cuya razón radica en el hecho de que las concentraciones de  $P_{total}$  durante este tramo, en repetidas ocasiones, resultan ser inferiores al límite de detección (0,04 mg/L).



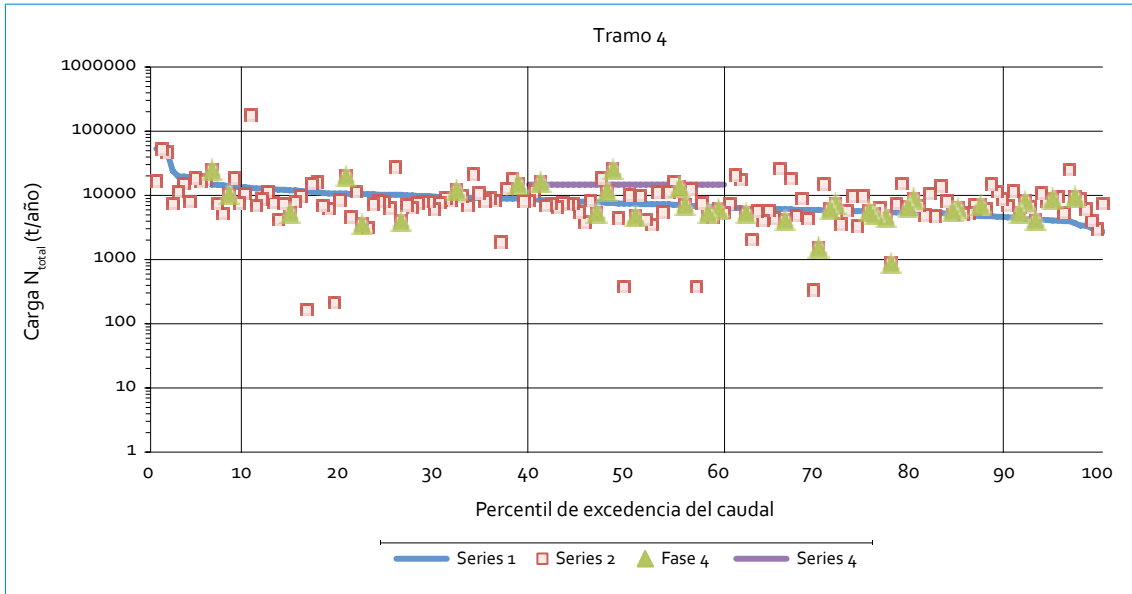
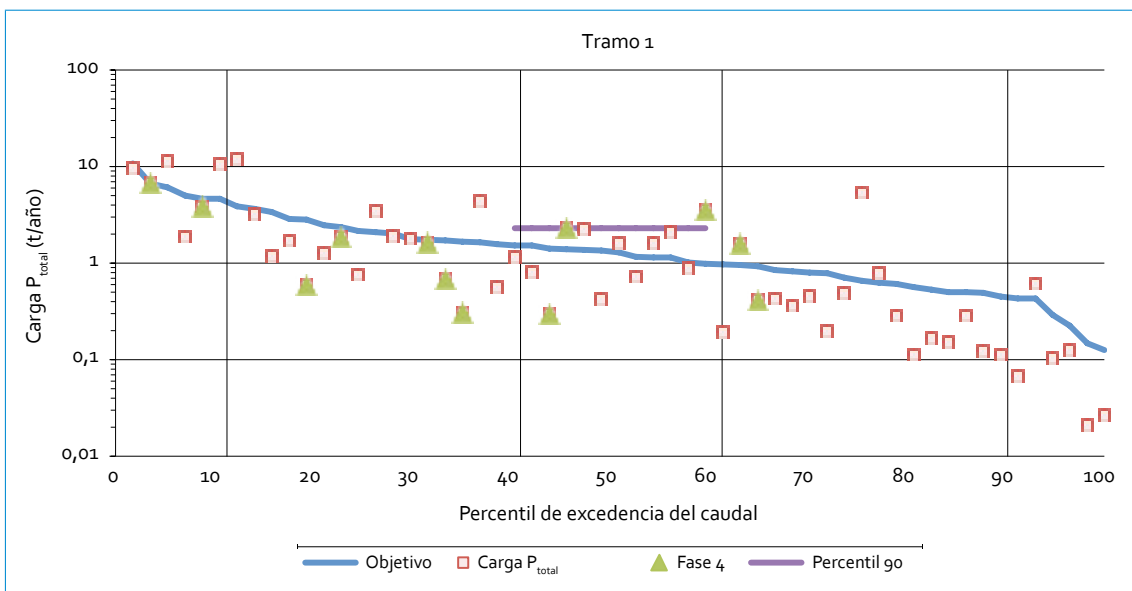


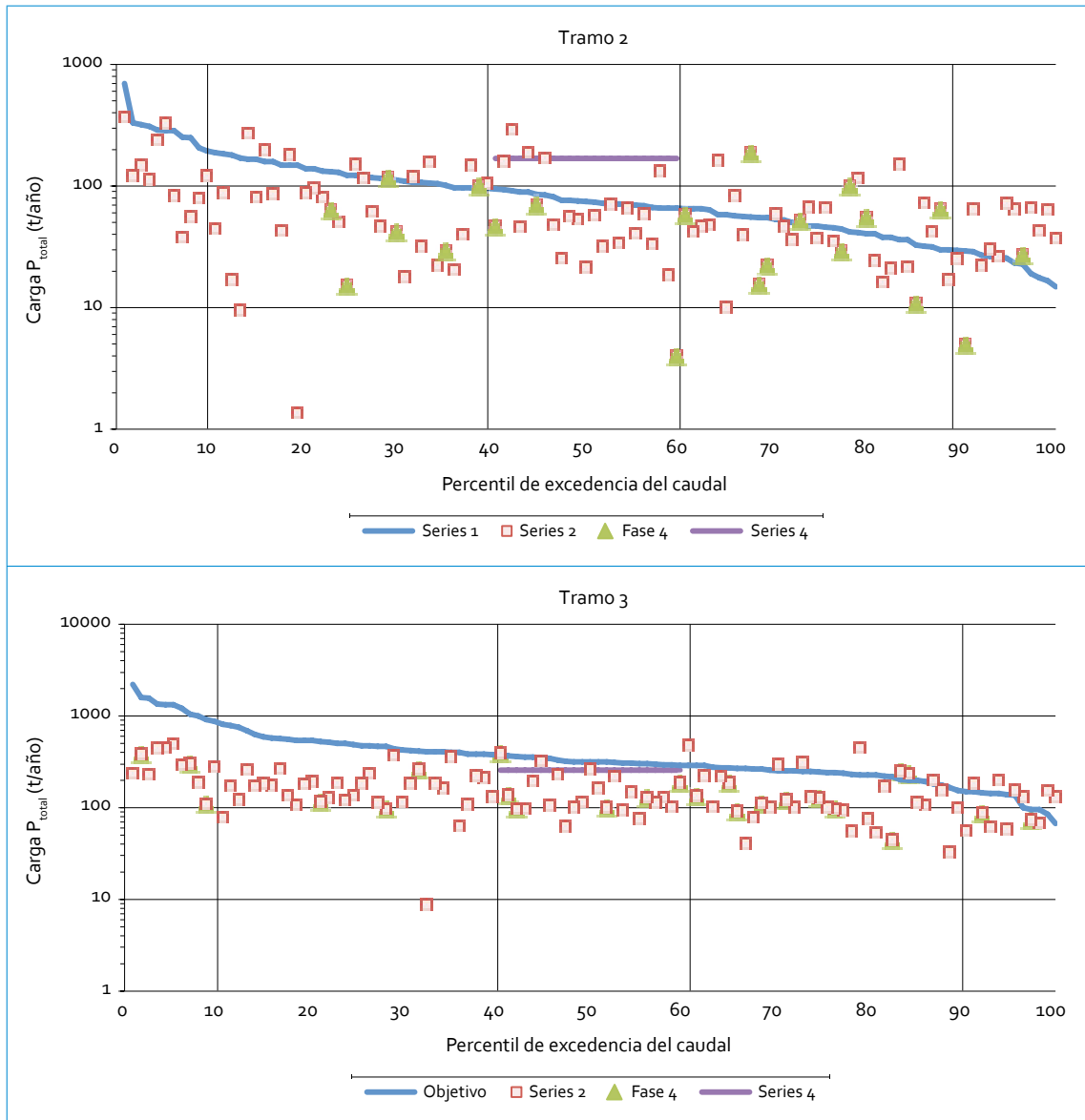
FIGURA 4.24. Curva de duración de carga  $N_{total}$ : río Fucha

En lo que respecta al comportamiento de las cargas en función de la excedencia de caudal, se identifica que durante las condiciones más húmedas el promedio de cargas corresponde a 4 t/año; mientras que en condiciones de caudales medios y bajos (percentil 40-100) el promedio de cargas resulta ser de 1 t/año.

En el tramo 2 del río Fucha las cargas presentan gran variabilidad, con valores entre 1 y 370 t/año. Se observa la tendencia de las cargas a superar en mayor proporción la curva durante las condiciones secas, rango durante el cual las cargas tienen un promedio de 53 t/año. El promedio de cargas aumenta



Continúa



Continúa

proporcionalmente al incremento de caudal; de esta manera, en el rango medio de caudales el promedio aumenta a 75 t/año, y durante condiciones húmedas y de altos caudales aumenta a 99 t/año (tabla 4.5). Lo anterior demuestra un cambio significativo en las cargas de  $P_{total}$  en relación con el tramo 1, que se presenta en consecuencia a los vertimientos de agua residual que a partir de este tramo el río empieza a recibir. Con relación al cambio

de cargas a través del tiempo, las cargas de  $P_{total}$  disminuyeron 74 t para el último periodo (fase 4), que equivale a un cumplimiento del 92 % de las metas de reducción.

Con relación al tramo 3, las cargas de  $P_{total}$  la mayor parte del tiempo evidenciaron cumplimiento de los objetivos de carga. Durante las condiciones de caudal alto, las cargas de  $P_{total}$  (205 t/año) se alejaron significativamente por debajo de la curva de duración y de-



FIGURA 4.25. Curva de duración de carga  $P_{total}$ : río Fucha

TABLA 4.5. Carga  $P_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
$P_{total}$				
Percentil 90 (F1-F <sub>4</sub> )	2,3	169	257	1965
Promedio (F1-F <sub>4</sub> )	1	75	157	1154
Promedio (F <sub>4</sub> )	2	40	176	1270
Carga curva duración (percentil 50)	1	75	315	1491
PMSV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	80	80	1200
Línea base-promedio F <sub>4</sub>	-	74	[-]	835

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

notaron cumplimiento. En las condiciones de caudal medio y bajo, el promedio de las cargas fue similar (144 y 157 t/año); sin embargo, durante el rango de caudales bajos se presentaron varias cargas por encima de la curva de duración. La carga más elevada se presentó en el punto Av. Américas en horas de la madrugada con un valor de 504 t/año,

lo cual refleja la sensibilidad de las curvas 24 horas para la extrapolación de las cargas. En lo referente a las metas de reducción, para el presente tramo se incumplió con lo establecido, pues las cargas aumentaron aunque no en gran proporción, pues el incremento resultó ser de tan solo 4 t/año. En el tramo 4, las cargas de  $P_{total}$  presentaron valores entre 210 y

35 566 t/año, este último valor registrado en el punto de monitoreo Fucha Alameda a las 11:00 p. m.

Las cargas en este tramo tendieron a superar la curva de duración en mayor proporción en las condiciones secas y de caudales medios y bajos. El percentil 90 de las cargas dentro del escenario de caudales medios se alejó un 32 % de la curva de duración, lo cual refleja incumplimiento en algunas ocasiones. Entre la línea base y las cargas presentadas durante la fase 4 se encuentra una reducción en las cargas de  $P_{total}$  que, aunque no cumple en su totalidad con la meta de reducción, sí cumple con el 70 % de lo estipulado.

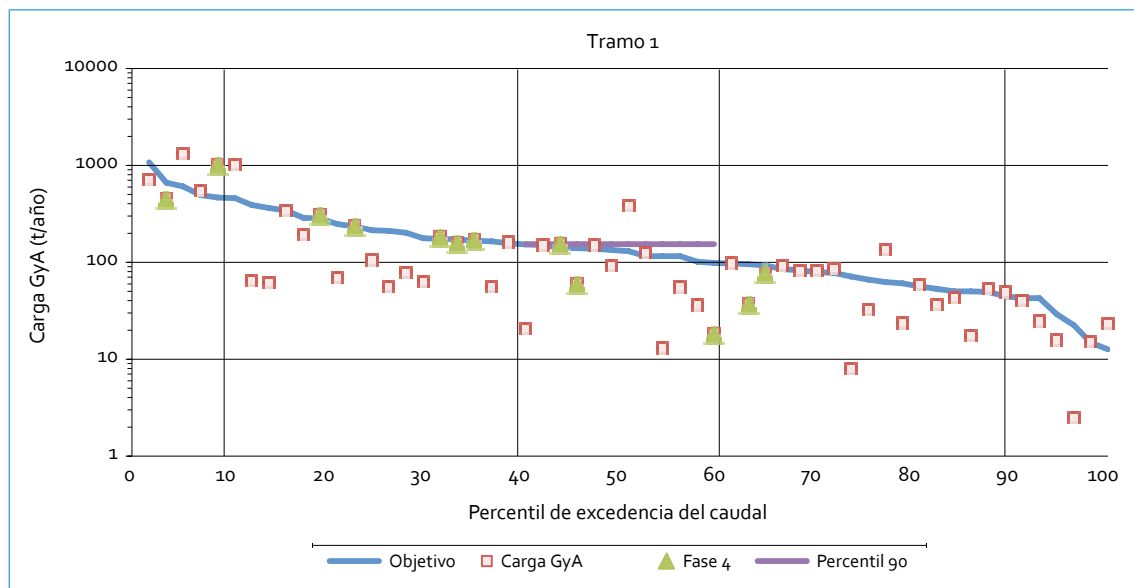
#### 4.2.1.6. Grasas y aceites

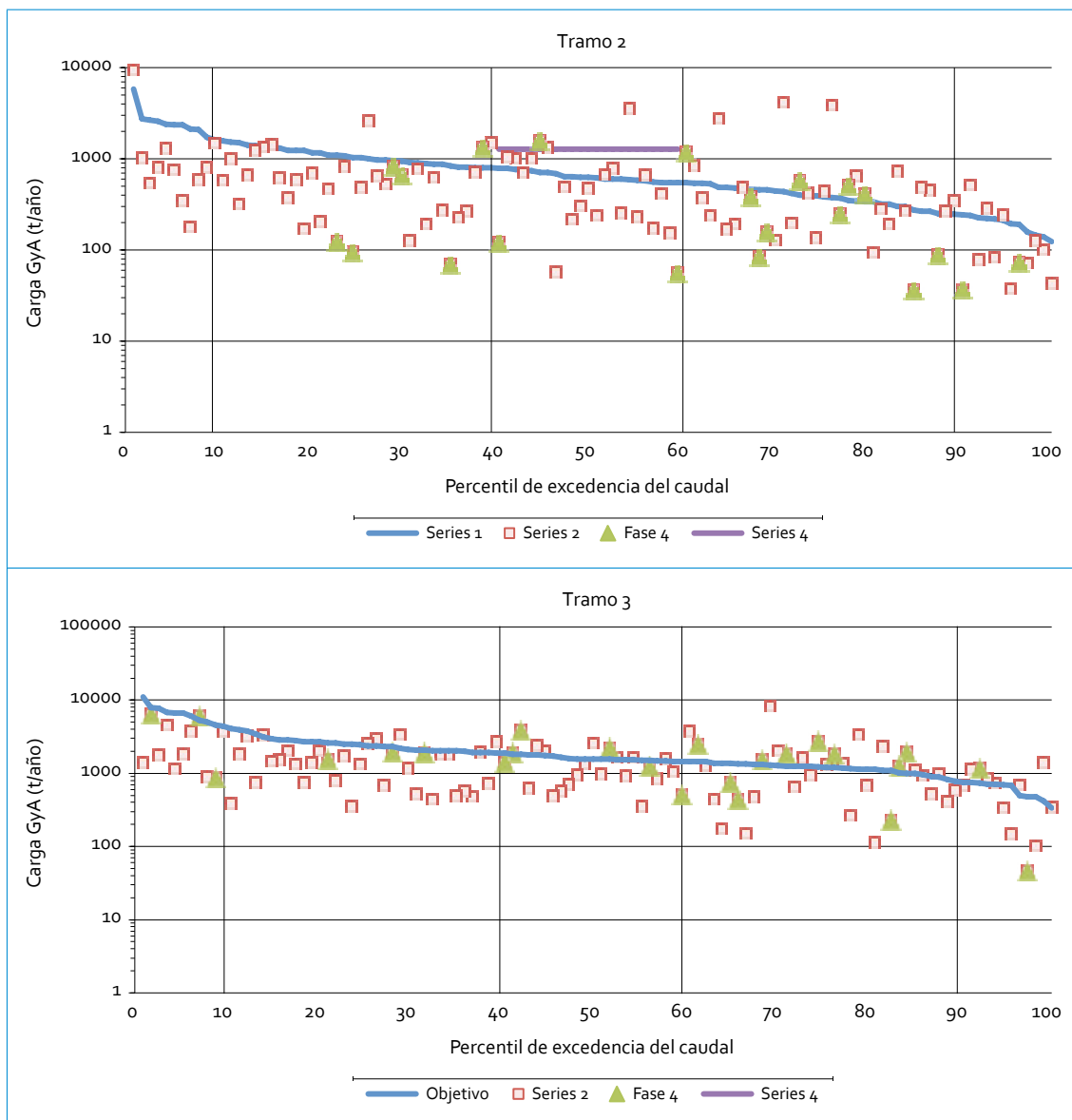
Se observa en la figura 4.26 el cumplimiento de los objetivos de carga en el tramo 1 del río Fucha. Las cargas de GyA se encuentran dentro de un rango de 3-1330 t/año con promedios de 49, 105 y 336 t/año para los percentiles 60-100, 40-60 y 0-60. Respecto a los resulta-

dos obtenidos durante la fase 4 se presenta tendencia hacia los rangos más elevados de caudal (tabla 4.6).

En el tramo 2 del río Fucha se resalta la gran variabilidad de datos de carga, las cuales reflejan una variación de 117 a 9424 t/año. En las condiciones húmedas y más elevadas de caudal, las cargas presentaron un promedio de 888 t/año; mientras que en las condiciones secas y más bajas de caudal el promedio de cargas fue de 513 t/año. En el rango de caudales medios, el promedio y el percentil 90 de las cargas del tramo 2 se encontraron por encima de la curva de duración (tabla 4.6), aunque en el caso específico del percentil 90 este representa el doble de la carga de la curva de duración, lo que refleja incumplimiento en diversas ocasiones de las cargas objetivo con valores extremadamente elevados, como es el caso de la carga registrada en el punto de monitoreo Av. Ferrocarril, donde se alcanzó una carga de GyA de 3615 t/año.

En el tramo 3, las cargas se incrementaron aún más como resultado de los constantes





Continúa

vertimientos al río. Es posible identificar el amplio rango de variación de las cargas de GyA (46-8362 t/año) y cómo estas tienden a superar en mayor proporción la curva de duración entre los escenarios de caudales secos y medios (figura 4.26). De hecho, el percentil 90 de las cargas en rango medio de caudal excede la carga objetivo en un 51%. La carga más elevada se registró en el punto Av. Américas durante la fase 2, mientras que en lo que se refiere a la

fase 4, la carga más elevada alcanzó un valor de 6443 t/año.

Por último, en el tramo 4 las cargas experimentan un aumento realmente significativo. Al comparar los promedios de carga del rango medio de caudales de los tramos 3 y 4, se observa que el promedio de cargas del tramo 4 resulta ser 13 veces el del tramo 3. Además, el rango de cargas es realmente amplio (al variar entre 594 y 3360158 t/año), donde el valor más elevado se

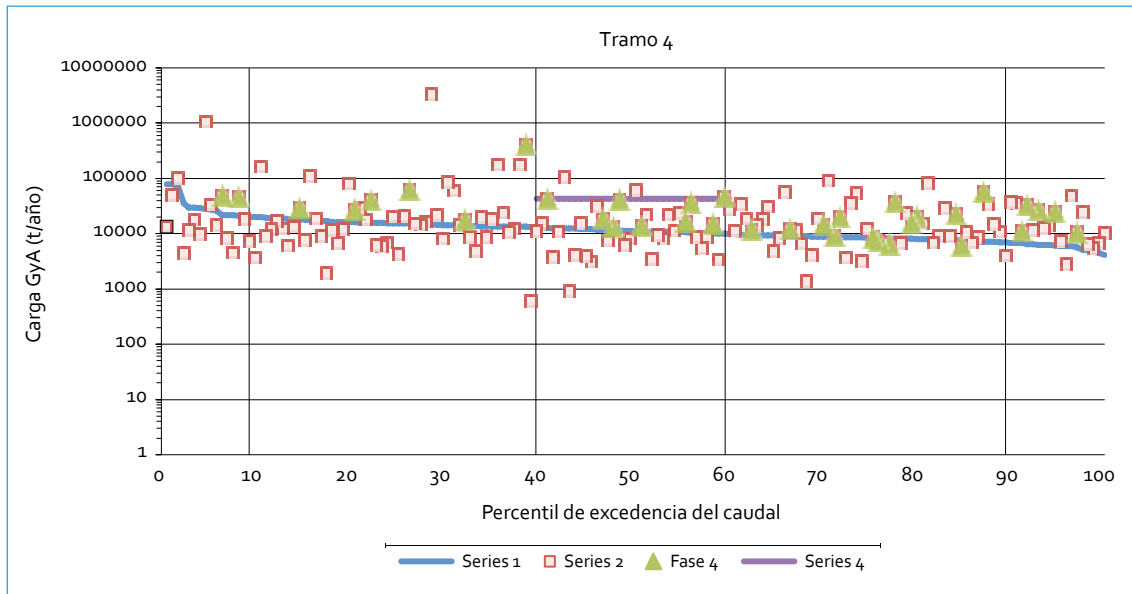


FIGURA 4.26. Curva de duración de carga GyA: río Fucha

TABLA 4.6. Carga GyA (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
GyA				
Percentil 90 (F1-F4)	6,3	329	2231	14177
Promedio (F1-F4)	4,8	251	930	7760
Promedio (F4)	8,1	169	116	8356
Carga curva duración (percentil 50)	9,1	63	401	1422

presenta en el punto Visión Colombia durante la fase 3. En relación con la curva de duración, el percentil 90 (42 512 t/año) dentro del rango de caudales medios es aproximadamente 4 veces el de la carga de la curva de duración (11 184 t/año), lo que implica incumplimiento significativo de las cargas objetivo.

4.2.1.7. SAAM

En el tramo 1 del río Fucha las cargas de SAAM fueron las más bajas de todo el río, pues variaron entre 0,1 y 8 t/año. El promedio de las

cargas fue de 3, 2 y 1 t/año en los percentiles de excedencia de caudal 0-40, 40-60 y 60-100. El percentil 90 de las cargas dentro del rango medio de caudales es de 2,8 t/año, un 60% por debajo de la carga de la curva de duración, lo cual demuestra la óptima calidad de agua del río en su cuenca más alta. En lo que respecta al comportamiento de las cargas de SAAM en el último periodo (fase 4), se puede observar que tendieron a concentrarse en el rango medio de caudales y en las condiciones húmedas y elevadas de caudal, y que resultaron ser las cargas inferiores de todas las fases (tabla 4.7).

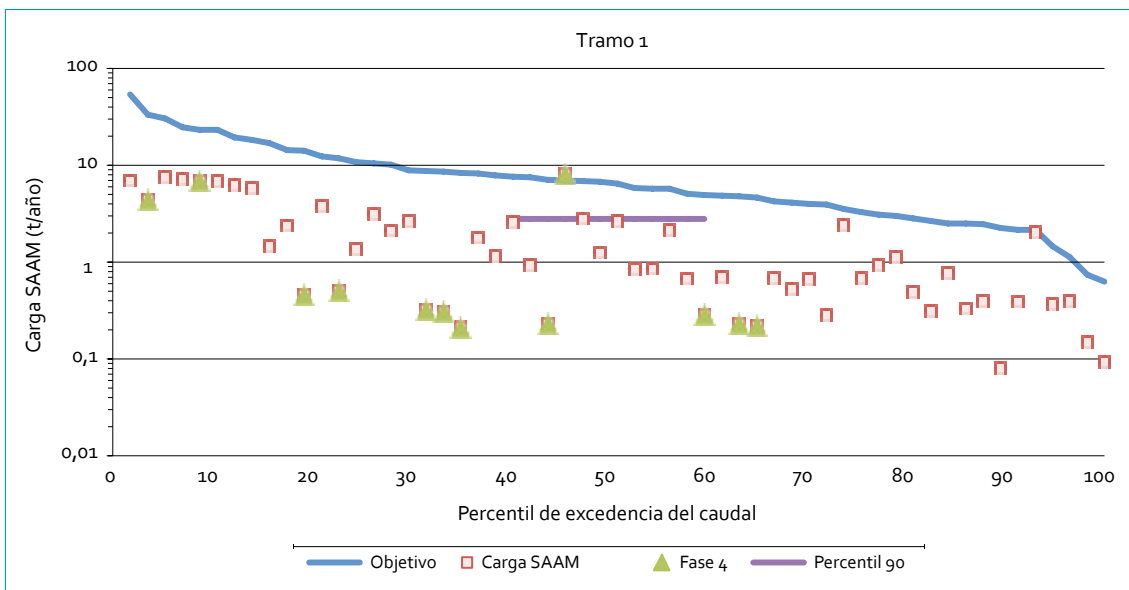
TABLA 4.7. Carga SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Fucha

Parámetro	Río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SAAM				
Percentil 90 (F1-F4)	2,8	158	371	2477
Promedio (F1-F4)	2,0	76	180	1440
Promedio (F4)	3,0	25	98	1220
Carga curva duración (percentil 50)	7,0	75	158	746

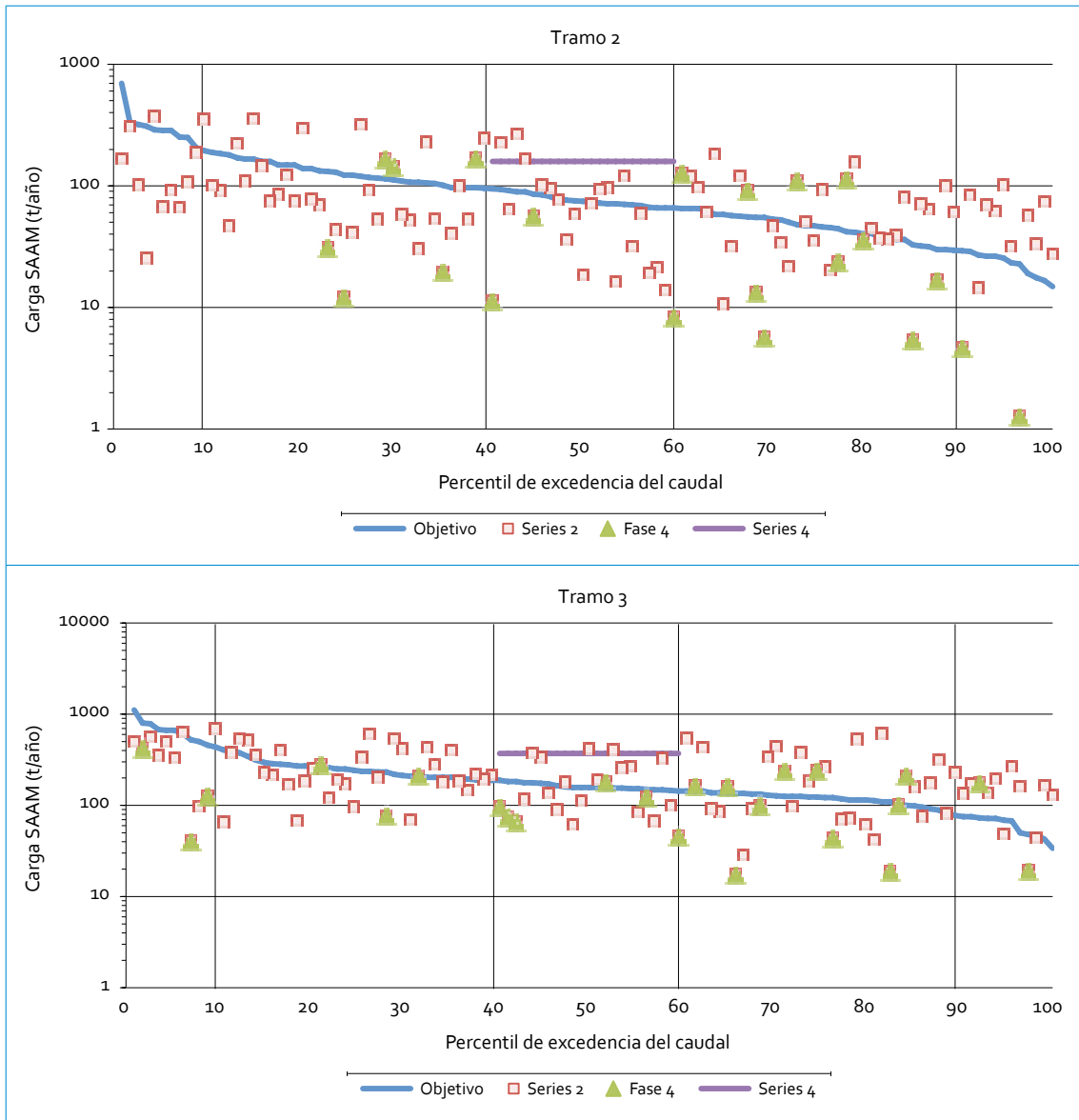
En los tramos 2 y 3 las cargas de SAAM presentan gran variabilidad, pues sus valores oscilan de forma importante (1373 t/año y 17698 t/año). Es posible observar las reiteradas veces en que las cargas superan la curva de duración; en el caso del rango medio de caudales, el percentil 90 de las cargas de ambos tramos resulta ser el doble del de la carga objetivo (figura 4.27), lo que pone de manifiesto el impacto generado por las descargas de ARD una vez el río ingresa en el perímetro urbano.

En lo que respecta al tramo 4, las cargas de SAAM aumentan sustancialmente; el promedio

de cargas resulta ser 8 veces el del tramo 3 en el escenario de caudales medios. Pero las cargas no solo presentan valores elevados, sino que incumplen reiteradamente con los objetivos (figura 4.27), lo cual se ve reflejado por medio del percentil 90, cuyo valor triplica la carga objetivo. En este tramo la carga más elevada encontrada corresponde a 40 028 t/año; esta se registró en el punto Fucha Alameda durante la fase 2 en horas de la madrugada, lo cual evidencia la sensibilidad de las curvas 24 horas para la extrapolación de las cargas.



Continúa



Continúa

### 4.2. Calidad del agua (wqI)

El tramo 1 del río Fucha está compuesto únicamente por un punto de monitoreo (El Delirio). Este registró un total de 97 datos, de los cuales 7 no alcanzaron los objetivos de calidad: 6 datos en el parámetro fósforo total y 1 en el parámetro pH (tabla 4.8). A partir de la estimación del índice de calidad del agua (wqI) se

pudo determinar que la calidad de este tramo es **buena**.

TABLA 4.8. wqI río Fucha: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
OD	0	F1	20,00
DBO <sub>5</sub>	0	F2	7,20



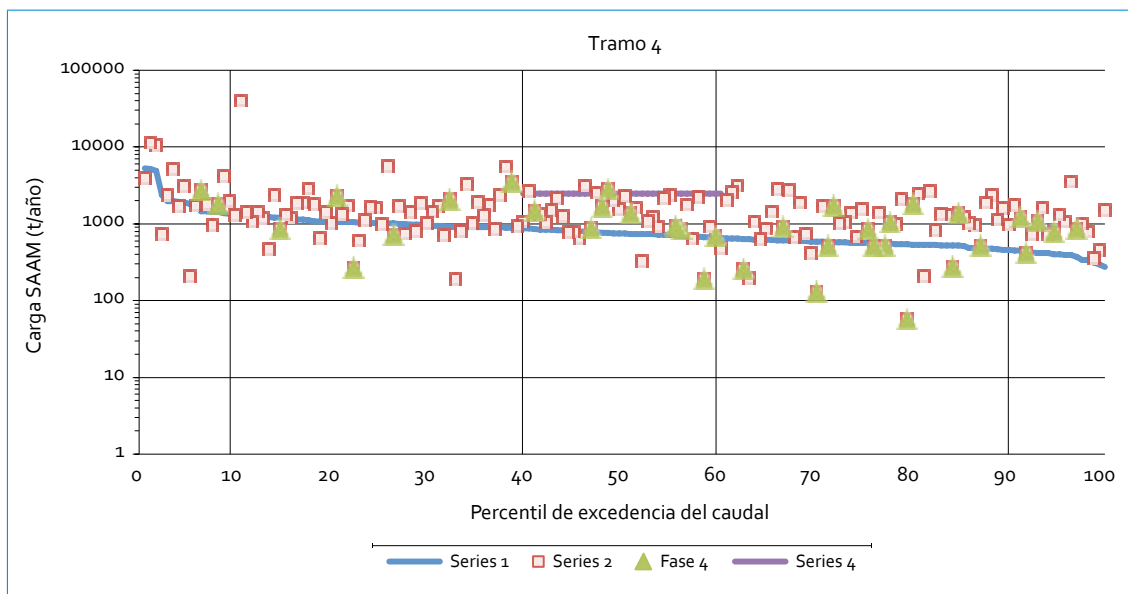


FIGURA 4.27. Curva de duración de carga SAAM: río Fucha

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
DQO	0	NSE	0,03
N <sub>total</sub>	0	F3	2,72
P <sub>total</sub>	6	WQI	87,62
SST	0		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	1		
SAAM	0		

Al comparar los valores obtenidos de WQI (2012-2013) con los valores anuales dinámicos anteriores, se observa un comportamiento similar en la calidad del agua en este tramo a través del tiempo, pues en los periodos 2011-2012 y 2009-2010 el valor del WQI fue el mismo del presente año (88); mientras que el valor reportado en el periodo 2010-2011 correspondió a 94. Lo anterior evidencia la dinámica natural

que presenta este tramo en ausencia de alteraciones provocadas por fuentes antropogénicas.

El tramo 2 de este río se compone por dos puntos (Carrera 7ª y Av. Ferrocarril). Se generaron 203 datos, de los cuales 60 (30 %) no alcanzaron los objetivos de calidad (tabla 4.9). Los parámetros más críticos fueron SST y OD, donde el 65 % y el 50 % de los datos incumplieron con los objetivos de calidad, respectivamente. Es importante resaltar la diferencia de calidad entre los puntos de este tramo, ya que Carrera 7ª supera sustancialmente la de Av. Ferrocarril; en el punto Av. Ferrocarril el 53 % de los datos sobrepasó lo establecido en la Resolución 5731 de 2008, a diferencia del punto Carrera 7ª, donde solo el 5 % de los datos incumplió lo estipulado.

El WQI para este tramo fue de 41, equivalente a una calidad **pobre**. Este resultado refleja una mejoría en relación con el WQI obtenido en el periodo 2011-2012 (31), que se debe principalmente al progreso que para este periodo ha presentado el punto Carrera 7ª, el cual pasó de

tener un 33% de los datos por fuera de los objetivos de calidad en el periodo 2011-2012, a un 5% en el actual. Así mismo, cabe resaltar que, aun cuando este tramo durante las 4 fases de monitoreo se ha mantenido en calidad pobre, el presente periodo ha sido el que ha arrojado los mejores resultados y se ha acercado a la categoría marginal. Es importante resaltar el cambio drástico en la calidad de agua entre el tramo 1 (buena) y el tramo 2 (pobre), que se presenta sobre todo por la entrada del río Fucha al perímetro urbano y que trae consigo la descarga de ARD.

TABLA 4.9. WQI río Fucha: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
OD	9	F1	90,00
DBO <sub>5</sub>	5	F2	29,60
DQO	7	NSE	0,56
N <sub>total</sub>	3	F3	36,06
P <sub>total</sub>	4	WQI	41,48
SST	13		
Grasas y Aceites	5		
Coliformes fecales	8		
pH	0		
SAAM	6		

En el tramo 3 del río Fucha existen dos puntos (Av. Américas y Av. Boyacá). Este tramo cuenta para el presente periodo con 190 datos, de los cuales 51 (27%) no se encuentran dentro de los objetivos de calidad. En Av. Américas y Av. Boyacá el 29% y el 24% de los datos incumplen el objetivo de calidad, lo que refleja un comportamiento similar de la calidad del agua en ambos puntos. Todos los parámetros, a diferencia de DBO<sub>5</sub> y pH, no

alcanzaron los objetivos de calidad establecidos, siendo los más críticos coliformes fecales (88% incumple), GyA (45% incumple) y N<sub>total</sub> (45% incumple) (tabla 4.10). GyA supera el objetivo de calidad de 40 mg/L con rangos de valores de 42 a 84 mg/L y N<sub>total</sub> con valores de 41 a 70 mg/L, de igual manera con un objetivo de calidad de 40 mg/L.

El valor WQI del tramo 3 fue de 51, correspondiente a una calidad de agua marginal. El WQI anual dinámico perteneciente a los periodos 2009-2010, 2010-2011 y 2011-2012 equivalía a 46, 56 y 57, respectivamente, que de igual manera se encontraban en la categoría marginal y reflejaban una mejoría a través del tiempo; pero con los resultados actuales se evidencia una disminución en la calidad del agua. Los parámetros que redujeron notoriamente el porcentaje de cumplimiento de la Resolución 5731 de 2008 entre el periodo 2011-2012 y 2012-2013 fueron exactamente los parámetros críticos del WQI actual, siendo el más crítico coliformes fecales, que aumentó del 67% al 88% el incumplimiento (tabla 4.10).

TABLA 4.10. WQI río Fucha: tramo 3

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
OD	4	F1	80,00
DBO <sub>5</sub>	0	F2	26,08
DQO	6	NSE	0,08
N <sub>total</sub>	9	F3	7,36
P <sub>total</sub>	1	WQI	51,10
SST	4		
Grasas y Aceites	9		
Coliformes fecales	14		
pH	0		
SAAM	4		

Durante todos los años de monitoreo se ha visto que la categoría del wqi sube del tramo 2 al tramo 3, lo cual no refleja un mejoramiento de la calidad del agua, sino un efecto de la variación de los objetivos de calidad en el tramo 3. Se ha podido evidenciar que los diferentes registros obtenidos en los puntos Av. Ferrocarril y Av. Américas presentan variaciones muy pequeñas (no más del 25 %), por lo que el aumento del wqi se refiere a que los objetivos son menos exigentes en el tramo 3, por ejemplo, el objetivo de calidad para  $\text{DBO}_5$  pasa de 50 mg/L en el tramo 2 a 250 mg/L en el tramo 3 (por el orden del 80 %).

El tramo 4 de este río está conformado por tres puntos (Visión Colombia, Zona Franca y Fucha con Alameda). El cálculo del wqi se realizó con un total de 267 datos, de los cuales 167 (63 %) excedieron los objetivos de calidad (tabla 4.11). En Visión Colombia, Zona Franca y Fucha con Alameda el 60 %, el 62 % y el 65 % de los datos no cumplieron lo establecido en la Resolución 5731 de 2008, lo que demuestra una homogeneidad en las condiciones de cada uno de los puntos. Del total de parámetros monitoreados, el único que alcanzó en su totalidad el objetivo de calidad fue el pH, mientras que de los parámetros restantes los más críticos fueron coliformes fecales (100 % incumplió), GyA (92 % incumplió) y  $N_{\text{total}}$  (88 % incumplió). Los valores de coliformes fecales oscilan entre  $9,1 \times 10^6$  y  $9,5 \times 10^7$  NMP/100 mL y superaron el objetivo de calidad de  $1 \times 10^6$  NMP/100mL; en GyA, el objetivo de calidad corresponde a 60 mg/L y el rango de excedencia varía de 63 a 334 mg/L; y por último, en el caso de  $N_{\text{total}}$ , el objetivo de calidad es 40 mg/L y se encuentra con valores que exceden el objetivo de 40,3 a 101 mg/L.

TABLA 4.11. WQI río Fucha: tramo 4

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
OD	18	F1	90,00
$\text{DBO}_5$	9	F2	62,50
DQO	24	NSE	0,41
$N_{\text{total}}$	22	F3	29,19
$P_{\text{total}}$	8	WQI	34,51
SST	17		
Grasas y Aceites	24		
Coliformes fecales	23		
pH	0		
SAAM	22		

El wqi para el tramo 4 resultó ser de 35, equivalente a una calidad **pobre**. En comparación con los wqi obtenidos en las campañas 2009-2010 (35), 2010-2011 (42) y 2011-2012 (37), se evidencia una disminución en la calidad del agua. En general, todos los parámetros—a excepción de OD y SAAM—aumentaron su porcentaje de incumplimiento de los objetivos de calidad con respecto al periodo 2011-2012. El parámetro más crítico fue GyA, que aumentó en un 33 % el incumplimiento. De igual manera, en relación con la calidad del tramo 3, es indudable la reducción en la calidad del río, que pasa de **marginal** a **pobre**. La mejoría no ha tenido lugar en este tramo, debido a la gran cantidad de carga contaminante que recibe, proveniente de interceptores como Fucha, Boyacá, del Sur y Kennedy, y del canal San Francisco.

A continuación se presenta el mapa de calidad para el río Fucha.

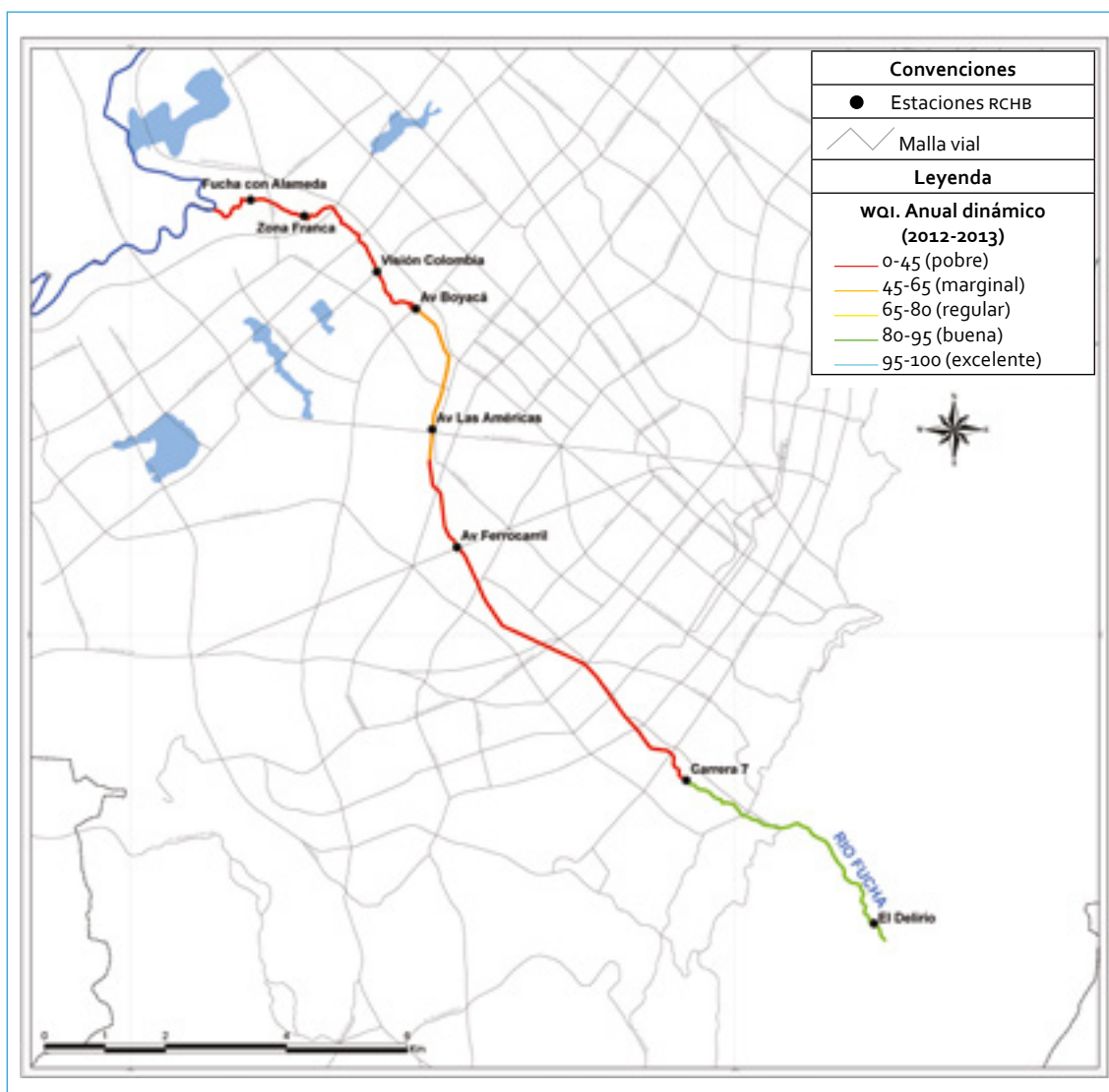


FIGURA 4.28. Mapa de calidad: río Fucha

# 5. RÍO TUNJUELO

## 5.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico

### 5.1.1. Validación de datos: diagramas de cajas

#### 5.1.1.1. pH

La figura 5.1 presenta el comportamiento del pH en el río Tunjuelo (cuenca alta, media y baja) durante el periodo comprendido entre 2009 y 2013. Durante este periodo el pH osciló en un rango de 5,5 a 11,5 unidades. La cuen-

ca alta (Regadera y UAN) tuvo valores de pH entre 6 y 8 unidades; entre tanto las cuencas media (Yomasa, Doña Juana, Barrio México y San Benito) y baja (Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón), valores entre 6,5 y 11 unidades. Se observó que los valores más bajos de pH se encontraron en la cuenca alta mientras que los valores más altos se encontraron en la cuenca media.

Teniendo en cuenta la variación de pH en el tiempo, se observó que durante el periodo enero de 2010-abril de 2012 en la cuenca alta los valores de pH se dispersaron en un rango

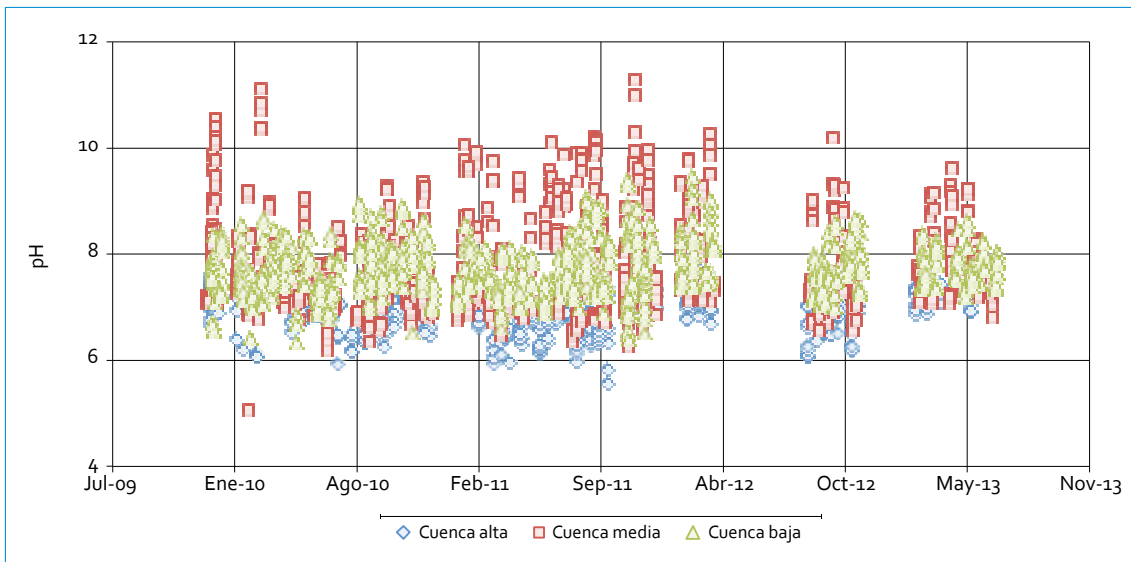


FIGURA 5.1. Perfil de pH: río Tunjuelo

de 6-7,5 unidades; mientras que durante el periodo octubre de 2012-mayo de 2013 los valores de pH se concentraron en valores similares (rango de 6-8 unidades). Este mismo comportamiento se observó en las cuencas media y baja (véase figura 5.1).

#### 5.1.1.2. Conductividad

En la cuenca alta (La Regadera y UAN), la conductividad se encontró entre un rango de 20-100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , donde los valores más altos se registraron en los primeros semestres de 2010 y 2011 (figura 5.2). Por otro lado, las conductividades en la cuenca media fueron más variables (30-700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), reflejo de la calidad del agua afectada por la descarga de aguas residuales. En cuanto a la cuenca baja, los valores de conductividad se incrementaron sustancialmente, ya que se encontraron valores en un rango de 100-2013  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En estos puntos se observa el aporte de aguas residuales, sobre todo en el Interceptor de Tunjuelo Medio. Los valores

en las tres cuencas han sido constantes a lo largo del tiempo.

#### 5.1.1.3. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en la cuenca alta estuvo entre 1,8 y 10,8 mg/L; los valores más bajos (1,8 y 0,1 mg/L) se reportaron únicamente en los meses de enero y febrero de 2010. Para el resto del periodo los valores se concentraron en el rango de 6,8 mg/L y ello evidencia la buena calidad de agua en estos puntos de la cuenca alta. En la cuenca media se registraron valores de oxígeno disuelto con una alta variación (rango de 0,05 a 8,7 mg/L). Aunque existieron cifras similares a las encontradas en la cuenca alta, siempre se presentó una tendencia a la disminución, debido al número de descargas residuales en los puntos muestreados en esta parte del río. En cuanto a la cuenca baja, se hallaron valores bajos de oxígeno disuelto entre 0,05 y 4,98 mg/L. En comparación con la cuenca media, hubo una disminución de

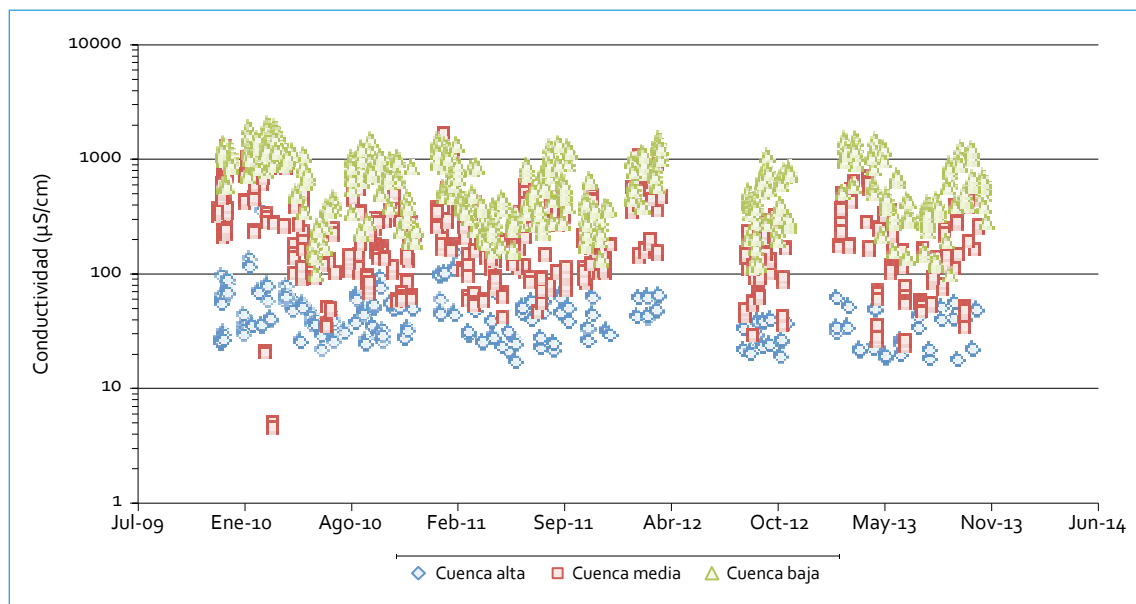


FIGURA 5.2. Perfil de conductividad: río Tunjuelo

aproximadamente el 50 %. Estos valores evidencian el incremento de materia orgánica en descomposición, debido al alto número de vertimientos en estos puntos de la cuenca baja (figura 5.3).

#### 5.1.1.4. $DBO_5$

En el tramo 1, la mayoría de los valores de demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) estuvieron por debajo del objetivo de calidad y solo para el periodo S2-2009 y S1-2010 se encontraron algunos por encima (figura 5.4). Las concentraciones para este tramo fueron constantes (medianas = 1-3 mg/L), lo que refleja buenas condiciones en la calidad en el agua. En el tramo 2 (Yomasa, Doña Juana) se hallaron concentraciones más altas de  $DBO_5$  y mayor variabilidad de los datos, con un rango amplio de medianas de 4-50 mg/L. En comparación con el tramo 1, se aprecia que el río se empieza a deteriorar, debido a las descargas de aguas residuales. Las concentraciones más altas se encontraron en los periodos S2-2009

y S1-2012, con medianas de 50 y 26 mg/L; los valores más bajos, en los periodos S2-2012 y S1-2013, con medianas de 4 y 6 mg/L. Solo en S2-2009 y S1-2012 se detectaron valores por encima del objetivo de calidad.

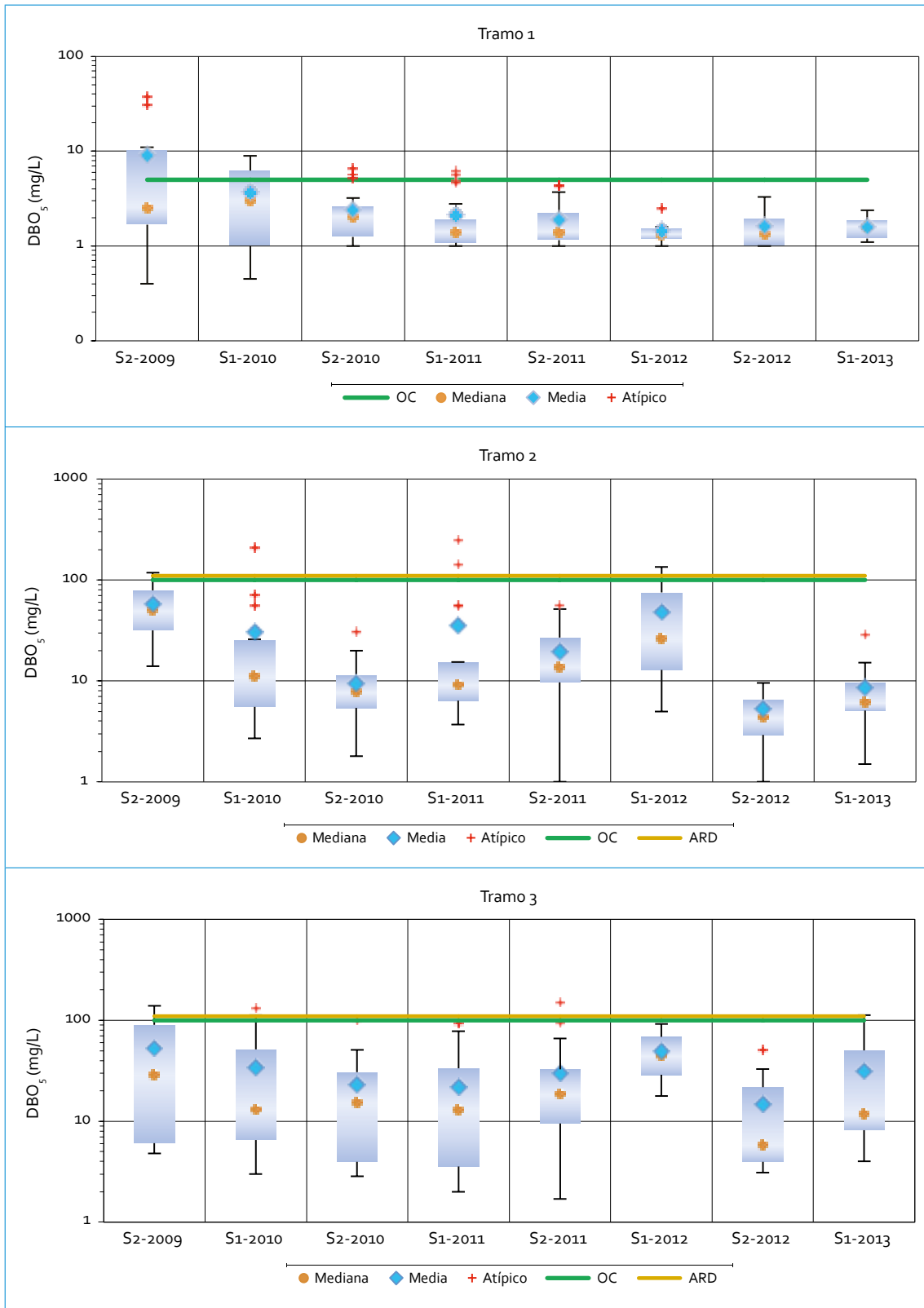
En cuanto al tramo 3, los valores de  $DBO_5$  fueron similares a los del tramo 2, ya que se encontraron concentraciones con un rango de medianas de 6-45 mg/L; en ninguno de los periodos monitoreados hubo valores que sobrepasaran el objetivo de calidad. Con respecto al tramo 4, las concentraciones de  $DBO_5$  aumentaron considerablemente con medianas en un rango de 59 a 241 mg/L. Solo en el periodo S2-2009 se hallaron valores que superaron el objetivo de calidad; sin embargo, en todos los periodos hay valores de  $DBO_5$  superiores a los encontrados en un agua residual doméstica diluida (ARD).

#### 5.1.1.5. $DQO$

La figura 5.5 muestra las concentraciones de demanda química de oxígeno ( $DQO$ ) en los



FIGURA 5.3. Perfil de oxígeno disuelto: río Tunjuelo





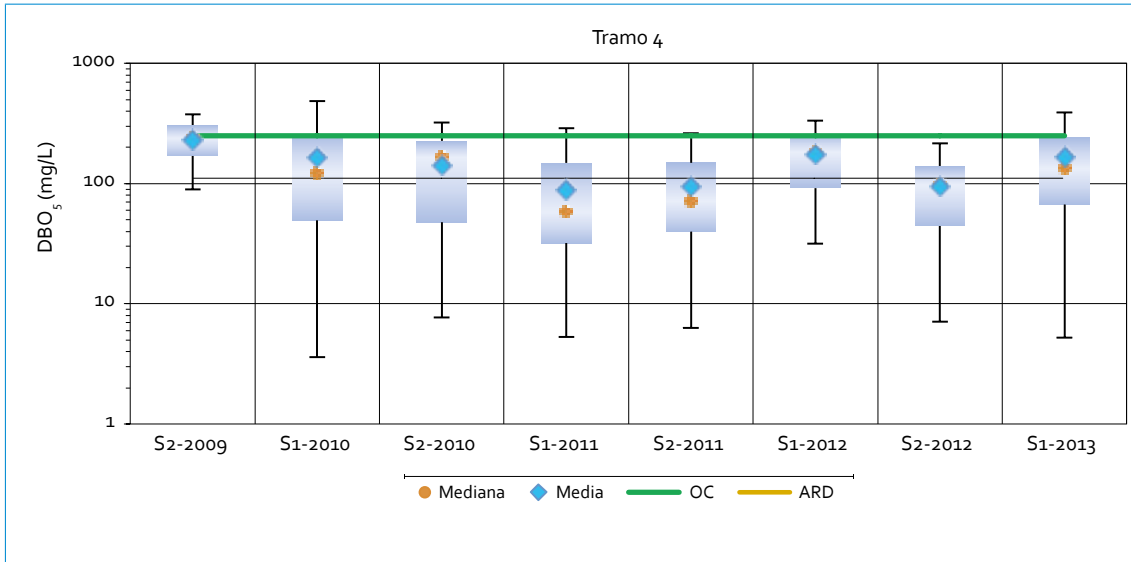
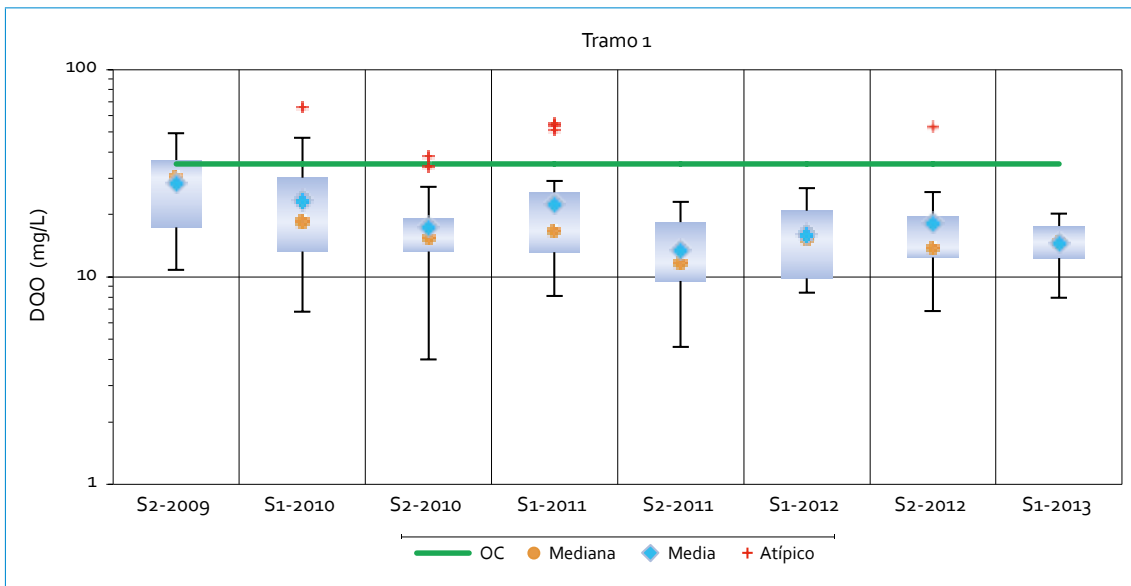


FIGURA 5.4. Perfil de DBO<sub>5</sub>: río Tunjuelo

cuatro tramos del río Tunjuelo. En el tramo 1 se registraron las cantidades más bajas de DBO en el río, al variar en un rango de medianas de 12 a 30 mg/L. Únicamente en los periodos S2-2009 y S1-2010 se presentaron algunos valores que superaron el objetivo de calidad; para los demás periodos las concentraciones

de DBO fueron bajas y constantes, y ello refleja la buena calidad de agua en este tramo. En cuanto al tramo 2, las concentraciones aumentaron notablemente en comparación con el tramo 1 (medianas = 58-222 mg/L), lo cual evidencia la afectación sobre la calidad del agua, debido a las primeras descargas de aguas



Continúa

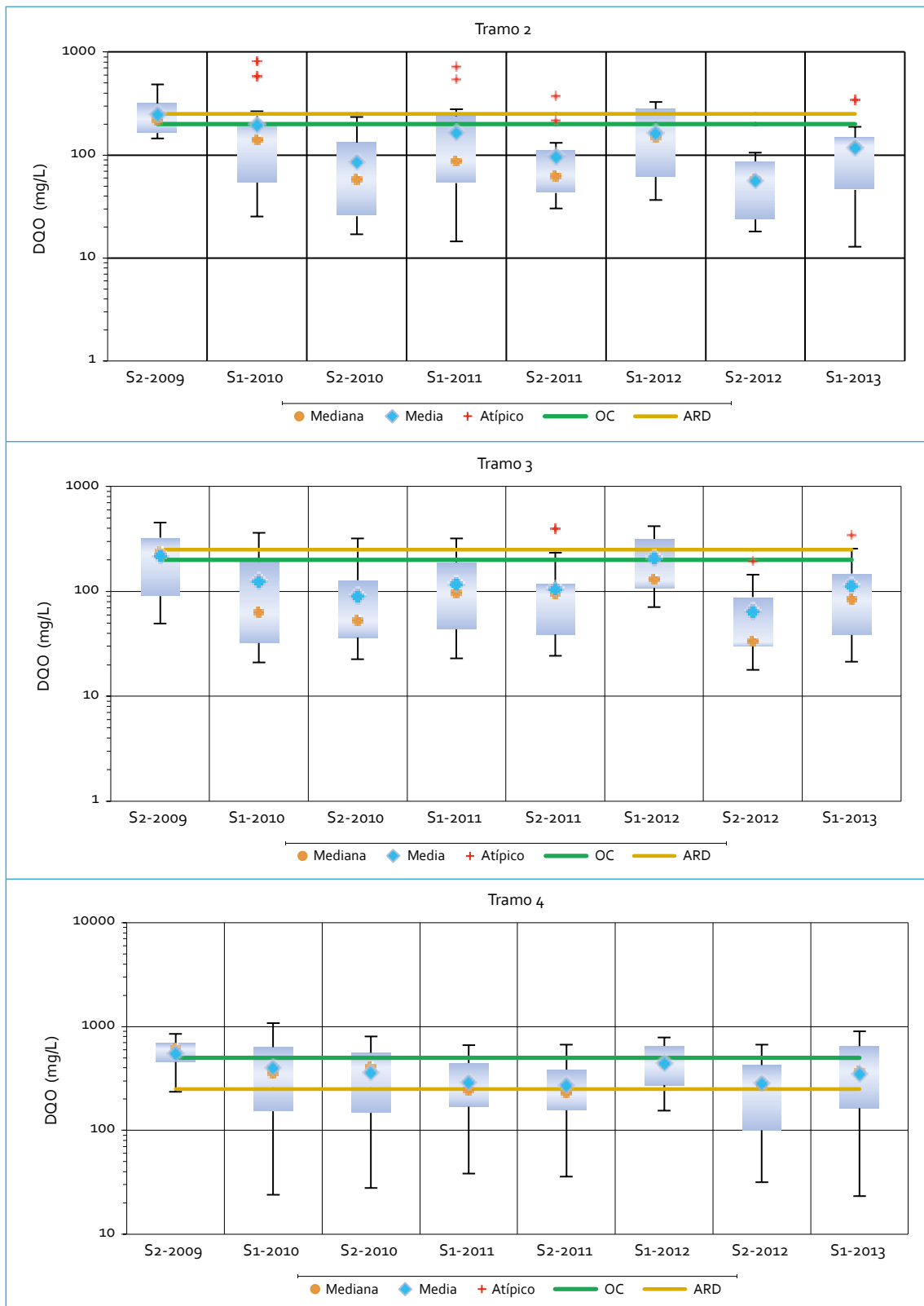


FIGURA 5.5. Perfil de DQO: río Tunjuelo

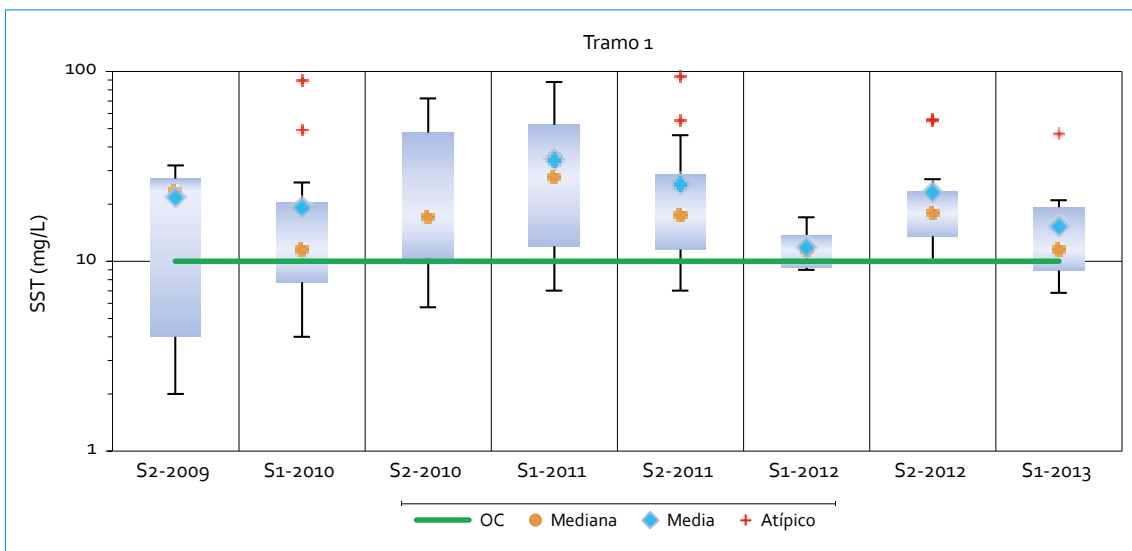
residuales sobre el río. Se observó que de los 8 semestres evaluados 3 (S2-2009, S1-2011 y S1-2012) presentaron valores superiores al objetivo de calidad. El periodo más crítico estuvo en el lapso S2-2009, con una mediana de 220 mg/L, la cual superó el objetivo de calidad y se acercó a valores similares encontrados en un ARD.

En el tramo 3, las concentraciones de DQO fueron similares a las encontradas en el tramo 2, con medianas entre 34 y 240 mg/L. Los periodos con las concentraciones más críticas fueron S2-2009 y S1-2012, en los cuales se superó el objetivo de calidad. En cuanto al tramo 4 (Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón) se midieron las concentraciones más altas de DQO, con un rango de medianas de 229 a 615 mg/L; para todos los periodos analizados las concentraciones de DQO sobrepasaron el objetivo de calidad y de ARD. El periodo más crítico del tramo 4 se dio en S2-2009, teniendo en cuenta que la mediana sobrepasó el objetivo de calidad con un valor de 615 mg/L.

5.1.1.6. SST

En Regadera y UAN se observaron concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) con medianas de 12 a 24 mg/L, superiores al objetivo de calidad. Estos valores están relacionados con la apertura de las compuertas en el embalse La Regadera, que hace que todas las partículas que se encuentran en el fondo del río se resuspendan y afecten las concentraciones de SST. Así mismo, el tramo 2 también se ve afectado por esta apertura y por las descargas de aguas residuales que comienzan a hacerse evidentes en la cantidad de SST. Como se puede observar en la figura 5.6, las medianas en el tramo 2 están en un rango de 153 a 1367 mg/L, que sobrepasan el objetivo de calidad y se asemejan a lo encontrado en ARD. En este tramo se encuentran las concentraciones más altas de SST, con los periodos más críticos en S2-2009, S1-2012 y S1-2013, con máximas de 5295, 2587 y 1210 mg/L.

En cuanto al tramo 3, se presentó un descenso en las concentraciones de SST. Las medianas encontradas estuvieron en el rango de



Continúa

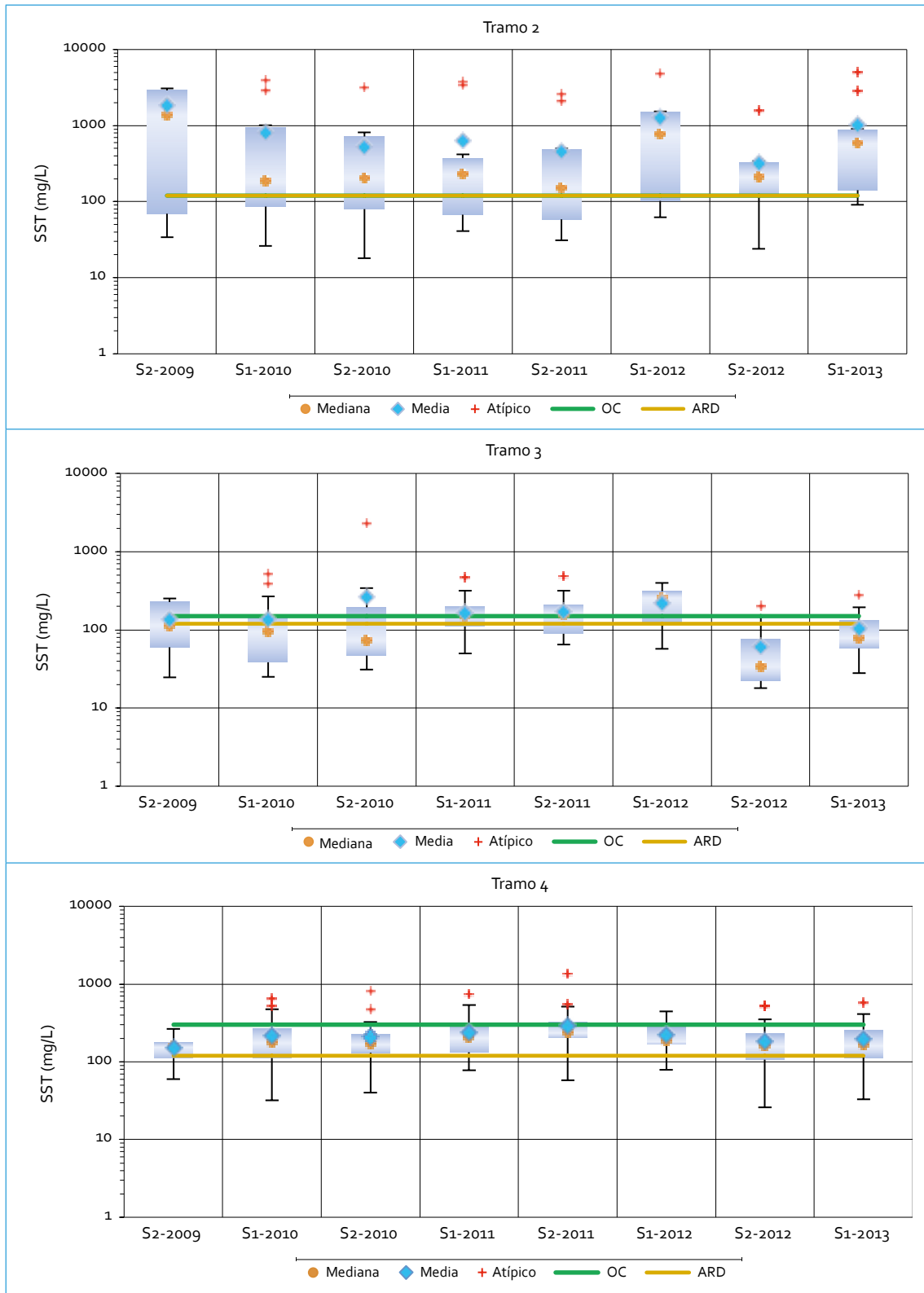


FIGURA 5.6. Perfil de SST: río Tunjuelo

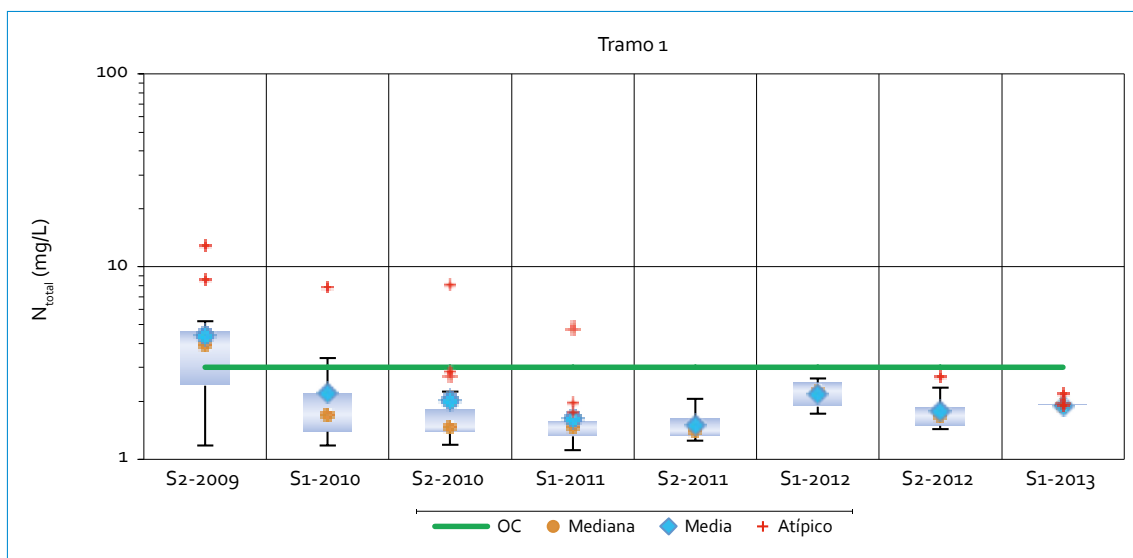
34 a 160 mg/L, lo cual evidencia que las lluvias —junto con el aumento de caudal— influyen en el arrastre de sólidos. Se pudo observar que en 3 (S1-2011, S2-2011 y S1-2012) de los 8 semestres monitoreados los valores superaron el objetivo de calidad con medianas de 151, 160 y 257 mg/L. En Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón las concentraciones de SST tuvieron un leve aumento, con un rango de medianas de 159 a 242 mg/L. Aunque en ningún periodo analizado las cantidades de SST sobrepasaron el objetivo de calidad, sí superan los valores encontrados en un ARD diluida.

#### 5.1.1.7. Nitrógeno

En el tramo 1 se encontraron valores de nitrógeno total ( $N_{total}$ ) en un rango de medianas de 1,41 a 3,92 mg/L. A excepción del periodo S2-2009, las concentraciones de  $N_{total}$  no sobrepasaron el objetivo de calidad (figura 5.7). En Yomasa y Doña Juana se registró una variación significativa en las concentraciones de  $N_{total}$  con un rango de medianas de 3,1 a

21 mg/L. Se presentaron fluctuaciones en los periodos analizados: el lapso con la concentración más alta se observó en S1-2010, cuando el  $N_{total}$  máximo fue de 69 mg/L; mientras que el lapso con la concentración más baja fue S2-2011, con un máximo de 7,2 mg/L. De los 8 periodos analizados, 3 (S2-2009, S1-2010 y S1-2012) tuvieron valores que sobrepasaron el objetivo de calidad y se asemejaron a un ARD típica. El comportamiento en este tramo evidencia la contaminación del agua, producto de las primeras descargas en el río.

En el tramo 3, al igual que en el tramo 2, hubo variaciones en las concentraciones y se encontraron medianas en un rango de 5,8 a 17,4 mg/L. En 4 periodos (S1-2009, S1-2010, S1-2012 y S1-2013) se hallaron valores que sobrepasaron el objetivo de calidad. En el tramo final, las concentraciones de  $N_{total}$  aumentaron considerablemente respecto al tramo 3, con medianas de 18 a 65 mg/L. Los periodos más críticos fueron S2-2009 y S1-2012, cuando las medianas fueron 65 y 57 mg/L. En 3 periodos monitoreados (S1-2009, S1-2012 y S1-2013) los valores estuvieron por encima del objetivo de



Continúa

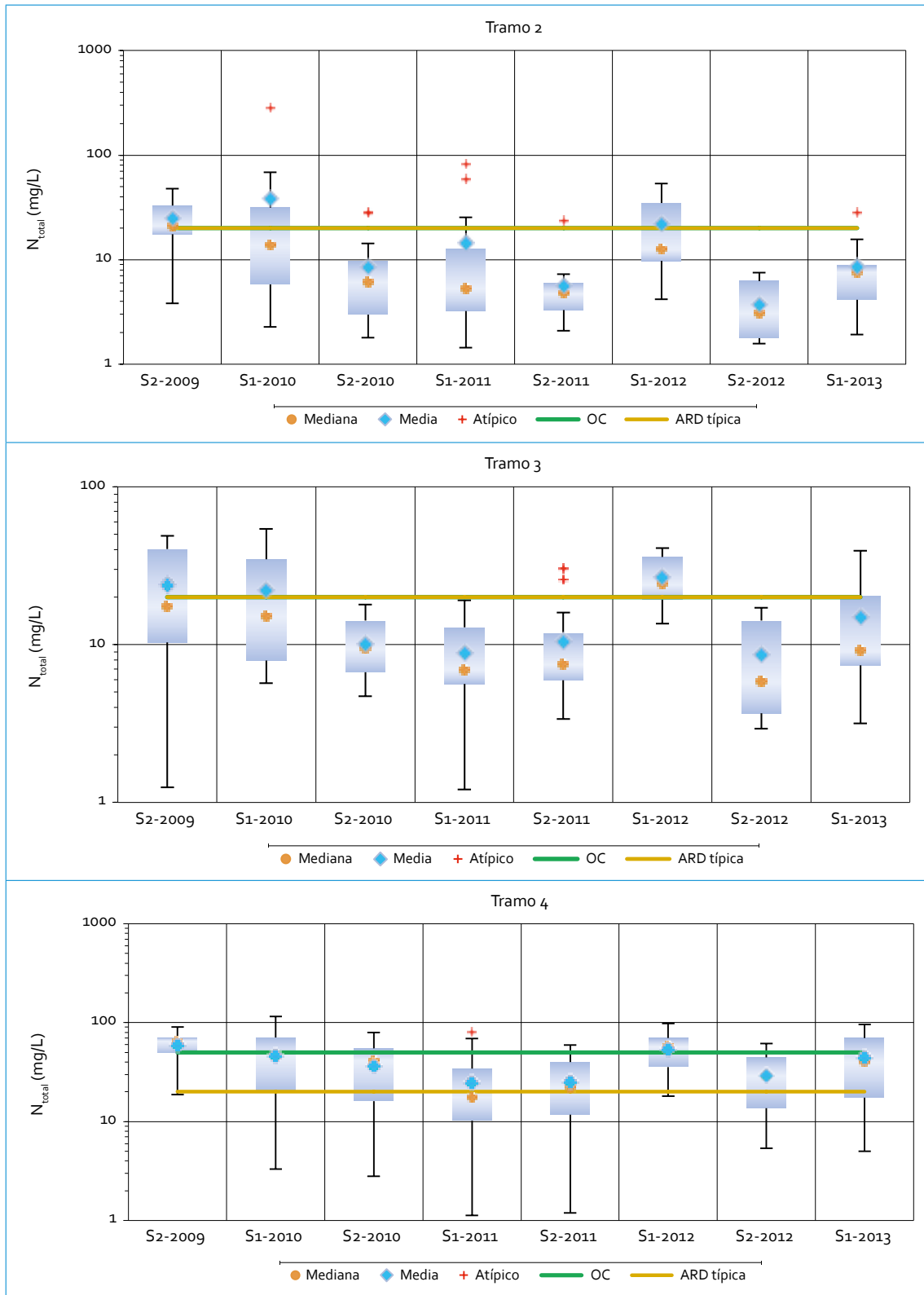


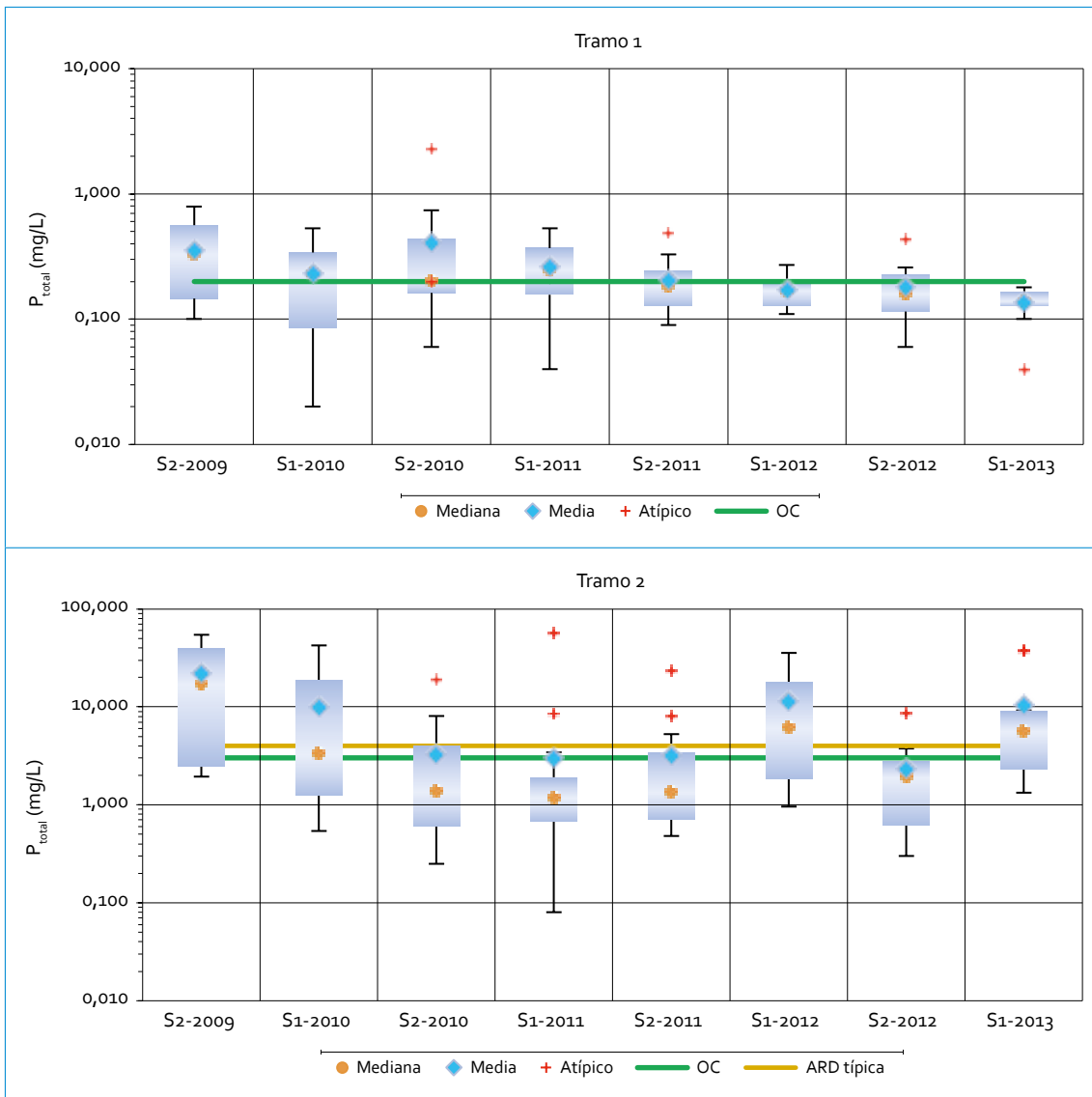
FIGURA 5.7. Perfil de  $N_{total}$ : río Tunjuelo

calidad. El establecido para los tramos 3 y 4 es superior a los valores de  $N_{total}$  encontrados en ARD típica, por lo cual es importante cumplir con el objetivo de calidad establecido y más adelante establecer uno más exigente.

5.1.1.8. Fósforo

En el tramo 1 se encontraron medianas en un rango de 0,14 a 0,33 mg/L. Aunque fueron las concentraciones más bajas en los 4 tramos del

río, se observó que en la mitad de los periodos analizados (S2-2009, S1-2010, S2-2010 y S1-2011) las cantidades de fósforo total ( $P_{total}$ ) sobrepasaron el objetivo de calidad (figura 5.8). En cuanto al tramo 2, las concentraciones de  $P_{total}$  aumentaron sustancialmente respecto al tramo 1, con medianas en un rango de 1,2 a 17 mg/L. Los periodos más críticos fueron S2-2009, S1-2010, S1-2012 y S1-2013, cuando el 75 % de los valores sobrepasó el objetivo de calidad y los valores de ARD típica. Este



Continúa

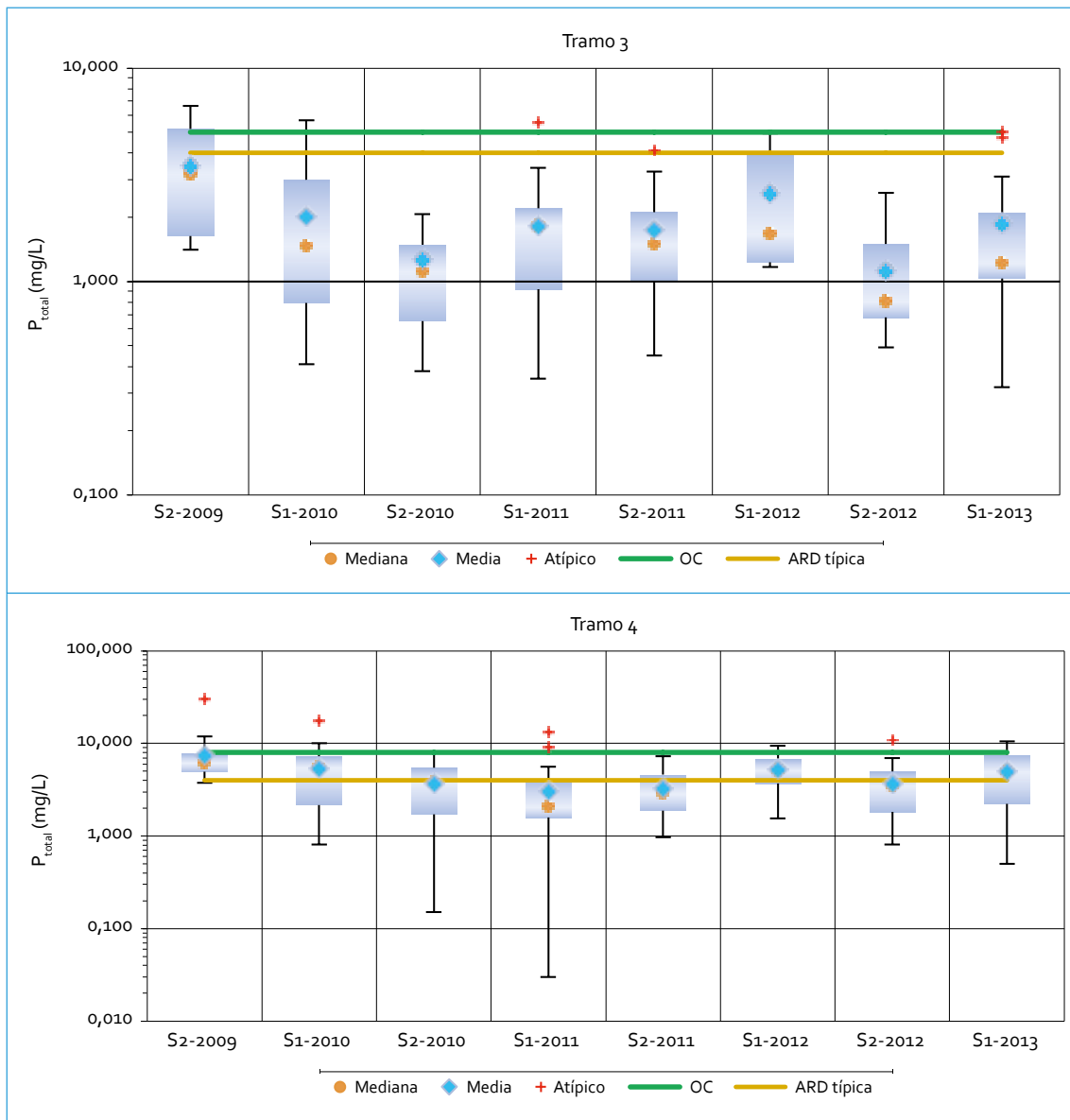


FIGURA 5.8. Perfil de  $P_{total}$ : río Tunjuelo

comportamiento es un reflejo de las actividades mineras y los vertimientos de los lixiviados provenientes de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario en Doña Juana. Las concentraciones de  $P_{total}$  en Barrio México y San Benito no excedieron el objetivo de calidad. Las medianas allí encontradas estuvieron en un rango de 0,8 a 3,2 mg/L, menores que las encontradas en el tramo 2, por lo cual se

puede pensar que existe un efecto de sedimentación en la Zona de Minas Inundadas. En cuanto al tramo 4, las concentraciones de  $P_{total}$  fueron constantes durante los periodos analizados, con medianas de 2,1 a 6,3 mg/L. El periodo con las medianas más altas fue S2-2009 (6,3 mg/L). El objetivo de calidad se cumplió en todos los intervalos analizados, pese a que en los periodos S2-2009, S1-2012 y

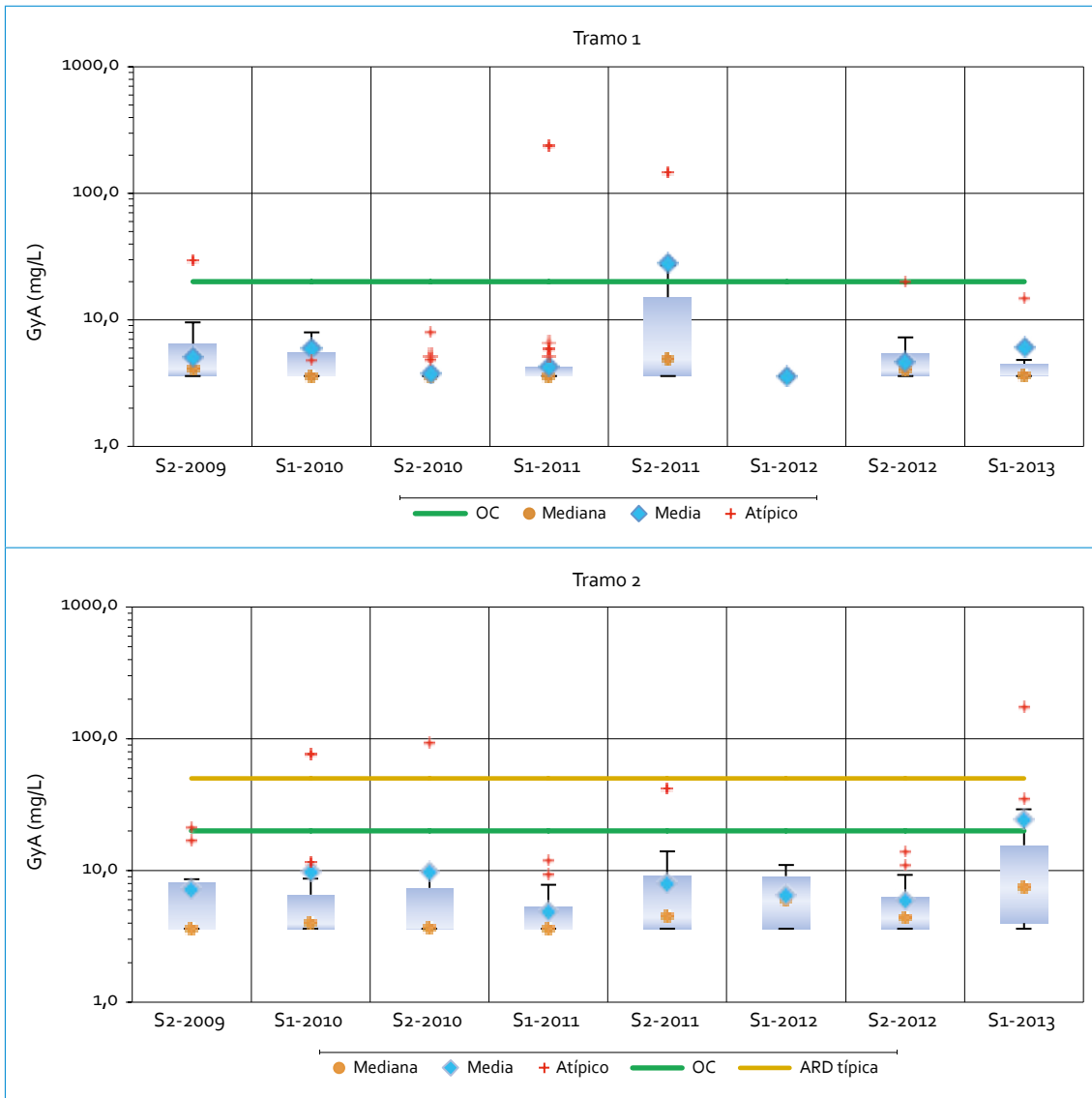


S1-2013 se encontraron valores por encima del ARD típica.

5.1.1.9. Grasas y aceites

En el tramo 1 se pudo observar que las medianas de grasas y aceites (GyA) fueron bajas y constantes (3,6 a 4,9 mg/L), a excepción del periodo S2-2011, en el cual las concentraciones fueron más variables y amplias con un valor mínimo de 3,6 mg/L y un máximo de 27 mg/L

(figura 5.9). En ningún periodo analizado los valores sobrepasaron el objetivo de calidad. El tramo 2 tuvo un comportamiento similar a tramo 1, ya que las concentraciones de GyA fueron bajas con medianas de 3,6 a 8 mg/L y tampoco ningún periodo excedió el objetivo de calidad. El periodo más crítico fue S1-2013, cuando la concentración de GyA fue la más alta de los periodos analizados, con una mediana de 8 mg/L.



Continúa

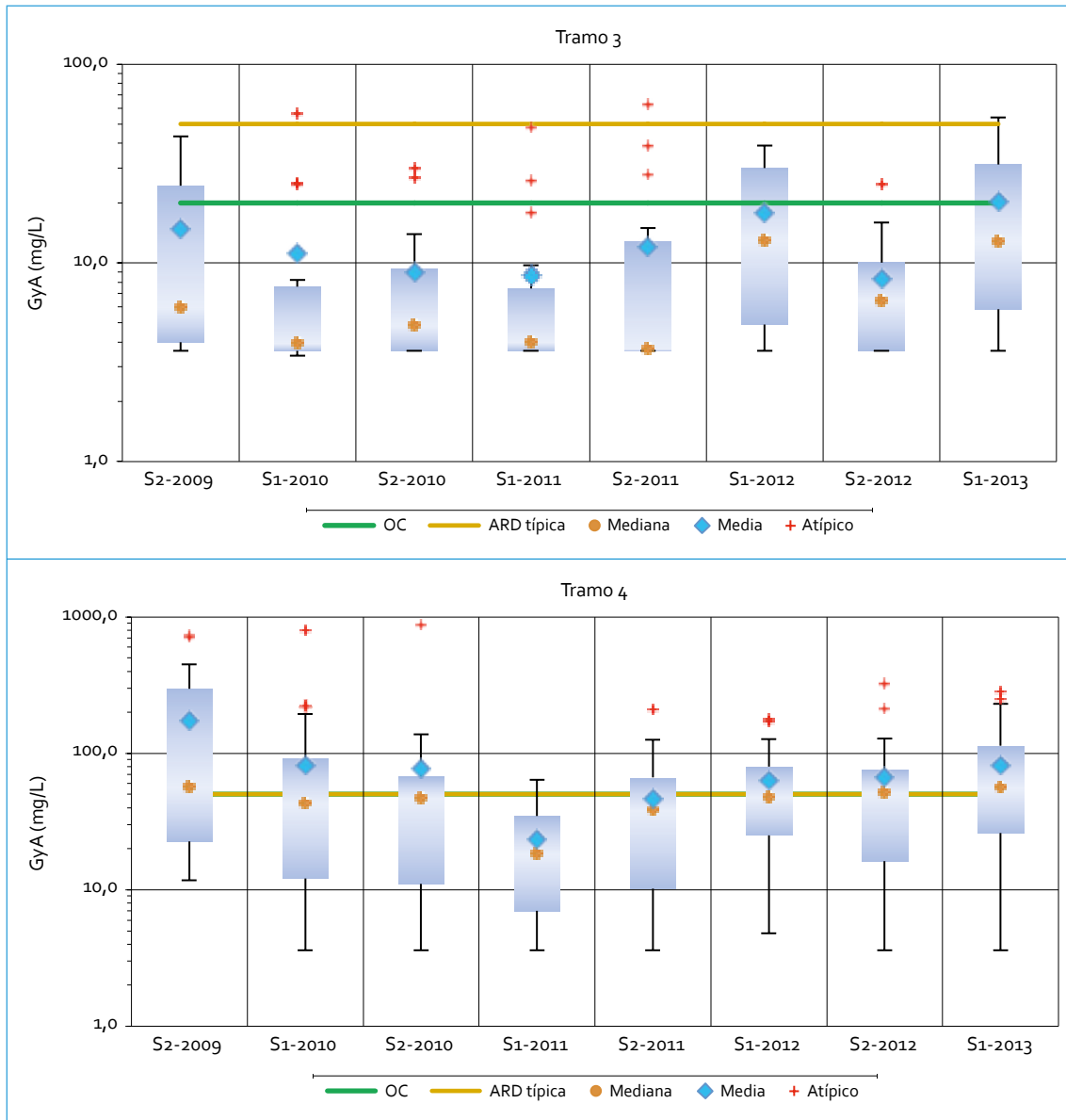


FIGURA 5.9. Perfil de grasas y aceites: río Tunjuelo

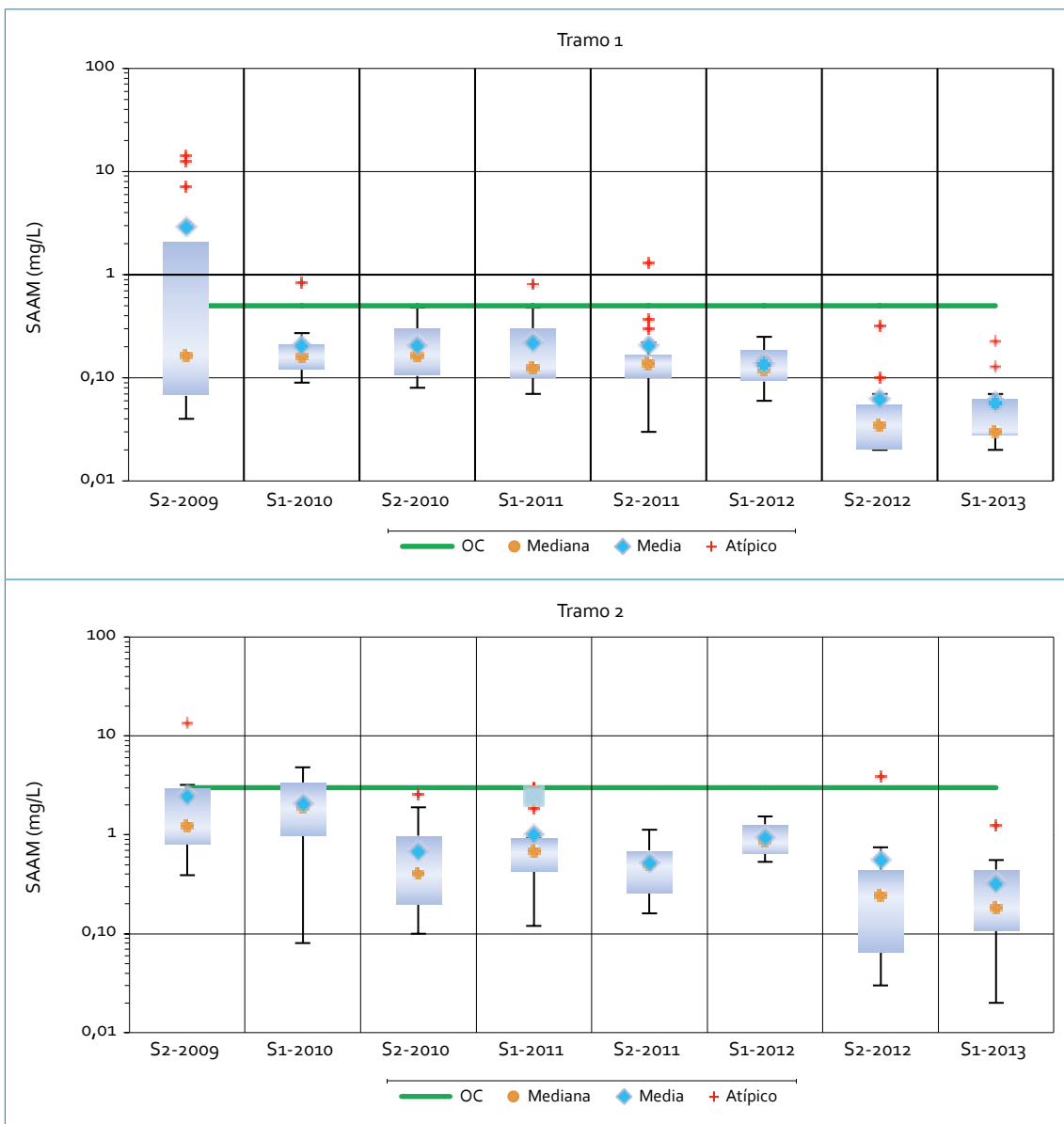
Respecto al tramo 3, las concentraciones de GyA aumentaron en relación con los tramos 1 y 2, pues el rango de medianas estuvo entre 3,7 y 13 mg/L. En tres periodos analizados (S2-2009, S1-2012 y S1-2013) se encontraron valores por encima del objetivo de calidad. En cuanto al tramo 4, las concentraciones de GyA aumentaron considerablemente; en 7 de los 8

periodos analizados hubo valores por encima del objetivo de calidad y de ARD. Las medianas para este tramo estuvieron en un rango de 18,5 a 57 mg/L, el periodo con la concentración de GyA más bajo fue S1-2011 (18,5 mg/L) y en los demás periodos la concentración de GyA estuvo por encima de 38 mg/L.

5.1.1.10. SAAM

A partir de los valores registrados para sustancias activas al azul de metileno (SAAM), se identifica un comportamiento ascendente a lo largo del río (figura 5.10). La presencia de estas sustancias es un claro indicador de contaminación por descargas de ARD. En el tramo 1 (Regadera y UAN), las medianas de concentra-

ción de SAAM fueron bajas (0,03-0,17 mg/L), a excepción del periodo S1-2009, en el cual se encontraron valores superiores al objetivo de calidad. En S2-2012 y S1-2013 se encontraron las concentraciones de SAAM más bajas de todos los periodos, con medianas de 0,04 y 0,03 mg/L. En el tramo 2 aumentaron en un rango de 0,2 a 1,9 mg/L, con periodos críticos en S2-2009 y S1-2010 y concentraciones ba-



Continúa

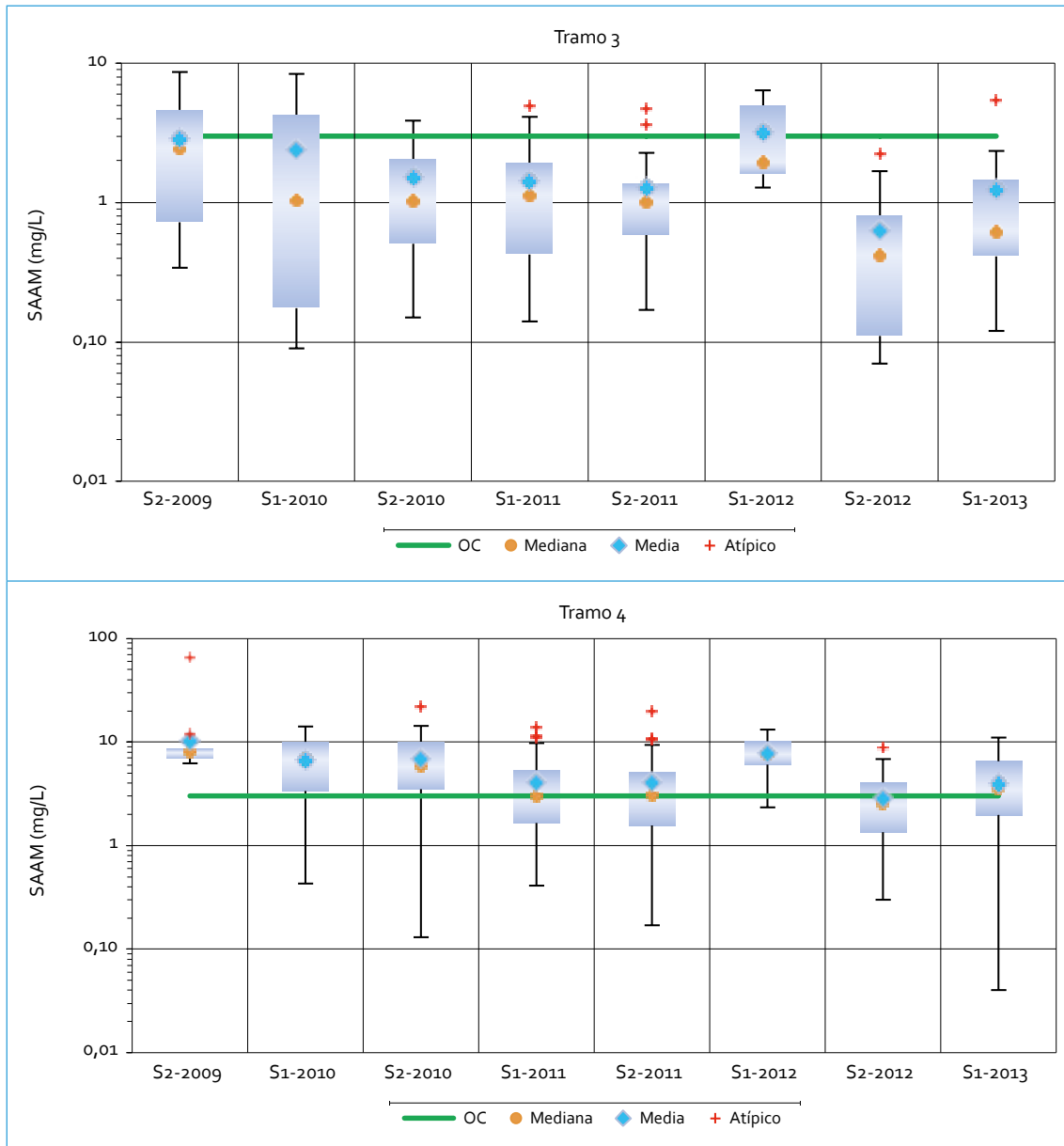


FIGURA 5.10. Perfil de SAAM: río Tunjuelo

jas en S2-2012 y S1-2013 (medianas de 0,25 y 0,19 mg/L). En el tramo 3 se encontró que las concentraciones fueron más variables, con valores mínimos de 0,07 mg/L y máximos de 8,63 mg/L. En los periodos S2-2009, S1-2010 y S1-2012 se detectaron valores por encima del objetivo de calidad. Finalmente, en tramo 4 (Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla

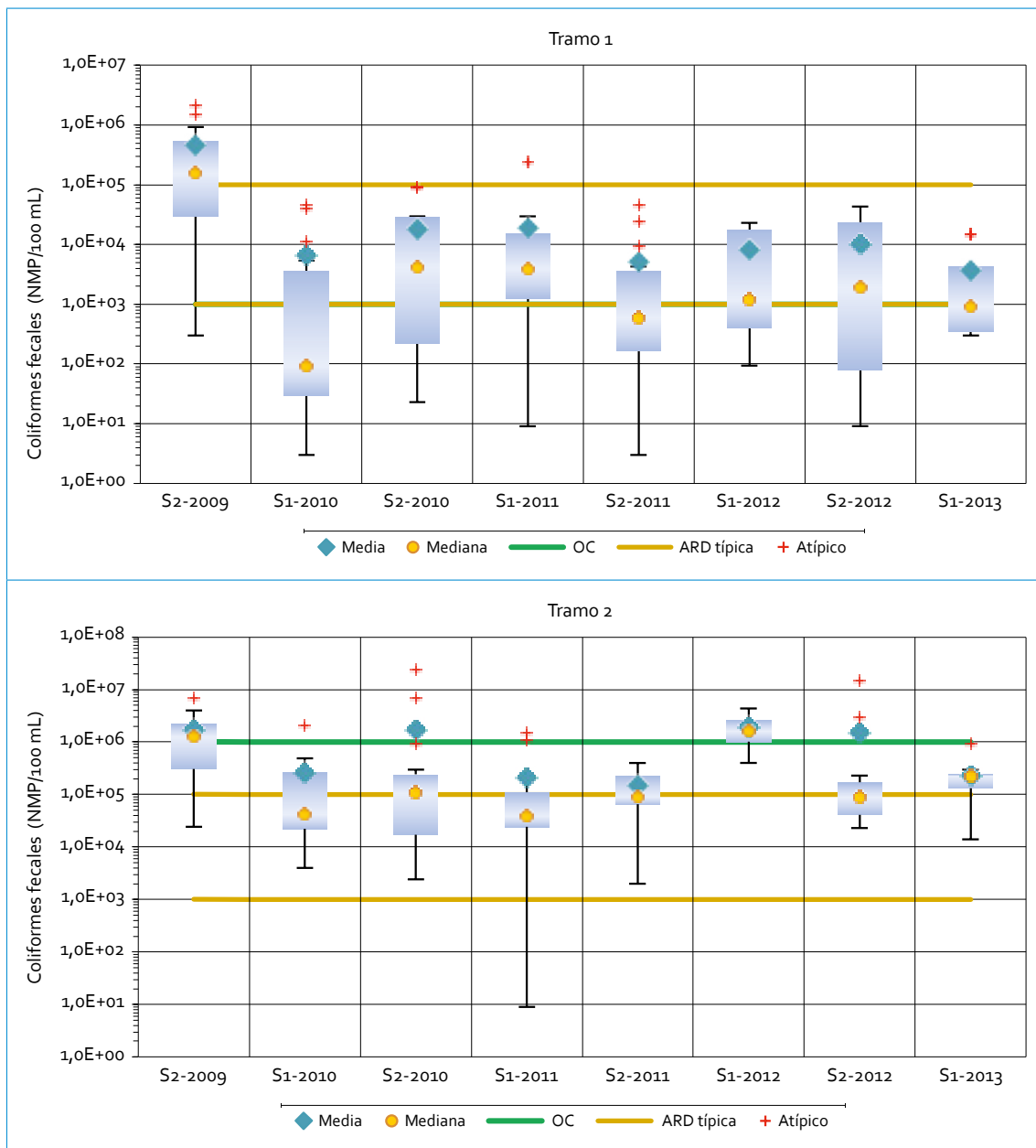
Pontón) se registraron las concentraciones más altas de SAAM, ya que en todos los periodos la mayoría de valores superó el objetivo de calidad. Las medianas encontradas estuvieron en un rango de 2,53 a 8,01 mg/L; los periodos con las concentraciones más altas fueron S2-2009 y S1-2012.

5.1.1.11. Coliformes fecales

En Regadera y UAN se puede observar un comportamiento similar en la concentración de coliformes fecales durante los últimos siete periodos analizados (S1-2010-S1-2013), ya que las medianas oscilan en un rango de  $9,5 \times 10^1$  a  $4,3 \times 10^3$  NMP/100 mL (figura 5.11), a excepción

del periodo S2-2009, en el cual la concentración aumentó con una mediana de  $1,6 \times 10^5$  NMP/100 mL. Todos los periodos analizados superan el objetivo de calidad y evidencian el vertimiento de ARD en las zonas aledañas al tramo 1.

En el tramo 2, las concentraciones de coliformes fecales aumentan casi en un orden



Continúa

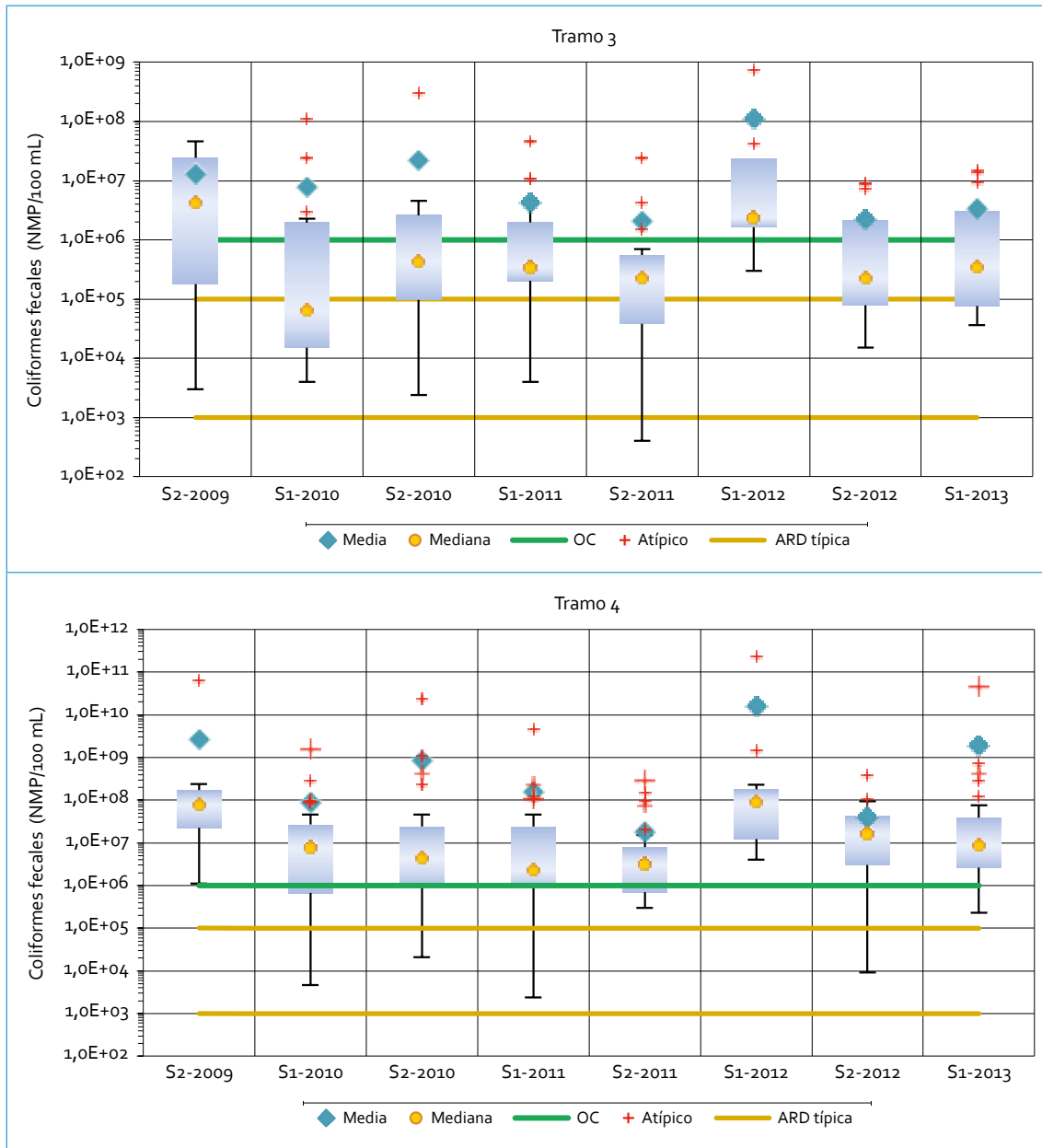


FIGURA 5.11. Perfil de coliformes fecales: río Tunjuelo

de magnitud en comparación con el tramo 1. También en todos los periodos se encontraron valores por encima del ARD. Aunque en los últimos dos periodos (F4) ha disminuido la concentración de coliformes fecales (medianas =  $9,1 \times 10^4$  y  $2,3 \times 10^5$  NMP/100 mL) es evidente el deterioro de la calidad de agua en este tramo,

producto de las descargas de ARD. En el tramo 3 (Barrio México y San Benito), las concentraciones de coliformes fecales permanecieron similares a las encontradas en el tramo 2 (rango de medianas =  $6,5 \times 10^4$ - $4,3 \times 10^6$  NMP/100 mL); sin embargo, a diferencia del tramo 2, en este se encontró un mayor número de periodos en

los cuales las concentraciones de coliformes fecales superaron el objetivo de calidad. Respecto al tramo 4, se presentaron las concentraciones más altas de todo el río: aumentaron en un orden de magnitud en comparación con el tramo previo. Las medianas estuvieron en un rango de  $2,4 \times 10^6$  a  $9,3 \times 10^7$  NMP/100 mL, con los periodos más críticos de S2-2009 y S1-2012.

#### 5.1.1.12. Sulfuros

La figura 5.12 muestra el comportamiento de sulfuros en el río Tunjuelo durante el periodo S2-2009 a S1-2013. Se observa que la concentración de sulfuros totales en todos los puntos de monitoreo osciló en un rango de 0,5 a 6,7 mg/L, y así superó el criterio de vida acuática; sin embargo, es importante resaltar que el límite de detección del método detecta hasta 0,5 mg/L, por lo cual es muy posible que en la parte alta del río (puntos de monitoreo como La Regadera y UAN), donde se presentaron estos valores, la concentración real de sulfuros sea mucho menor que la reportada y pueda

cumplir con el criterio de vida acuática, dados sus altos niveles de oxígeno disuelto.

#### 5.1.1.13. Fenoles

En la figura 5.13 se presenta el comportamiento de fenoles en todos los puntos de monitoreo del río Tunjuelo entre S2-2009 y S1-2013. Para los puntos Regadera, UAN, Yomasa y Barrio México las concentraciones de fenoles totales estuvieron en un rango de 0,02 a 0,3 mg/L, y así cumplen con el criterio de salud humana y el criterio de efecto organoléptico. El límite de detección es de 0,02 mg/L y la mayoría de los datos en Regadera y UAN estuvieron muy cercanos a este valor, por lo cual los valores reales pueden ser menores. En cuanto a las concentraciones de fenoles totales en los puntos Doña Juana, San Benito, Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón se registraron cifras que excedieron el criterio organoléptico y evidenciaron el efecto de aguas residuales en estos puntos del río. En ninguno de los puntos monitoreados se observaron concentraciones que superaran el criterio de salud humana.

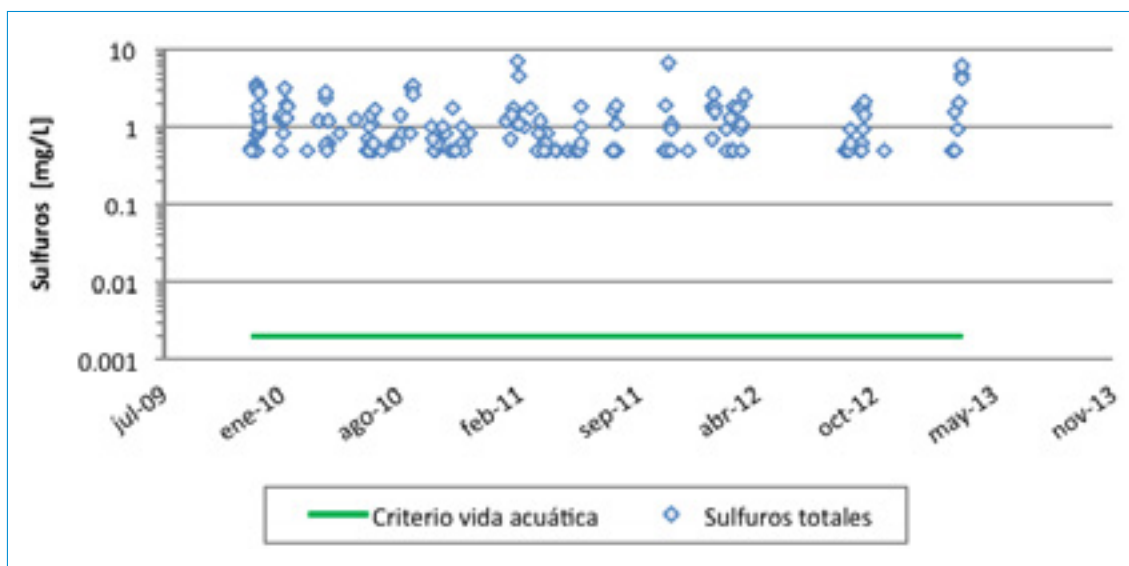


FIGURA 5.12. Perfil de sulfuros: río Tunjuelo

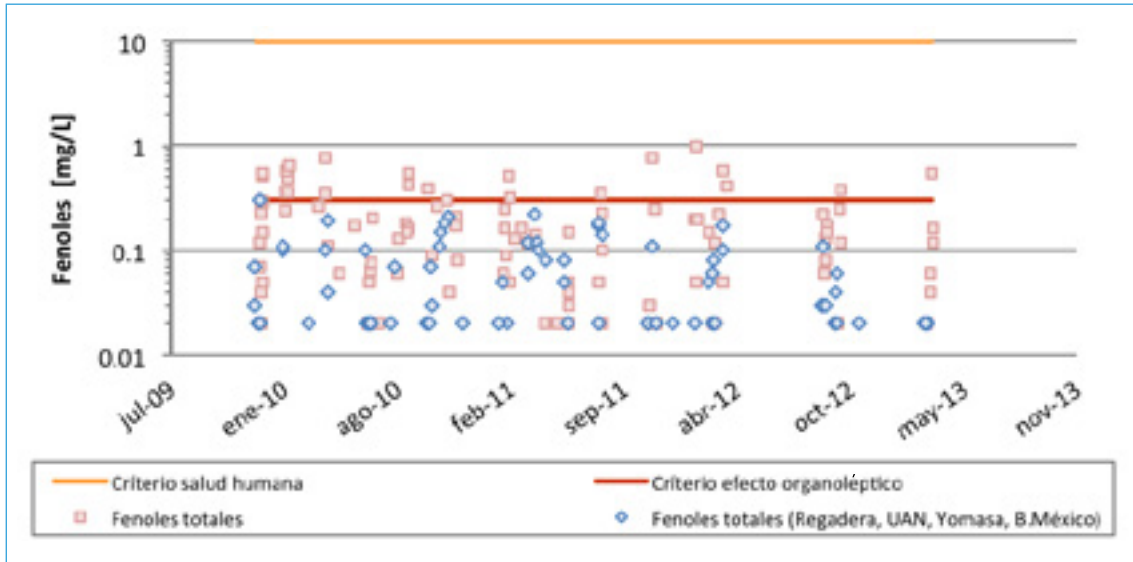


FIGURA 5.13. Perfil de fenoles: río Tunjuelo

5.1.1.14. Metales

5.1.1.14.1. Bario

Al observarse la figura 5.14 se encuentra que las concentraciones de bario fueron similares (rango = 0,023-0,286 mg/L) en la mayoría de puntos de monitoreo del río Tunjuelo (La Re-

gadera, UAN, Yomasa, San Benito, Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia, Barrio México e Isla Pontón) durante los periodos analizados. En ninguno de estos puntos se han encontrado concentraciones de bario superiores al criterio de agua potable durante los semestres analizados. Por el contrario, en el punto Doña Juana se hallaron concentraciones de bario que

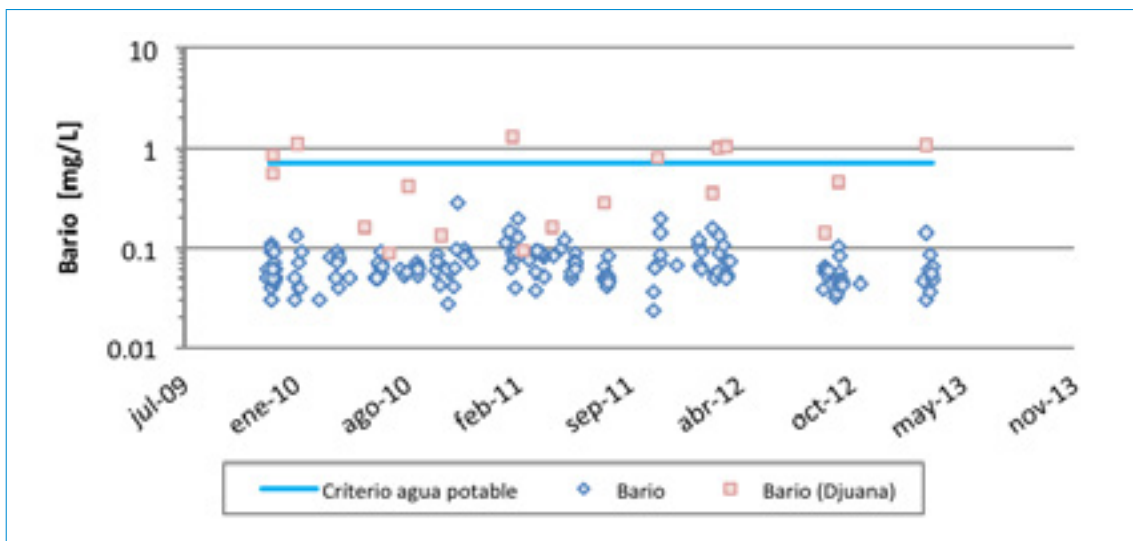


FIGURA 5.14. Perfil de bario: río Tunjuelo



excedieron el criterio de agua potable (rango de concentraciones = 0,09-1,3 mg/L) y evidencian que en este punto el río es afectado por las descargas de lixiviados provenientes del relleno sanitario Doña Juana.

#### 5.1.1.14.2. Cadmio

La figura 5.15 muestra que la concentración de cadmio en la mayoría de puntos del río Tunjuelo (La Regadera, UAN, Yomasa, San Benito, Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia, Barrio México e Isla Pontón) fue similar con valores entre 0,001 y 0,007 mg/L. En estos puntos la mayoría de valores no sobrepasó los criterios de agua potable, ni de vida acuática. Como los límites de detección variaron de 0,001 a 0,006 mg/L es probable que los valores encontrados para la mayoría de los monitoreos puedan ser menores. En cuanto al punto Doña Juana, se observó que las concentraciones de cadmio durante los periodos analizados (0,001-0,031 mg/L) superaron en su mayoría el criterio de agua potable y de vida acuática, lo que reitera

el impacto negativo que tiene la descarga de lixiviados desde el relleno sanitario hacia el río.

#### 5.1.1.14.3. Cinc

Como para los otros metales, las concentraciones de cinc en los primeros puntos del río (La Regadera, UAN y Yomasa) son bajas y cumplen con los criterios de vida acuática y agua potable. Estas concentraciones ascienden en los puntos Doña Juana, San Benito, Makro Sur, Barrio México, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón, por encima del criterio de vida acuática con un rango de valores de 0,01 a 3,6 mg/L. Sin embargo, en ninguno de los puntos monitoreados los valores superan el criterio de agua potable (figura 5.16).

#### 5.1.1.14.4. Cobre

En la figura 5.17 se muestra el comportamiento de las concentraciones de cobre en todos los puntos de monitoreo del río Tunjuelo durante el periodo comprendido entre S2-2009 y S1-

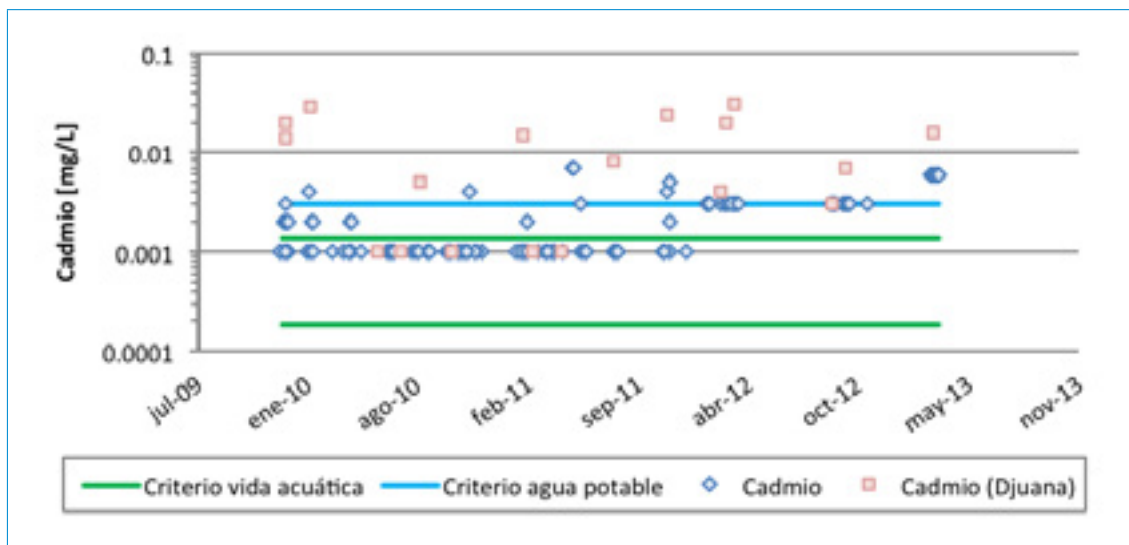


FIGURA 5.15. Perfil de cadmio: río Tunjuelo

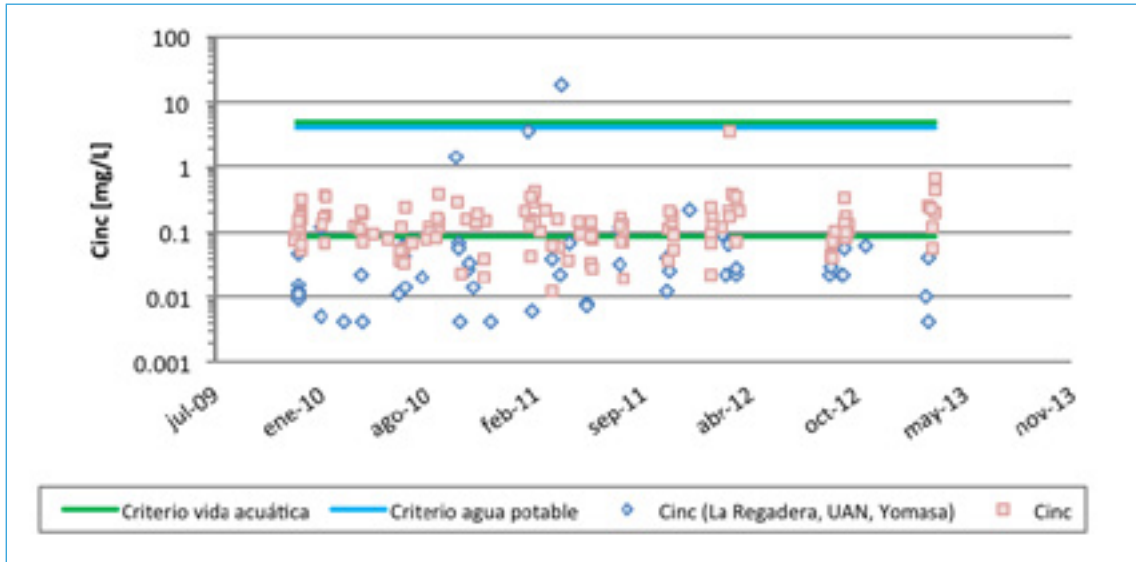


FIGURA 5.16. Perfil de cinc: río Tunjuelo

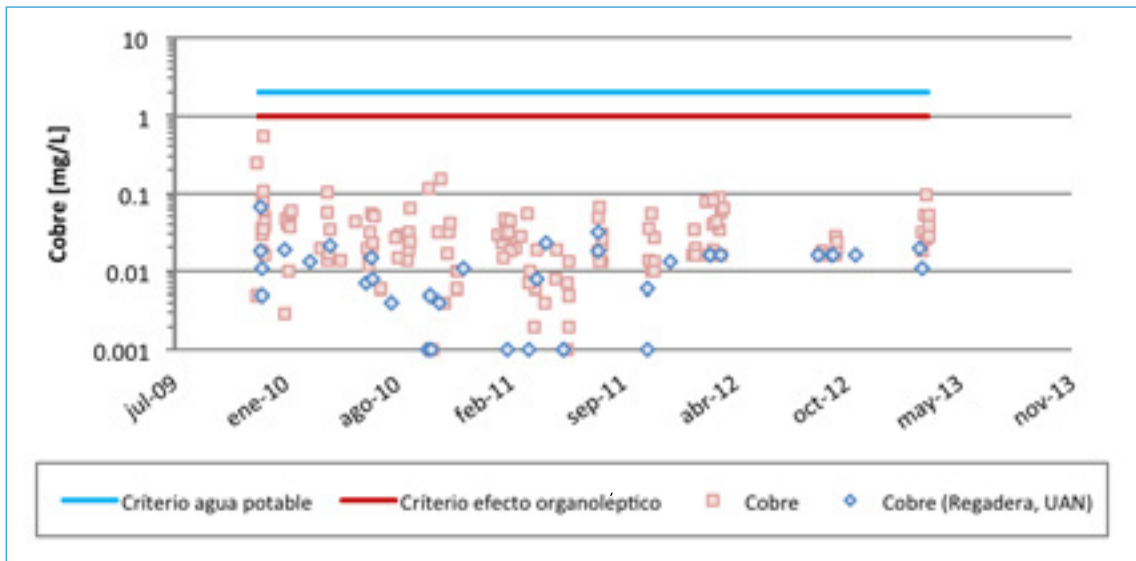


FIGURA 5.17. Perfil de cobre: río Tunjuelo

2013. En general, se observó que en ningún punto de monitoreo del río Tunjuelo las concentraciones de cobre sobrepasaron el criterio de agua potable, ni el efecto organoléptico. En los dos primeros puntos (Regadera y UAN) se registraron las concentraciones más bajas,

inferiores al límite de detección (0,016 mg/L). A partir del punto Yomasa y hasta Isla Pontón se notó un incremento en los valores de cobre, lo cual pone en evidencia que las aguas residuales vertidas aumentan la cantidad de este metal en el río.

#### 5.1.1.14.5. Cromo total

Las concentraciones en La Regadera, UAN, Yomasa, San Benito, Barrio México y Makro Sur son bajas y variaron entre 0,006 mg/L (límite de detección para S2-2009 al S1-2011), 0,007 mg/L (límite de detección para los periodos S2-2011 y S2-2012) y 0,032 mg/L (límite de detección para los periodos S2-2012 y S1-2013). La concentración no sobrepasó el criterio de agua potable (figura 5.18); por el contrario, en Doña Juana, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón los registros fueron variables (0,006-2,15 mg/L) y en su mayoría sobrepasaron el criterio de agua potable. Este comportamiento es un reflejo de las descargas de agua residual y de los vertimientos del relleno sanitario Doña Juana.

#### 5.1.1.14.6. Níquel

El comportamiento de las concentraciones de níquel en todos los puntos de monitoreo del río Tunjuelo durante el periodo comprendido

entre S2-2009 y S1-2013 se presenta en la figura 5.19. Estas concentraciones no tuvieron variaciones bruscas para los primeros puntos de monitoreo (La Regadera y UAN), con valores cercanos a los límites de detección; ningún valor encontrado en estos puntos de monitoreo excedió los criterios de vida acuática, ni de agua potable, lo cual evidencia la óptima calidad de agua en estos puntos del río. En cuanto a los puntos de monitoreo desde Yomasa hasta Isla Pontón, se observó que las concentraciones de níquel fluctuaron entre 0,001 y 0,11 mg/L, y se acercaron al criterio de vida acuática. Este comportamiento se debe principalmente a las descargas de aguas residuales. Solo un valor en Makro Sur superó el criterio de agua potable.

#### 5.1.1.14.7. Plomo

Al igual que para el níquel, las concentraciones de plomo no presentaron mayores variaciones para los primeros puntos de monitoreo, con valores en el límite de detección. Ninguno

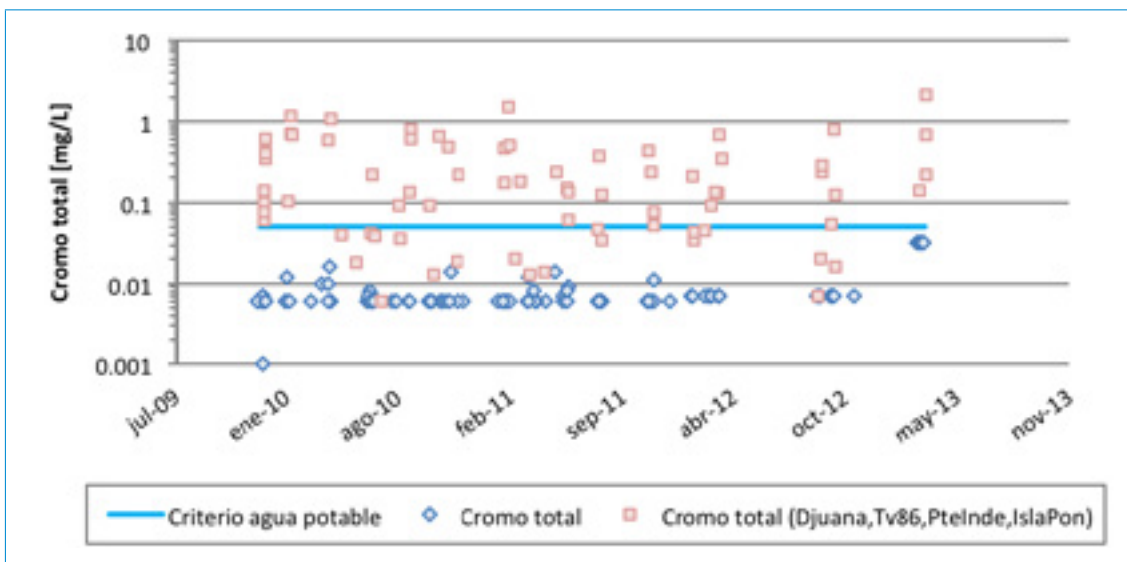


FIGURA 5.18. Perfil de cromo total: río Tunjuelo

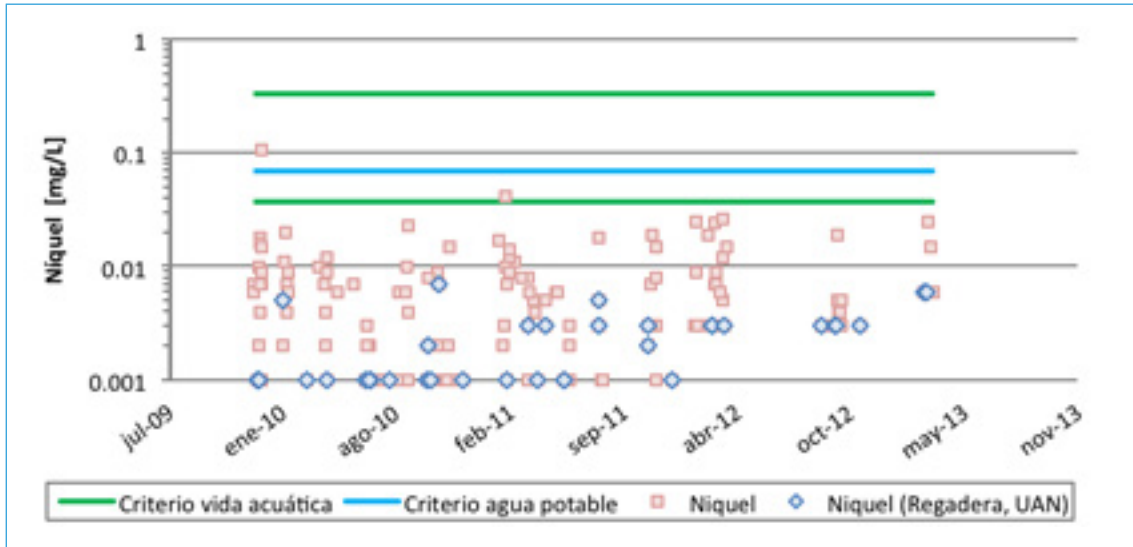


FIGURA 5.19. Perfil de níquel: río Tunjuelo

sobrepasó los criterios de vida acuática, ni de agua potable (figura 5.20). En los demás puntos aguas abajo las concentraciones de plomo fluctuaron durante todos los periodos monitoreados entre valores de 0,001 y 0,41 mg/L.

Nuevamente, el punto de monitoreo crítico fue Doña Juana, en el que se alcanzaron valores máximos hasta de 0,41 mg/L, que sobrepasan el criterio de vida acuática y de agua potable.

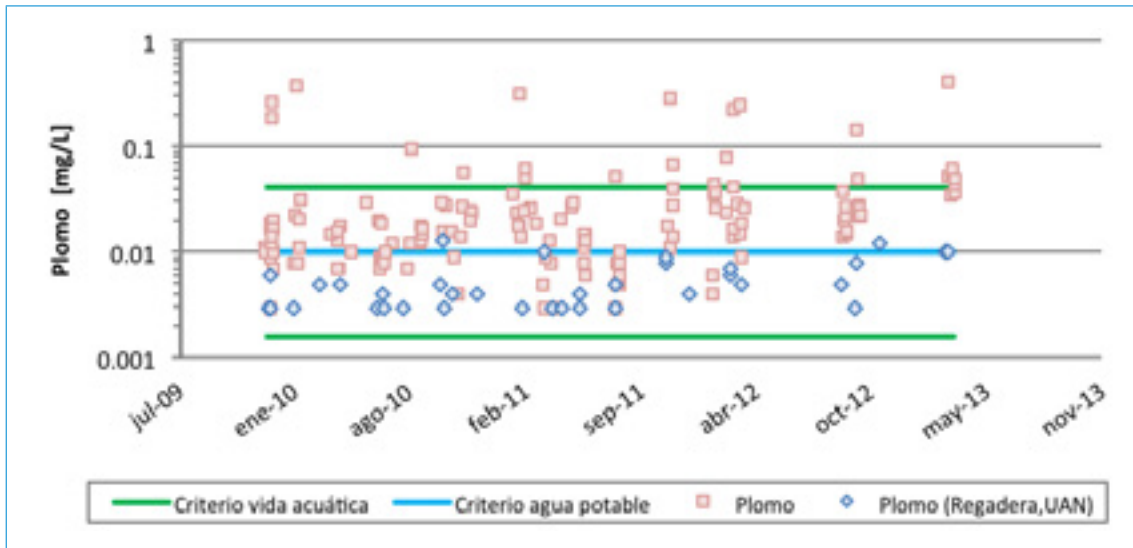


FIGURA 5.20. Perfil de plomo: río Tunjuelo

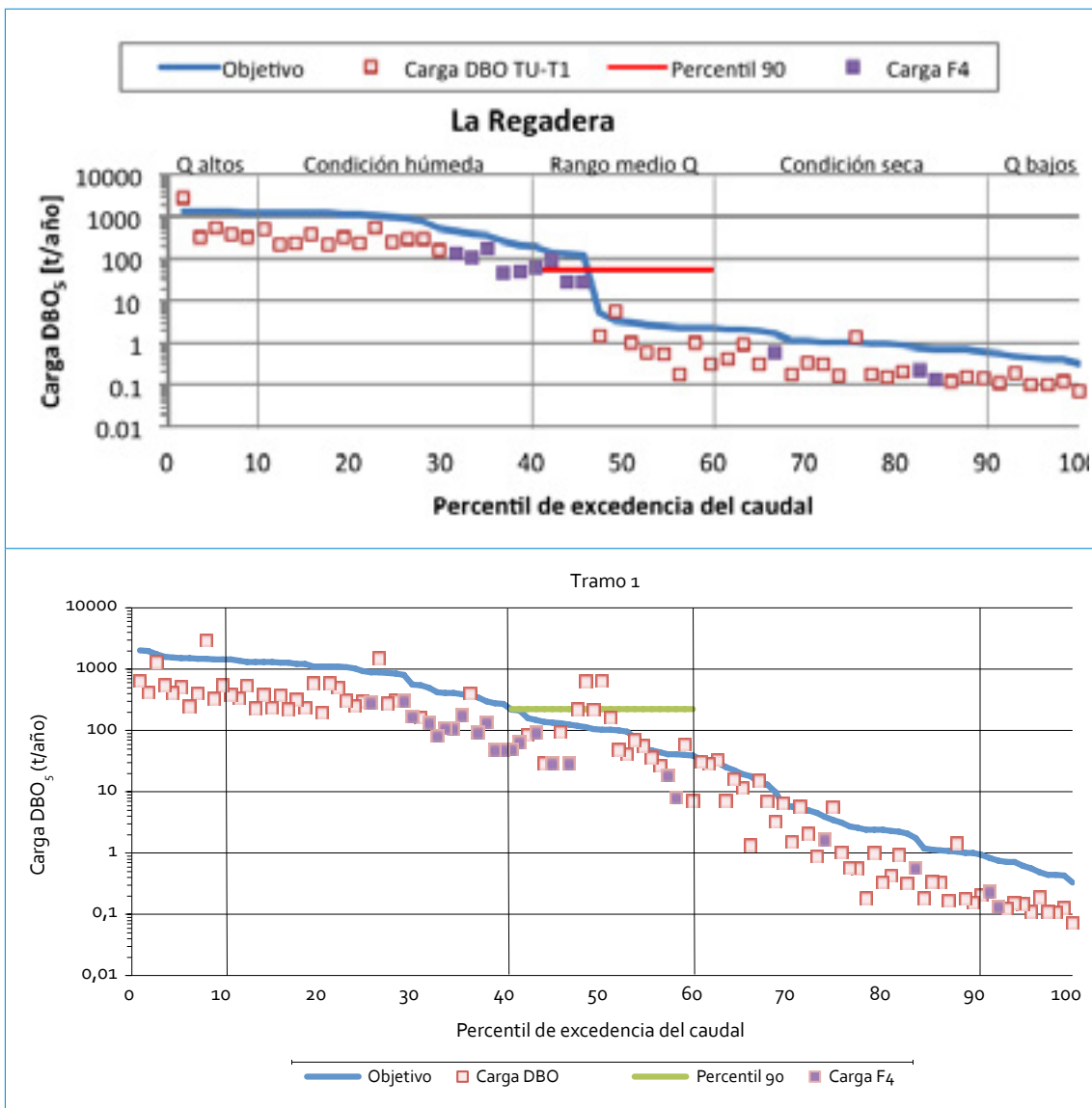
5.1.2. Cargas contaminantes

5.1.2.1.  $DBO_5$

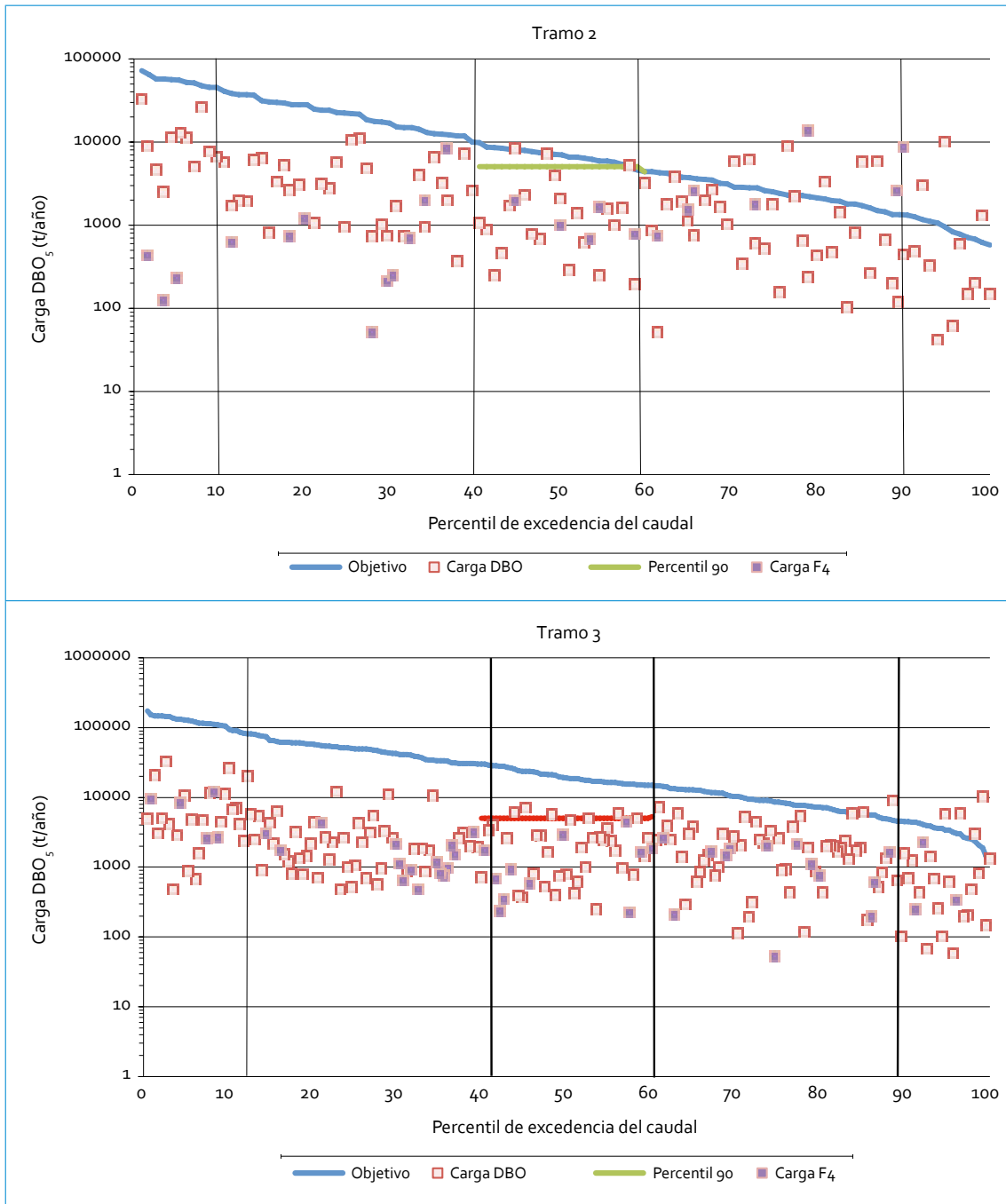
En la figura 5.21 se presenta la curva de duración de carga de  $DBO_5$  para los 4 tramos del río Tunjuelo. Se destaca el aumento gradual en la magnitud de las cargas de  $DBO_5$  a partir del tramo 2 y ello demuestra el alto grado de contaminación del río, producto de las des-

cargas de ARD y aguas residuales industriales. Así mismo, se puede observar el cambio de las cargas promedio entre los tramos del río y sus diferencias con las metas (tabla 5.1).

El tramo 1 (puntos La Regadera y UAN) es afectado por la apertura de las compuertas en el embalse La Regadera. Las cargas de  $DBO_5$  son mucho más altas cuando las compuertas están abiertas que cuando están cerradas. Este mismo comportamiento se pudo apreciar



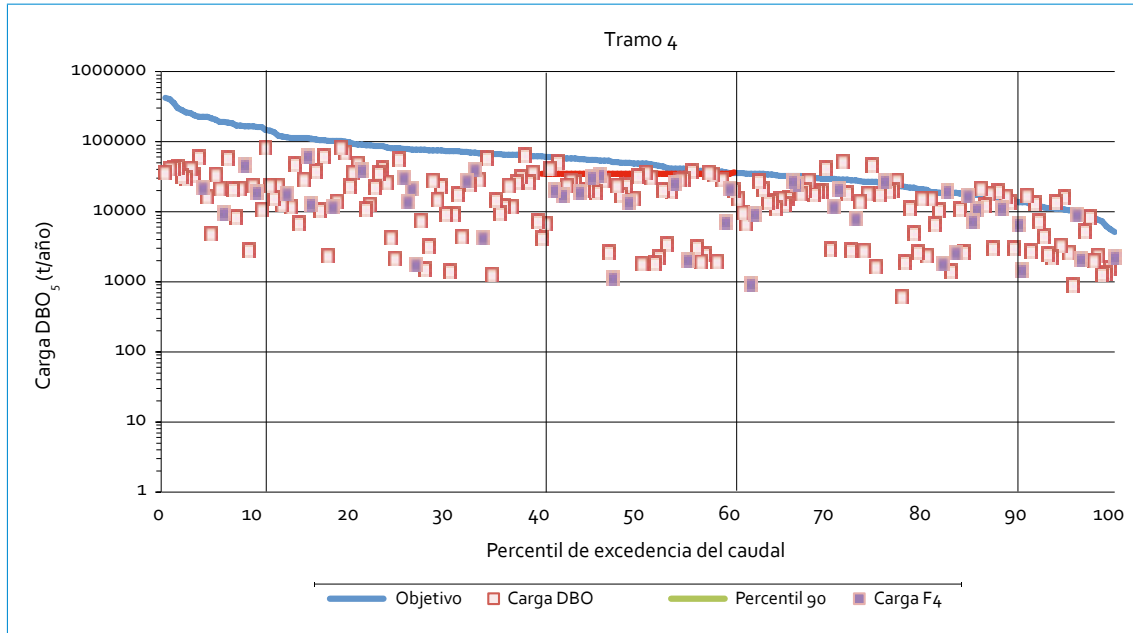
Continúa



Continúa

para todos los parámetros, por lo cual solo se presenta para este parámetro. Como se observa en la figura 5.21, las cargas en el tramo 1 tienen una variación significativa, ya que el rango estuvo entre 0,07 y 3049 t/año, lo cual

muestra que la apertura de las compuertas causa la resuspensión de partículas y pueden llegar a deteriorar la calidad del agua. De igual forma, se puede observar el efecto del caudal sobre las cargas del tramo 1; en caudales altos

FIGURA 5.21. Curva de duración de carga  $DBO_5$ : río TunjueloTABLA 5.1. Carga  $DBO_5$  (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$DBO_5$				
Percentil 90 (F1-F4)	222	5044	5020	34760
Promedio (F1-F4)	119	2012	2216	19675
Promedio (F4)	42	2364	1506	17628
Carga curva duración (percentil 50)	104	7030	19015	48763
PMSV	292	828	1000	25145
Meta de reducción	-	3400	1550	25145
Línea base-promedio F4	-	2016	3266	7952

[ - ] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

y condición húmeda (percentil 0-40) las cargas fueron altas, con un promedio de 411 t/año; en el rango medio de caudales el promedio fue de 119 t/año, y en caudales bajos y condiciones secas (percentil 60-100) las cargas fueron bajas con un promedio de 4 t/año. En este tramo la curva de duración fue excedida, ya que el per-

centil 90 de las cargas y el promedio excedieron la curva de duración.

En el tramo 2, las cargas variaron entre 42 y 32 912 t/año y aumentaron considerablemente frente al tramo 1. En la figura 5.21 se ve que las cargas de  $DBO_5$  calculadas en el rango medio de caudales y condición seca son relativamen-

te bajas con un promedio de 2012 t/año. Esta carga es menor que la curva de duración y demuestra que el objetivo de calidad se cumplió para este parámetro. En cuanto a la diferencia entre la línea base y la carga promedio (rango medio de caudales) del último periodo de monitoreo (F<sub>4</sub>), se aprecia que aunque las cargas han disminuido en el tiempo, la meta de reducción (3400 t) todavía no se cumple.

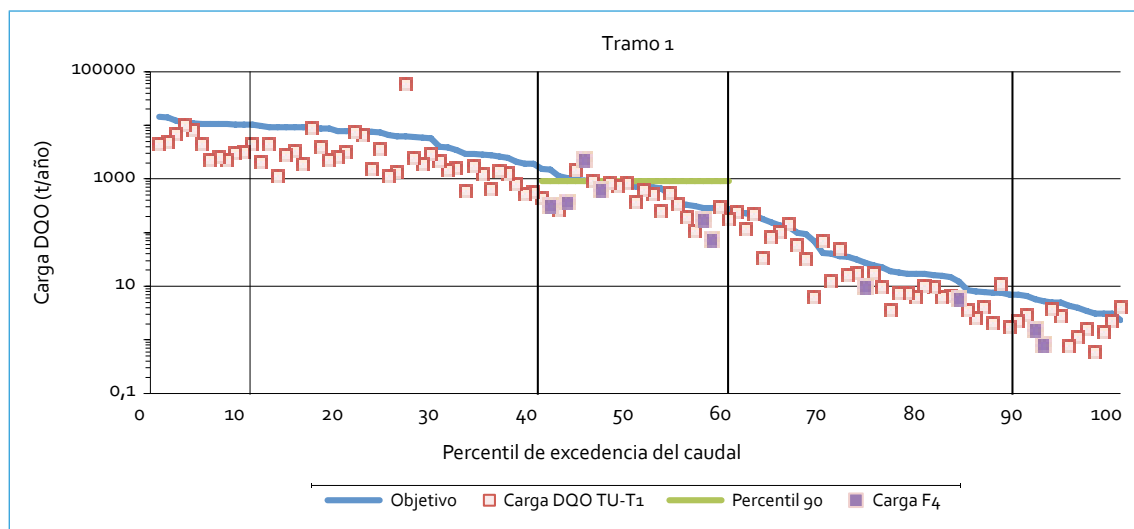
En el tramo 3 (puntos Doña Juana, Barrio México, San Benito y Makro Sur) se presentaron cargas muy similares al tramo 2, que oscilaron entre 53 y 32 912 t/año. Este comportamiento se debe a que hubo cargas bajas en el punto Barrio México, debido al tránsito del río Tunjuelo a través de la Zona de Minas Inundadas, que actúa como un sedimentador y disminuye la materia orgánica en este tramo del río. Así mismo, se encontró que las cargas obtenidas (percentil 90 = 5044 t/año) fueron menores que la curva de duración, y ello muestra que se cumplió el objetivo de calidad.

En el tramo 4, las cargas de DBO<sub>5</sub> fueron las más altas de todo el río con un rango de 621 a 82 755 t/año. Este aumento en la concentración se evidencia en el punto Tv 86, donde el río

es afectado por las descargas del interceptor Tunjuelo Medio. En general, se observó que las cargas estuvieron por debajo de la curva de duración, ya que el promedio de carga fue de 19 675 t/año. En caudales bajos (percentil 60-100), las cargas fueron bajas con un promedio de 12 156 t/año, mientras que en caudales altos y condición húmeda (percentil 0-40) las cargas fueron muy altas, con un promedio de 25 886 t/año. Aun cuando la meta de reducción (25 145 t) no se ha cumplido, se ha evidenciado una reducción en las cargas a través del tiempo.

#### 5.1.2.2. DQO

En el tramo 1, las cargas tuvieron una alta variación, debido a la operación de la compuerta en el embalse, lo que generó valores en un rango de 1 a 59 800 t/año. El promedio de carga (556 t/año) no excedió la curva de duración; sin embargo, el percentil 90 fue mayor, por lo cual se presentaron algunos muestreos en los cuales las cargas de DQO fueron muy elevadas y afectaron la calidad del tramo (figura 5.22). Aquí fue muy notorio el efecto del caudal sobre las cargas del tramo 1; en caudales





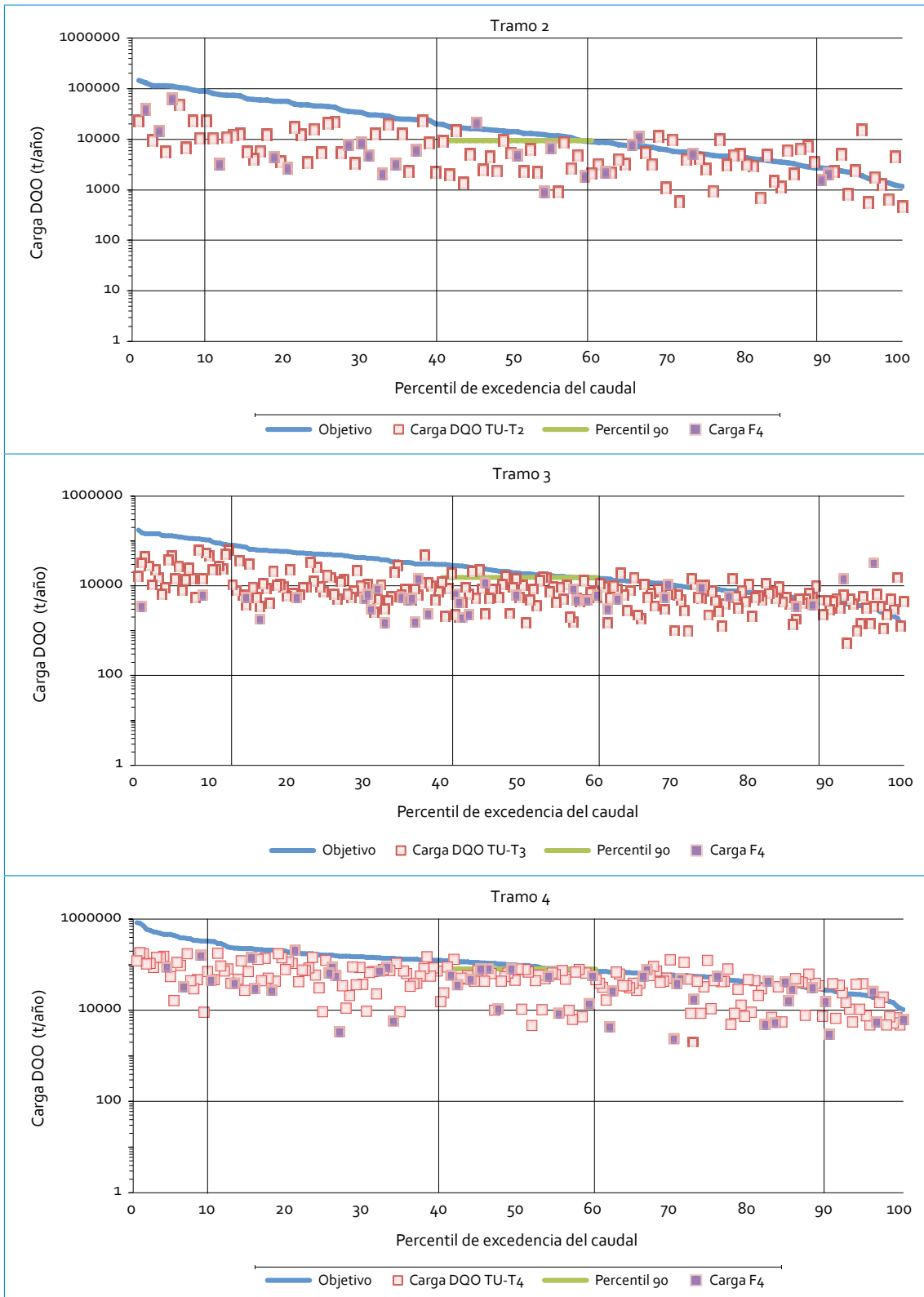


FIGURA 5.22. Curva de duración de carga DQO: río Tunjuelo

bajos y condiciones secas (percentil 60-100) las cargas fueron bajas con un promedio de 30 t/año, mientras que en caudales altos y condición húmeda (percentil 0-40) las cargas fueron altas, con un promedio de 4353 t/año.

El tramo 2 es afectado mayoritariamente por los vertimientos del relleno sanitario ubicados en el punto Doña Juana; por esta razón, las cargas de DQO aumentaron considerablemente al compararlas con el tramo 1. Las cargas variaron en un rango de 457 a 63 637 t/año. La carga promedio en el rango medio de caudales (5325 t/año) y el percentil 90 (9386 t/año) fueron menores que la curva de duración, lo cual refleja que el objetivo de calidad fue cumplido. Aunque la meta de reducción (7000 t) no se ha alcanzado, las cargas de DQO a través del tiempo han disminuido. Para el tramo 3 las cargas de DQO fueron similares a las encontradas en el tramo 1 (533-63 637 t/año). Al igual que para DBO<sub>5</sub>, este comportamiento se debe a las cargas bajas encontradas en el punto Barrio México, en el cual se ubican las zonas de minas inundadas que actúan como un amortiguador de los contaminantes. La carga promedio en

el rango medio de caudales (8220 t/año) fue menor que la curva de duración y ello refleja que la zona de minas inundadas, junto con la eliminación de puntos de vertimiento en Doña Juana, permite que se cumpla el objetivo de calidad propuesto. También se pudo observar que la meta de reducción establecida (5300 t) se está cumpliendo, ya que las cargas de DQO han disminuido a través del tiempo (tabla 5.2).

Finalmente, en el tramo 4 se presentaron las cargas de DQO más altas de todos los tramos, con un rango de 2406 a 206 356 t/año y ello refleja el alto grado de contaminación producto de las descargas del interceptor Tunjuelo Medio. Aunque la carga promedio en el rango medio de caudales (49 922 t/año) fue menor que la curva de duración, el percentil 90 (80 738 t/año) no fue muy distante de esta curva, lo cual demuestra que hubo monitoreos en los cuales las cargas de DQO fueron bastante altas y que afectaron la calidad del tramo. Aunque la meta de reducción (34 800 t) no se ha cumplido, se ha evidenciado una reducción de cargas a lo largo del tiempo.

TABLA 5.2. Carga DQO (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DQO				
Percentil 90 (F1-F4)	913	9386	15326	80738
Promedio (F1-F4)	556	5325	8220	49922
Promedio (F4)	607	7180	4909	48796
Carga curva duración (percentil 50)	728	14060	19015	97525
PMSV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	7000	5300	34800
Línea base-promedio F4	-	1812	6821	26096

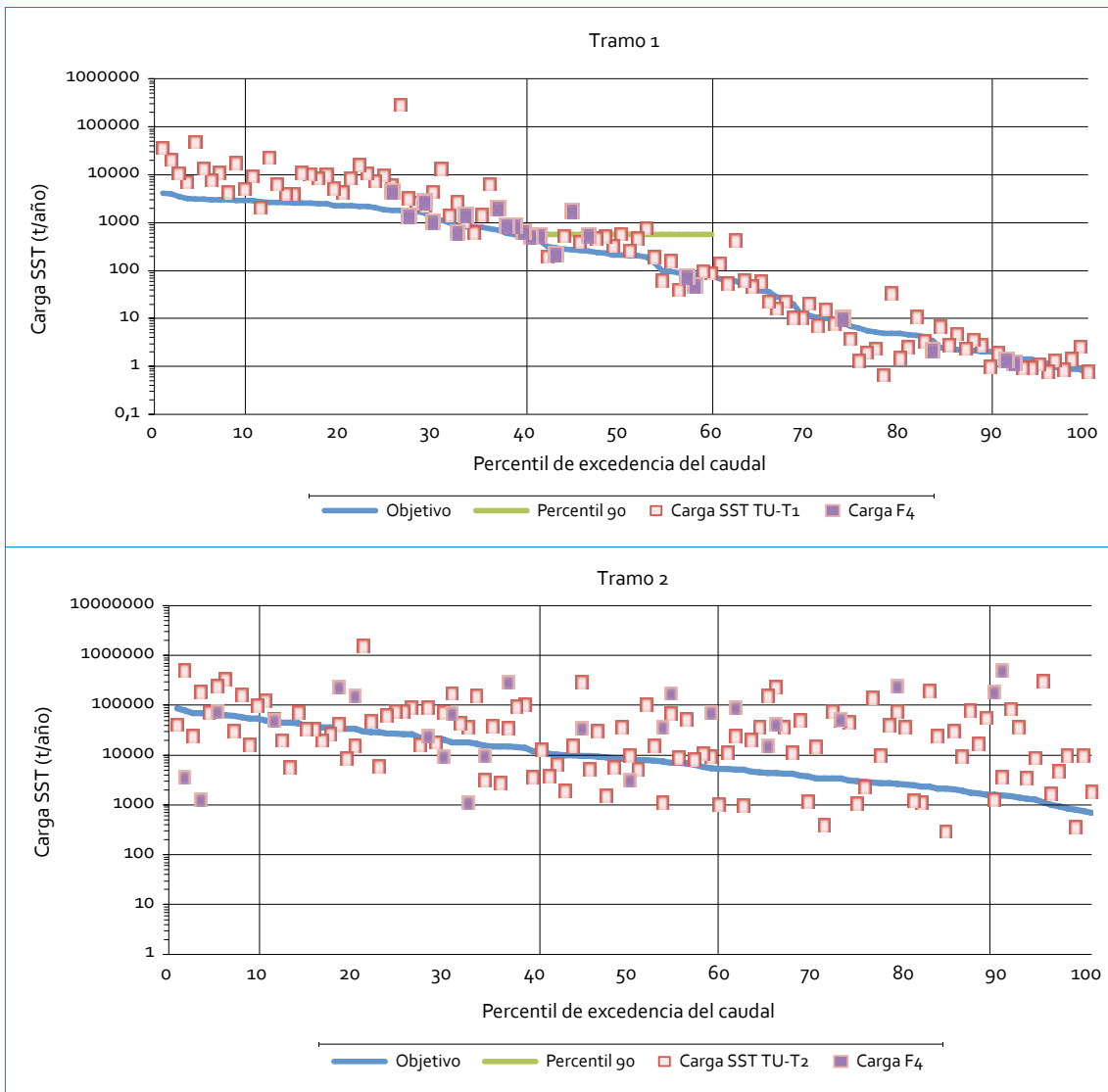
[ - ] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

5.1.2.3. SST

En el tramo 1, las cargas de SST fueron altas (promedio = 14 916 t/año) bajo condiciones húmedas y caudales altos (percentil 0-40) y bajas (promedio = 22 t/año) con un tiempo seco y caudales bajos (percentil 60-100). Así mismo, se observaron cargas con una variación alta (rango = 1-288 658 t/año), como consecuencia de la apertura de las compuertas del embalse La Regadera (figura 5.23). El percentil 90 de

las cargas (569 t/año), junto con el promedio de cargas (529 t/año), es superior a la curva de duración, lo que refleja el incumplimiento del objetivo de calidad en este tramo (tabla 5.3). El efecto de la apertura de las compuertas y los primeros vertimientos de ARD incrementan las partículas y deterioran la calidad en este tramo del río.

Respecto al tramo 2, las cargas de SST fueron las más dispersas de todos los tramos, ya que se registraron valores en un rango de 296



Continúa

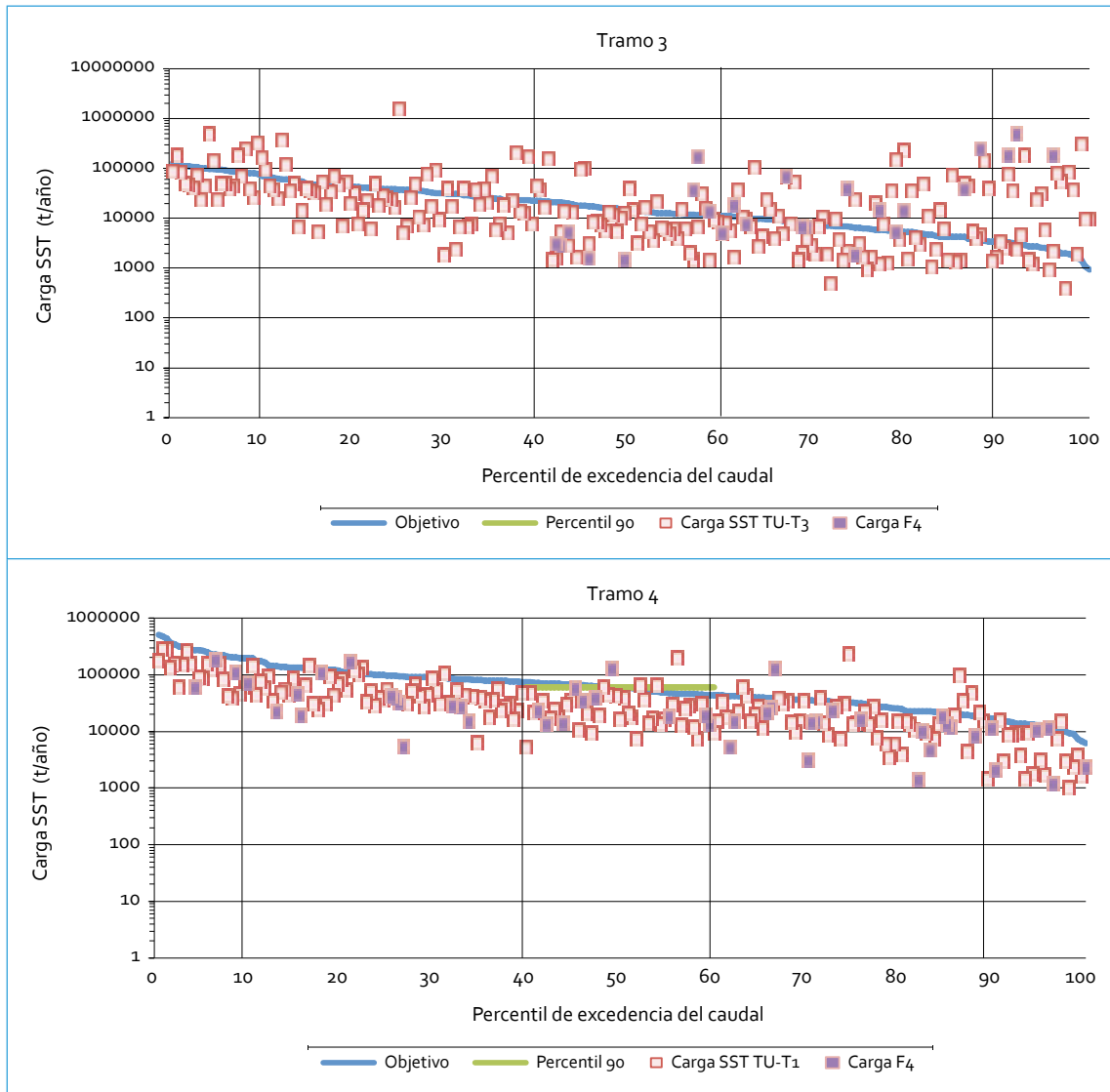


FIGURA 5.23. Curva de duración de carga SST: río Tunjuelo

a 1 556 938 t/año. Los valores más altos se encontraron en el punto Doña Juana, el cual es afectado por las descargas provenientes del relleno sanitario y de la extracción minera en la zona. Aquí se obtuvo la carga más alta de todo el tramo (1 556 938 t/año), que aumentó los valores promedio. Las cargas obtenidas en el percentil 90 (64 818 t/año), junto con las cargas promedio (31 027 t/año), son superiores a la curva de duración, lo cual evidencia

que el objetivo de calidad fue sobrepasado la mayor parte del tiempo. Así mismo, la diferencia entre la línea base y la carga promedio (rango medio de caudales) muestra que las cargas han aumentado en el tiempo, por lo cual la meta de reducción (55 100 t) no se ha cumplido.

En el tramo 3 se tuvieron cargas similares a las del tramo 2, con un rango de 384 a 1 556 938 t/año; ello refleja que este tramo también es

TABLA 5.3. Carga SST (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SST				
Percentil 90 (F1-F4)	569	64818	38237	59354
Promedio (F1-F4)	384	31027	17342	31827
Promedio (F4)	529	77256	7109	36760
Carga curva duración (percentil 50)	208	8436	14261	58515
PSMV	141	321	1077	23770
Meta de reducción	-	55100	2350	23770
Línea base-promedio F4	-	[-]	34	[-]

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

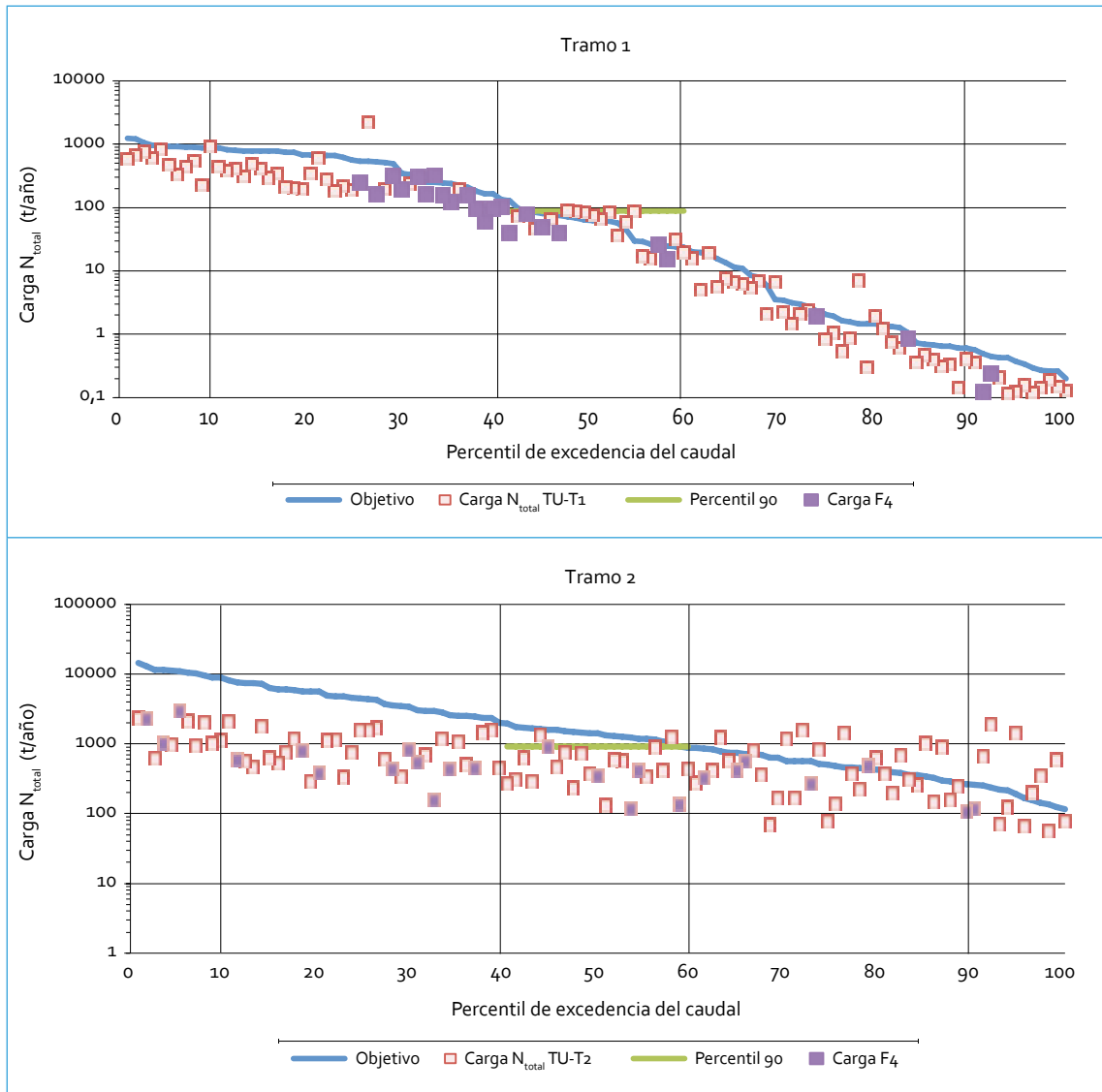
afectado por los vertimientos de agua residual ubicados principalmente en los puntos Doña Juana y San Benito, donde las cargas aumentaron de modo considerable. En el punto Doña Juana se reportó el valor más alto de todo el tramo (1 556 938 t/año), influenciado por el aumento de caudal. La carga promedio (17 342 t/año) y el percentil 90 (38 237 t/año) estuvieron muy por encima de la curva de duración y, así, mostraron el incumplimiento del objetivo de calidad en este tramo (tabla 5.3). La diferencia entre la línea base y la carga promedio evidencia que se necesita un mayor esfuerzo para cumplir la meta de reducción (2350 t).

Para finalizar, en el tramo 4 se encontró que las cargas de SST aumentaron de forma considerable en relación con aguas arriba, lo cual denota deterioro en la calidad del agua, producto de los vertimientos de ARD y aguas residuales industriales. Como se puede observar en la figura 5.23, las cargas oscilaron entre 1050 y 291 248 t/año, con una carga promedio en la fase 4 de 31 827 t/año, y con una carga en el percentil 90 de 59 354 t/año. Aunque los valores de la carga promedio fueron inferior-

es a la curva de duración, los valores en el percentil 90 fueron superiores, lo cual indica que se encontraron cargas que superaron el objetivo de calidad establecido. Así mismo, se pudo evidenciar que la línea base es menor que la carga actual en el rango promedio de la fase 4, por lo cual la meta de reducción no se ha cumplido.

#### 5.1.2.4. Nitrógeno total

Similar que para los otros parámetros, las cargas de  $N_{total}$  presentaron un comportamiento ascendente a lo largo del río que se puede ver en la figura 5.24. Los tramos 3 y 4 tuvieron las concentraciones más altas y el tramo 1 tuvo las más bajas. La tabla 5.4 muestra el cambio de las cargas promedio entre los tramos del río y sus diferencias con las metas. Se observa que las cargas de  $N_{total}$  en el tramo 1 variaron de manera significativa, ya que se encontraron cargas en un rango de 0,1 a 2286 t/año, reflejo que la operación de las compuertas del embalse tiene un efecto negativo en el aumento de nutrientes en el agua. Las cargas más altas se



Continúa

presentaron en el punto UAN, donde las primeras descargas domésticas incrementan su cantidad. La carga promedio de la fase 4 (56 t/año) fue inferior a la curva de duración, pero los valores en el percentil 90 (87 t/año) fueron mayores. Ello indica que existen cargas por encima del objetivo de calidad.

En el tramo 2, las cargas de  $N_{total}$  aumentaron (57-2938 t/año) en comparación con el tramo 1, debido a las primeras descargas de agua residual, junto con los vertimientos del

relleno sanitario (figura 5.24); la carga promedio para la fase 4 fue de 523 t/año, y el percentil 90, de 914 t/año, valores menores que la curva de duración (1406 t/año), por lo cual el objetivo de calidad fue cumplido en este tramo. Aunque las cargas de  $N_{total}$  han disminuido a lo largo del tiempo, se necesitan mayores esfuerzos para alcanzar la meta de reducción (800 t), ya que la línea base promedio  $F_4$  presenta un valor de 615 t. Respecto al tramo 3, las cargas de  $N_{total}$  continuaron aumentando (23-7177

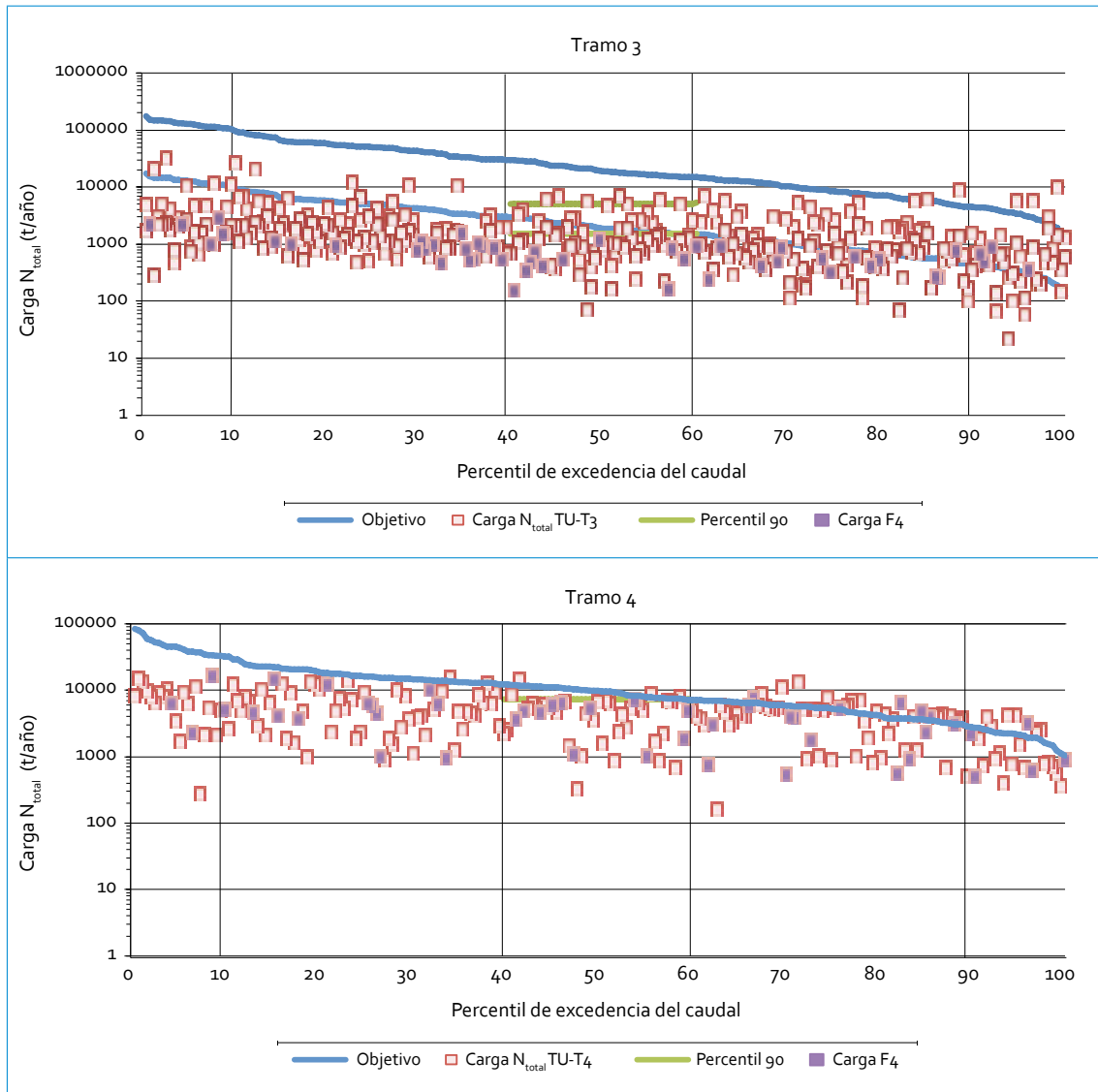


FIGURA 5.24. Curva de duración de carga  $N_{total}$ : río Tunjuelo

t/año); los puntos más críticos son Doña Juana y San Benito, los cuales aportan una alta carga de nutrientes, debido a los vertimientos de agua residual industrial y de lixiviados. La carga promedio (1025 t/año) y el percentil 90 (1528 t/año) tuvieron valores debajo de la curva de duración, lo cual refleja que el objetivo de calidad se está cumpliendo en este tramo. La diferencia entre la línea base y la carga promedio evidencia que la meta de reducción (1150 t

se puede alcanzar en poco tiempo si se elimina un mayor número de vertimientos.

En el tramo 4, las cargas promedio de la fase 4 (4630 t/año), junto con el percentil 90 (7096 t/año), han aumentado en comparación con el tramo 3 y han mostrado que los vertimientos del Interceptor Tunjuelo Medio incrementan la cantidad de nutrientes en este tramo del río (tabla 5.4). Sin embargo, la curva de duración no fue excedida, por lo cual el objetivo de ca-

TABLA 5.4. Carga  $N_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$N_{total}$				
Percentil 90 (F1-F4)	87	914	1528	7096
Promedio (F1-F4)	56	523	1025	4630
Promedio (F4)	50	391	588	6449
Carga curva duración (percentil 50)	62	1406	1902	9753
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	800	1150	3850
Línea base-promedio F4	-	615	1217	1434

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

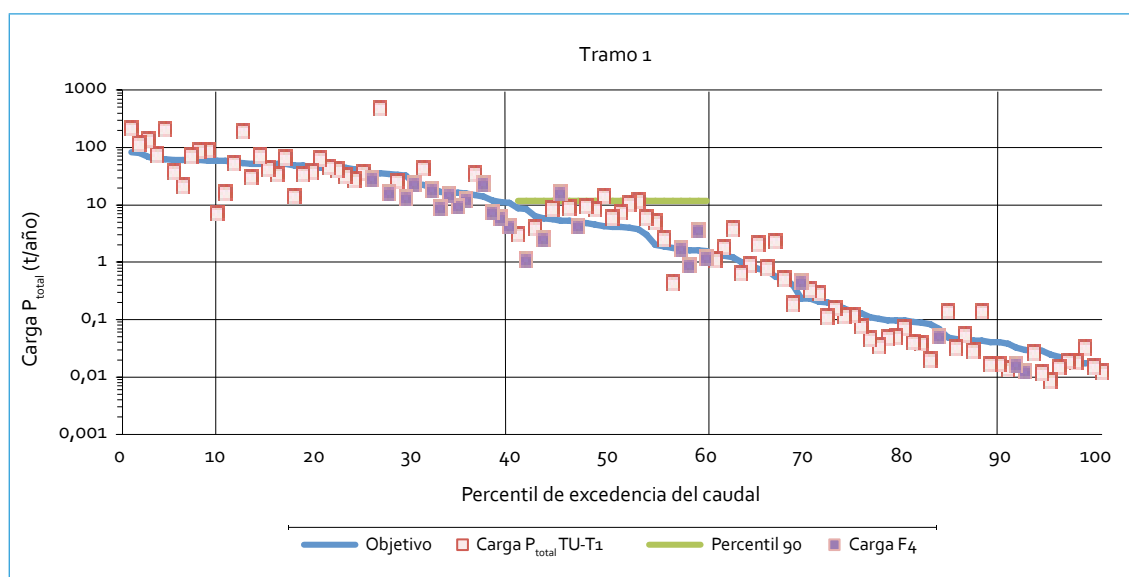
idad se ha cumplido en este tramo. Al igual que para el tramo 3, las cargas han disminuido a lo largo de tiempo, pero se requiere eliminar puntos de vertimiento para cumplir la meta de reducción de 3850 t.

#### 5.1.2.5. Fósforo total

La figura 5.25 muestra la curva de duración de cargas de  $P_{total}$  para los cuatro tramos del río

Tunjuelo. Las cargas aumentaron a lo largo del río y son más altas en los tramos 2 y 3, debido a las actividades mineras y a los vertimientos en ciertos puntos de estos tramos. En la tabla 5.5 se detalla el cambio de las cargas promedio entre los tramos del río y sus diferencias con las metas establecidas.

Las cargas de  $P_{total}$  en el tramo 1 evidencian una amplia variación, ya que estas se presentaron en un rango de 0,01 a 494 t/año. Al igual





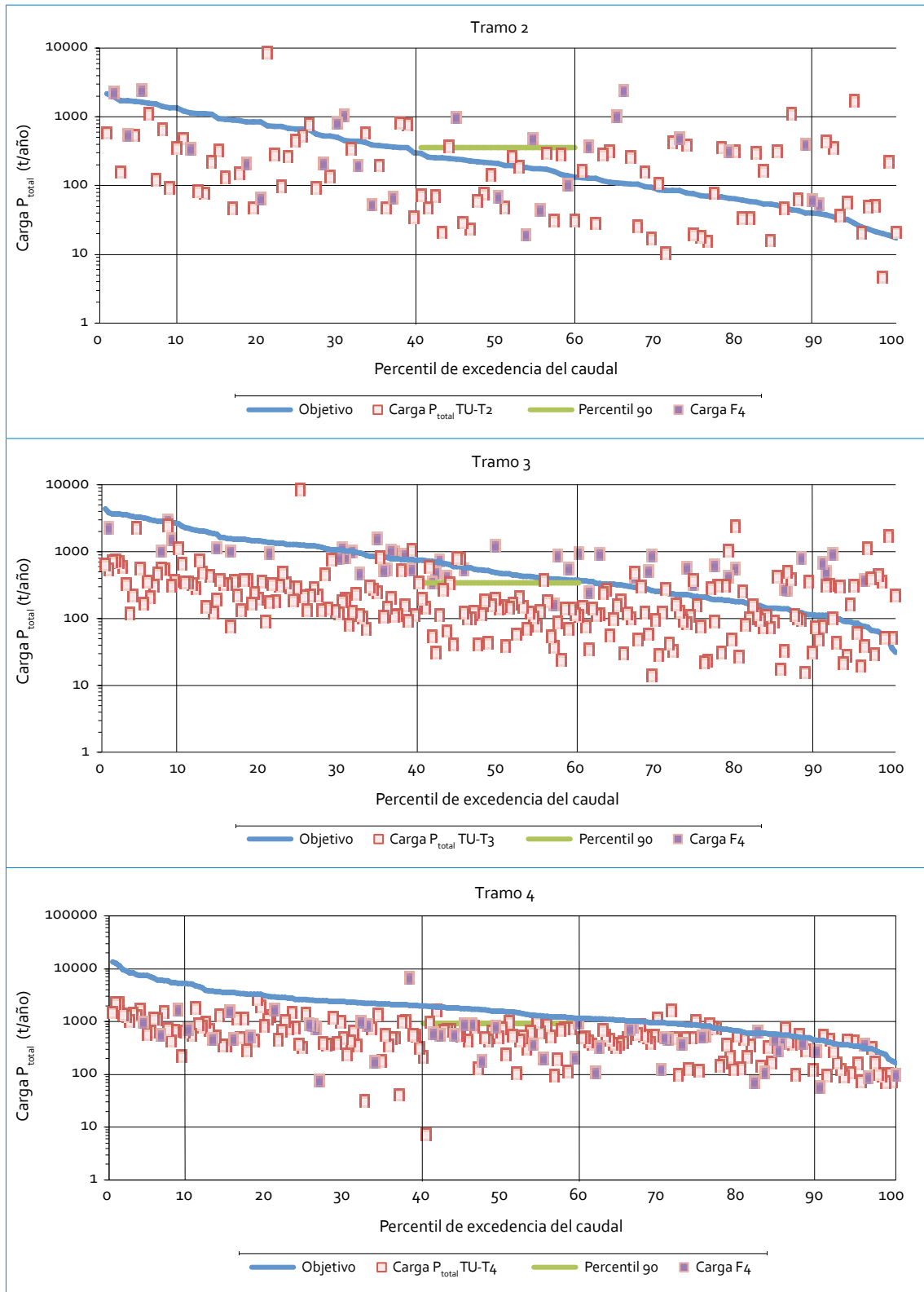


FIGURA 5.25. Curva de duración de carga P<sub>total</sub>: río Tunjuelo

TABLA 5.5. Carga  $P_{total}$  (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$P_{total}$				
Percentil 90 (F1-F4)	12,0	355	338	921
Promedio (F1-F4)	6,1	163	167	559
Promedio (F4)	4,0	284	98	569
Carga curva duración (percentil 50)	4,2	211	475	1560
PSMV	-	-	-	-
Meta de reducción	-	550	100	500
Línea base-promedio F4	-	318	166	558

[-] la línea base es menor a la carga actual en el rango medio de caudales (promedio fase 4).

que para los otros parámetros, la cantidad de nutrientes aumentó en el punto La Regadera, por la apertura de las compuertas del embalse, y el punto UAN, que fue afectado por las primeras descargas de ARD. El caudal ejerció un efecto en las cargas del tramo 1; en caudales altos y condición húmeda (percentil 0-40) las cargas fueron altas, con un promedio de 60 t/año; en el rango medio de caudales el promedio fue de 6,1 t/año, y en caudales bajos y condiciones secas (percentil 60-100) las cargas fueron bajas, con un promedio de 0,37 t/año (figura 5.25).

En Yomasa y Doña Juana, las cargas fueron más dispersas y aumentaron respecto al tramo 1. Los valores estuvieron en un rango de 5 a 8625 t/año, lo que refleja que los vertimientos de los lixiviados provenientes de la planta de tratamiento del relleno sanitario en Doña Juana afectan severamente la calidad del agua en este tramo. En la figura 5.25 se aprecia que las cargas de  $P_{total}$  obtenidas en el rango medio de caudales y condición seca son relativamente bajas, con un promedio de 163 t/año; sin embargo, las cargas del percentil 90

(355 t/año) y las cargas promedio de la fase 4 (284 t/año) son superiores a la curva de duración y muestran que el objetivo de calidad se incumplió varias veces durante el tiempo de monitoreo. En cuanto a la diferencia entre la línea base y la carga promedio (rango medio de caudales) del último periodo de monitoreo (F4), se ve que todavía se presentan cargas bastante altas que impiden cumplir con la meta de reducción (550 t).

El tramo 3 presentó cargas similares al tramo 2, con un rango de 14 a 8625 t/año. Las cargas fueron altas en el punto Doña Juana, pero decayeron en el punto Barrio México, por efecto de la zona de minas inundadas, y volvieron a aumentar en los puntos San Benito y Makro Sur. Respecto a la carga promedio (167 t/año) y al percentil 90 (338 t/año), los valores son menores que la curva de duración (475 t/año) y refleja que el objetivo de calidad se ha cumplido en este tramo; así mismo, es importante resaltar que las cargas han disminuido a lo largo del tiempo, ya que la meta de reducción de 100 t se está cumpliendo.

Para finalizar, en el tramo 4 se observó que las cargas aumentaron considerablemente en comparación con el tramo 3, debido a los vertimientos del Interceptor Tunjuelo Medio; los rangos estuvieron entre 7 y 6578 t/año. Las cargas más altas se presentaron en el punto Tv 86, en el cual las descargas de agua residual son más altas (promedio = 646 t/año). En cuanto a la carga promedio (559 t/año) y al percentil 90 (921 t/año), la figura 5.25 muestra que estos valores son menores que la curva de duración (1560 t/año) y evidencian que el objetivo de calidad se está cumpliendo. Las cargas de  $P_{total}$  han disminuido a lo largo del tiempo, ya que la diferencia entre la línea base y la carga promedio (en rango medio de caudales) refleja que la meta de reducción (500 t) se está cumpliendo.

#### 5.1.2.6. Grasas y aceites

Las cargas de GyA muestran un comportamiento ascendente a lo largo del río. Se observa incremento a partir del tramo 2 (tabla 5.6), posiblemente causado por las descargas de la planta de tratamiento del relleno sanitario en Doña Juana, junto con vertimientos de San Benito y el Interceptor Tunjuelo Medio.

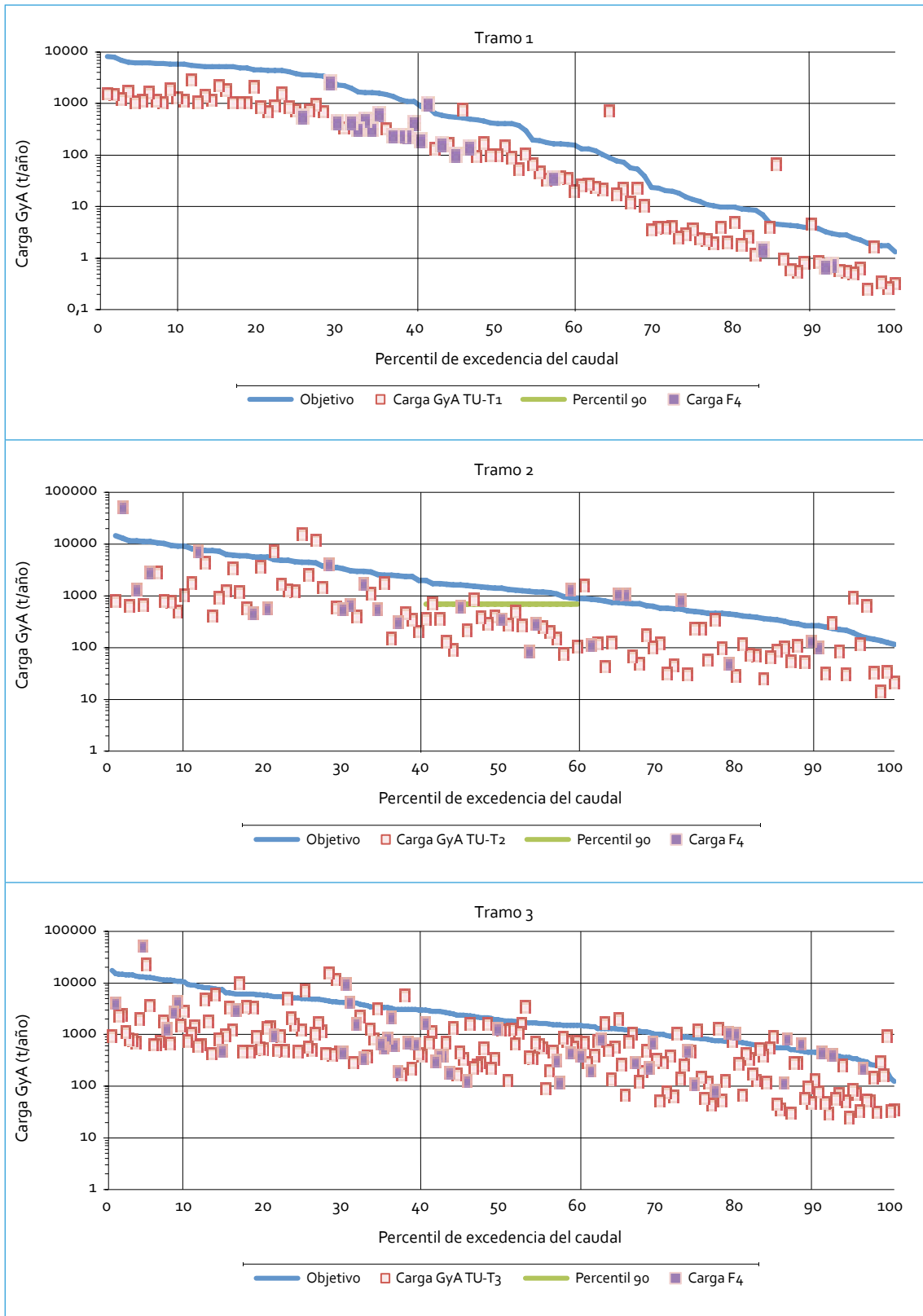
En el tramo 1, las cargas de GyA presentaron un rango entre 0,3 y 2877 t/año (figura 5.26)

consecuencia de la apertura de las compuertas del embalse La Regadera, que afectan el caudal en este tramo, junto con el efecto de las primeras descargas de ARD en el punto UAN. La carga promedio (164 t/año), junto con el percentil 90 (189 t/año), no sobrepasa la curva de duración y ello evidencia que este tramo no es afectado por GyA y que el objetivo de calidad se está cumpliendo. La mayoría de las cargas de la fase 4 se encuentran en condiciones húmedas y caudales altos con un promedio de 268 t/año. En el tramo 2, las cargas fueron bastante dispersas (15-51 805 t/año) y aumentaron en comparación con el tramo 1 (tabla 5.6). El punto más crítico fue Doña Juana debido a los vertimientos del relleno sanitario en Doña Juana. La curva de duración en este tramo no fue excedida, ya que las cargas promedio (361 t/año) y el percentil 90 (692 t/año) fueron menores, lo cual evidencia que el objetivo de calidad se está cumpliendo en este tramo.

En el tramo 3 se observó un comportamiento similar al tramo 2, con oscilaciones entre 25 y 51 805 t/año. Al igual que para los otros parámetros, este comportamiento se debe al aumento de cargas por los vertimientos en los puntos Doña Juana, San Benito y Makro Sur y al descenso de cargas por la zona de minas inundadas en el punto Barrio México. En cuanto a la curva de duración, la figura 5.26 muestra

TABLA 5.6. Carga de GyA (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
GyA				
Percentil 90 (F1-F4)	189	692	1442	22287
Promedio (F1-F4)	164	361	702	10961
Promedio (F4)	268	533	518	8811
Carga curva duración (percentil 50)	416	1406	1902	9753



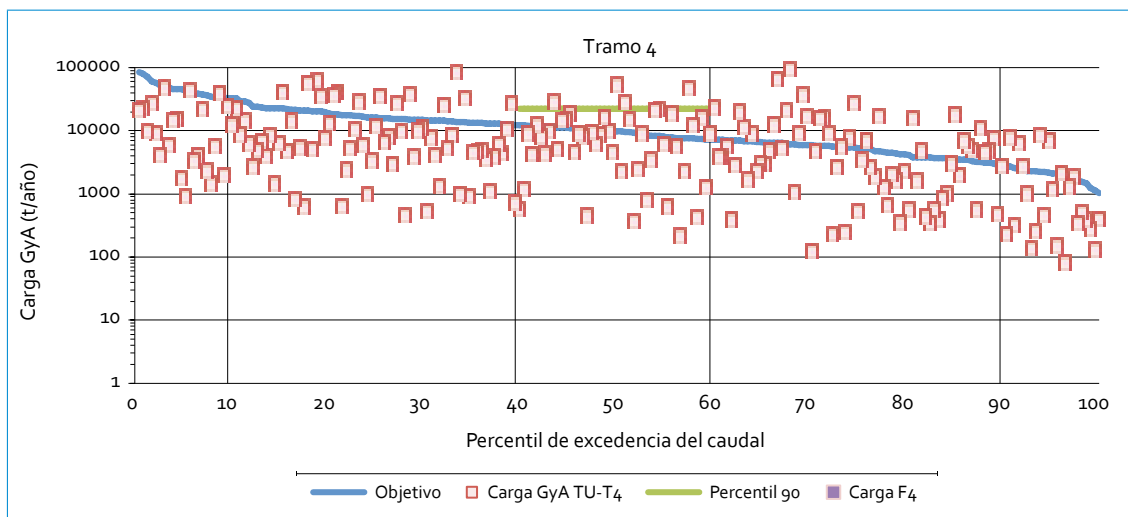


FIGURA 5.26. Curva de duración de carga GyA: río Tunjuelo

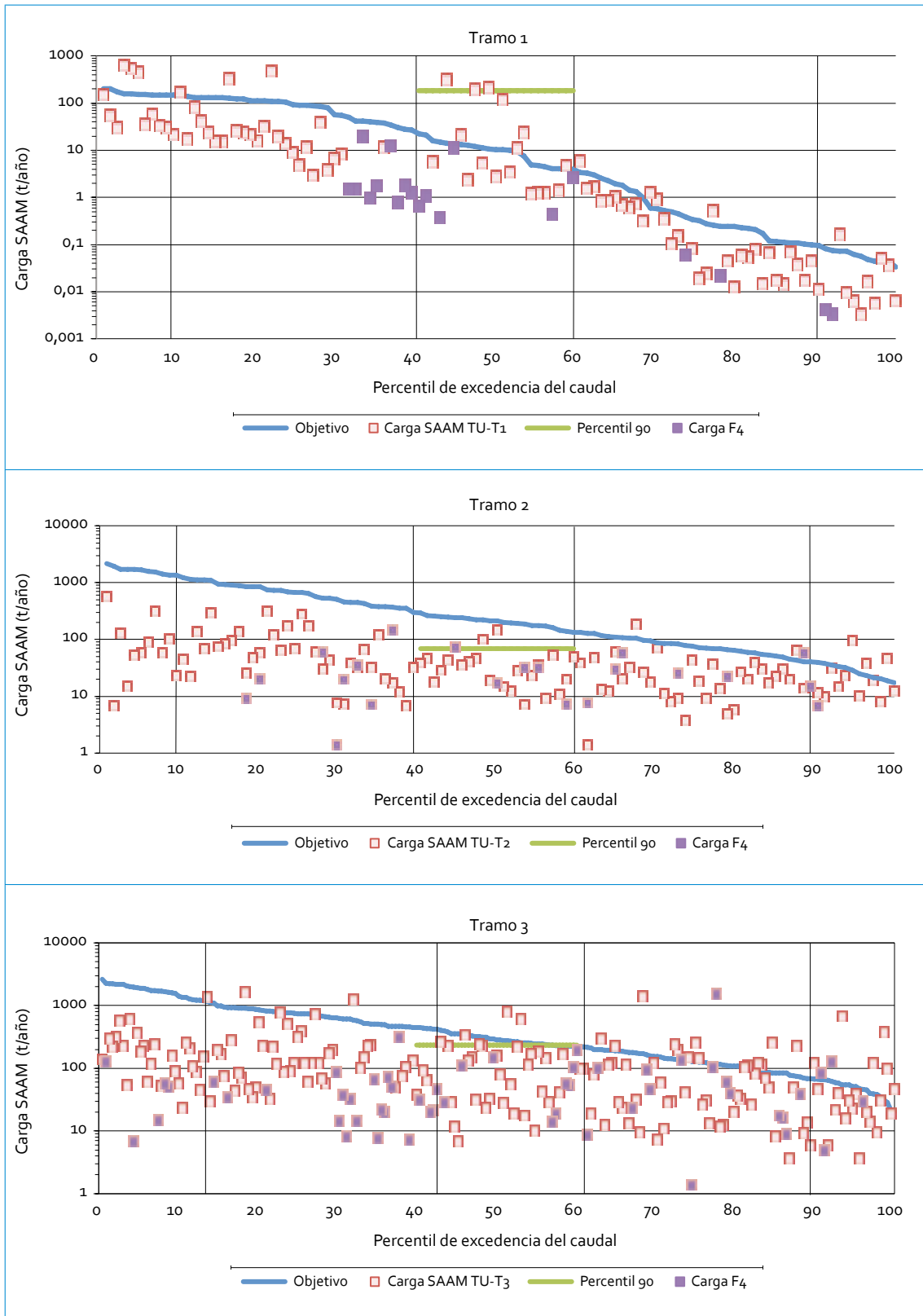
que las cargas promedio (361 t/año) y el percentil 90 (692 t/año) fueron menores, lo cual muestra que este tramo ha cumplido con el objetivo de calidad establecido. En el tramo 4, las cargas de GyA fueron las más altas de todos los tramos, debido al aumento sucesivo en el caudal y al elevado número de vertimientos en este tramo. De esta forma, se presentaron cargas altas (12 081 t/año) con caudales altos y condiciones húmedas (percentil 0-40), y cargas medias (4870 t/año) con caudales bajos y condiciones secas (percentil 60-100). Así mismo, las cargas promedio (10 961 t/año) y el percentil 90 (22 287 t/año) son mayores que la curva de duración, lo cual evidencia el incumplimiento del objetivo de calidad. Es importante resaltar que para este tramo no hay meta de reducción establecida.

#### 5.1.2.7. SAAM

En el tramo 1, la figura 5.27 muestra que las cargas variaron en un rango bastante amplio de 0,003 a 638 t/año, afectado por la apertura de las compuertas del embalse La Regadera.

Las cargas promedio (42 t/año) y el percentil 90 (182 t/año) son superiores a la curva de duración (tabla 5.7), lo cual refleja que hubo cargas bastante altas durante los monitoreos que elevaron la condición natural del río, las cuales causaron el incumplimiento del objetivo de calidad propuesto. Para el tramo 2, la carga de SAAM presentó un rango de 1 a 572 t/año; las cargas son menores que la curva de duración, ya que la carga promedio fue de 39 t/año y el percentil 90 fue de 69 t/año, y ello genera cumplimiento del objetivo de calidad.

La carga de SAAM en el tramo 3 fue mayor que en el tramo 2, y ello muestra que el agua es afectada por las descargas de tipo doméstico. Al igual que en los otros parámetros, el punto con las cargas más bajas fue Barrio México y los puntos con las concentraciones más altas fueron San Benito y Makro Sur. La curva de duración no fue excedida, ya que la carga promedio (121 t/año) y el percentil 90 (234 t/año) fueron menores. Este comportamiento evidencia que el objetivo de calidad se cumplió en este tramo.



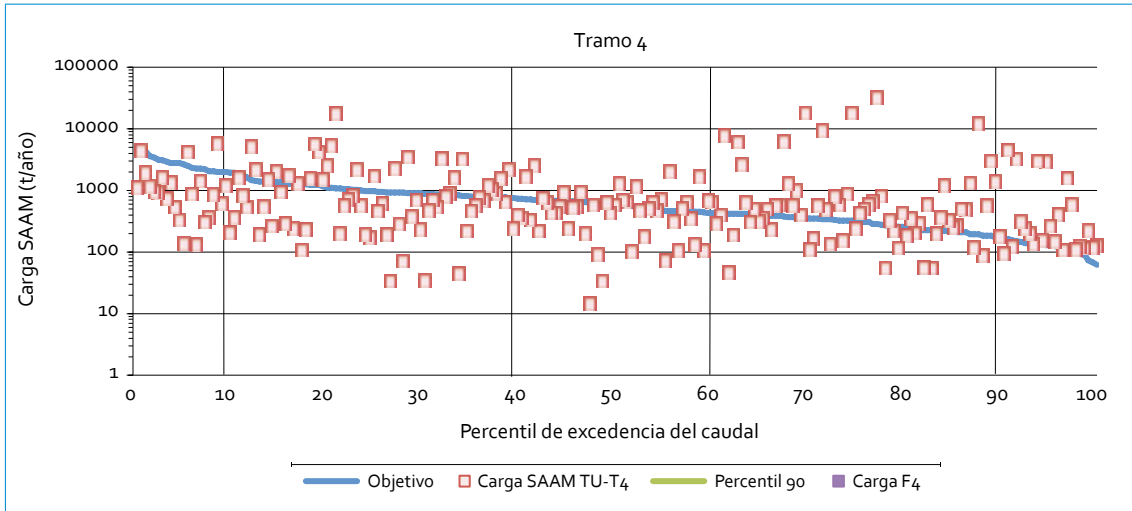


FIGURA 5.27. Curva de duración de carga SAAM: río Tunjuelo

TABLA 5.7. Carga SAAM (rango medio caudales) vs. metas: río Tunjuelo

Parámetro	Río Tunjuelo (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
SAAM				
Percentil 90 (F <sub>1</sub> -F <sub>4</sub> )	182,0	69	234	1211
Promedio (F <sub>1</sub> -F <sub>4</sub> )	42,0	39	121	598
Promedio (F <sub>4</sub> )	2,7	57	66	353
Carga curva duración (percentil 50)	10	211	285	585

Para finalizar, en el tramo 4 se presentaron las cargas más altas de todo el río, con un rango que osciló entre 15 y 32 522 t/año, que refleja la afectación del agua debido a los vertimientos de ARD y agua residual industrial. Se presentaron cargas altas (2275 t/año) con caudales altos y condiciones húmedas (percentil 0-40), y cargas bajas (656 t/año) con caudales bajos y condiciones secas (percentil 60-100). Las cargas promedio (598 t/año), junto con el percentil 90 (1211 t/año), son mayores que la curva de duración, lo cual evidencia el incumplimiento del objetivo de calidad.

### 5.2. Calidad del agua (woi)

El caudal en el río Tunjuelo se ve alterado de forma significativa, por la operación de la compuerta del embalse La Regadera, lo que aumenta su valor hasta en tres órdenes de magnitud cuando estas compuertas del embalse se abren. Dicho factor afecta las concentraciones de algunos parámetros en el agua y, a su vez, influye en el valor del índice de calidad hídrica. Por lo anterior, se considera importante analizar dos escenarios para evaluar la dinámica de la calidad del agua en función del régimen de caudales en el tramo 1. El escenario 1

corresponde a todos los datos registrados y el escenario 2 hace referencia a la operación del embalse con las compuertas cerradas (caudales aproximadamente entre 4 y 12 L/s). Sin embargo, al analizar los datos registrados para el S2-2012, todos corresponden a caudales superiores a 1000 L/s, y para el S1-2013, la mitad corresponde a caudales superiores a 1391 L/s. Teniendo en cuenta que estadísticamente no hay una muestra significativa para el escenario 2, el índice de calidad del agua (WQI) solo fue calculado teniendo en cuenta el escenario 1.

En el tramo 1 del río Tunjuelo únicamente se encuentra un punto de monitoreo (La Regadera). Sobre este se obtuvo un total de 103 datos, de los cuales 7 no alcanzaron los objetivos de calidad. A partir de la estimación del WQI, la calidad del agua en este tramo 1 fue **buena**. Los parámetros que no satisficieron los objetivos de calidad fueron SST y coliformes fecales. Como se puede ver en la tabla 5.8, el WQI para este tramo fue de 88.

TABLA 5.8. WQI río Tunjuelo: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	0	F1	20,00
DBO <sub>5</sub>	0	F2	6,99
DQO	0	NSE	0,03
N <sub>total</sub>	0	F3	2,82
P <sub>total</sub>	0	WQI	87,68
sst	6		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	1		
pH	0		
SAAM	0		

El 60 % de los datos de SST no alcanzó los objetivos de calidad y 6 datos estuvieron por encima del valor establecido en la Resolución 5731 de 2008 (10 mg/L), con valores de 11 y 22 mg/L. En cuanto a coliformes fecales, solo se presentó un dato que no cumplió con el objetivo de calidad con un valor de  $1,5 \times 10^3$  NMP/100 mL. Cabe resaltar que este dato se encontró cercano al objetivo de calidad descrito en la norma ( $1 \times 10^3$  NMP/100 mL).

Al comparar el WQI de este periodo (2012-2013) para el escenario 1 con el WQI 2011-2012, la calidad de este tramo pasó de **regular** a **buena**. El valor del WQI cambió entre los dos periodos (pasó de 73 a 88), lo cual estuvo relacionado con la disminución de variables que no alcanzaron los objetivos, pues para el 2012-2013 se obtuvieron 2 parámetros (SST y coliformes fecales) por fuera del rango del objetivo; mientras que para 2011-2012 se encontraron 4 parámetros (oxígeno disuelto, P<sub>total</sub>, SST y coliformes fecales). Aunque los SST y coliformes fecales continúan por fuera del rango objetivo, el número de datos que no cumplió fue menor que para el 2011-2012.

En el tramo 2 de este río hay dos puntos de monitoreo (Yomasa y Doña Juana) con un total de datos de 187, de los cuales 19 no lograron los objetivos de calidad. El WQI de este tramo fue **bueno**; los parámetros que no satisficieron los objetivos de calidad para este tramo fueron P<sub>total</sub> y SST. El WQI para este tramo fue de 81, como se muestra en la tabla 5.9.

TABLA 5.9. WQI río Tunjuelo: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	0	F1	20,00
DBO <sub>5</sub>	0	F2	10,20



Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
DQO	0	NSE	0,32
N <sub>total</sub>	0	F3	24,32
P <sub>total</sub>	6	WQI	80,89
SST	13		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	0		
SAAM	0		

El WQI obtenido para el tramo 2 se comportó de forma similar al tramo 1, y al igual que este, el parámetro de SST no cumplió con los objetivos de calidad establecidos. El punto Yomasa presentó una mejor calidad que Doña Juana; tan solo el 53 % de los datos de calidad de este punto sobrepasó lo establecido en la Resolución 5731 de 2008. En Doña Juana, el 15 % de los datos excedió los objetivos. El parámetro más crítico del tramo fue SST, con el 72 % de los datos por encima del objetivo de calidad (120 mg/L); de este porcentaje el 50 % correspondió a datos del punto Doña Juana. En cuanto a P<sub>total</sub>, solo 6 datos presentaron valores por encima del objetivo de calidad; de estos solo un dato en el punto Yomasa excedió el objetivo establecido en la norma (3 mg/L), con un valor de 4,83 mg/L. Los demás datos se presentaron en el punto Doña Juana con un rango de variación de 4-9 mg/L.

Comparando el WQI de este periodo con el WQI de 2011-2012, la calidad del agua de este tramo mejoró, al pasar de una categoría **marginal** a una **buena**. Los valores de WQI cambiaron drásticamente entre los dos periodos (WQI actual = 81 vs. WQI 2011-2012 = 60). Esta mejoría está asociada con la disminución de

parámetros que no cumplieron los objetivos de calidad; para el 2012-2013 se obtuvieron dos parámetros (P<sub>total</sub> y SST) por fuera del objetivo de calidad establecido, mientras que para 2011-2012 se obtuvieron 6 parámetros (DBO, DQO, N<sub>total</sub>, P<sub>total</sub>, SST y pH). La mejora en la calidad del agua para este tramo se debe principalmente al punto Yomasa, el cual presentó solo 5 datos que excedieron los objetivos de calidad, debido a la eliminación de puntos de vertimiento aguas arriba de la quebrada Yomasa. Sin embargo, es importante mencionar que aun cuando hubo una disminución de variables que incumplen, para el punto Doña Juana se continúan presentando datos (51 %) superiores al objetivo de calidad establecido.

El tramo 3 de este río está conformado por cuatro puntos: Doña Juana, Barrio México, San Benito y Makro Autopista Sur, con 376 datos en total, de los cuales 58 no alcanzaron los objetivos de calidad. De acuerdo con el cálculo del WQI, para este tramo la calidad del agua fue **pobre**, con un valor de 41 (tabla 5.10). En general, se observó que la calidad del agua, en comparación con el tramo 2, empeoró drásticamente, al pasar de una calidad **buena** a una **pobre**. La calidad de agua en los cuatro puntos de monitoreo fue heterogénea, ya que el punto Barrio México tuvo una mejor calidad que el resto de los puntos monitoreados. Solo el 4,25 % de los datos sobrepasó los objetivos de calidad, en tanto que para los puntos Doña Juana y Makro Autopista Sur, el 15 % y el 17 % excedieron los objetivos, y en San Benito el 28 % superó lo establecido en la Resolución 5731 de 2008. Todos los parámetros evaluados excedieron los objetivos de calidad, siendo oxígeno disuelto, SST y coliformes fecales los parámetros más críticos. El oxígeno disuelto excedió el objetivo de calidad en 40 % de los

monitoreos, seguido de coliformes fecales, con 33 %, y SST, con 32 %.

TABLA 5.10. WQI río Tunjuelo: tramo 3

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	16	F1	100,00
DBO <sub>5</sub>	1	F2	15,40
DQO	1	NSE	0,24
N <sub>total</sub>	1	F3	19,42
P <sub>total</sub>	4	WQI	40,51
SST	12		
Grasas y aceites	4		
Coliformes fecales	13		
pH	2		
SAAM	4		

Al comparar el WQI de este periodo (2012-2013) con el periodo previo, la calidad de este tramo se ha mantenido en la misma categoría **pobre**; sin embargo, se notó un pequeño aumento en el valor obtenido para este periodo, en comparación con el periodo anterior (WQI actual = 41 vs. WQI 2011-2012 = 38). Aunque para este periodo todos los parámetros mostraron datos por encima de los objetivos de calidad al compararlo con el periodo 2011-2012, el número de valores que excedieron los objetivos fue inferior. Se observó que la cantidad de valores que excedieron los objetivos de oxígeno disuelto, DQO, N<sub>total</sub>, SST y pH fue mucho menor para este periodo (2012-2013) que para el periodo (2011-2012).

Por último, el WQI en el tramo 4 (Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón) mostró una calidad del agua **pobre**; el WQI para este tramo fue de 43. En este tramo

se obtuvieron 382 datos, de los cuales 127 no cumplieron los objetivos de calidad. Al igual que en el tramo anterior, todos los parámetros, a excepción de pH, sobrepasaron los objetivos de calidad, como se puede observar en la tabla 5.11.

TABLA 5.11. WQI río Tunjuelo: tramo 4

Parámetro	Núm. datos que no alcanzan	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	18	F1	90,00
DBO <sub>5</sub>	5	F2	33,40
DQO	10	NSE	0,26
N <sub>total</sub>	14	F3	20,85
P <sub>total</sub>	5	WQI	43,28
SST	3		
Grasas y aceites	20		
Coliformes fecales	32		
pH	0		
SAAM	20		

Los parámetros que con mayor frecuencia excedieron los objetivos de calidad fueron oxígeno disuelto, GyA, coliformes fecales y SAAM. El 89 % de los datos de coliformes fecales superó el objetivo de calidad, el 51 % de los datos de GyA excedieron 30 mg/L, al igual que SAAM que superó 3mg/L en el mismo porcentaje. En cuanto a oxígeno disuelto, el 47 % de los datos sobrepasó el objetivo con valores inferiores a 0,5 mg/L. Al comparar el WQI de este periodo con el WQI de 2011-2012, la calidad de este tramo se ha mantenido en la misma categoría **pobre**; sin embargo, al igual que en el tramo 3, se notó un pequeño aumento en el valor obtenido para este periodo, en comparación con el periodo anterior (WQI actual =

43 vs. WQI 2011-2012 = 38). Esta mejoría en la calidad del agua está relacionada principalmente con una disminución en la cantidad de variables que no alcanzaron los objetivos de calidad. La cantidad de valores que excedie-

ron los objetivos de oxígeno disuelto y SST fue menor para este periodo (2012-2013) que para el periodo 2011-2012.

A continuación se presenta el mapa de calidad para el río Tunjuelo.

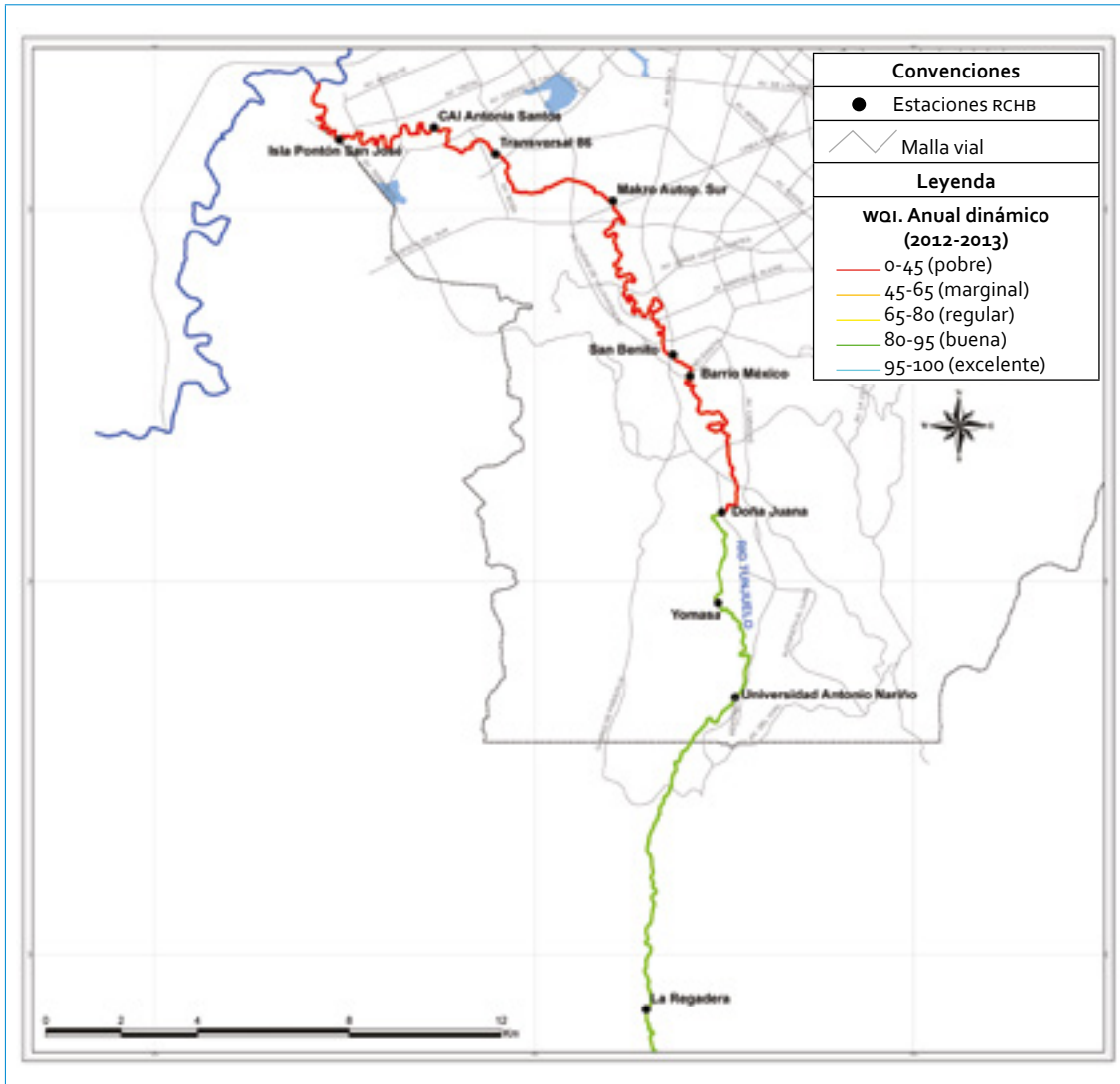


FIGURA 5.28. Mapa de calidad: río Tunjuelo



## 6. ESTADO DE LOS RÍOS EN BOGOTÁ

### 6.1. Río Torca

**E**n el río Torca, la mayoría de parámetros mostró un aumento de las concentraciones entre los tramos 1 y 2. En el 1, las concentraciones fueron muy bajas y gran parte de datos estuvo por debajo del objetivo de calidad, lo que denota un muy buen estado. Por el contrario, en el tramo 2 se evidencia el impacto de las descargas de aguas residuales domésticas (ARD) y el incumplimiento de los objetivos de calidad, que se incrementan, especialmente en sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y coliformes fecales.

Al comparar la calidad del agua del río con un ARD típica, el tramo 2 muestra una condición alarmante respecto a los coliformes fecales. Así, al sumar el estado de los tramos 1 y 2, es evidente que la calidad del agua está altamente impactada por los coliformes fecales y en menor proporción por el nitrógeno (tabla

6.1). Hay una alta probabilidad de encontrar concentraciones de coliformes en el río que no se alejan del agua transportada en la red de alcantarillado. En general, se notó que el sector entre Calle 161 y Jardines de Paz es donde más impacto se recibe, producto de las descargas de agua residual. Esto refleja que se deben centrar los esfuerzos de la ciudad en prevenir las descargas de ARD en el río en zonas con nuevos desarrollos habitacionales. En varios parámetros se notó que en la cuenca baja (punto de monitoreo San Simón), los contaminantes se mantienen altos; no obstante, el rango de variación es más pequeño, lo cual se puede relacionar con un ligero amortiguamiento de las descargas, que ayuda a mantener concentraciones más homogéneas. Además, hacia la parte más baja se ha notado la presencia de buchón, que tiende a mejorar la calidad del agua.

Dado que la mayoría de aguas residuales vertidas al río Torca son de origen doméstico,

TABLA 6.1. Resumen de cumplimiento parámetros tipo 1: río Torca

	DBO <sub>5</sub>	DOO	SST	N <sub>total</sub>	P <sub>total</sub>	CT	CF	GyA	SAAM
% por encima ARD típica	2	3	8	20	1	-	64	2	-
% por encima de objetivos de calidad	0	3	5	3	3	-	36	5	26

no es común encontrar otras sustancias como metales, fenoles, entre otros. Luego de contrastar las concentraciones de los parámetros tipo 2 con criterios de calidad para diferentes usos, se concluye que, para los parámetros evaluados, el río no tiene la capacidad para soportar la vida acuática, específicamente en el tramo 2, ya que una cantidad importante de datos supera los criterios establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para alcalinidad, sulfuros y nitrógeno amoniacal (tabla 6.2). Por otro lado, la protección a la salud humana y el uso para agua potable se ven amenazados por los índices de manganeso y plomo encontrados en varias ocasiones.

## 6.2. Río Salitre

El río Salitre se encuentra en una cuenca mayoritariamente doméstica, donde los verti-

mientos de aguas residuales afectan la calidad del agua del río a lo largo de su recorrido por la ciudad. El primer punto de monitoreo (Parque Nacional) presenta buena calidad; sin embargo, a partir de Carrera 7ª, donde el río es canalizado, las descargas de las aguas residuales aumentan los contaminantes de manera importante. La mayoría de de estos mostraron un aumento de las concentraciones a lo largo del río. Estas evidencian una alta variabilidad, sobre todo en los tramos 2 y 3, que oscilan en rangos muy amplios, lo que permite asumir que los contaminantes en este sector del río dependen de las descargas de aguas residuales y su dinámica en el día.

A partir del tramo 2, una cantidad no despreciable de datos supera los objetivos de calidad y la concentración de un ARD típica (tabla 6.3), lo que permite asegurar que la capacidad autodepuradora y de asimilación del río se ve muy disminuida y que el agua transportada

TABLA 6.2. Resumen de parámetros tipo 2: río Torca

	Alcalinidad	Dureza	Sulfuros	Fenoles	N <sub>amoniacal</sub>	Ba	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Pb
% por encima criterio vida acuática	81	-	57*	-	58	-	8	25	-	-	-	1	6
% por encima criterio vida salud humana	-	-	-	0	-	1	-	0	0	-	61	0	-
% por encima criterio agua potable	-	13	-	-	-	1	9	0	0	3	-	1	49
% por encima criterio efecto organoléptico	-	-	-	0	-	-	-	0	0	-	-	-	-
Apto para el uso evaluado	x	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x

\*El criterio es más bajo que el límite de detección; por lo tanto, el porcentaje representa los datos por encima del límite de detección.

TABLA 6.3. Resumen cumplimiento de parámetros tipo 1: río Salitre

	DBO <sub>5</sub>	DOO	SST	N <sub>total</sub>	P <sub>total</sub>	CT	CF	GyA	SAAM
% por encima ARD típica	35	44	25	57	39	-	79	21	-
% por encima de objetivos de calidad	26	29	23	33	10	-	57	42	47

no se diferencia sustancialmente de lo que se transporta en la red de alcantarillado combinado, sobre todo por las cantidades de coliformes fecales, nutrientes y materia orgánica.

Así como para el río Torca, las concentraciones de los parámetros tipo 2 del río Salitre no muestran la capacidad para soportar la vida acuática después del punto NQS Calle 53, ya que una cantidad importante de datos supera los criterios establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para alcalinidad, sulfuros y nitrógeno amoniacal (tabla 6.4). La protección a la salud humana y el uso para agua potable se ven amenazados por las concentraciones de manganeso y plomo.

### 6.3. Río Fucha

El río Fucha, considerado uno de los principales cuerpos de agua que atraviesa la ciudad de Bogotá, es afectado en gran medida por las des-

cargas de ARD que se vierten paulatinamente en este a través de su tránsito por la ciudad. El tramo más alto presenta óptimas condiciones de calidad de agua, propias de cuerpos de agua natural que se encuentran inalterados por las actividades antropogénicas. El impacto generado por las descargas de ARD empieza a evidenciarse una vez el río atraviesa el tramo 2, donde se observa cómo las concentraciones de parámetros como descarga bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno ( $N_{total}$ ) y coliformes fecales incrementan. En el tramo 3, los contaminantes aumentan significativamente. Por último, en el tramo 4 las condiciones resultan ser aún más críticas, pues las de los distintos parámetros, en ocasiones, terminan por superar con casi el 80 % o hasta el 100 % de sus datos los objetivos de calidad (como es el caso de coliformes fecales) y, por ende, los valores típicos de referencia (tabla 6.5).

TABLA 6.4. Resumen de parámetros tipo 2: río Salitre

	Alcalinidad	Dureza	Sulfuros	Fenoles	$N_{amoniacal}$	Ba	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Pb
% por encima criterio vida acuática	78	-	64*	-	66	-	9	0	-	-	-	0	6
% por encima criterio vida salud humana	-	-	-	0	-	0	-	0	0	-	49	0	-
% por encima criterio agua potable	-	17	-	-	-	1	8	0	0	2	-	0	44
% por encima criterio efecto organoléptico	-	-	-	7	-	-	-	0	0	-	-	-	-
Apto para el uso evaluado	x	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x

\*El criterio es más bajo que el límite de detección; por lo tanto, el porcentaje representa los datos por encima del límite de detección.

TABLA 6.5. Resumen cumplimiento de parámetros tipo 1: río Fucha

	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST	$N_{total}$	$P_{total}$	CT	CF	GyA	SAAM
% por encima ARD típica	46	56	43	61	45	-	82	30	-
% por encima de objetivos de calidad	24	46	42	43	20	-	65	37	58

Los vertimientos de ARD en el río son tan altos que no le permiten al río desempañar sus funciones naturales de autosostenibilidad ni de resiliencia, tan importantes para la estabilidad de los cuerpos de agua. Adicionalmente, los efectos son tales que en los últimos tramos del río es casi imposible que se desarrolle vida aerobia acuática y, muchos menos, se pueda utilizar este recurso como fuente de agua potable, pues parámetros como sulfuros, nitrógeno amoniacal, cinc y plomo presentan concentraciones muy elevadas que superan los criterios establecidos para estos usos de agua (tabla 6.6).

#### 6.4. Río Tunjuelo

Para el río Tunjuelo los puntos de La Regadera y UAN no presentaron variaciones importantes en la mayoría de los parámetros medidos. Los

incrementos en el río son evidentes a partir de Yomasa, donde las cantidades de materia orgánica, nutrientes, tensoactivos, coliformes fecales y totales, fenoles y sulfuros aumentan a causa del primer vertimiento importante de ARD que se presenta en el río (quebrada Yomasa). Con relación a los parámetros tipo 1, en la tabla 6.7 se realiza una comparación con un ARD y con el objetivo de calidad. En general, se observó que parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST),  $N_{total}$ , fósforo ( $P_{total}$ ), SAAM y coliformes fecales superaron los objetivos de calidad y presentaron valores por encima de los encontrados en un ARD en alcantarillado combinado. Este comportamiento se evidenció, sobre todo, en puntos como Doña Juana y Tv 86, los cuales son afectados por los lixiviados del relleno sanitario y por el interceptor medio del río Tunjuelo. Por el contrario, se notó

TABLA 6.6. Resumen de parámetros tipo 2: río Fucha

	Alcalinidad	Dureza	Sulfuros	Fenoles	$N_{amoniacal}$	Ba	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Pb
% por encima criterio vida acuática	86	-	73*	-	81	-	-	61	-	-	-	0	4
% por encima criterio vida salud humana	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	15	-	-
% por encima criterio agua potable	-	26	-	-	-	0	11	1	0	24	-	6	58
% por encima criterio efecto organoléptico	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apto para el uso evaluado	x	✓	x	✓	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	x

\*El criterio es más bajo que el límite de detección, por lo tanto el porcentaje representa los datos por encima del límite de detección.

TABLA 6.7. Resumen cumplimiento de parámetros tipo 1: río Tunjuelo

	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST	$N_{total}$	$P_{total}$	CT	CF	GyA	SAAM
% por encima ARD típica	28	50	28	43	36	-	99	28	-
% por encima de objetivo de calidad	12	24	43	24	22	-	53	23	38



que en el tramo 3 (punto de monitoreo Barrio México) las concentraciones de SST y DQO disminuyen, ya que allí se ubican las zonas de minas inundadas, las cuales funcionan como un sedimentador y un reactor de oxidación.

Al comparar los parámetros tipo 2 con diferentes criterios de uso, se concluye que la alcalinidad, el nitrógeno amoniacal y algunos metales (como cadmio, cinc, cromo, manganeso y plomo) se encuentran en altas concentraciones en los tramos 2, 3 y 4 del río, y que con ello se afecta el potencial de vida acuática, de potabilización y la vida humana (tabla 6.8). Las altas concentraciones en alcalinidad y nitrógeno amoniacal son producto de diferentes condiciones como: los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana, los vertimientos de tipo industrial (curtiembres, frigoríficos y talleres mecánicos) en San Benito y el Interceptor Tunjuelo Medio en Tv 86. Así mismo, las altas concentraciones de cadmio, cinc, cromo, manganeso y plomo en los tramos bajos del río no permiten la vida acuática o el uso para agua potable, y pueden llegar a afectar la salud humana. Por esta razón, es necesario el sanea-

miento del río por medio del uso adecuado de interceptores y el control del relleno sanitario Doña Juana.

En general, en la mayoría de puntos donde la calidad está entre regular y pobre, los parámetros críticos fueron coliformes fecales, grasas y aceites (GyA) y oxígeno disuelto. En la tabla 6.9 se muestran las concentraciones promedio de los parámetros críticos en todos los puntos de monitoreo. Las anotaciones (a\*, b\* y c\*) hacen referencia al tipo de ARD a la que se asemeja la concentración promedio. En el caso de los coliformes fecales, las concentraciones promedio en cada punto de monitoreo son muy similares a las de una ARD cruda. Estos resultados muestran que los ríos llegan a recibir tanta carga contaminante que su capacidad de asimilación es nula, por lo que la calidad es muy similar a la del ARD cruda.

Por otro lado, se evidenció el alto consumo de oxígeno disuelto una vez empiezan las descargas importantes de agua residual en los ríos, porque pasa rápidamente de concentraciones de 7 mg/L aproximadamente a niveles por debajo de 1,5 mg/L (tabla 6.10).

TABLA 6.8. Resumen de parámetros tipo 2: río Tunjuelo

	Alcalinidad	Dureza	Sulfuros	Fenoles	N <sub>amoniacal</sub>	Ba	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Pb
% por encima criterio vida acuática	76	-	21*	-	57	-	69	53	-	40	-	1	63
% por encima criterio vida salud humana	-	-	-	0	-	2	-	-	-	-	98	0	-
% por encima criterio agua potable	-	14	-	-	-	4	15	0,5	0	30	-	0,5	61
% por encima criterio efecto organoléptico	-	-	-	12	-	-	-	0,5	0	-	-	-	-
Apto para el uso evaluado	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	✓	x

\*El criterio es más bajo que el límite de detección; por lo tanto, el porcentaje representa los datos por encima del límite de detección.

TABLA 6.9. Composición típica de agua residual doméstica cruda

Parámetro	Concentración baja (a*)	Concentración media (b*)	Concentración alta (c*)
DBO	110	190	350
DQO	250	430	800
N <sub>total</sub>	20	40	70
P <sub>total</sub>	4	7	12
sst	120	210	400
Grasas y aceites	50	90	100
Coliformes fecales	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>8</sup>

a\*: descarga de agua residual de 750 L/hab-día; b\*: descarga de agua residual de 460 L/hab-día; c\*: descarga de agua residual de 240 L/hab-día.

TABLA 6.10. Concentración promedio: parámetros críticos

Coliformes fecales	Grasas y aceites	Oxígeno disuelto
< 1,0E+02	< 19	> 6,9
1,0E+2-1,0E+4	19-38	5,2-6,8
1,0E+4-5,0E+5	38-57	3,4-5,1
5,0E+5-1,0E+7	57-76	1,7-3,3
> 1,0E+07	> 76	< 1,6

	Coliformes fecales (Promedio)	Grasas y aceites (Promedio)	Oxígeno disuelto (Promedio)
TO-BosqueP	3,6E+01	5,0	7,4
TO-CL161	2,4E+06	19	1,6
TO-Jardpaz	1,9E+06	19	1,5
TO-Ssimón	2,7E+06	8,1	0,9
SA-ParqNal	1,0E+03	4,0	7,8
SA-Arzobis	1,5E+04	4,2	7,5
SA-CL53	3,3E+06	32	4,0
SA-Carrefo	1,6E+07	62 (a*)	0,7
SA-Tv91	6,3E+06	31	0,2
SA-Alameda	9,3E+06	94 (b*)	0,2
FU-Delirio	5,6E+01	3,6	8,1
FU-KR7	4,0E+05	4,6	7,5
FU-Ferroca	1,0E+07	23	1,0
FU-América	5,0E+07	43	0,6

	Coliformes fecales (Promedio)	Grasas y aceites (Promedio)	Oxígeno disuelto (Promedio)
FU-Boyacá	3,9E+06	36	0,8
FU-VisiónC	4,6E+07	95 (b*)	0,2
FU-ZFranca	4,3E+07	137 (c*)	0,2
FU-Alameda	3,0E+07	160 (c*)	0,4
TU-Regader	4,5E+02	4,7	7,6
TU-Yomasa	1,3E+05	7,6	7,1
TU-DJuana	1,4E+05	4,2	7,2
TU-México	4,6E+05	6,4	1,5
TU-SBenito	6,5E+06	20	1,0
TU-MakroS	2,7E+06	8,6	1,0
TU-Tv86	4,8E+07	157 (c*)	0,4
TU-PteInde	3,5E+07	50	0,3
TU-IslaPon	1,4E+07	72 (a*)	1,0

a\*: descarga de agua residual de 750 L/hab-día; b\*: descarga de agua residual de 460 L/hab-día; c\*: descarga de agua residual de 240 L/hab-día.

La calidad del río Torca estuvo entre **excelente** y **marginal** a lo largo de su recorrido por la ciudad. Dado que la calidad del agua en el tramo 1 fue excelente, no se evidenció ningún parámetro crítico. Por el contrario, en el tramo 2 los parámetros críticos fueron coliformes fecales, SAAM y GyA (tabla 6.11), lo cual muestra que el impacto de la calidad del agua está dado por las descargas de ARD, las cuales se caracterizan por su alto contenido de coliformes y detergentes. Al comparar los resultados actuales con el periodo 2011-2012, se pudo establecer un comportamiento constante en la calidad del agua del tramo 1 y una

leve mejora en el tramo 2, aunque se mantuvo en la misma categoría **marginal**.

TABLA 6.11. Resumen de variables críticas y evolución del índice de calidad del agua (WQI): río Torca

Río Torca	Parámetros críticos	WQI 2012-2013 vs. 2011-2012	
T1	-	Constante	
T2	Coliformes fecales (%)	66	Mejoró (%) 13
	SAAM (%)	34	
	Grasas y aceites (%)	16	

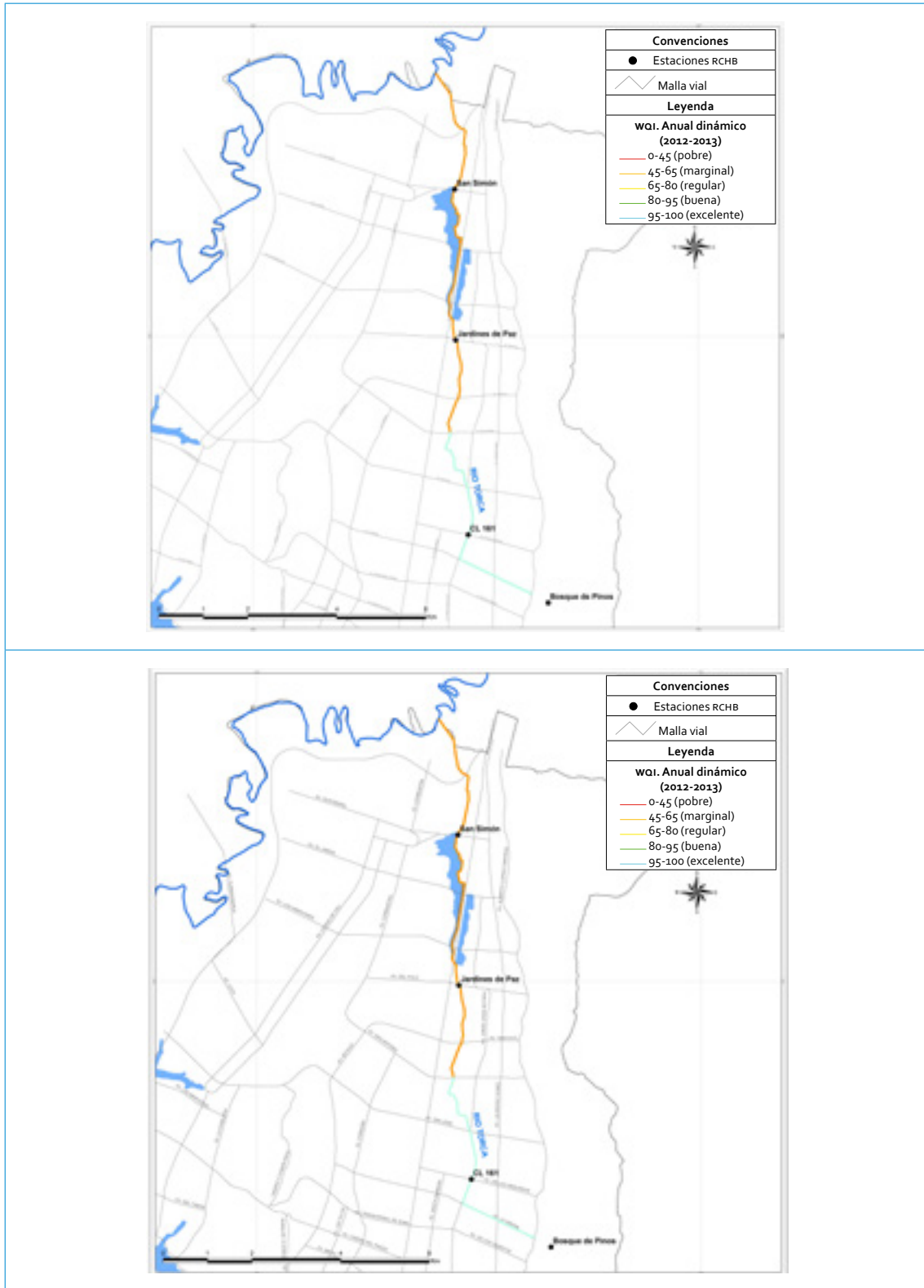


FIGURA 6.1. Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Torca

Respecto al río Salitre, se pasó de una clasificación **buena** en el tramo 1 a **marginal** en el 2, y **pobre** en los tramos 3 y 4. En el tramo 1, el único parámetro crítico fue oxígeno disuelto, aunque el valor que no alcanzó el objetivo no se alejó lo suficiente como para deteriorar su calidad. En el tramo 2 se observó una mayor cantidad de parámetros críticos (DQO,  $N_{total}$  y GyA); además, se encontró que el punto Arzobispo presenta una mejor calidad que Carrera 30 con Calle 53. En el tramo 3, los parámetros más críticos fueron coliformes fecales, GyA y DQO, de los cuales los primeros fueron el parámetro que más veces excedió el objetivo de calidad. Por último, en el tramo 4, los parámetros que con más frecuencia superaron los objetivos de calidad fueron coliformes fecales, oxígeno disuelto y GyA (tabla 6.12). Dada la recurrencia de los coliformes fecales en exceder los objetivos, la calidad del río a partir del tramo 3 se puede atribuir a las descargas de ARD.

En comparación con el WQI 2011-2012, se observó un comportamiento constante en la clasificación del tramo 1 y del 4. Los tramos 2

y 3 mostraron una leve mejora; en el 2, la categoría cambió de **pobre** a **marginal**, aunque el valor del WQI fue muy similar, y en el tramo 3 la categoría se mantuvo en **pobre**; pero el valor del WQI varió un poco más que en el tramo anterior (tabla 6.12). En general, dado que los valores de WQI no cambiaron de manera significativa, se puede decir que la calidad del río se mantuvo constante entre el periodo actual y 2011-2012.

Respecto al río Fucha, es evidente la disminución de la calidad del agua a través de su trayectoria. En los tramos 1, 2, 3 y 4 el WQI corresponde a las categorías **buena**, **pobre**, **marginal** y **pobre**, respectivamente. Es importante resaltar que el aumento de categoría entre el tramo 2 y el 3 no se atribuye a mejores condiciones del río en el tramo 3, sino al hecho de que los objetivos de calidad son menos estrictos.

En términos de parámetros, el fósforo total fue el más crítico en el tramo 1, SST y oxígeno disuelto en el tramo 2, y coliformes fecales, GyA y  $N_{total}$  en los tramos 3 y 4. Aun-

TABLA 6.12. Resumen de variables críticas y evolución WQI: río Salitre

Río Salitre	Parámetros críticos		WQI 2012-2013 vs. 2011-2012	
T1	Oxígeno disuelto (%)	9	Constante	
T2	DQO (%)	38	Mejoró (%)	5
	$N_{total}$ (%)	38		
	Grasas y aceites	30		
T3	Coliformes fecales (%)	71	Mejoró (%)	12
	Grasas y aceites (%)	70		
	DQO (%)	50		
T4	Coliformes fecales (%)	92	Constante	
	Oxígeno disuelto (%)	81		
	Grasas y aceites (%)	64		

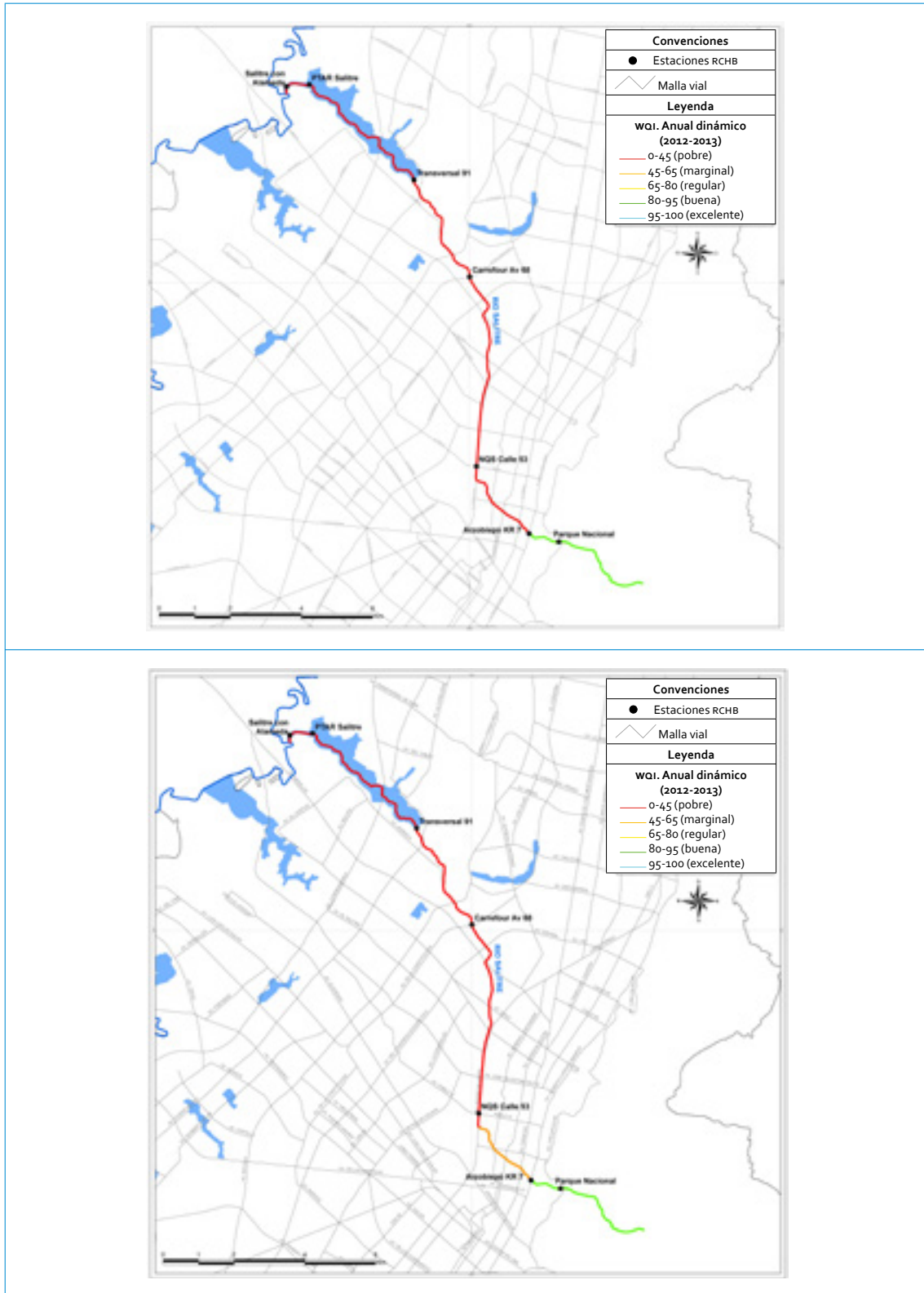


FIGURA 6.2. Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Salitre

que en el tramo 1 el 55 % de los datos haya incumplido, todos sus valores se encuentran muy cercanos al objetivo de calidad, lo cual reflejan el reducido impacto que este parámetro genera en la calidad de este tramo. Adicionalmente, en el tramo 2, los SST y el oxígeno disuelto presentan similares porcentajes de excedencia de los objetivos, donde el punto Carrera 7ª aporta los valores más altos de SST, y Av. Ferrocarril, los más altos de oxígeno disuelto. En los tramos 3 y 4, el parámetro que más veces superó los objetivos de calidad fue coliformes fecales, con valores que oscilan entre  $1,5 \times 10^6$  y  $2,6 \times 10^8$  NMP/100 mL (tabla 6.13).

Luego de comparar el WQI del presente periodo con el obtenido en la anterior campaña (2011-2012), se evidencia un comportamiento constante en la calidad del tramo 1, una mejora en la calidad del tramo 2 y una disminución de la calidad en los tramos 3 y 4 (tabla 6.13). Aunque estas variaciones se hayan presentado, no han sido del todo significativas para que el cambio de categoría se genere, por lo

que se puede afirmar que la calidad del río se ha mantenido constante.

Finalmente, la calidad del río Tunjuelo estuvo entre **buena** y **pobre** a lo largo de su recorrido por la ciudad. En los tramos 1 y 2 la calidad fue buena, lo cual evidencia que para el tramo 1 el parámetro crítico fue SST, y para el 2, SST y  $P_{total}$ . A partir del tramo 3, la calidad pasó de **buena** a **pobre** y se encontraron un mayor número de parámetros críticos. Para este tramo los parámetros críticos fueron oxígeno disuelto, coliformes fecales y SST. El punto Barrio México presentó una calidad mejor que el resto de los puntos. En cuanto al tramo 4, los parámetros críticos fueron coliformes fecales, GyA, SAAM y oxígeno disuelto, siendo coliformes fecales el que más afectó la calidad. En este tramo, el punto que más se vio afectado por la presencia de coliformes fecales fue Tv 86, por la descarga del Interceptor Tunjuelo Medio. En general, las descargas domésticas son un factor perjudicial en este río, debido a que coliformes fecales y SST fueron los parámetros que aparecieron con mayor frecuencia (tabla 6.14).

TABLA 6.13. Resumen de variables críticas y evolución WQI: río Fucha

Río Fucha	Parámetros críticos		WQI 2012-2013 vs. 2011-2012	
T1	$P_{total}$ (%)	55	Constante	
T2	SST (%)	65	Mejoró (%)	32
	Oxígeno disuelto (%)	50		
T3	Coliformes fecales (%)	88	Empeoró (%)	11
	Grasas y aceites (%)	45		
	$N_{total}$ (%)	45		
T4	Coliformes fecales (%)	100	Empeoró (%)	6
	Grasas y aceites (%)	92		
	$N_{total}$ (%)	88		

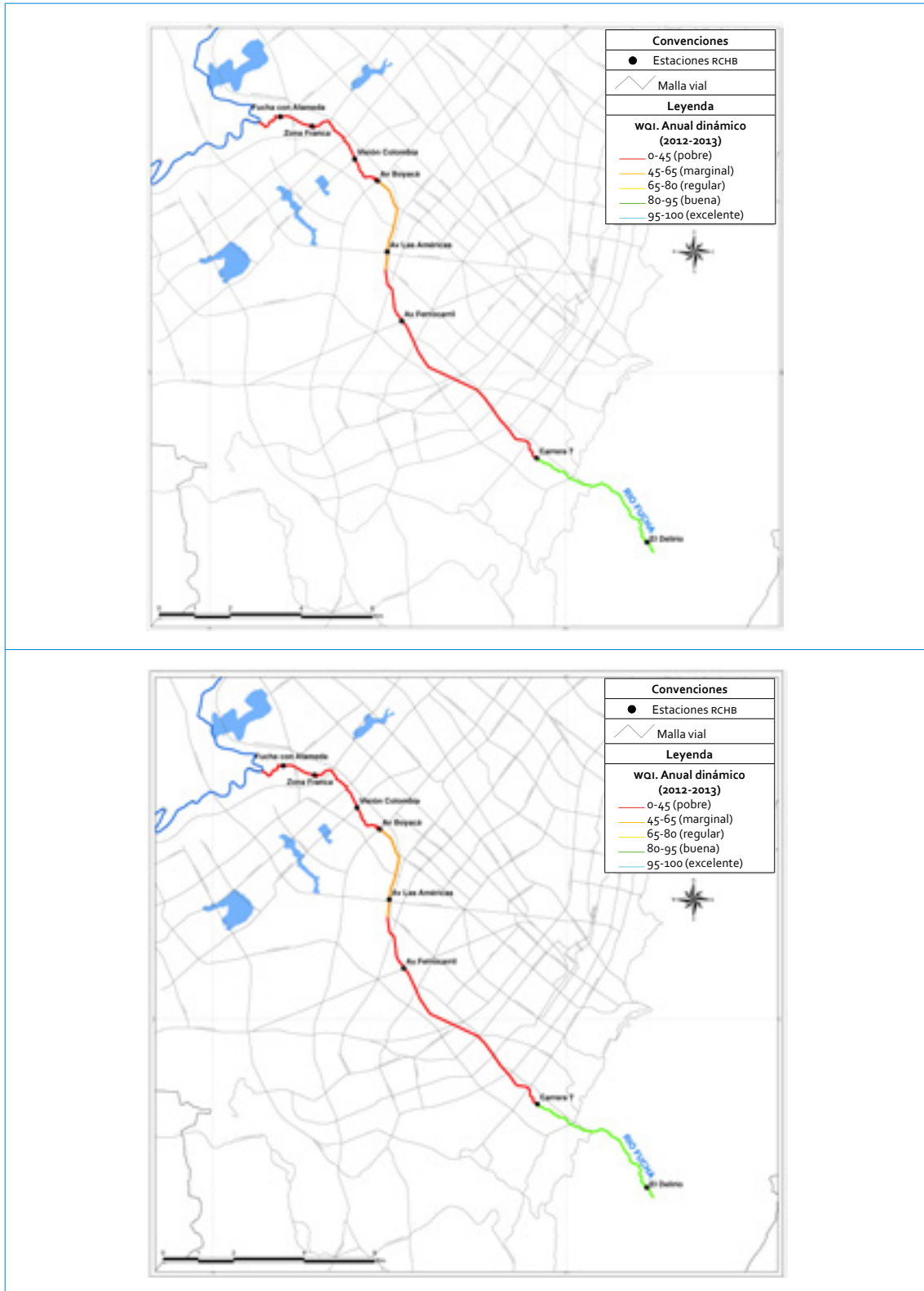
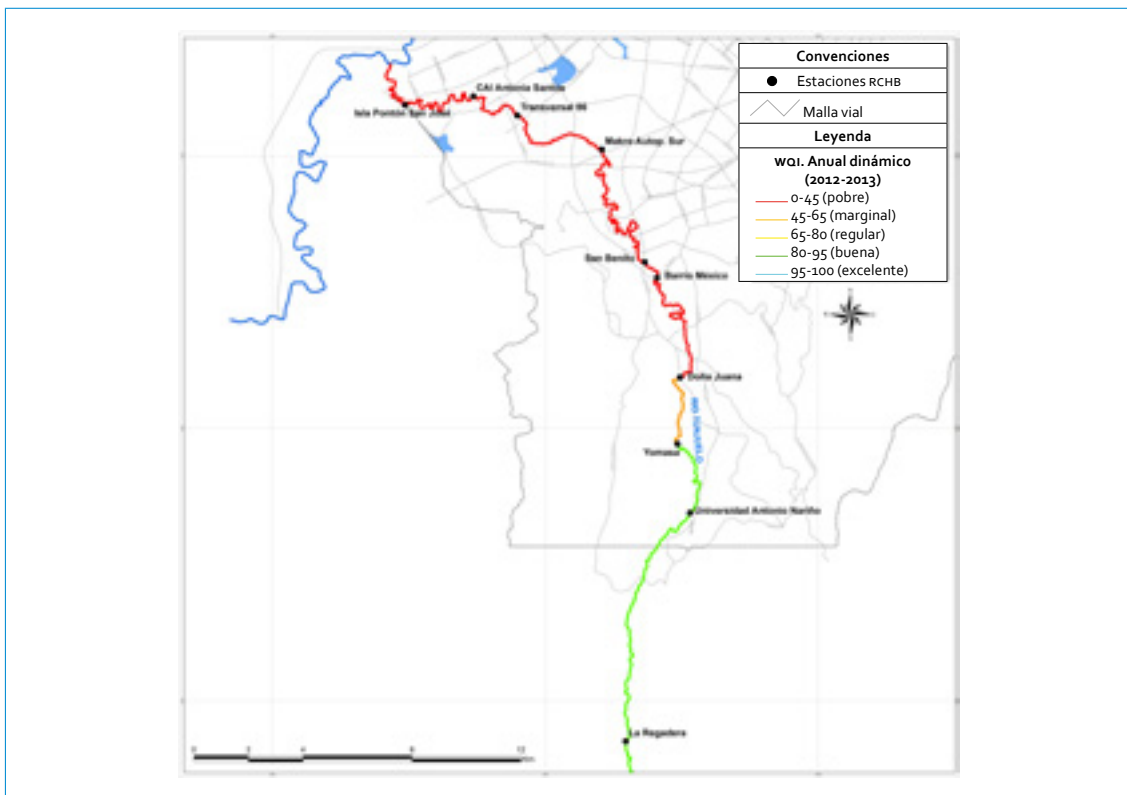


FIGURA 6.3. Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Fucha



TABLA 6.14. Resumen de variables críticas y evolución wqi: río Tunjuelo

Río Tunjuelo	Parámetros críticos		WQI 2012-2013 vs. 2011-2012	
T1	SST (%)	60	Mejóro (%)	10
T2	SST (%)	72	Mejóro (%)	35
	P <sub>total</sub> (%)	35		
T3	Oxígeno disuelto (%)	40	Mejóro (%)	7
	Coliformes fecales (%)	33		
	SST (%)	32		
T4	Coliformes fecales (%)	89	Mejóro (%)	13
	Grasas y aceites (%)	51		
	SAAM (%)	51		
	Oxígeno disuelto (%)	47		



Continúa

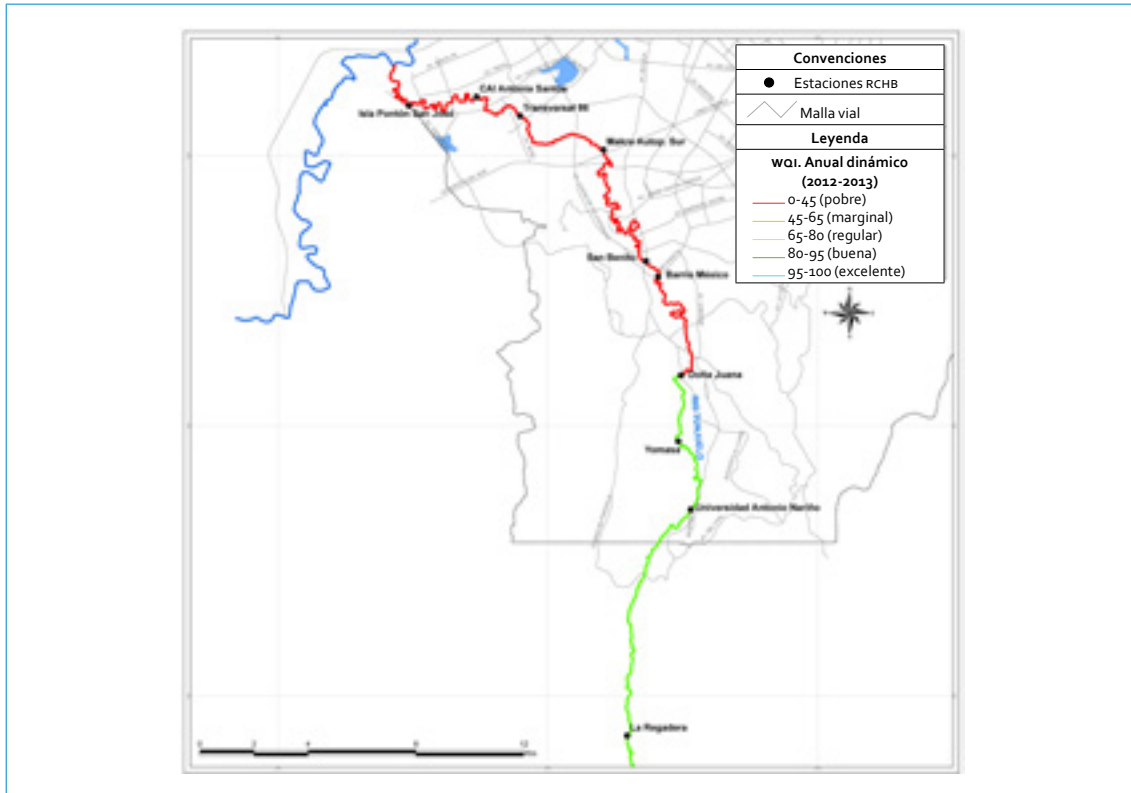


FIGURA 6.4. Comparación WQI 2011-2012 y WQI 2012-2013 para el río Tunjuelo

En comparación con el WQI 2011-2012, se observó mejora sustancial en la calidad del agua para los tramos 1 y 2, ya que para el 2 pasó de categoría **marginal** a **buena**. Los tramos 3 y 4 mostraron una leve mejora, pero la cate-

goría continuó en **pobre** (véase tabla 6.14). En general, se evidenció que la calidad a lo largo del río mejoró respecto a 2011-2012, ya que los valores cambiaron para todos los tramos.

# BIBLIOGRAFÍA

- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), (1999). *Mediciones hidrométricas* [documento preliminar]. Bogotá: Subdirección de Hidrología.
- METCALF & EDDY, INC. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE Y EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ (2008). *Calidad de sistema hídrico de Bogotá*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (1985). *Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses*. Washington: autor.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-OFFICE OF WATER (1986). *Quality criteria for water*. Washington: autor.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-OFFICE OF WATER (2007). *Aquatic life ambient freshwater quality criteria-copper*. Washington: autor.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-OFFICE OF WATER (2009). *National recommended water quality criteria*. Washington: autor.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-OFFICE OF WETLANDS, OCEANS, AND WATERSHEDS (2007). *An approach for using load duration curves in the development of TMDLs*. Washington: autor.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES Y SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (2010). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2008-2009)*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES Y SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (2011). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2009-2010)*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES Y SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (2012). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2010-2011)*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL) Y CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL RÍO GRANDE DE LA MAGDALENA (2007). *Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del canal del Dique: modelación matemática, hidráulica y de calidad del agua del canal del Dique*. Bogotá: autores.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL) Y EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ (EAAB), (2009). *Modelación dinámica de la calidad de agua del río Bogotá*. Bogotá: autores.

