





**CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO  
DE BOGOTÁ  
(2009-2010)**

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ

Clara Rojas Obregón  
Alcaldesa Mayor

Juan Antonio Nieto Escalante  
Secretario Distrital de Ambiente

Samir José Abisambra Vesga  
Subsecretario General y de Control Disciplinario

Germán Darío Álvarez Lucero  
Director de Control Ambiental

Octavio Augusto Reyes Ávila  
Director de Gestión Ambiental

María Odilia Clavijo Rojas  
Subdirector de Recurso Hídrico y del Suelo

Óscar Ferney López Espitia  
Coordinador RCHB

Liliana Carolina Quintero Delgado  
Profesional de Apoyo  
Grupo Profesional

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Manuel Salvador Rodríguez Susa  
Profesor asociado-director

Especialista  
Edna Lorena Delgado Hurtado

Asistentes de investigación  
Lina Sabrina Porras  
Johner Venicio Correa Cruz  
Óscar Fernando Rueda Ureña  
Walter Ramírez  
Juan David Pérez Gutiérrez  
Alma Patricia Pérez Hoyos  
Lina María Rodríguez Ruiz  
Sandra Constanza Medina Muñoz  
Andrés Felipe Delgado Quintero  
Nelson Leonardo Santiago Urrego

Zeyla Zulinne Cetre Rodríguez  
Jesús Antonio Florez Salamanca  
Comisión de Monitoreos

Gloria E. Barriga Hernández  
Asistente administrativa

Manuel Salvador Rodríguez Susa  
Lina S. Porras  
Alma Patricia Pérez Hoyos  
Lina María Rodríguez Ruiz  
Sandra C. Medina Muñoz

# CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO DE BOGOTÁ (2009-2010)



Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2009-2010) / Manuel Salvador Rodríguez ... [et al.]. – Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental; Ediciones Uniandes, 2011.

226 pp.; 21.5 x 28 cm

Otros autores: Alma Patricia Pérez, Lina María Rodríguez, Lina Porras y Sandra Medina.

ISBN 978-958-695-707-6

1. Calidad del agua – Bogotá (Colombia) 2. Contaminación del agua – Bogotá (Colombia) 3. Distribución del agua – Control de calidad – Bogotá (Colombia) I. Rodríguez Susa, Manuel Salvador II. Pérez Hoyos, Alma Patricia III. Rodríguez Ruiz, Lina María IV. Porras, Lina Sabrina V. Medina Muñoz, Sandra Constanza VI. Universidad de los Andes (Colombia). Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

CDD 628.161

SBUA

Primera edición: diciembre de 2011

© Manuel Salvador Rodríguez Susa, Lina S. Porras, Alma Patricia Pérez Hoyos,  
Lina María Rodríguez Ruiz, Sandra C. Medina Muñoz

© Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, respecto a esta edición

Ediciones Uniandes

Carrera 1 núm. 19-27, edificio AU 6

Teléfonos: 339 49 49/339 49 99, ext. 2133

Bogotá D. C., Colombia

<http://ediciones.uniandes.edu.co>

[infeduni@uniandes.edu.co](mailto:infeduni@uniandes.edu.co)

© Secretaría Distrital de Ambiente titular del derecho

Av. Caracas núm. 54-38

Teléfono: 377 88 99

Bogotá D. C., Colombia

ISBN: 978-958-695-707-6

Corrección de estilo: Ella Suárez

Diagramación: David Reyes

Carátula: Leonardo Cuéllar

Impresión: Editorial Kimpres Ltda.

Calle 19 sur núm. 69C-17

Teléfono: 413 68 84

Bogotá D. C., Colombia

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, electroóptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial.

# CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>15</b>
<b>ABREVIATURAS Y SIGLAS</b> .....	<b>17</b>
<b>PRÓLOGO</b> .....	<b>19</b>
<b>1. MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ</b> .....	<b>21</b>
1.1. Sitios de monitoreo .....	21
1.2. Esquema de monitoreo .....	23
<b>2. RÍO TORCA</b> .....	<b>27</b>
2.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico .....	27
2.2. Calidad del agua (WQI) .....	60
<b>3. RÍO SALITRE</b> .....	<b>63</b>
3.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico .....	63
3.2. Calidad del agua (WQI) .....	93
<b>4. RÍO FUCHA</b> .....	<b>97</b>
4.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico .....	97
4.2. Calidad del agua .....	133
<b>5. RÍO TUNJUELO</b> .....	<b>137</b>
5.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico .....	137
5.2. Calidad del agua (WQI) .....	173

<b>6. ESTADO DE LOS RÍOS EN BOGOTÁ .....</b>	<b>179</b>
6.1. Río Torca.....	179
6.2. Río Salitre.....	180
6.3. Río Fucha.....	181
6.4. Río Tunjuelo.....	182
6.5. Conclusiones .....	183
<b>7. INTRODUCCIÓN A LA RECUPERACIÓN DE RÍOS .....</b>	<b>185</b>
7.1. Introducción.....	185
7.2. Historia y cronología.....	187
7.3. Servicios de los ecosistemas y valoración económica .....	191
7.4. Servicios que presta el río Tunjuelo y su aproximación a la valoración económica .....	198
7.5. Restauración de ríos.....	201
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>221</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. Ubicación geográfica puntos de monitoreo RCHB (2009-2010) .....	23
FIGURA 1.2. Esquema de toma de muestra y medición de velocidad puntual.....	24
FIGURA 1.3. Esquema de toma de muestra con botella muestreadora .....	26
FIGURA 2.1. Perfil caudal: río Torca .....	27
FIGURA 2.2. Perfil alcalinidad: río Torca .....	29
FIGURA 2.3. Perfil dureza: río Torca.....	29
FIGURA 2.4. Perfil pH: río Torca.....	30
FIGURA 2.5. Perfil conductividad: río Torca .....	31
FIGURA 2.6. Perfil de oxígeno disuelto: río Torca.....	32
FIGURA 2.7. Perfil DBO: río Torca .....	33
FIGURA 2.8. Perfil DQO: río Torca.....	34
FIGURA 2.9. Perfil SST: río Torca.....	35
FIGURA 2.10. Perfil NTK: río Torca.....	37
FIGURA 2.11. Perfil $N_{total}$ : río Torca .....	37
FIGURA 2.12. Perfil nitrógeno amoniacal: río Torca .....	38
FIGURA 2.13. Perfil nitritos: río Torca.....	39
FIGURA 2.14. Perfil nitratos: río Torca .....	39
FIGURA 2.15. Perfil $F_{total}$ : río Torca .....	40
FIGURA 2.16. Perfil grasas y aceites: río Torca .....	41
FIGURA 2.17. Perfil SAAM: río Torca.....	42
FIGURA 2.18. Perfil coliformes fecales: río Torca .....	43
FIGURA 2.19. Perfil coliformes totales: río Torca .....	44
FIGURA 2.20. Perfil sulfuros: río Torca .....	45
FIGURA 2.21. Perfil fenoles: río Torca .....	46
FIGURA 2.22. Perfil bario: río Torca .....	47
FIGURA 2.23. Perfil cadmio: río Torca .....	48
FIGURA 2.24. Perfil cinc: río Torca .....	49
FIGURA 2.25. Perfil cobre: río Torca.....	49

FIGURA 2.26. Perfil cromo total: río Torca .....	50
FIGURA 2.27. Perfil manganeso: río Torca .....	51
FIGURA 2.28. Perfil níquel: río Torca.....	51
FIGURA 2.29. Perfil plomo: río Torca .....	52
FIGURA 2.30. Perfil cargas $DBO_5$ : río Torca .....	53
FIGURA 2.31. Perfil cargas DQO: río Torca .....	54
FIGURA 2.32. Perfil cargas SST: río Torca .....	55
FIGURA 2.33. Perfil cargas $N_{total}$ : río Torca.....	57
FIGURA 2.34. Perfil cargas $F_{total}$ : río Torca .....	58
FIGURA 2.35. Perfil cargas GyA: río Torca .....	59
FIGURA 2.36. Perfil cargas SAAM: río Torca .....	60
FIGURA 2.37. Mapa de calidad: río Torca .....	62
FIGURA 3.1. Perfil caudal: río Salitre.....	63
FIGURA 3.2. Perfil alcalinidad: río Salitre .....	64
FIGURA 3.3. Perfil dureza: río Salitre .....	65
FIGURA 3.4. Perfil pH: río Salitre .....	66
FIGURA 3.5. Perfil conductividad: río Salitre.....	67
FIGURA 3.6. Perfil oxígeno disuelto: río Salitre .....	68
FIGURA 3.7. Perfil DBO: río Salitre.....	69
FIGURA 3.8. Perfil DQO: río Salitre .....	70
FIGURA 3.9. Perfil SST: río Salitre .....	71
FIGURA 3.10. Perfil $N_{total}$ : río Salitre .....	72
FIGURA 3.11. Perfil nitritos: río Salitre .....	72
FIGURA 3.12. Perfil nitratos: río Salitre.....	73
FIGURA 3.13. Perfil nitrógeno amoniacal: río Salitre .....	73
FIGURA 3.14. Perfil $F_{total}$ : río Salitre.....	74
FIGURA 3.15. Perfil grasas y aceites: río Salitre.....	75
FIGURA 3.16. Perfil SAAM: río Salitre.....	76
FIGURA 3.17. Perfil coliformes fecales: río Salitre .....	77
FIGURA 3.18. Perfil coliformes totales: río Salitre .....	78
FIGURA 3.19. Perfil fenoles: río Salitre.....	79
FIGURA 3.20. Perfil bario: río Salitre .....	79
FIGURA 3.21. Perfil cadmio: río Salitre .....	80
FIGURA 3.22. Perfil cinc: río Salitre .....	81
FIGURA 3.23. Perfil cobre: río Salitre .....	82
FIGURA 3.24. Perfil cromo total: río Salitre.....	82
FIGURA 3.25. Perfil manganeso: río Salitre.....	83
FIGURA 3.26. Perfil níquel: río Salitre .....	84
FIGURA 3.27. Perfil plomo: río Salitre .....	85
FIGURA 3.28. Perfil carga $DBO_5$ : río Salitre .....	85
FIGURA 3.29. Perfil cargas DQO: río Salitre .....	87

FIGURA 3.30. Perfil cargas SST: río Salitre.....	88
FIGURA 3.31. Perfil cargas $N_{total}$ : río Salitre .....	89
FIGURA 3.32. Perfil cargas $F_{total}$ : río Salitre .....	90
FIGURA 3.33. Perfil cargas grasas y aceites: río Salitre .....	91
FIGURA 3.34. Perfil cargas SAAM: río Salitre.....	92
FIGURA 3.35. Mapa de calidad: río Salitre.....	96
FIGURA 4.1. Perfil caudal: río Fucha .....	98
FIGURA 4.2. Perfil alcalinidad: río Fucha .....	99
FIGURA 4.3. Perfil dureza: río Fucha.....	100
FIGURA 4.4. Perfil pH: río Fucha.....	101
FIGURA 4.5. Perfil de conductividad: río Fucha.....	101
FIGURA 4.6. Perfil de oxígeno disuelto: río Fucha.....	102
FIGURA 4.7. Perfil DBO: río Fucha .....	104
FIGURA 4.8. Perfil de DQO: río Fucha.....	105
FIGURA 4.9. Perfil SST: río Fucha.....	106
FIGURA 4.10. Perfil NTK: río Fucha .....	107
FIGURA 4.11. Perfil nitritos: río Fucha.....	108
FIGURA 4.12. Perfil nitratos: río Fucha .....	109
FIGURA 4.13. Perfil nitrógeno amoniacal: río Fucha .....	109
FIGURA 4.14. Perfil $F_{total}$ : río Fucha.....	110
FIGURA 4.15. Perfil de grasas y aceites: río Fucha.....	111
FIGURA 4.16. Perfil SAAM: río Fucha .....	112
FIGURA 4.17. Perfil de coliformes fecales: río Fucha .....	113
FIGURA 4.18. Perfil coliformes totales: río Fucha .....	114
FIGURA 4.19. Perfil fenoles: río Fucha .....	116
FIGURA 4.20. Perfil bario: río Fucha .....	117
FIGURA 4.21. Perfil cadmio: río Fucha .....	119
FIGURA 4.22. Perfil cinc: río Fucha .....	119
FIGURA 4.23. Perfil cobre: río Fucha.....	120
FIGURA 4.24. Perfil cromo total: río Fucha .....	121
FIGURA 4.25. Perfil manganeso: río Fucha .....	122
FIGURA 4.26. Perfil níquel: río Fucha.....	124
FIGURA 4.27. Perfil plomo: río Fucha.....	125
FIGURA 4.28. Perfil cargas $DBO_5$ : río Fucha .....	126
FIGURA 4.29. Perfil cargas DQO: río Fucha.....	127
FIGURA 4.30. Perfil cargas SST: río Fucha .....	128
FIGURA 4.31. Perfil cargas $N_{total}$ : río Fucha.....	130
FIGURA 4.32. Perfil cargas $F_{total}$ : río Fucha .....	130
FIGURA 4.33. Perfil cargas GyA: río Fucha .....	131
FIGURA 4.34. Perfil cargas SAAM: río Fucha .....	132
FIGURA 4.35. Mapa de calidad: río Fucha.....	136

FIGURA 5.1. Perfil caudal: río Tunjuelo.....	138
FIGURA 5.2. Perfil alcalinidad: río Tunjuelo.....	139
FIGURA 5.3. Perfil dureza: río Tunjuelo .....	140
FIGURA 5.4. Perfil pH: río Tunjuelo .....	141
FIGURA 5.5. Perfil conductividad: río Tunjuelo.....	142
FIGURA 5.6. Perfil oxígeno disuelto: río Tunjuelo.....	143
FIGURA 5.7. Perfil DBO: río Tunjuelo.....	144
FIGURA 5.8. Perfil DQO: río Tunjuelo.....	145
FIGURA 5.9. Perfil relación DBO/DQO: río Tunjuelo .....	146
FIGURA 5.10. Perfil SST: río Tunjuelo .....	147
FIGURA 5.11. Perfil SST: río Tunjuelo (sin Doña Juana) .....	147
FIGURA 5.12. Perfil NTK: río Tunjuelo.....	148
FIGURA 5.13. Perfil nitritos: río Tunjuelo .....	149
FIGURA 5.14. Perfil nitratos: río Tunjuelo.....	150
FIGURA 5.15. Perfil nitrógeno amoniacal: río Tunjuelo.....	150
FIGURA 5.16. Perfil $F_{total}$ : río Tunjuelo.....	151
FIGURA 5.17. Perfil $F_{total}$ : río Tunjuelo (sin Doña Juana).....	152
FIGURA 5.18. Perfil 1 de grasas y aceites: río Tunjuelo .....	153
FIGURA 5.19. Perfil 2 de grasas y aceites: río Tunjuelo .....	153
FIGURA 5.20. Perfil SAAM: río Tunjuelo .....	154
FIGURA 5.21. Perfil coliformes fecales: río Tunjuelo.....	155
FIGURA 5.22. Perfil coliformes totales: río Tunjuelo.....	156
FIGURA 5.23. Perfil fenoles: río Tunjuelo.....	158
FIGURA 5.24. Perfil bario: río Tunjuelo.....	159
FIGURA 5.25. Perfil bario: río Tunjuelo (sin Doña Juana) .....	160
FIGURA 5.26. Perfil cadmio: río Tunjuelo .....	161
FIGURA 5.27. Perfil cadmio: río Tunjuelo (sin Doña Juana) .....	161
FIGURA 5.28. Perfil cinc: río Tunjuelo .....	162
FIGURA 5.29. Perfil cobre: río Tunjuelo.....	163
FIGURA 5.30. Perfil cromo total: río Tunjuelo.....	164
FIGURA 5.31. Perfil manganeso: río Tunjuelo.....	165
FIGURA 5.32. Perfil níquel: río Tunjuelo .....	165
FIGURA 5.33. Perfil plomo: río Tunjuelo .....	166
FIGURA 5.34. Perfil plomo: río Tunjuelo (sin Doña Juana) .....	167
FIGURA 5.35. Perfil cargas $DBO_5$ : río Tunjuelo .....	168
FIGURA 5.36. Perfil cargas DQO: río Tunjuelo .....	169
FIGURA 5.37. Perfil cargas SST: río Tunjuelo.....	170
FIGURA 5.38. Perfil cargas $N_{total}$ : río Tunjuelo .....	171
FIGURA 5.39. Perfil cargas $F_{total}$ : río Tunjuelo.....	172
FIGURA 5.40. Perfil cargas GyA: río Tunjuelo .....	172
FIGURA 5.41. Perfil cargas SAAM: río Tunjuelo .....	173

FIGURA 5.42. Mapa de calidad: río Tunjuelo .....	177
FIGURA 7.1. Cambios en los flujos hidrológicos con el incremento del ISC .....	203
FIGURA 7.2. Cambios del canal asociados al incremento de sedimentos .....	204
FIGURA 7.3. Principales etapas en la restauración de ríos y ejemplos de consideraciones para la planeación.....	208
FIGURA 7.4. Mapa de localización de las zonas de la cuenca del río Tunjuelo.....	214
FIGURA 7.5. Río Tunjuelo aguas arriba de los predios de la Universidad Antonio Nariño .....	215
FIGURA 7.6. Descarga de fondo del embalse La Regadera en periodo de estiaje .....	216
FIGURA 7.7. Descarga de fondo del embalse seco de Cantarrana .....	217
FIGURA 7.8. Desembocadura de la quebrada Yomasa al río Tunjuelo .....	217
FIGURA 7.9. Río Tunjuelo aguas abajo del relleno sanitario .....	218
Figura 7-10. Punto de descarga del interceptor Tunjuelito Medio en el río Tunjuelo.....	219



# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. Puntos de monitoreo RCHB (2009-2010).....	22
TABLA 1.2. Parámetros de calidad medidos en las campañas de monitoreo: tipo 1.....	26
TABLA 1.3. Parámetros de calidad medidos en las campañas de monitoreo: tipo 2.....	26
TABLA 2.1. Relación promedio $N_{total}$ /NTK: río Torca.....	36
TABLA 2.2. Carga promedio transportada $DBO_5$ : río Torca.....	52
TABLA 2.3. Carga promedio transportada DQO: río Torca.....	54
TABLA 2.4. Relación $DBO_5$ /DQO.....	55
TABLA 2.5. Carga promedio transportada SST: río Torca.....	55
TABLA 2.6. Carga promedio transportada $N_{total}$ : río Torca.....	56
TABLA 2.7. Carga promedio transportada $P_{total}$ : río Torca.....	57
TABLA 2.8. Concentraciones promedio $N_{total}$ y $F_{total}$ : río Torca.....	58
TABLA 2.9. Carga promedio transportada GyA: río Torca.....	58
TABLA 2.10. Carga promedio transportada SAAM: río Torca.....	59
TABLA 2.11. WQI río Torca: tramo 1.....	60
TABLA 2.12. WQI río Torca: tramo 2.....	61
TABLA 3.1. Carga promedio transportada $DBO_5$ : río Salitre.....	84
TABLA 3.2. Carga promedio transportada DQO: río Salitre.....	86
TABLA 3.3. Carga promedio transportada SST: río Salitre.....	87
TABLA 3.4. Carga promedio transportada $N_{total}$ : río Salitre.....	89
TABLA 3.5. Carga promedio transportada $F_{total}$ : río Salitre.....	90
TABLA 3.6. Carga promedio transportada grasas y aceites: río Salitre.....	91
TABLA 3.7. Carga promedio transportada SAAM: río Salitre.....	92
TABLA 3.8. WQI río Salitre: tramo 1.....	93
TABLA 3.9. WQI río Salitre: tramo 2.....	94
TABLA 3.10. WQI río Salitre: tramo 3.....	94
TABLA 3.11. WQI río Salitre: tramo 4.....	95
TABLA 4.1. Rango histórico SAAM: río Fucha.....	113
TABLA 4.2. Carga promedio transportada $DBO_5$ : río Fucha.....	125

TABLA 4.3. Carga promedio transportada DQO: río Fucha .....	126
TABLA 4.4. Carga promedio transportada SST: río Fucha .....	127
TABLA 4.5. Carga promedio transportada $N_{total}$ : río Fucha .....	129
TABLA 4.6. Carga promedio transportada $F_{total}$ : río Fucha .....	129
TABLA 4.7. Carga promedio transportada GyA: río Fucha .....	131
TABLA 4.8. Carga promedio transportada SAAM: río Fucha .....	132
TABLA 4.9. WQI río Fucha: tramo 1 .....	133
TABLA 4.10. WQI río Fucha: tramo 2 .....	133
TABLA 4.11. WQI río Fucha: tramo 3 .....	134
TABLA 4.12. WQI río Fucha: tramo 4 .....	135
TABLA 5.1. Carga promedio transportada $DBO_5$ : río Tunjuelo .....	167
TABLA 5.2. Carga promedio transportada DQO: río Tunjuelo .....	168
TABLA 5.3. Carga promedio transportada SST: río Tunjuelo .....	169
TABLA 5.4. Carga promedio transportada $N_{total}$ : río Tunjuelo .....	170
TABLA 5.5. Carga promedio transportada $F_{total}$ : río Tunjuelo .....	171
TABLA 5.6. Carga promedio transportada GyA: río Tunjuelo .....	173
TABLA 5.7. Carga promedio transportada SAAM: río Tunjuelo .....	173
TABLA 5.8. WQI río Tunjuelo: tramo 1 .....	174
TABLA 5.9. WQI río Tunjuelo: tramo 2 .....	174
TABLA 5.10. WQI río Tunjuelo: tramo 3 .....	175
TABLA 5.11. WQI río Tunjuelo: tramo 4 .....	176
TABLA 6.1. WQI .....	183
TABLA 7.1. Funciones, bienes y servicios de los ecosistemas naturales y seminaturales .....	193
TABLA 7.2. Los métodos de valoración y su relación con las funciones de los ecosistemas .....	197
TABLA 7.3. Efectos del ISC en variables físicas y biológicas de los ríos urbanos .....	205
TABLA 7.4. Ejemplo de los componentes de la matriz para la restauración del río Magdalena, México .....	210
TABLA 7.5. Lista de los objetivos comunes en la restauración de ríos urbanos, con sus respectivas técnicas y posibles limitantes asociados .....	210
TABLA 7.6. Características de las zonas guías para el desarrollo del plan maestro de restauración del río Tunjuelo .....	213

## ABREVIATURAS Y SIGLAS

A y G	Aceites y grasas
A	Agrícola
BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno, xileno
CH <sub>1</sub>	Consumo humano (tratamiento convencional)
CH <sub>2</sub>	Consumo humano (desinfección)
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DSE	Disruptores del sistema endocrino
DQO	Demanda química de oxígeno
MDLC	Multilinear Discrete Lag-Cascade Method of Channel Routing
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl
N <sub>total</sub>	Nitrógeno total
OD	Oxígeno disuelto
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
P	Pecuario
PAH	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
PCB	Policloruros de bifenilo
PPF	Preservación de la flora y la fauna
POC	Pesticidas organoclorados
POP	Pesticidas organofosforados
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
P <sub>total</sub>	Fósforo total
R <sub>1</sub>	Recreativo (contacto primario)
R <sub>2</sub>	Recreativo (contacto secundario)
RBP	Protocolos de bioevaluación rápida
RCHB	Red de Calidad Hídrica de Bogotá
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno

SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
ST	Sólidos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
WQI	Water Quality Index

# PRÓLOGO

Las corrientes hídricas de la ciudad —ríos urbanos como Tunjuelo, Fucha, Salitre y Torca— se afectan por la presión que sobre ellas se ejerce, pues durante décadas han recibido las descargas de las aguas residuales de quienes habitan la capital. No obstante, en la administración de Bogotá Positiva se ha dado un paso fundamental para su recuperación, al construir una visión de ciudad en torno al patrimonio hídrico, y los esfuerzos y resultados deben presentarse a la ciudad.

Para el 2010 se consolidó el trabajo de generar el respaldo normativo necesario para adelantar acciones de control en pro de la recuperación del recurso hídrico de la ciudad, se fortaleció la herramienta para la captura de información y se implementó el índice de calidad para la ciudad, que nos permite hoy establecer el avance en cuanto a la recuperación del recurso hídrico bogotano.

En este libro se lleva a cabo un recorrido por el recurso hídrico superficial de la ciudad, que permite evidenciar los logros, los retos y las necesidades en materia de gestión para una ventana temporal de un año (julio del 2009-junio del 2010). Además, registra los cambios tanto en calidad como en cantidad de ríos, y de esa manera se documenta la salud del recurso hídrico de Bogotá.

El reto de ciudad para los próximos años está asociado a un incremento continuo de los tramos de río que mejoran su calidad. Se buscan, así, ríos aptos que le permitan a la ciudad contar con un trazado urbano en el cual las áreas del sistema hídrico sean lugares centrales para el disfrute de la comunidad, en torno a las cuales se logre la convergencia de las vías, los equipamientos y el espacio público. Así mismo, el diseño arquitectónico y el paisajístico deberán centrarse en el protagonismo de los elementos naturales, a fin de alcanzar la conectividad ecológica.

No obstante, para lograrlo será necesario garantizar que las líneas visuales, las fachadas, los cerramientos y demás elementos se diseñen buscando los máximos de visibilidad de las áreas que componen el sistema hídrico.



# 1. MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ

La metodología propuesta en el contrato de ciencia y tecnología 01202 del 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 hasta el momento fueron mantenidos, con el objeto de robustecer la información que normalmente alimenta la base de datos de la RCHB, que ha demostrado ser apropiada para el establecimiento del estado del recurso hídrico superficial en la ciudad.

## 1.1. Sitios de monitoreo

Para el programa de monitoreo de la RCHB 2009-2010 se aumentó el número de puntos de veintinueve a treinta, debido a la adición de un nuevo punto sobre el río Fucha. Por lo tanto, la repartición de estos nuevos puntos en la RCHB quedó de la siguiente forma:

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

Para la modificación del número de puntos constituyentes de la RCHB en el periodo de monitoreo 2009-2010, la Universidad de los Andes evaluó la pertinencia y ubicación de cada uno de éstos. Como resultado de esta evaluación, se mantuvieron todos los sitios de monitoreo existentes para los ríos Torca, Salitre, Tunjuelo y Bogotá. Sin embargo, debido a problemas de alta acumulación de macrófitas y a obras adelantadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), fue necesario el desplazamiento hacia aguas arriba de los puntos: Club Guaymaral (río Torca), avenida 68 (río Salitre) y Puente Independencia (río Tunjuelo). Para el río Fucha se incluyó el sitio de monitoreo denominado *avenida Boyacá*, debido a que su ubicación permite la cuantificación del impacto en la calidad del río de las actividades industriales que se dan en la zona de Montevideo, ubicada en la parte media norte de la cuenca.

Adicionalmente, 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 éstos y las pequeñas obras de mantenimiento adelantadas por la EAAB. En la tabla 1.1 y en la figura 1.1 se presentan los sitios de monitoreo redefinidos y su ubicación.

TABLA 1.1. Puntos de monitoreo RCHB (2009-2010)

Tramos	Puntos*			
	río Torca	río Salitre	río Fucha	río Tunjuelo
1	Canal El Cedro [114640N- -105633E]**	Parque Nacional [103150N-101430E]	El Delirio [95541N-101917E]	La Regadera [78878N-92546E]
2	Makro 193 [119317N- 104300E] y Club Guaymaral [124950N- 104377E]	Arzobispo Carrera 7a [103269N-101304E]	Carrera 7a Río Fucha [87861N-98913E]	Universidad Antonio Nariño [87211N-94924E] Yomasa [89744N-944458E]
		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]
		Planta El Salitre [115570N-94614E]	Fucha con Alameda [107503N-91611E]	Puente La Independencia [102519N-86982E]
		Salitre con Alameda [115901N-94878E]		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.

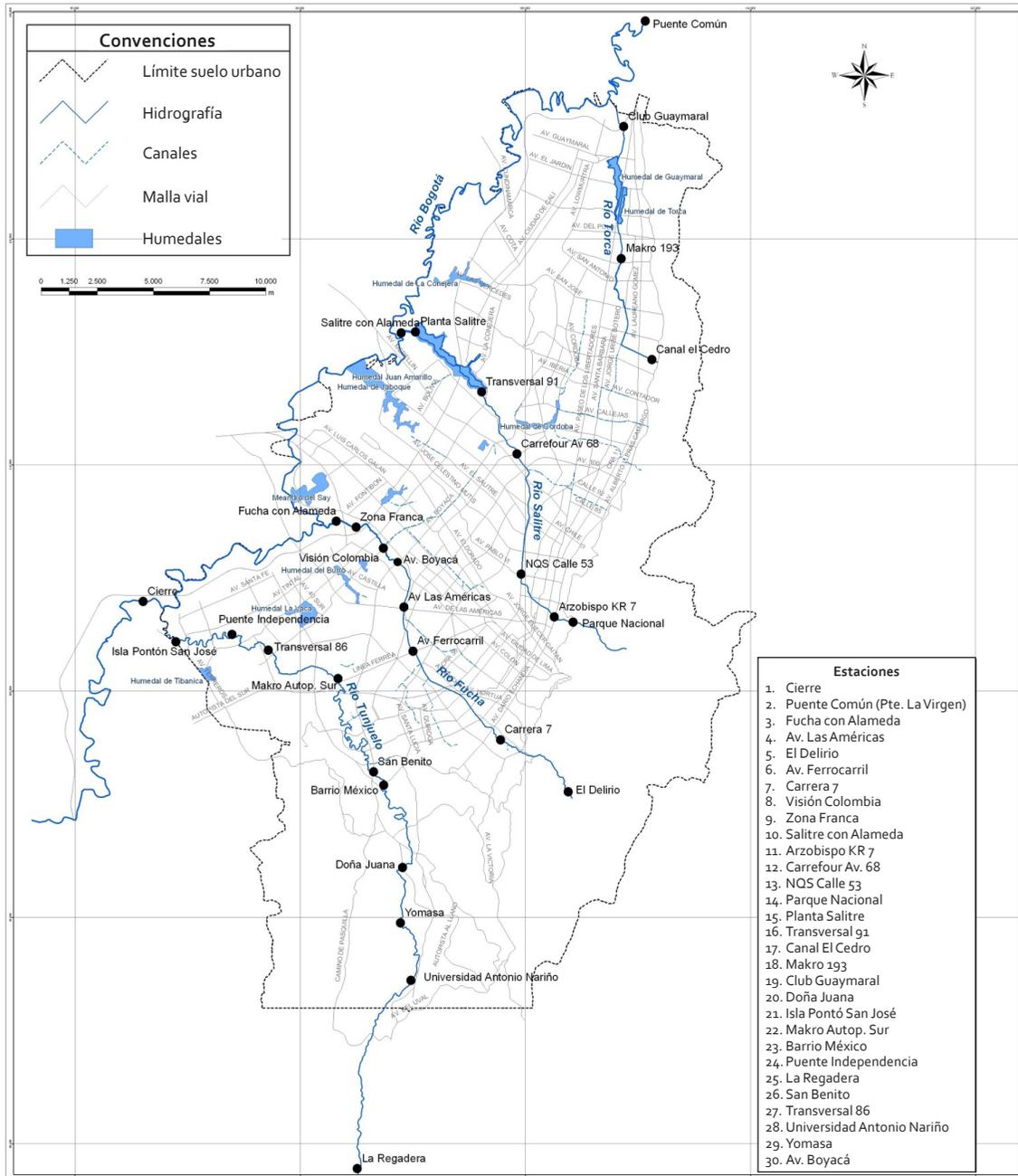


FIGURA 1.1. Ubicación geográfica puntos de monitoreo RCHB (2009-2010)

### 1.2. Esquema de monitoreo

Estas campañas fueron realizadas siguiendo la metodología empleada en ejercicios previos de caracterización (Secretaría Distrital de Ambiente y Empresa de Acueducto y Al-

cantarillado de Bogotá [SDA y EAAB], 2008; Universidad de los Andes y Secretaría Distrital de Ambiente, 2010), en los cuales durante ventanas temporales de dos horas se realizaba un monitoreo compuesto isovolumétrico de agua cada treinta minutos, en cada uno de los

puntos constituyentes de la RCHB. Cada uno de estos puntos fue monitoreado cinco veces en la mañana (entre las 05:01 y las 12:00 horas), cinco veces en la tarde (entre las 12:01 y las 19:00 horas) y cinco veces en la noche (entre las 19:01 y las 05:00 horas). Estas campañas fueron divididas en dos etapas. La primera de ellas se desarrolló entre el 6 de noviembre y el 28 de diciembre del 2009, bajo condiciones predominantemente secas; mientras que la segunda etapa se llevó en condiciones más húmedas, entre el 18 de enero y el 10 de julio del 2010.

#### 1.2.1. Logística de campo

Para la realización de estas campañas se utilizaron simultáneamente dos comisiones de campo, cada una de ellas conformada por un vehículo, un coordinador de comisión y dos auxiliares de campo. Durante los monitoreos, las comisiones de campo fueron acompañadas periódicamente por equipos de verificación

integrados por personal de la Universidad de los Andes y de la SDA, que supervisaron las actividades desarrolladas en campo.

#### 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), tomando 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, que 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.

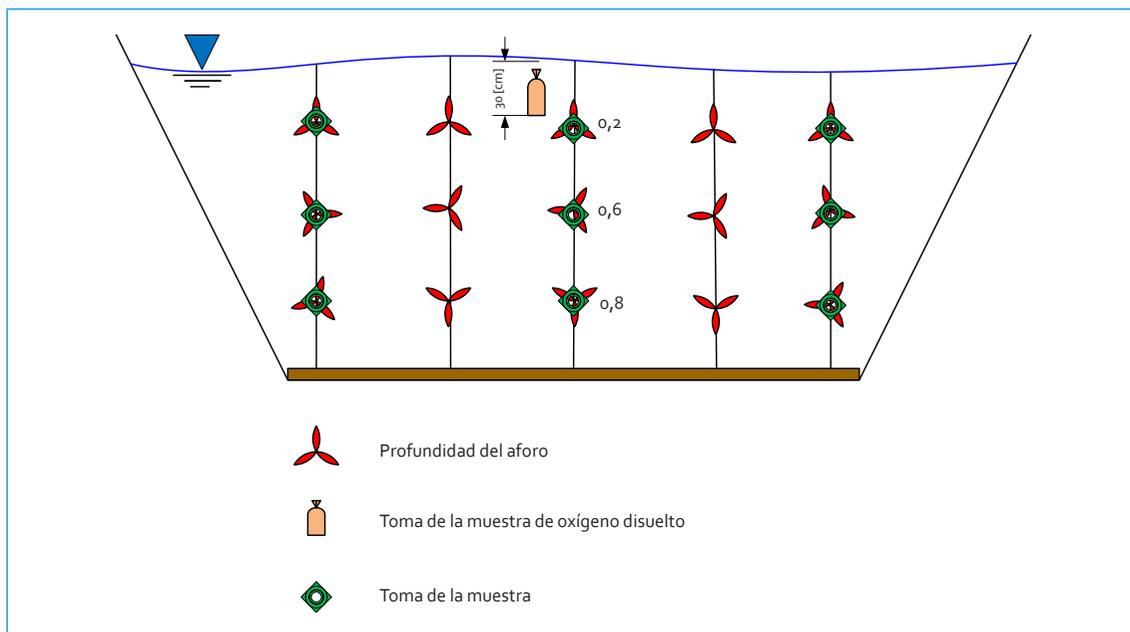


FIGURA 1.2. Esquema de toma de muestra y medición de velocidad puntual

De acuerdo con las recomendaciones dadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), en su documento preliminar de *Mediciones 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 fue utilizado 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 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 (Unal-Cormagdalena, 2007; 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 moni-

torio. 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 eran consignados en formatos 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 período 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 recolectar 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.

La caracterización realizada sobre las muestras de agua varió según el tipo de análisis deseado. Se realizaron diez caracterizaciones fisicoquímicas de tipo 1, para cada uno de los puntos de la RCHB; mientras que del tipo 2 se llevaron a cabo cinco caracterizaciones por punto. En las tablas 1.2 y 1.3 se listan los determinantes de calidad del agua que se midieron en las muestras compuestas para los dos diferentes tipos de caracterizaciones.

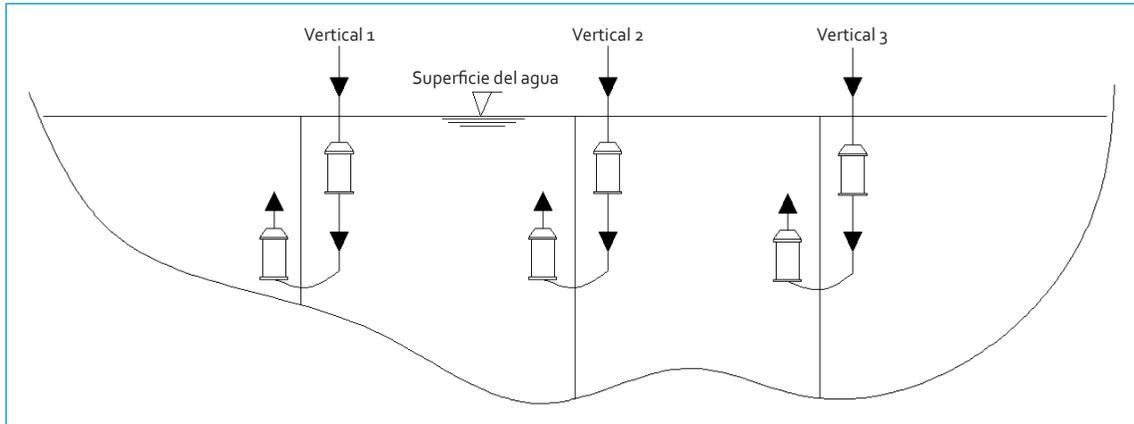


FIGURA 1.3. Esquema de toma de muestra con botella muestreadora

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	Amonio	Arsénico	Bario	Cadmio
Cianuro	Cinc	Cobre	Cromo	Dureza
Fenoles	Manganeso	Mercurio	Níquel	Plomo
Sulfuros				

## 2. RÍO TORCA

### 2.1. Resultados del monitoreo físicoquímico

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

##### 2.1.1.1. Caudal

El caudal del río Torca muestra un aumento a lo largo de su recorrido por la ciudad (figura 2.1). En el punto canal El Cedro, los caudales medidos estuvieron entre 1,1 y 9,0 L/s en condiciones hidrológicas no extremas. En este punto los mayores caudales se presentaron en horas

de la mañana entre las 08:00 y las 12:00, con una mediana de 8 L/s; mientras que los menores valores se observaron entre las 23:00 y las 04:00, con una mediana es de 2,3 L/s, menos de un tercio de lo que se transporta en la mañana.

El cambio drástico de caudales entre el primer y el segundo punto de monitoreo sobre el río Torca (en Makro 193 los caudales van de 76 a 413 L/s) se dan por los vertimientos de aguas residuales procedentes de la red de alcantarillado público de la ciudad, en especial asociada a tres puntos específicos: Torca x Carrera 9, Torca x Ferrocarril y Torca x Calle 187. Al igual que en canal El Cedro, en este punto (Makro 193) los

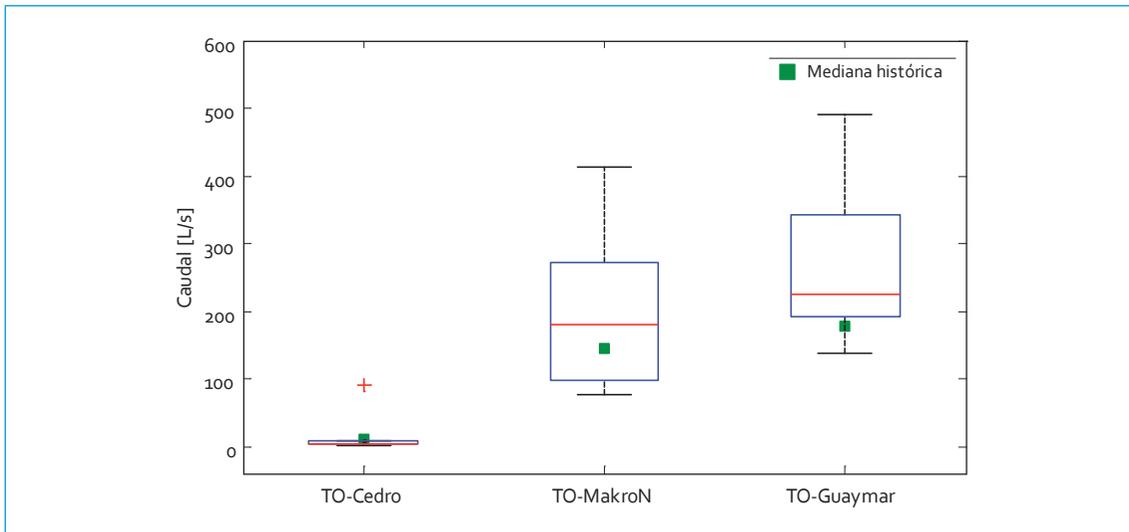


FIGURA 2.1. Perfil caudal: río Torca

mayores caudales se presentan en horas de la mañana (mediana = 259 L/s) y los menores en la noche y madrugada (mediana = 130 L/s), lo que evidencia el efecto de la dinámica de las descargas domiciliarias sobre el comportamiento del caudal durante el día.

Finalmente, en el punto Club Guaymaral, los caudales medios oscilaron entre 137 y 491 L/s, no muy diferentes a los de Makro 193. A diferencia de los puntos de monitoreos anteriores, en Club Guaymaral no hubo gran diferencia de los caudales en las diferentes horas del día; los mayores caudales se presentaron en los monitores hechos en la tarde. La mediana de los caudales registrados en la mañana (7:00 a 12:00) fue de 203 L/s, en la tarde (13:00 a 20:00) de 249 L/s, y en la noche o madrugada (3:00 a 4:00) de 200 L/s. Este amortiguamiento en la variación de caudales puede deberse al efecto del río Bogotá, el cual causa un remanso hidráulico sobre el río Torca en este punto final de monitoreo.

En comparación con los datos históricos, en el canal El Cedro se presentaron caudales mucho más bajos en los monitoreos realizados en este período. El caudal mínimo histórico era de 5 L/s, mientras que el valor más bajo registrado durante las campañas 2009-2010 fue de 1,1 L/s; además, cerca del 70% de los datos de este lapso se encuentran por debajo de 5 L/s. Esto pareciera mostrar que el período evaluado tuvo características hidrológicas más secas; sin embargo, debido a los valores de flujo tan bajos, la medición de caudal en este punto cuenta con una mayor incertidumbre.

Los caudales en Makro 193 y Club Guaymaral han seguido relativamente constantes, con un leve aumento en las medianas, pero manteniéndose en el mismo rango.

#### 2.1.1.2. Alcalinidad

En la figura 2.2 se presenta el perfil longitudinal de la alcalinidad del río Torca, el cual mostró un aumento de las concentraciones a lo largo del río. El cambio más importante se dio entre el canal El Cedro y Makro 193, donde la alcalinidad se triplicó, pasando de una mediana de aproximadamente 41 mg/L a 139 mg/L.

En el punto canal El Cedro, la alcalinidad es poco variable; aunque la mayoría de los datos corresponden a monitoreos realizados en horas de la mañana, el valor máximo se presentó en horas de la tarde. Por otro lado, en Makro 193 los valores de alcalinidad son más elevados, y el valor mínimo (84 mg/L) se presentó en horas de la madrugada. Los demás datos estuvieron muy cercanos entre sí y corresponden a monitoreos en horas de la mañana y tarde. Finalmente, en el Club Guaymaral se pudo evidenciar una variación de la alcalinidad durante las diferentes horas del día: en la mañana, la mediana estuvo cerca de 171 mg/L, y en la tarde, cerca de 144 mg/L. Esto muestra que los vertimientos posiblemente tienen un efecto en la dinámica de la alcalinidad. Históricamente no existen registros de medida de este parámetro, razón por la cual no se puede identificar ningún tipo de dinámica temporal.

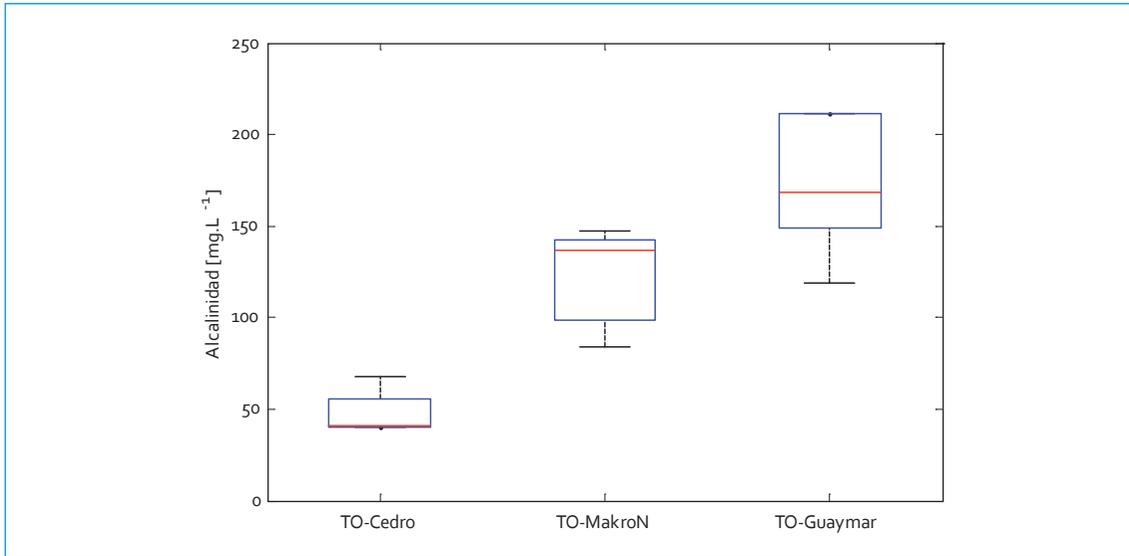


FIGURA 2.2. Perfil alcalinidad: río Torca

### 2.1.1.3. Dureza

El perfil longitudinal de la dureza del río Torca registrado en las campañas 2009-2010 se presenta en la figura 2.3. En los puntos canal El Cedro y Makro 193, la dureza es poco variable, aunque se notaron variaciones según la hora de monitoreo: en el canal El Cedro el valor máximo se presentó en horas de la tarde, mientras que en Makro 193 la máxima dureza

se observó en la madrugada, lo que muestra comportamientos diferentes a lo largo del día en los dos puntos de monitoreo. Por su parte, en el Club Guaymaral se pudo evidenciar una variación de la dureza durante las diferentes horas del día, que registraron valores elevados en horas de la mañana. La mediana de las concentraciones en este punto fue de 94 mg/L. Al igual que la alcalinidad, la dureza no se monitoreó históricamente.

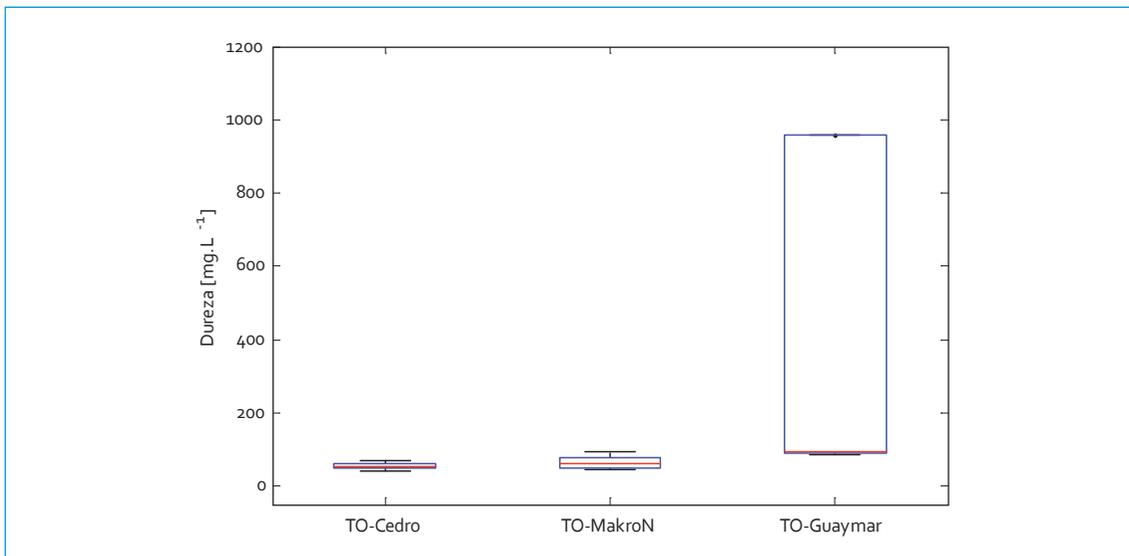


FIGURA 2.3. Perfil dureza: río Torca

#### 2.1.1.4. pH

La figura 2.4 presenta el perfil longitudinal de pH obtenido sobre el río Torca entre 2009 y 2010. Se puede apreciar que el promedio de los valores de pH es relativamente neutro para todos los puntos de monitoreo. Sin embargo, es clara la paulatina acidificación que va sufriendo el río en su tránsito por la ciudad, lo cual puede ser consecuencia de la formación de ácidos orgánicos durante los procesos de digestión anaerobia, que muy probablemente se den en el cuerpo de agua, a causa de las altas cargas de materia orgánica recibidas.

Los valores más altos de pH se presentaron en el canal El Cedro (alrededor del 40% de los datos registrados en este punto son superiores a ocho unidades), mientras que en el Club Guaymaral ningún valor estuvo por encima de 8,0. En el punto canal El Cedro la mediana de los valores de pH medidos entre 2009 y 2010

(7,7 unidades) está por encima de la mediana histórica (7,2 unidades); los valores de pH en este punto son muy variables (de 6,3 a 9,0). En Makro 193 se evidenció un comportamiento temporal contrario, pues la mediana 2009-2010 (7,6 unidades) está por debajo de la mediana histórica (8,0 unidades). Dado que para este punto los datos son más uniformes, se puede decir que en los monitoreos actuales se tomaron condiciones de pH más neutras. Finalmente, en el punto Club Guaymaral los valores fueron mucho más uniformes, con poca variabilidad, incluso se acercaron en un rango más neutro. En comparación con los datos históricos, la mediana (7,23) estuvo por debajo de la mediana histórica (7,65), que mostró una leve variación. En conclusión, los cambios del pH en función del tiempo y la longitud del río no son considerablemente importantes y no permiten establecer cambios dinámicos en la calidad del agua en los últimos dos años.

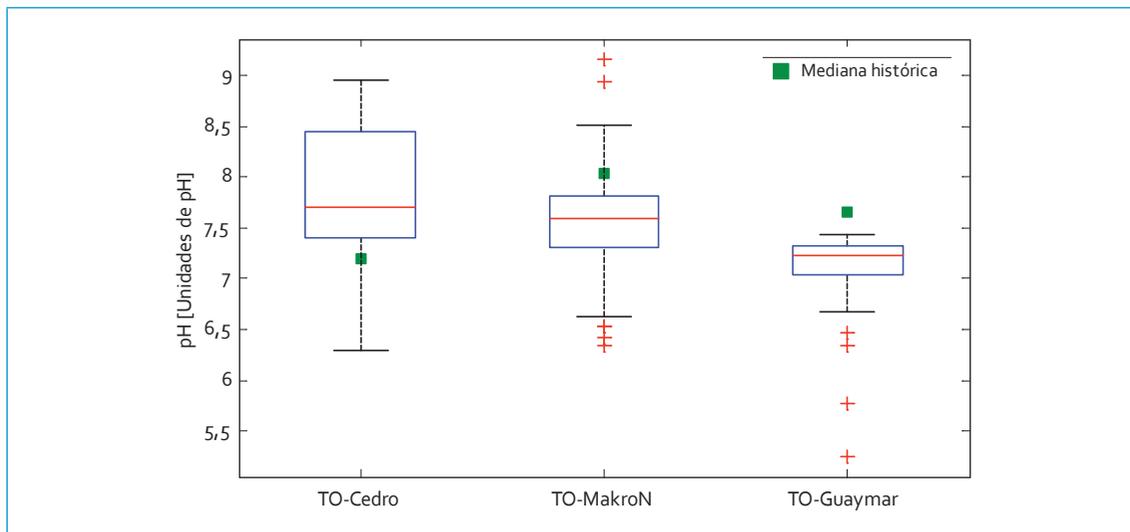


FIGURA 2.4. Perfil pH: río Torca

### 2.1.1.5. Conductividad

El perfil longitudinal de la conductividad del río Torca medido en las campañas de monitoreo 2009-2010 se presenta en la figura 2.5, donde se puede observar que las menores conductividades fueron medidas en canal El Cedro, seguido de máximos valores en Makro 193 y valores intermedios finales en Club Guaymaral, muy posiblemente asociados al efecto de remanso y mezcla con el río Bogotá.

El Cedro y Makro 193 los valores más altos se presentaron en horas de la tarde, aunque con pequeñas variaciones durante el día; mientras que en el Club Guaymaral se mantuvieron casi constantes los valores en la mañana y la tarde, siendo la noche y madrugada el momento con menores conductividades. Es importante resaltar que en el punto Club Guaymaral se presentó el rango más amplio de valores de conductividad (224 a 607  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los registros históricos no cuentan con valores de conductividad, por

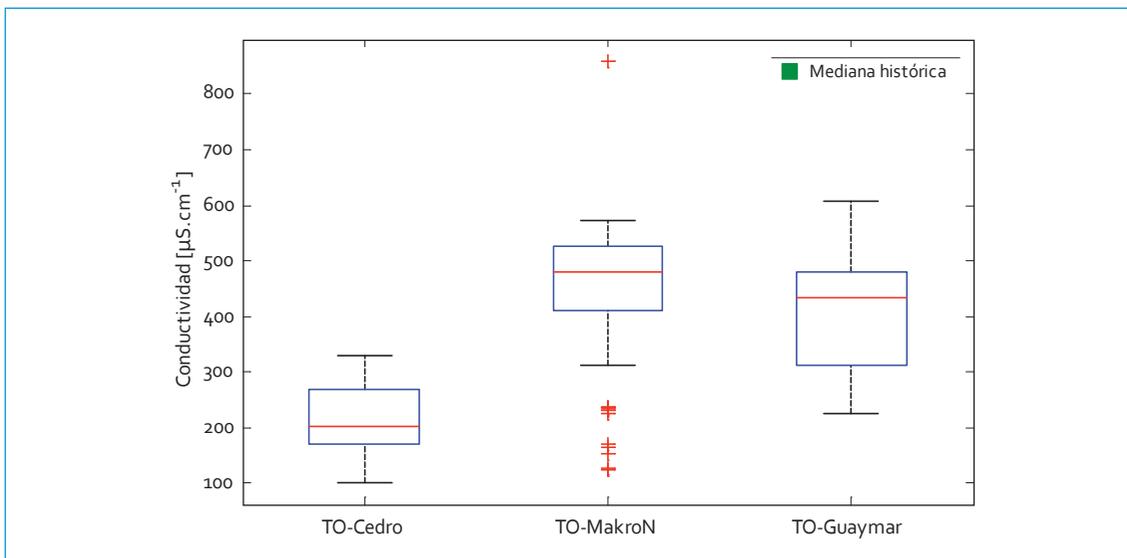


FIGURA 2.5. Perfil conductividad: río Torca

En el Canal El Cedro la conductividad se encontró en un rango entre 100 y 329  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y muestra poca variabilidad en los datos, con una mediana de 204  $\mu\text{S}/\text{cm}$  cercana al valor medio de 219  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para Makro 193 las conductividades fueron uniformes y oscilaron entre 311 y 574  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El cambio tan importante que se percibió entre El Cedro y Makro 193 es efecto de los vertimientos de aguas residuales, los cuales aumentan la concentración de iones en el río.

Analizando las conductividades según la hora de monitoreo, se encontró que en canal

lo que no fue viable realizar la comparación y análisis de las variaciones en el tiempo.

### 2.1.1.6. Oxígeno disuelto

A partir de los datos se puede observar (figura 2.6) que las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyeron desde la entrada al perímetro urbano hasta el punto donde más descargas ha recibido el río (Makro 193). Entre Makro 193 y Club Guaymaral, las concentraciones de oxígeno se mantuvieron similares, aunque en el último punto tendieron a disminuir. El punto

con mejores cantidades de oxígeno disuelto en el canal El Cedro, aunque los valores fueron muy variables (2,7 a 7 mg/L). Se resalta que la mayoría de los datos estuvieron cerca del percentil 75 (6,3 mg/L) y que la mediana (5,9 mg/L) no estuvo muy lejana de la mediana histórica (5 mg/L), que mostró un leve incremento a lo largo del tiempo. La variación diaria de las concentraciones de oxígeno disuelto en este punto del río no es importante; las concentraciones se mantuvieron en promedio entre 5,5 mg/L (en la tarde) y 6,1 mg/L (en la mañana).

Makro 193 presentó valores bajos de oxígeno disuelto en comparación con canal El Cedro; el máximo valor fue de 2,9 mg/L, muy cercano al valor mínimo del primer punto de monitoreo. Este comportamiento permite ver un alto consumo de oxígeno disuelto en este tramo del río, producto de la degradación de la materia orgánica aportada en las descargas de aguas residuales. En este punto de monitoreo la mediana (0,84 mg/L) se encuentra por

encima de la mediana histórica (0,1 mg/L). La variación diaria de las concentraciones de oxígeno disuelto en este punto no fue importante; las concentraciones se mantienen en 0,9 mg/L a lo largo del día. En cuanto al punto Club Guaymaral, se presentó la misma situación que en Makro 193: la mediana (0,86 mg/L) superó a la histórica (0,1 mg/L). Sin embargo, en los registros históricos el máximo oxígeno disuelto (2,2 mg/L) estuvo por encima del máximo actual (1,84 mg/L). En este punto del río se notó una pequeña variación entre las concentraciones a lo largo del día; en la mañana las cantidades de oxígeno disuelto (mediana = 0,13 mg/L) fueron inferiores que las de la noche (mediana = 1,37 mg/L).

A lo largo del río se observó para las campañas de monitoreo 2009-2010 que las medianas de las concentraciones de oxígeno disuelto presentaron un pequeño incremento respecto a las medianas históricas, aunque en los datos actuales no se hayan registrado los máximos de oxígeno disuelto presentados en el río.

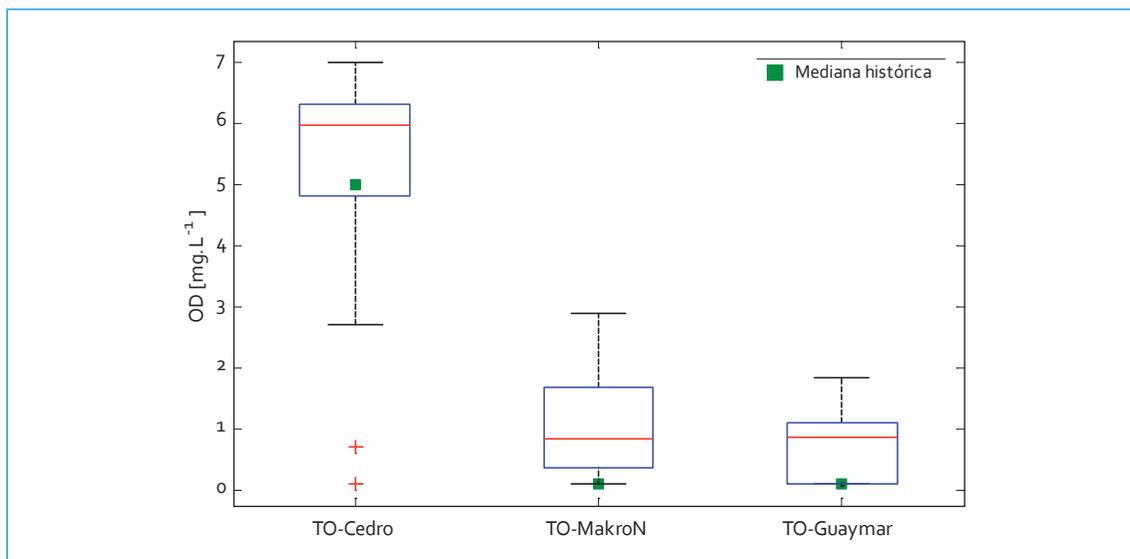


FIGURA 2.6. Perfil de oxígeno disuelto: río Torca

### 2.1.1.7. DBO

El perfil longitudinal de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el río Torca muestra que las mayores concentraciones se presentaron en el segundo punto de monitoreo (Makro 193) y las menores en el canal El Cedro (figura 2.7), lo cual es coherente con el comportamiento del oxígeno disuelto en el río. A pesar de presentar las concentraciones más bajas de DBO en el río Torca, el punto de monitoreo canal El Cedro (mediana = 8 mg/L) superó los registros históricos (mediana = 5 mg/L), siendo el 73% de los datos superiores a la mediana histórica; es importante mencionar que la mediana y la media (14 mg/L) fueron muy disímiles, lo que refleja dispersión en los datos. Los monitoreos de noviembre y diciembre de 2009 oscilaron entre 8 y 41 mg/L; mientras que de enero y julio de 2010 el rango estuvo entre 4 y 12 mg/L.

En la figura 2.7 se puede observar un decrecimiento en las concentraciones de DBO a partir de Makro 193, lo cual pueda deberse a fenómenos de dilución, posible depuración por humedal o por el buchón. Por otro lado, en

este segundo tramo del río las concentraciones de DBO han disminuido respecto a la mediana histórica. La disminución más notoria se presenta en Makro 193, donde la mediana histórica está cerca a los 115 mg/L, mientras que los valores registrados en la campaña 2009-2010 presentaron una mediana de 47 mg/L, y un valor máximo de 103 mg/L. Las variaciones diarias en Makro 193 muestran que en horas de la mañana se recibieron las mayores concentraciones de materia orgánica (mediana = 61 mg/L) y en la noche las más bajas (mediana = 36 mg/L).

En Club Guaymaral la disminución de las concentraciones en el tiempo no fue tan significativa como en Makro 193, aun cuando se notó que la mediana (25 mg/L) decreció a la mitad de los registros históricos (49 mg/L). Las variaciones diarias en este punto muestran, al igual que en Makro 193, que en horas de la mañana se recibieron las mayores concentraciones de materia orgánica (mediana = 44 mg/L); sin embargo, en las tardes se registraron las más bajas (mediana = 12 mg/L). En general, el comportamiento de la DBO ha variado con el tiempo. En el primer tramo se

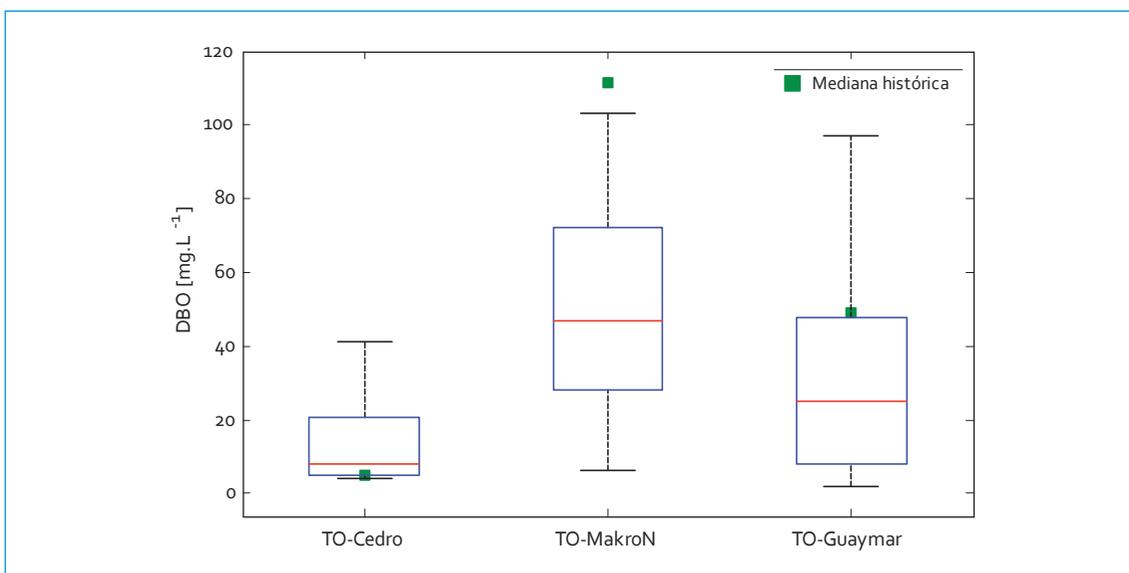


FIGURA 2.7. Perfil DBO: río Torca

observó un leve aumento, mientras que en el segundo la disminución de las concentraciones fue importante.

#### 2.1.1.8. DQO

En la figura 2.8 se presenta el perfil longitudinal de las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) del río Torca, generado a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010. Se observó un aumento importante de las concentraciones a lo largo del río, aunque entre Makro 193 y Club Guaymaral se mantuvieron relativamente constantes con una leve disminución entre las medianas.

En el primer punto se encontraron las concentraciones más bajas de DQO en el río. Al igual que la DBO, pero en menor proporción, las concentraciones de DQO se incrementaron en referencia a los históricos; la mediana (31 mg/L) en este punto del río estuvo ligeramente por encima de la histórica (24 mg/L). Las variaciones diarias de DQO en el canal El Cedro muestran la condición particular que se presen-

tó en noviembre y diciembre. La mediana en la mañana (mediana = 41 mg/L) fue superior a la tarde y la noche (mediana = 26 mg/L). En cuanto a Makro 193, las concentraciones disminuyeron respecto a los datos históricos. Los valores de las medianas 2009-2010 e históricas difieren considerablemente (151 y 260 mg/L respectivamente). Las mayores concentraciones de DQO se presentaron en los monitoreos de la tarde (mediana = 204 mg/L), el doble de lo que se dio en la noche (mediana = 101 mg/L). El punto Club Guaymaral se comportó de manera casi constante en el tiempo, pues la mediana (137 mg/L) fue levemente inferior a la histórica (152 mg/L). Sin embargo, es importante resaltar la alta dispersión de los datos (28-477 mg/L). Las variaciones diarias de DQO en Club Guaymaral presentaron una fuerte diferencia entre la mañana (mediana = 274 mg/L) y la tarde (mediana = 57 mg/L).

En general, se pudo observar un leve decrecimiento en las concentraciones a partir de Makro 193, tal como ocurrió para la DBO. Respecto a los datos históricos, en el primer

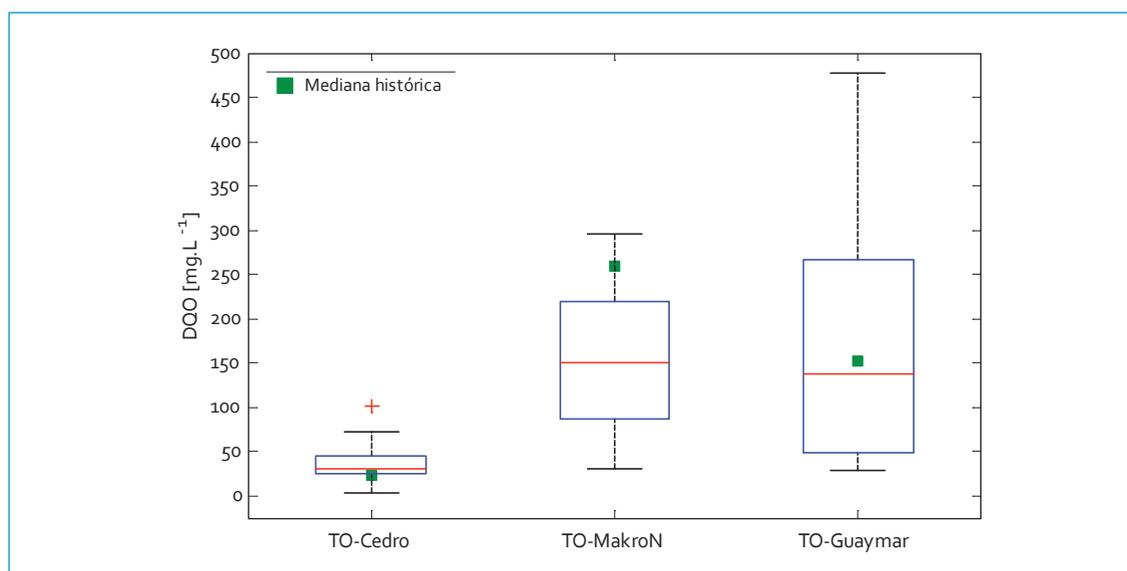


FIGURA 2.8. Perfil DQO: río Torca

punto las concentraciones aumentaron mientras que en los otros disminuyeron.

#### 2.1.1.9. SST

El perfil longitudinal de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) muestra que las mayores concentraciones se encontraron en el último punto de monitoreo (figura 2.9). Para el canal El Cedro los valores estuvieron en un rango de 4 a 135 mg/L. En este primer punto los SST han aumentado en el tiempo de la misma forma que la materia orgánica y los nutrientes. Dado que la mediana (12 mg/L) se inclina hacia el percentil 25 y hacia la mediana histórica (9 mg/L), se afirma que el cambio de las concentraciones en el tiempo no es muy significativo. Las variaciones diarias de las concentraciones de SST en el canal El Cedro mostraron igualmente la condición particular que se presentó en noviembre y diciembre. La mediana en la mañana fue de 58 mg/L, alrededor de seis veces más de lo presentado en la tarde (mediana = 10 mg/L).

En el punto Makro 193 los datos fueron muy uniformes: la mediana (60 mg/L) no difiere del valor medio (57 mg/L) y muestra poca dispersión. Respecto a los históricos (mediana = 92 mg/L), los valores de la campaña 2009-2010 presentaron una disminución, siendo este el único punto donde ocurrió esto, ya que en el canal El Cedro y Club Guaymar las medianas aumentaron en el tiempo. Las variaciones diarias de los SST, en este punto, muestran que la peor condición se dio en los monitoreos de la tarde (mediana = 101 mg/L), y la mejor, en la noche (mediana = 21 mg/L). Por otro lado, los datos de SST del punto Club Guaymar fueron muy dispersos: el rango osciló entre 8 y 575 mg/L, con una pronunciada tendencia a hacia el percentil 25. Cabe resaltar que la mediana (61 mg/L) fue casi el doble de la mediana histórica (35 mg/L). Es difícil predecir las causas de las variaciones en este punto del río, puesto que en los demás puntos los datos son relativamente uniformes. Lo más probable es que se deba a la resuspensión potencial de sólidos en la toma de muestras, ya que en este punto

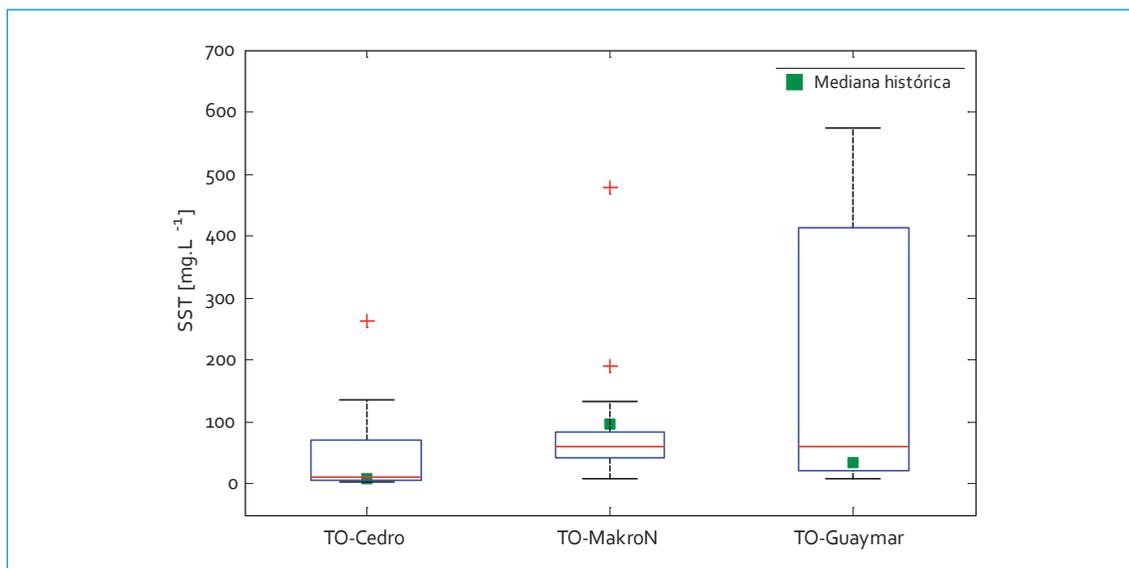


FIGURA 2.9. Perfil SST: río Torca

había una muy alta presencia de buchón. A diferencia de Makro 193, en Club Guaymaral las mayores cantidades de SST se presentaron en los monitoreos de la mañana (mediana = 430 mg/L), y la noche (mediana = 15 mg/L) siguió siendo la mejor condición.

#### 2.1.1.10. Nitrógeno

En la figura 2.10 se presenta el perfil del nitrógeno total Kjeldahl (NTK), el cual evidenció un aumento importante entre el primer punto de monitoreo y los dos últimos. Dado que la diferencia entre el NTK y el  $N_{total}$  es la cantidad de nitritos y nitratos en el agua, se notó que el punto de monitoreo con mayores concentraciones de nitritos y especialmente de nitratos fue el canal El Cedro, quizá por las altas concentraciones de oxígeno disuelto que se presentan en este punto. La mediana en este punto fue de 3,4 mg/L; mientras que la mediana de  $N_{total}$  fue de 7,7 mg/L. En la tabla 2.1 se presenta la relación  $N_{total}/NTK$  en cada punto de monitoreo, la cual muestra que a lo largo del río la concentración de nitritos y nitratos va disminuyendo.

TABLA 2.1. Relación promedio  $N_{total}/NTK$ : río Torca

Punto	$N_{total}/NTK$
Canal El Cedro	2,2
Makro 193	1,4
Club Guaymaral	1,0

Los valores de NTK en el canal El Cedro muestran uniformidad, en contraste con los valores de  $N_{total}$ , los cuales tienden más hacia el percentil 75 y al valor máximo. Esta diferencia en la dispersión de los datos está dada por la

variabilidad en las concentraciones de nitritos y nitratos en este punto del río; el rango de concentraciones de nitratos a finales del 2009 estuvo entre 4,0 y 8,5 mg/L, mientras que el rango de los monitoreos en el 2010 fue de 0,46 a 1,47 mg/L. Dado que no existen datos históricos de  $NO_2$  y  $NO_3$ , sólo a partir de más datos se podrá comprobar si las concentraciones en la mañana (como es el caso de la mayoría de monitoreos del 2009) son mucho más elevadas que en otras horas del día y dan una alta variabilidad en los datos y una diferencia marcada entre NTK y  $N_{total}$ .

También se puede observar en las figuras que en el canal El Cedro las concentraciones de  $N_{total}$  fueron superiores a las históricas. Teniendo en cuenta que los datos históricos corresponden sólo a concentraciones de NTK, es razonable que los datos actuales sean más elevados, sobre todo conociendo que en este tramo del río las concentraciones de nitratos fueron importantes, bien sea por una condición particular o porque las condiciones de este punto son propicias para la nitrificación.

Igualmente, se evidenció que los datos de nitrógeno amoniacal fueron bajos en el canal El Cedro, en comparación con los demás puntos, lo cual es lógico, teniendo en cuenta que para los ríos en Bogotá el gran aporte de nitrógeno tienen origen doméstico y este tipo de vertimientos no son muy importantes en este punto de monitoreo. Cabe resaltar que es la forma de nitrógeno que muestra mayor diferencia entre los puntos de monitoreo. Existe la hipótesis de poco aporte de nitrógeno o una rápida nitrificación para este punto; sin embargo, para validar cualquiera de los dos es necesaria más información que permita comprender los procesos que pueden ocurrir en este punto del río. A partir de los datos que se obtuvieron de nitrógeno amoniacal, se pudo

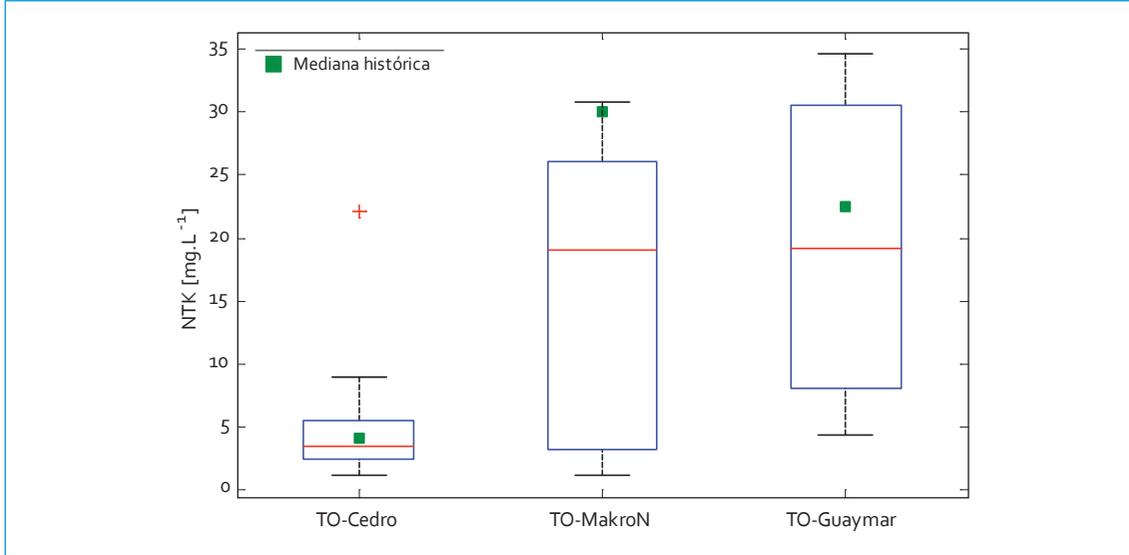
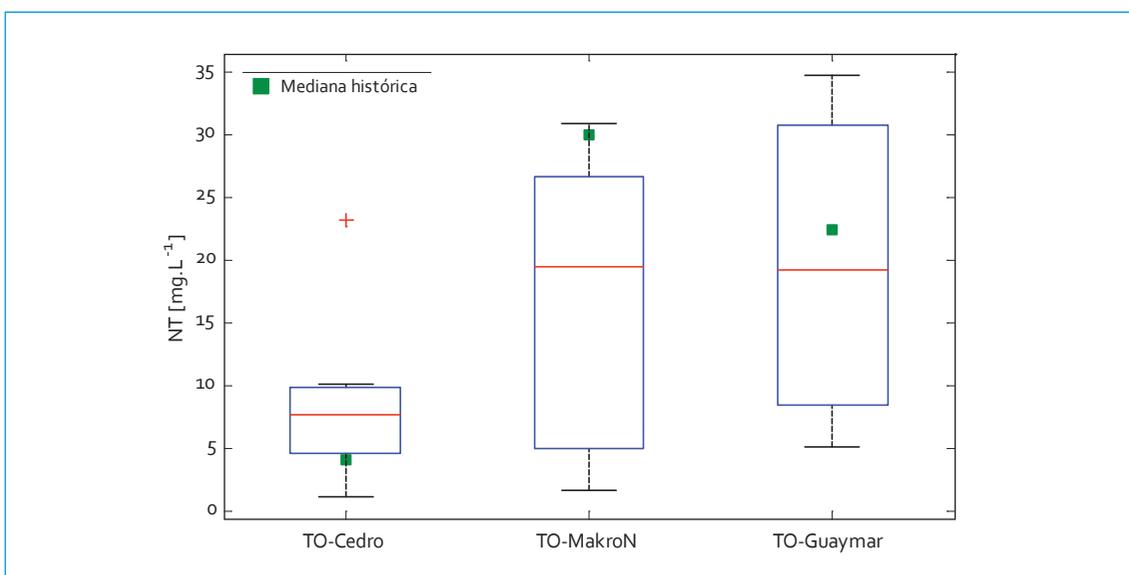


FIGURA 2.10. Perfil NTK: río Torca

ver que en la mañana las concentraciones del canal El Cedro (mediana = 1,4 mg/L) fueron muy inferiores a las de la tarde (6,3 mg/L). En comparación con los datos históricos, se pudo ver una leve reducción de las concentraciones en el canal El Cedro; no obstante, la diferencia no es significativa (1,7 mg/L vs. 2 mg/L), por lo que se puede asumir un comportamiento constante en el tiempo (figura 2.11).

En el punto Makro 193, las concentraciones de NTK, nitrógeno amoniacal y  $N_{total}$  aumentan bastante en comparación con el primer punto; adicionalmente, a lo largo del río (entre Makro 193 y Club Guaymaral) los valores de nitrógeno amoniacal se incrementan, mientras que los de  $N_{total}$  y NTK se mantienen constantes. En este punto, las concentraciones de NTK y, por lo tanto, de  $N_{total}$  fueron muy dispersas. El NTK

FIGURA 2.11. Perfil  $N_{total}$ : río Torca

estuvo entre 1,1 y 31 mg/L, y la mediana fue de 19 mg/L, mientras que la mediana histórica fue 30 mg/L, que evidencia una disminución en las concentraciones a lo largo del tiempo. Analizando cada valor y la hora de monitoreo, se notó que la variabilidad del NTK se da a cualquier hora del día, pues en monitoreos de la mañana (8:30 a 10:30) se reportaron concentraciones por debajo del límite de detección (1,1 mg/L) y concentraciones de 25,4 mg/L; igualmente, ocurrió con los monitoreos de la tarde (12:30 a 14:30), pues se reportaron valores de 30,8 mg/L y de 1,8 mg/L. Por lo tanto, es difícil establecer un comportamiento para este parámetro y para  $N_{total}$ , ya que en este punto del río las concentraciones de  $NO_2$  y  $NO_3$  tienden a disminuir (véanse perfiles de nitritos y nitratos).

Los valores de nitrógeno amoniacal no presentaron la misma variabilidad. En Makro 193 el rango estuvo entre 1,2 y 63 mg/L, con una mediana de 15 mg/L, que aunque tiende hacia el percentil 75, se encontró ligeramente inferior a la histórica (23 mg/L). La variación en el día de

las concentraciones de nitrógeno amoniacal no es muy importante entre la mañana y la tarde (mediana = 15 mg/L); sin embargo, en la noche y madrugada se notó una disminución (3,9 mg/L). El cambio de concentraciones durante el día permite identificar que los vertimientos de aguas residuales afectan la dinámica y la calidad del agua del río Torca (figura 2.12).

Las concentraciones de  $NO_2$  y  $NO_3$  disminuyeron considerablemente entre el primer y último punto de monitoreo del río Torca, lo cual se debe principalmente a las concentraciones de oxígeno disuelto en estos puntos. El proceso de nitrificación no sólo necesita una cantidad determinada de nitrógeno, sino que exista oxígeno disuelto en el río. Los valores de oxígeno disuelto son un factor clave en la capacidad de nitrificación-denitrificación de un cuerpo de agua. En Makro 193 la variabilidad de los datos de  $NO_2$  fue muy notoria: el valor máximo (0,22 mg/L) ha sido la mayor concentración registrada en la campaña 2009-2010. Las mayores concentraciones en nitritos se dan en la noche, cuando hay más cantidades

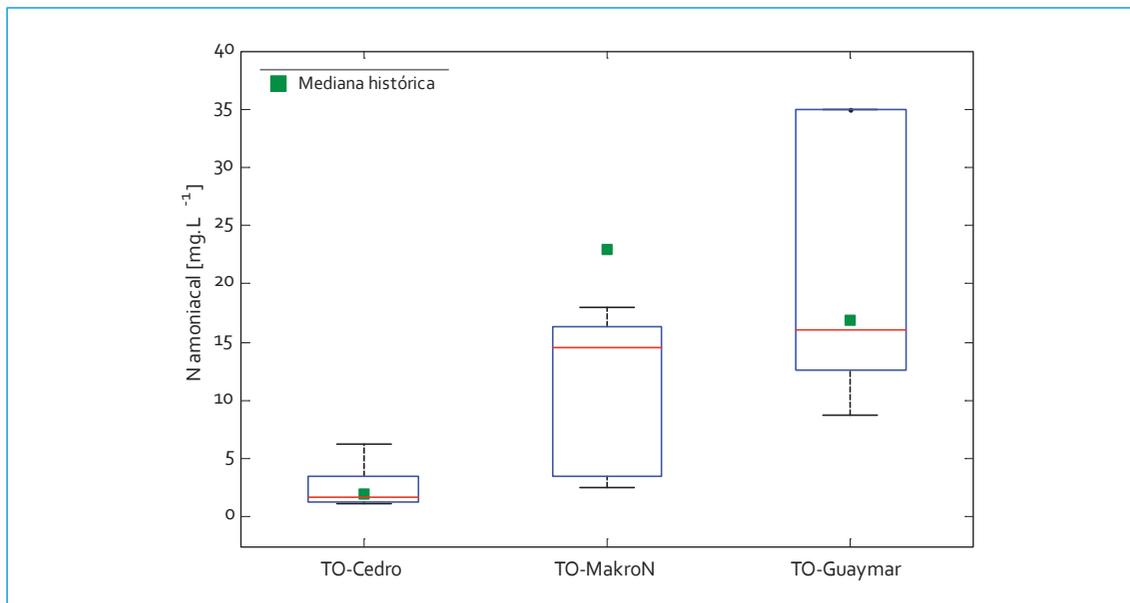


FIGURA 2.12. Perfil nitrógeno amoniacal: río Torca

de oxígeno disuelto en el río promoviendo la nitrificación. De la misma manera que en el canal El Cedro, los monitoreos de finales del 2009 en Makro 193 registraron las concentraciones más altas, pues el rango estuvo entre 1,77 y 3,52 mg/L, mientras que los valores del 2010 variaron entre 0,07 y 1,13 mg/L (figuras 2.13 y 2.14).

Por último, en el punto Club Guaymaral hubo una leve disminución en el NTK respecto

a los datos históricos. En este punto, los datos de  $N_{total}$  de la campaña 2009-2010 frente a los de NTK históricos son comparables, pues la oxidación del amonio es muy improbable con cantidades de oxígeno disuelto cercanas a cero. Por otro lado, las concentraciones de nitrógeno amoniacal para este punto del río permanecieron constantes en el tiempo, y se notó una homogeneidad en las concentraciones en las diferentes horas del día.

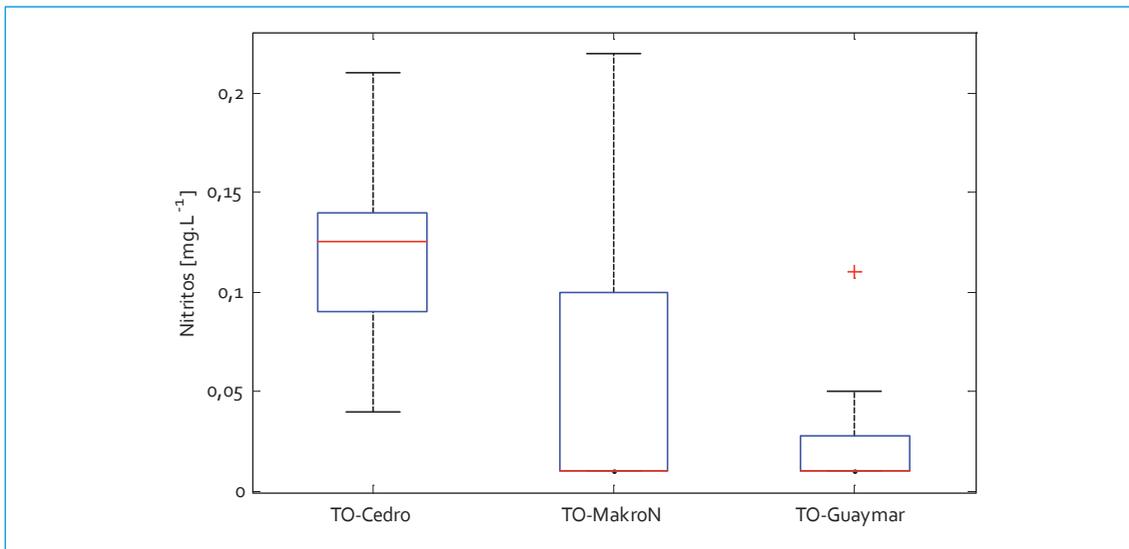


FIGURA 2.13. Perfil nitritos: río Torca

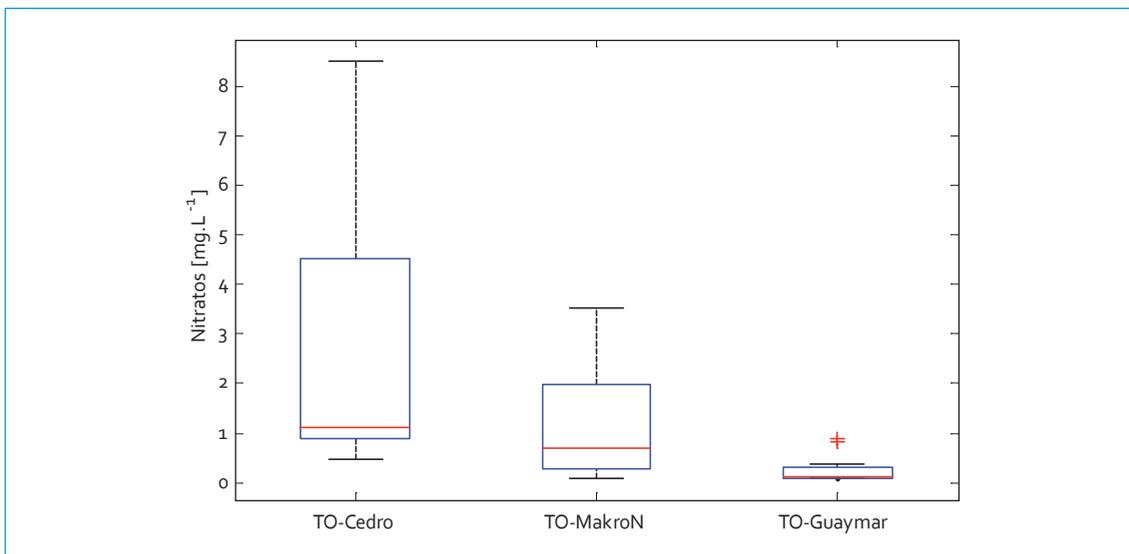


FIGURA 2.14. Perfil nitratos: río Torca

### 2.1.1.11. Fósforo total

A partir de la figura 2.15 se puede confirmar un aumento importante de las concentraciones de este parámetro a lo largo del río, aunque entre Makro 193 y Club Guaymaral las concentraciones se mantuvieron relativamente constantes. En canal El Cedro se encontraron las concentraciones más bajas de fósforo del río Torca. Las de fósforo en este punto han sido similares que los registros históricos. Las variaciones diarias muestran que, aunque en el 2009 se registraron las concentraciones más altas, en los monitoreos de la tarde se dio la condición más crítica y la mejor condición en los monitoreos de la noche. Sin embargo, es importante resaltar la uniformidad de los datos, por lo que las variaciones corresponden a un rango poco amplio. En el punto Makro 193, la disminución de las concentraciones frente a las históricas es la más notable: la mediana histórica es casi el doble a la mediana actual y además históricamente se han presentado valores de fósforo mucho más elevados

(7,6 mg/L) que el máximo actual (4,0 mg/L). La variación diaria mostró que en cualquier hora del día se pueden presentar concentraciones altas o bajas de fósforo, aunque en la noche tienden a ser más bajas. En el último punto de monitoreo del río las concentraciones de fósforo disminuyeron en comparación a los registros históricos. Aunque los rangos de mínimos y máximos son similares, las medianas difieren bastante (mediana 2009-2010 = 5 mg/L vs. mediana histórica = 12 mg/L). Aun teniendo en cuenta la dispersión de los datos, en Club Guaymaral, las menores concentraciones de fósforo se dieron en los monitoreos de la tarde y no en la noche, como ocurrió en Canal El Cedro y Makro 193. Se puede decir que, comparando los datos actuales de monitoreo frente a los históricos, las concentraciones de fósforo se han mantenido o reducido en el río Torca. Es importante anotar que en los dos últimos puntos de monitoreo las concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) fueron homogéneas.

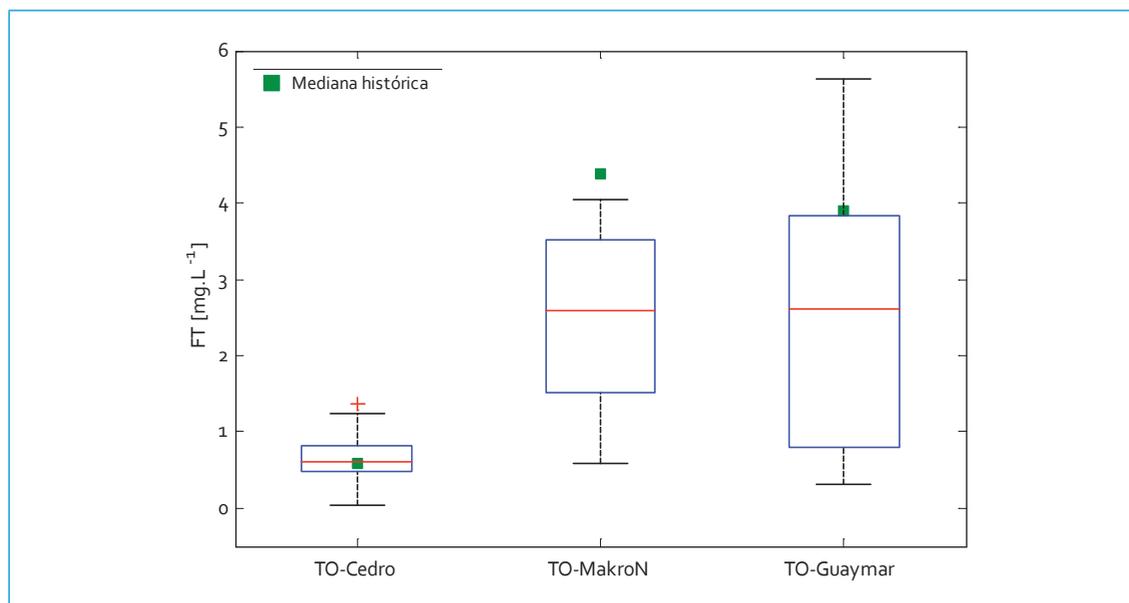


FIGURA 2.15. Perfil  $F_{total}$ : río Torca

### 2.1.1.12 Grasas y aceites

El perfil longitudinal de las concentraciones de grasas y aceites (GyA) muestra que las mayores concentraciones se encontraron en Makro 193 (figura 2.16). En el primer punto de monitoreo, muchos de los resultados fueron inferiores al límite de detección, por lo que aparecen cercanos a 3,6 mg/L, y aquellos valores por encima de 5 mg/L aparecen como valores atípicos. En Makro 193 se notó un aumento importante en las concentraciones, seguido de una disminución en el último punto de monitoreo. Para el canal El Cedro, las dos terceras partes de las concentraciones fueron no detectables, por lo que hubo una notable disminución respecto a los registros históricos. Los valores que estuvieron por encima del límite de detección corresponden a monitoreos de horas de la tarde. Las concentraciones en Makro 193 fueron las más variables y las más elevadas del río Torca; la mediana (6,3 mg/L) difiere bastante del valor

medio (11 mg/L) y muestra alta dispersión. Los datos obtenidos en horas de la tarde fueron los más elevados, pues el rango estuvo entre 3,6 y 32,8 mg/L; entre tanto en la noche fue de 3,6 a 14,5 mg/L. En Makro 193, la diferencia entre la mediana de las concentraciones de GyA y la histórica fue de la misma proporción que para canal El Cedro, que mostró una disminución significativa en el tiempo.

En el punto Club Guaymaral se observaron concentraciones de GyA relativamente bajas y mucho más uniformes que en Makro 193. La mediana fue de 4,9 mg/L y los datos estuvieron entre 3,6 y 11 mg/L. La tendencia a la disminución de concentraciones de GyA entre Makro 193 y Club Guaymaral, posiblemente, es resultado de la retención de las grasas en la zona de buchón previa al punto de monitoreo Club Guaymaral. Al igual que en los demás puntos de monitoreo, la mediana disminuyó de manera significativa en referencia a la histórica.

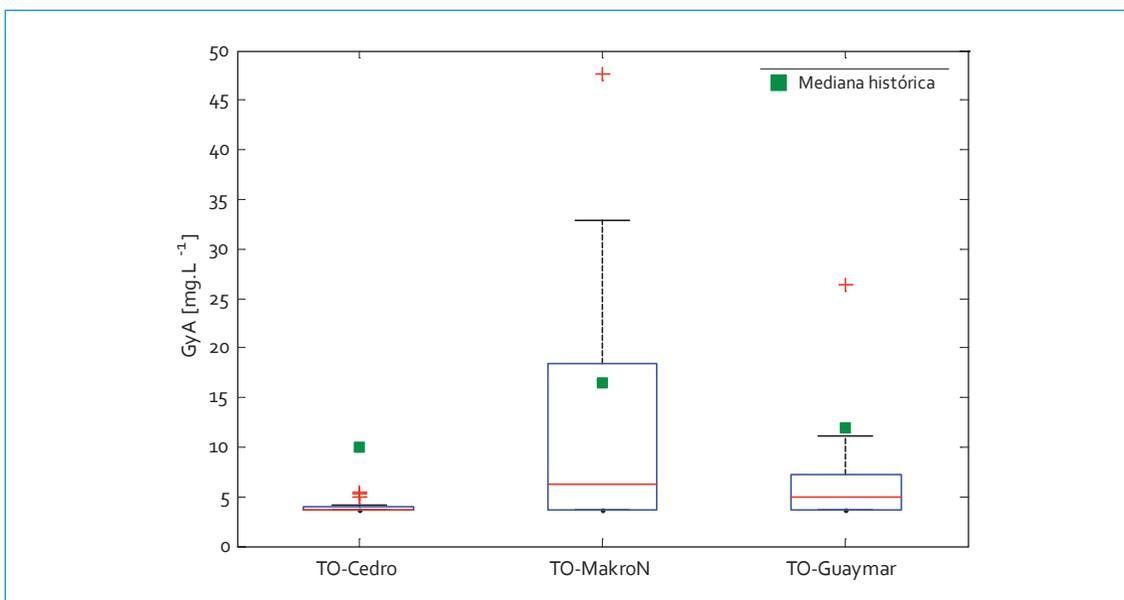


FIGURA 2.16. Perfil grasas y aceites: río Torca

### 2.1.1.13. SAAM

En la figura 2.17 se puede observar el aumento de las concentraciones de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) entre el primer y segundo punto de monitoreo. Entre Makro 193 y Club Guaymaral se observó una disminución al igual que para los parámetros de materia orgánica y GyA. Los valores de SAAM en canal El Cedro fueron muy similares a los históricos: la mediana 2009-2010 es levemente superior a la histórica. En cuanto a la variación diaria de las concentraciones de SAAM, en este punto se presentó un comportamiento completamente diferente a los demás parámetros, pues la condición más crítica, es decir donde se obtuvieron mayores valores, fue en la noche. Sin embargo, cabe resaltar que el promedio de las concentraciones en las horas de la noche no es lejano de los monitoreos de la tarde.

En el segundo tramo del río, las concentraciones de SAAM disminuyeron aguas abajo en Makro 193, donde los datos oscilaron entre 0,46 y 8,4 mg/L; mientras que en Club Guay-

maral estuvieron entre 0,21 y 5,3 mg/L. En el punto Makro 193 se notó un aumento importante de SAAM en el tiempo; la mediana actual (4,1 mg/L) superó de manera importante la mediana histórica (2,5 mg/L), y aunque los datos estuvieron muy dispersos (47% de los de SAAM superaron el valor máximo histórico), es importante resaltar que en este punto las mayores concentraciones se presentaron en la tarde y la mañana. En Club Guaymaral las concentraciones fueron más homogéneas y la mediana fue muy similar a la histórica, que mostraron un comportamiento constante en el tiempo en este punto, al igual que en el canal El Cedro. La condición más crítica la presentaron los monitoreos de la madrugada: la mediana de los monitoreos entre 3:00 y 4:00 fue de 3,8 mg/L; en tanto que entre las 13:00 y las 18:00 fue de 1,4 mg/L.

### 2.1.1.14. Coliformes fecales

El perfil longitudinal de las concentraciones de coliformes fecales medidos en la campaña

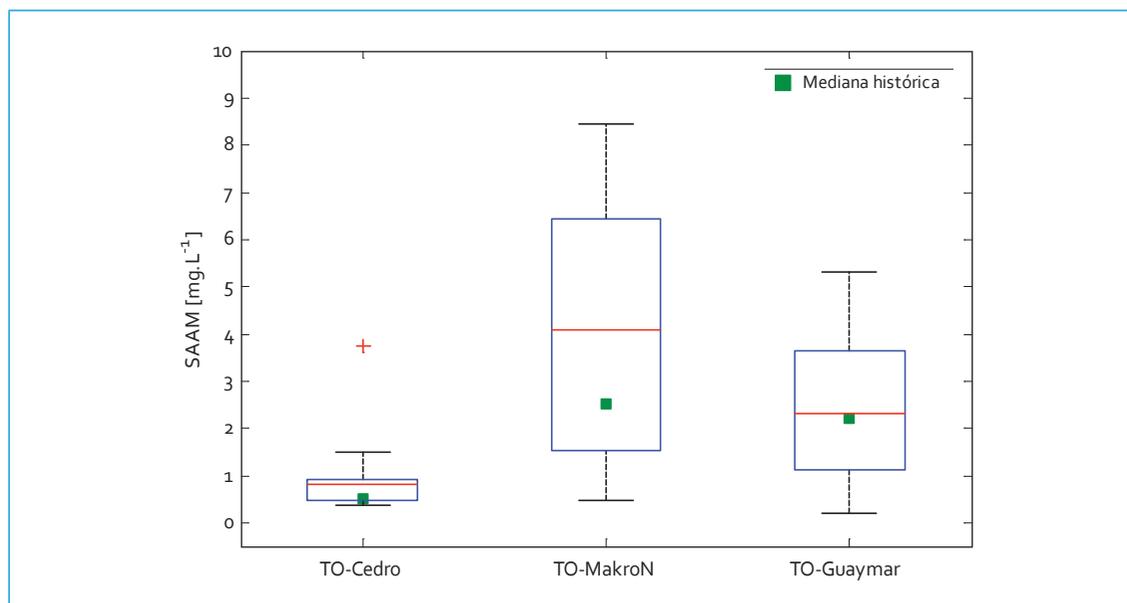


FIGURA 2.17. Perfil SAAM: río Torca

de monitoreo 2009-2010 se presenta en la figura 2.18. Se pudo constatar el aumento entre el primer y segundo tramo, aunque las medianas de los dos puntos pertenecientes al tramo 2 se mantuvieron similares.

En el primer punto de monitoreo se observaron concentraciones muy dispersas de coliformes fecales. El rango en que variaron los datos fue de  $3 \times 10^1$  a  $4 \times 10^5$  NMP/100mL. Aunque la concentración mínima se presentó en un monitoreo realizado en horas de la tarde, las menores cantidades de coliformes fecales se dieron en los monitoreos nocturnos, lo cual es de esperarse puesto que las descargas de aguas residuales domésticas se hacen mayoritariamente en la mañana. Por otro lado, la mediana histórica no estuvo muy alejada de la mediana de los datos 2009-2010, que mostró una variación casi nula en el tiempo. Sin embargo, es importante resaltar que históricamente se han dado valores más elevados de coliformes que los encontrados durante esta campaña (máx. actual:  $9,3 \times 10^5$  NMP/100mL vs. máx. histórico:  $2,4 \times 10^6$  NMP/100mL).

Previamente se resaltó el incremento a lo largo del tiempo de concentraciones de algunos parámetros como DBO, SST y DQO. A partir del aumento que se presenta igualmente para los coliformes fecales, se presume que estos cambios en la calidad del agua son efecto de vertimientos realizados sobre este tramo del río, posiblemente de carácter doméstico. Es necesario corroborar dicha hipótesis e identificar posibles transformaciones que haya sufrido el tramo entre noviembre y diciembre del 2009, cuando se presentaron las mayores concentraciones de coliformes fecales.

En el tramo 2 las medianas en los dos puntos de monitoreo fueron similares, porque presentaron una leve disminución frente a los datos históricos. En Makro 193 fue donde mayor uniformidad hubo en los datos; se notó que la mediana estuvo por debajo de la mediana histórica y se evidenció una aparente reducción en los coliformes fecales, aun cuando los órdenes de magnitud son iguales. En las diferentes horas de monitoreo se pudo establecer que las concentraciones de coliformes

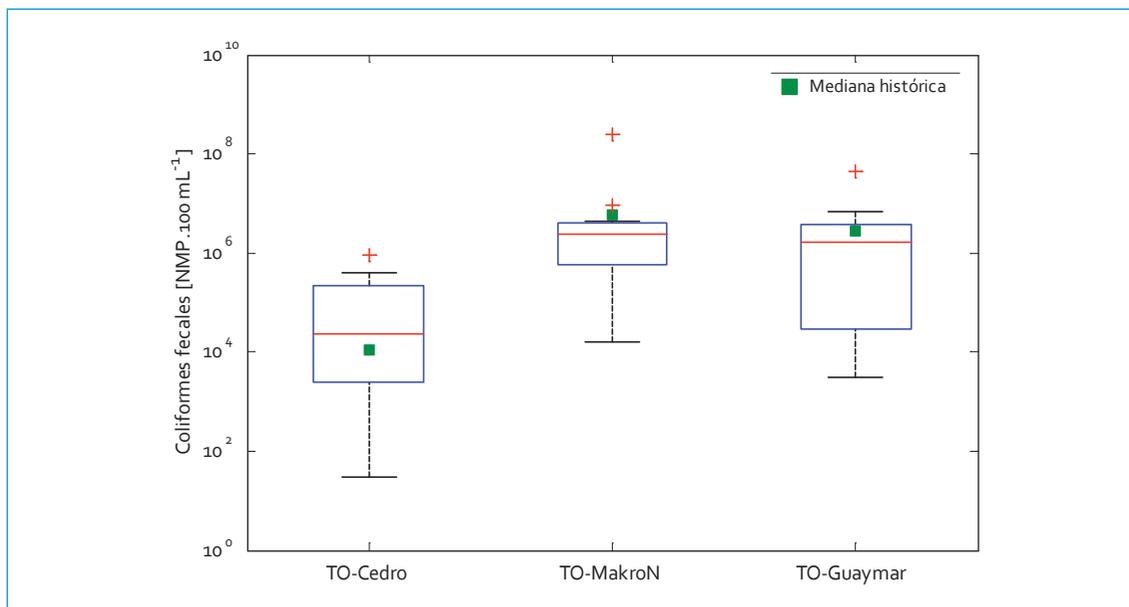


FIGURA 2.18. Perfil coliformes fecales: río Torca

fecales fueron mayores en la mañana que en la noche en este punto del río; sin embargo, como la mayoría de los datos de la mañana corresponden a los monitoreos del 2009, es necesario verificar a partir de más datos si en dicha época se presentó alguna anomalía en la calidad del agua del río. Así, al comparar los datos de este punto y los de Club Guaymaral, se observó que las concentraciones de coliformes fecales tienden a disminuir aguas abajo y que las medianas de los dos puntos difieren muy poco (Makro 193:  $2,4 \times 10^6$  vs. Club Guaymaral:  $1,7 \times 10^6$  NMP/100 mL).

#### 2.1.1.15. Coliformes totales

En la figura 2.19 se muestra el perfil longitudinal de los coliformes totales en el río Torca. Se puede observar, al igual que para los coliformes fecales, aumento en la concentración entre el primer y segundo tramo, y alto grado de homogeneidad entre los puntos de monitoreo del tramo 2. Para el canal El Cedro las menores concentraciones se presentaron en los moni-

toros nocturnos, lo cual es coherente con el comportamiento de los coliformes fecales. Por otro lado, la mediana fue muy similar a la mediana histórica, porque registró un comportamiento constante a lo largo del tiempo.

En los puntos Makro 193 y Club Guaymaral se notó que las medianas fueron similares, al presentar una disminución frente a los datos históricos, contrario a la evolución de los coliformes fecales, puesto que en este caso la disminución es de casi un orden de magnitud. También se observó la coherencia en el comportamiento de los coliformes totales y fecales, siendo la mañana con las mayores concentraciones y la noche o madrugada la menor. En Club Guaymaral, las variaciones diarias de los coliformes totales mostraron poca variación. En promedio, las concentraciones fueron muy similares entre los monitoreos de la mañana, tarde o noche.

#### 2.1.1.16. Sulfuros

En el canal El Cedro los sulfuros se han mantenido constantes en el tiempo (figura 2.20), con

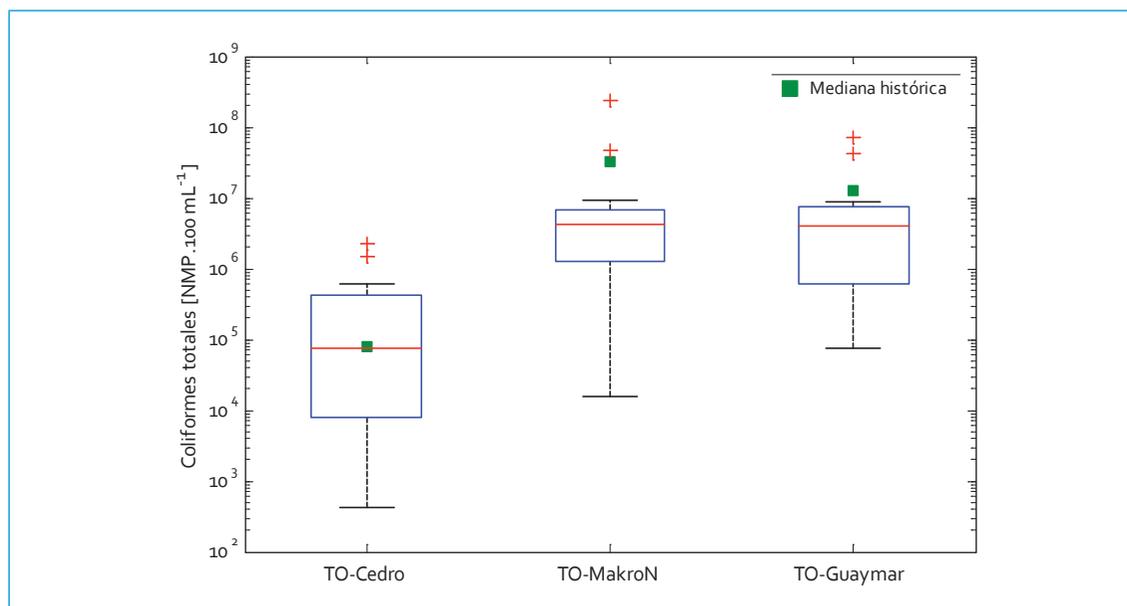


FIGURA 2.19. Perfil coliformes totales: río Torca

una pequeña tendencia a la disminución de la misma forma que el NTK, además que el 60% de los datos en este punto fueron cercanos o inferiores al límite de detección (0,5 mg/L). Los valores que estuvieron por encima del límite de detección corresponden a monitoreos de horas de la mañana y la tarde. En Makro 193, las concentraciones fueron poco variables, la mediana (0,6 mg/L) no difiere del valor medio (0,7 mg/L) y, adicionalmente, no se presentó variación según la hora de monitoreo.

La diferencia entre la mediana de las concentraciones de sulfuros y la histórica es de la misma proporción que para el canal El Cedro, ya que muestra un comportamiento casi constante en el tiempo. En el punto Club Guaymaral se observaron las concentraciones de sulfuros más elevadas del río, con una aparente variabilidad en los datos; sin embargo, el rango se encontró entre 1,1 y 2,0 mg/L. Aunque se desconozcan las concentraciones de sulfato en el río, se podría pensar que dado el poco oxígeno en este punto, podría estar ocurriendo una reducción de los sulfatos hacia sulfuros.

En este punto tampoco se presentó variación según la hora de monitoreo. Al igual que en los demás puntos, la mediana disminuyó de manera importante en referencia a la histórica.

#### 2.1.1.18. Cianuro

Las concentraciones de cianuro para la gran mayoría de los datos estuvieron muy cercanos al límite de detección de 0,5 mg/L de la campaña 2009-2010. No se presenta un perfil longitudinal, puesto que las concentraciones en todo el río oscilaron en un rango muy pequeño: de 0,5 a 0,6 mg/L. Las medianas históricas son cercanas a los 0,003 mg/L (límite de detección de los valores históricos). Se presume que la razón por la cual los datos históricos son tan bajos en comparación con los actuales es por la diferencia de cuantificación del método utilizado entre los laboratorios para la determinación de cianuros. Se puede asumir que con concentraciones de cianuros tan bajas en el río Torca no hay un impacto por este contaminante.

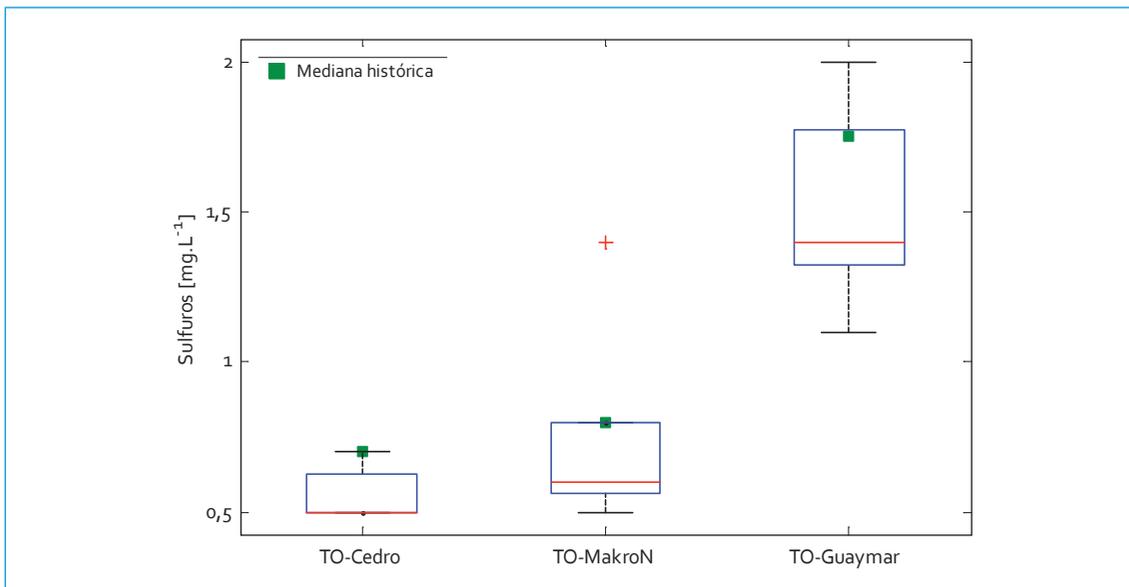


FIGURA 2.20. Perfil sulfuros: río Torca

### 2.1.1.19. Fenoles

El perfil longitudinal de fenoles del río Torca muestra que las mayores concentraciones se encontraron en Makro 193 (figura 2.21); sin embargo, los datos en todos los puntos de monitoreo presentaron poca variabilidad y el rango de concentraciones a lo largo del río estuvo entre 0,02 y 0,23 mg/L. En el canal El Cedro los fenoles tuvieron una aparente disminución en el tiempo; sin embargo, de la misma manera que para el cianuro, los límites de detección varían según el laboratorio, pues este es de 0,05 mg/L para los datos históricos y de 0,02 mg/L para la campaña 2009-2010. En ambos casos, histórico y actual, las concentraciones de fenoles en este punto del río han sido mayoritariamente no detectables, pero los monitoreos realizados en la tarde y madrugada obtuvieron concentraciones un poco más elevadas: entre 0,14 y 0,18 mg/L.

En el punto Makro 193 se obtuvo la mayor concentración del río (0,23 mg/L), valor muy cercano al máximo histórico (0,25 mg/L). Las concentraciones de fenoles fueron varia-

bles en comparación con los demás puntos de monitoreo: la mediana (0,05 mg/L) difiere ligeramente del valor medio (0,1 mg/L) y, adicionalmente, los mayores valores se dieron en los monitoreos realizados en horas de la tarde. La diferencia entre la mediana de las concentraciones de fenoles y la histórica es de la misma proporción que para canal El Cedro; muestra que muy seguramente es debido al límite de detección. Por último, en el punto Club Guaymaral se observaron las concentraciones más uniformes. A diferencia de los demás puntos, allí los datos más elevados se dieron en la mañana. En contraste al canal El Cedro y Makro 193, la mediana aumentó en referencia a la histórica, pues históricamente fueron más los datos que estuvieron por debajo del límite de detección.

### 2.1.1.20. Metales

A continuación se muestran los perfiles longitudinales de las concentraciones de bario, cadmio, cinc, cobre, cromo, manganeso, níquel y plomo en el río Torca. Estas cantidades totales

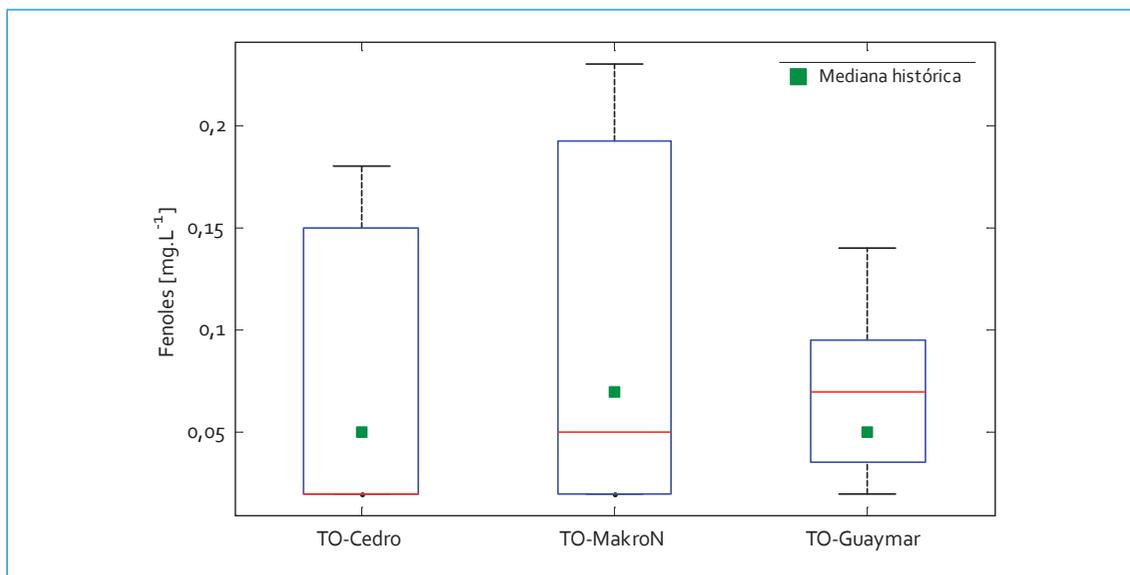


FIGURA 2.21. Perfil fenoles: río Torca

constituyen una medida poco representativa de la posible toxicidad de un metal pesado. La forma química bajo la que se presenta un metal pesado, es decir, la especiación gobierna la toxicidad. Algunos de los factores que afectan la acumulación y disponibilidad de este tipo de sustancias son el pH (a pH ácidos tienden a estar disponibles), la dureza (si la dureza es elevada existe baja toxicidad) y la materia orgánica, puesto que reacciona con los metales formando complejos organometálicos que facilitan la solubilidad, disponibilidad y dispersión.

#### 2.1.1.20.1. Bario

Las concentraciones de bario en el río Torca medidas en la campaña de monitoreo 2009-2010 estuvieron entre 0,03 y 0,23 mg/L (figura 2.22). Las concentraciones en los dos primeros puntos de monitoreo fueron muy homogéneas, aun cuando 0,13 mg/L fue el valor más elevado, por lo que se podría pensar que el bario encontrado en estos puntos es de origen

natural y no presenta alguna afectación a la calidad del agua. La Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (US EPA) tiene como límite máximo permisible 2 mg/L de bario para el agua potabilizable. En el punto Club Guaymaral, donde se registraron las más altas concentraciones, el máximo no superó los 0,23 mg/L, lo cual demuestra la baja concentración en la fase líquida encontrados.

#### 2.1.1.20.2. Cadmio

Las concentraciones de cadmio en el río Torca (figura 2.23), al igual que las de bario, no presentan variaciones importantes; los valores estuvieron entre 0,001 y 0,009 mg/L. Las concentraciones en los dos primeros puntos de monitoreo fueron la gran mayoría muy cercanas al límite de detección (0,001 mg/L), a excepción de un dato atípico en Makro 193, de 0,003 mg/L, que se presentó durante un monitoreo en que los SST también fueron atípicos, lo cual hace pensar en un fenómeno de resuspensión de sedimentos. Las diferencias

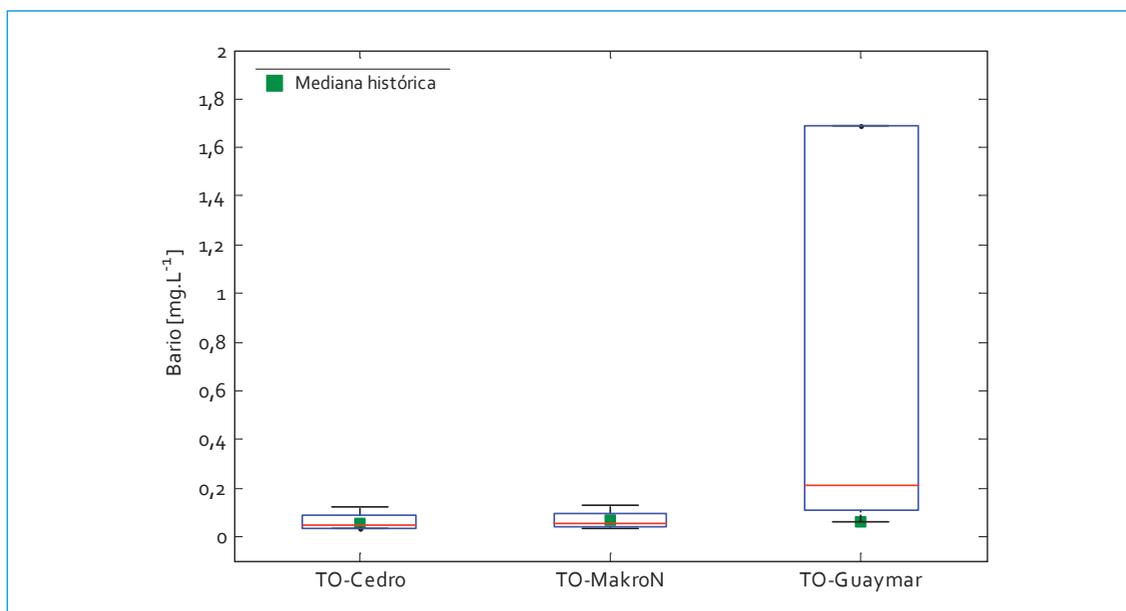


FIGURA 2.22. Perfil bario: río Torca

entre la mediana histórica y la de la campaña 2009-2010 es nuevamente la diferencia en los límites de detección. La US EPA tiene como límite máximo permisible 0,005 mg/L de cadmio para el agua potable. En el punto Club Guaymaral, donde se registraron las más altas concentraciones, la mediana fue de 0,005 mg/L; sin embargo, el máximo estuvo en 0,009 mg/L. Aunque la diferencia entre las concentraciones de los primeros puntos de monitoreo con las de Club Guaymaral no sean significativas, es difícil asociar dichos cambios a vertimientos, puesto que la mayoría de descargas están entre canal El Cedro y Makro 193.

#### 2.1.1.20.3. Cinc

Para este metal se pudo apreciar que las concentraciones van aumentando a lo largo del río y que el canal El Cedro es el punto donde se presentaron las más bajas concentraciones (figura 2.24). Las medianas de las concentraciones en los dos primeros puntos de monitoreo

disminuyeron en referencia a los datos históricos. La US EPA tiene como límite máximo permisible 5 mg/L de cinc para el agua potable. En el punto Club Guaymaral, donde se registraron las más altas concentraciones, el máximo no supera los 0,3 mg/L. Al igual que para los demás metales, las concentraciones de los primeros puntos de monitoreo, en comparación con las de Club Guaymaral, son bajas.

#### 2.1.1.20.4. Cobre

El perfil de concentraciones de cobre en el río Torca presenta mayor variación que los demás metales descritos (figura 2.25). En contraste con los otros metales, las mayores cantidades de cobre se dieron en Makro 193 y no en Club Guaymaral. Todas las medianas de las concentraciones aumentaron en referencia a las históricas, especialmente para canal El Cedro y Club Guaymaral. El rango histórico de las concentración en el río Torca es de 0,001-0,06 mg/L, mientras que para la campaña 2009-2010

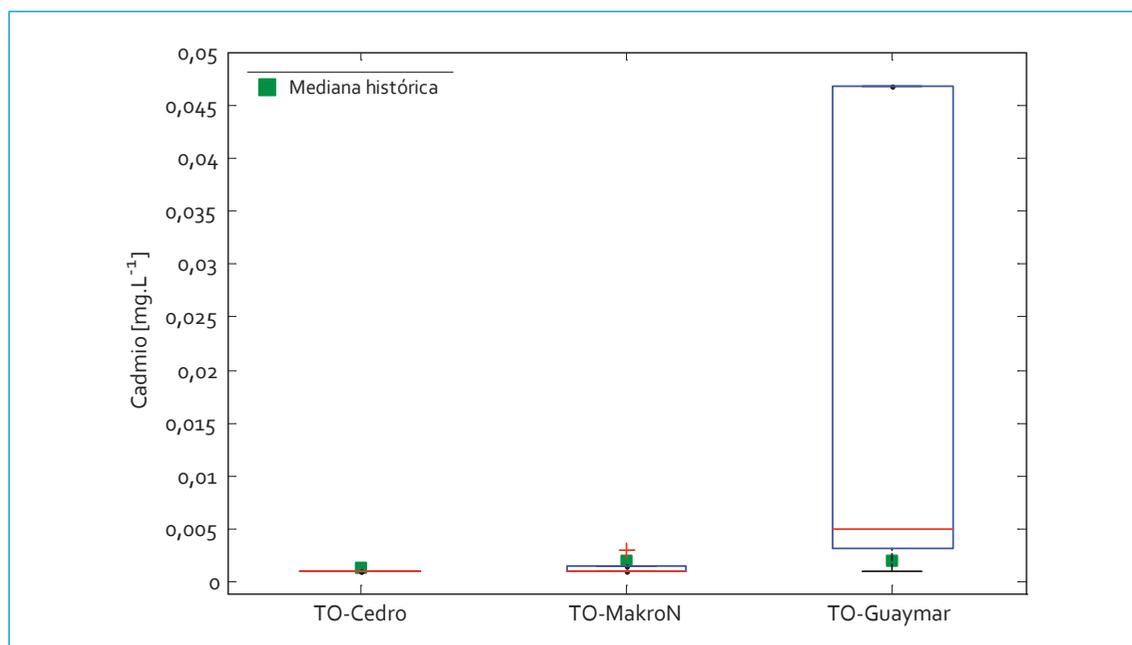


FIGURA 2.23. Perfil cadmio: río Torca

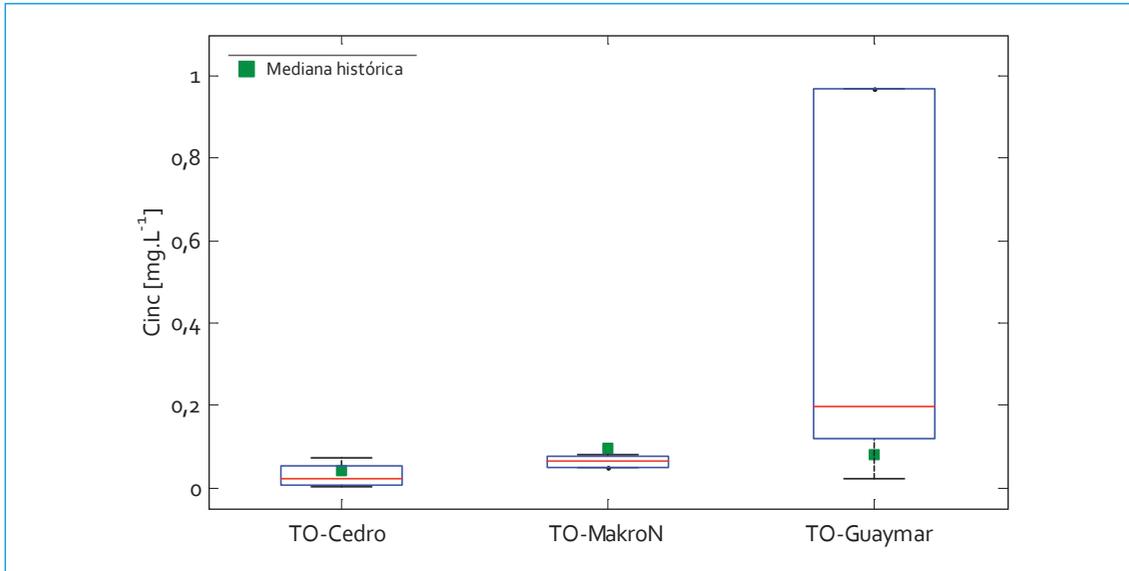


FIGURA 2.24. Perfil cinc: río Torca

los datos oscilaron entre 0,007 y 0,11 mg/L. La US EPA tiene como límite máximo permisible 1 mg/L de cobre para el agua potable; en el punto Makro 193, donde se registraron las más altas concentraciones, el máximo no

superó los 0,009 mg/L. Esto muestra que, a pesar de obtener datos más elevados de cobre, las concentraciones siguen siendo bajas y no representan un verdadero impacto en la calidad del agua.

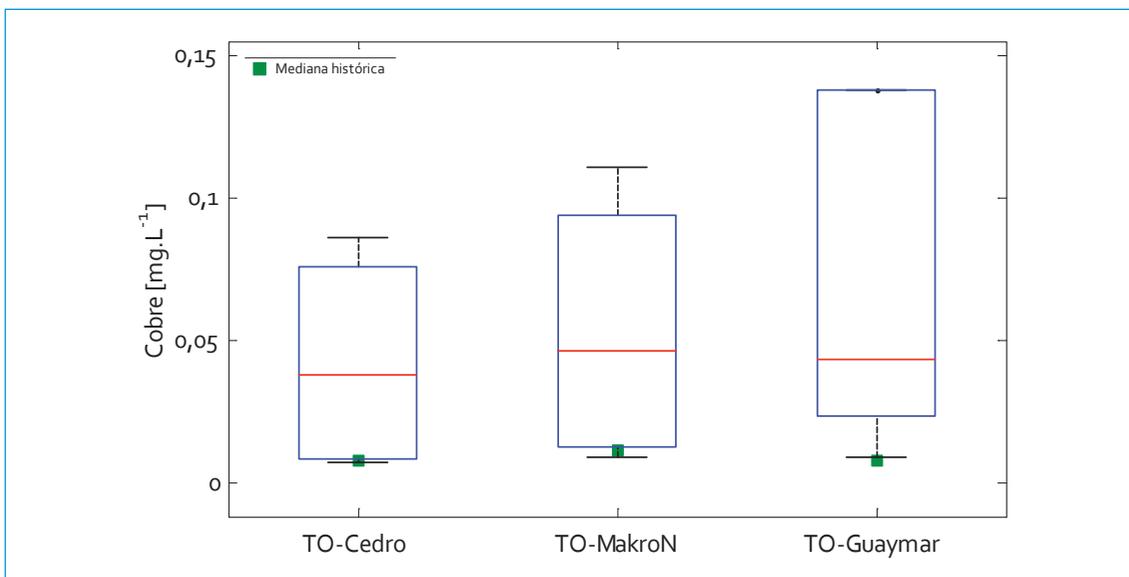


FIGURA 2.25. Perfil cobre: río Torca

## 2.1.1.20.5. Cromo total

Las concentraciones de cromo total en el río Torca (figura 2.26), al igual que las de bario y cadmio, no presentan variaciones importantes. Los valores estuvieron entre 0,006 y 0,017 mg/L. Las concentraciones en los dos primeros puntos de monitoreo fueron la gran mayoría muy cercanas al límite de detección (0,006 mg/L). Las diferencias entre la mediana histórica y la actual es nuevamente la diferencia en los límites de detección. La US EPA tiene como límite máximo permisible 0,1 mg/L de cromo total para el agua potable; en el punto Club Guaymaral, donde se registraron las más altas concentraciones, el máximo estuvo en 0,017 mg/L. Al igual que el cadmio, es difícil asociar los cambios de las concentraciones entre los primeros puntos de monitoreo y el último con vertimientos.

## 2.1.1.20.6. Manganeso

En la figura 2.27 se puede ver que las concentraciones de este metal van aumentando a lo largo del río, y canal El Cedro es el punto donde se presentaron la más bajas concentraciones. Las medianas de las concentraciones en los dos primeros puntos de monitoreo disminuyeron en referencia a los datos históricos. La US EPA tiene como límite máximo permisible 0,05 mg/L de manganeso para el agua potabilizable; también ha determinado que la exposición de por vida a concentraciones de 0,3 mg/L de manganeso en el agua potable no causará efectos adversos. En el punto Club Guaymaral se registraron concentraciones hasta de 0,88 mg/L, valores mucho más elevados que el límite permisible, lo cual demuestra altas concentraciones en la fase líquida de este cuerpo de agua. Al igual que para los demás metales, las concentraciones de los primeros puntos de monitoreo, en comparación con las de Club Guaymaral, fueron bajas.

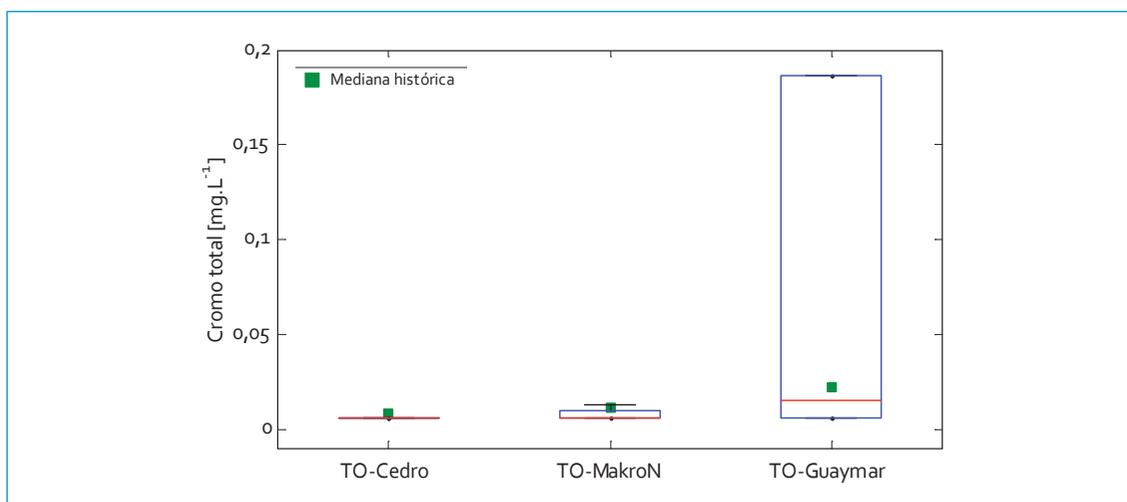


FIGURA 2.26. Perfil cromo total: río Torca

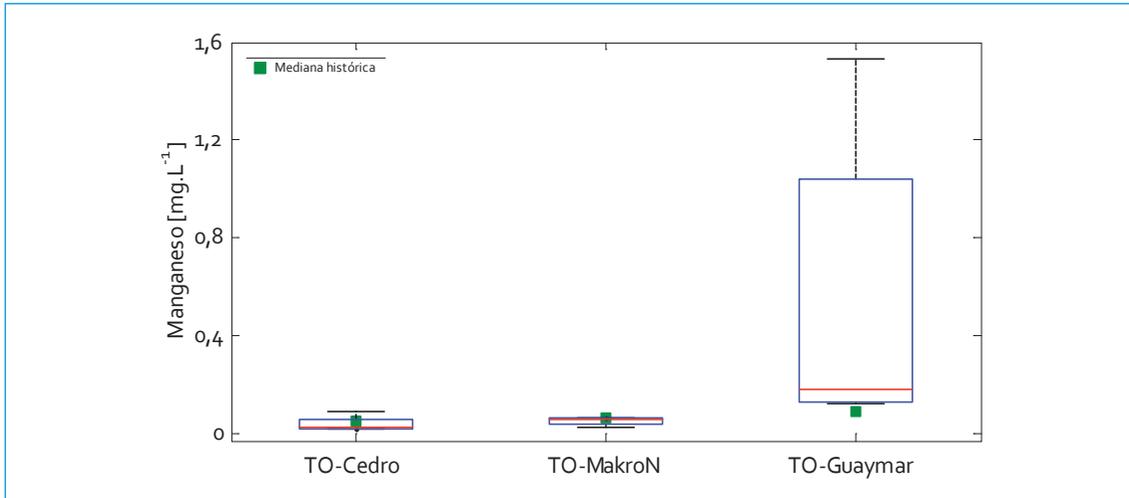


FIGURA 2.27. Perfil manganeso: río Torca

#### 2.1.1.20.7. Níquel

Las concentraciones de níquel en el río Torca no presentan variaciones importantes (figura 2.28); los valores estuvieron entre 0,001 y 0,008 mg/L. Las concentraciones más eleva-

das se dieron en el segundo tramo del río, en los puntos Makro 193 y Club Guaymaral. La US EPA tiene como límite máximo permisible 0,1 mg/L de níquel para el agua potable; en el punto Club Guaymaral donde se registraron las más altas concentraciones, el máximo no

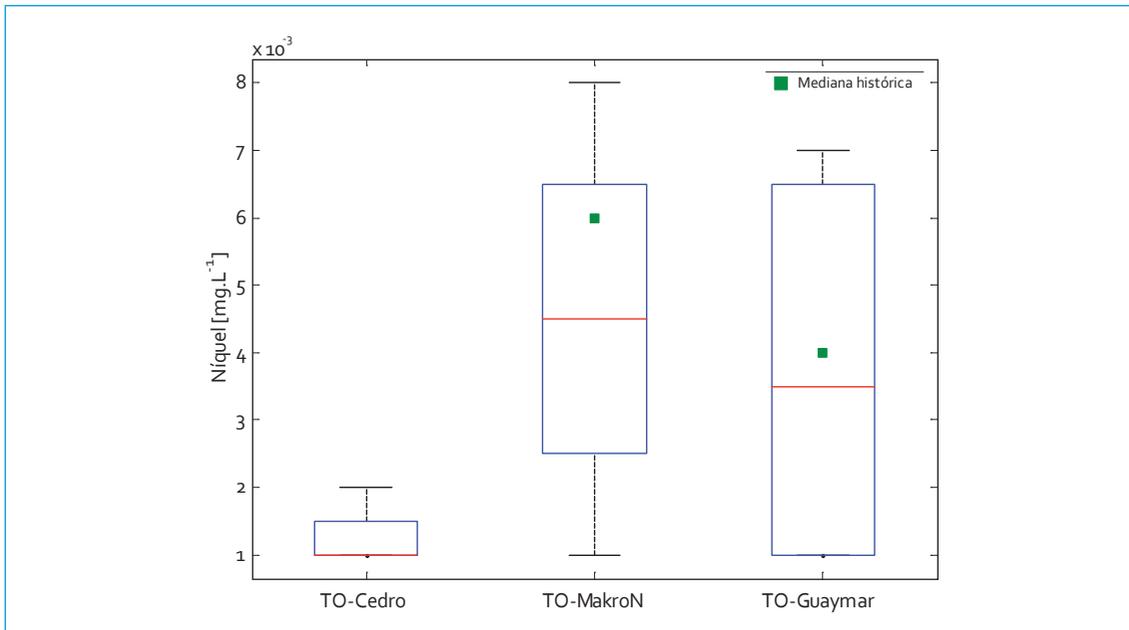


FIGURA 2.28. Perfil níquel: río Torca

superó los 0,008 mg/L, razón por la cual se puede pensar que la calidad del agua en el río Torca no se ve afectada por este metal. Es importante anotar que las medianas de las concentraciones históricas y actuales fueron muy similares para canal El Cedro y Makro 193, y para Club Guaymaral se observó un aumento en los últimos años.

#### 2.1.1.20.8. Plomo

Las concentraciones de plomo en el río Torca se muestran en el perfil longitudinal de la figura 2.29. Los datos no presentaron variaciones importantes y oscilaron entre 0,003 y 0,077 mg/L. Es importante resaltar que históricamente los datos siempre habían estado muy cercanos al límite de detección, especialmente para canal El Cedro y Club Guaymaral. Todo ello evidencia que las medianas históricas son inferiores a las actuales.

### 2.1.2 Cargas contaminantes

#### 2.1.2.1 DBO

La tabla 2.2 y la figura 2.30 presentan el cambio de las cargas promedio entre los dos tramos del río para la campaña de monitoreo 2009-2010. Se corrobora el efecto que tienen los vertimientos de aguas residuales sobre la calidad del agua.

TABLA 2.2. Carga promedio transportada  $DBO_5$ : río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
$DBO_5$	2,0	136

En el primer tramo las cargas variaron según la época del monitoreo. Como se explicó, las mayores cargas se presentaron en el 2009,

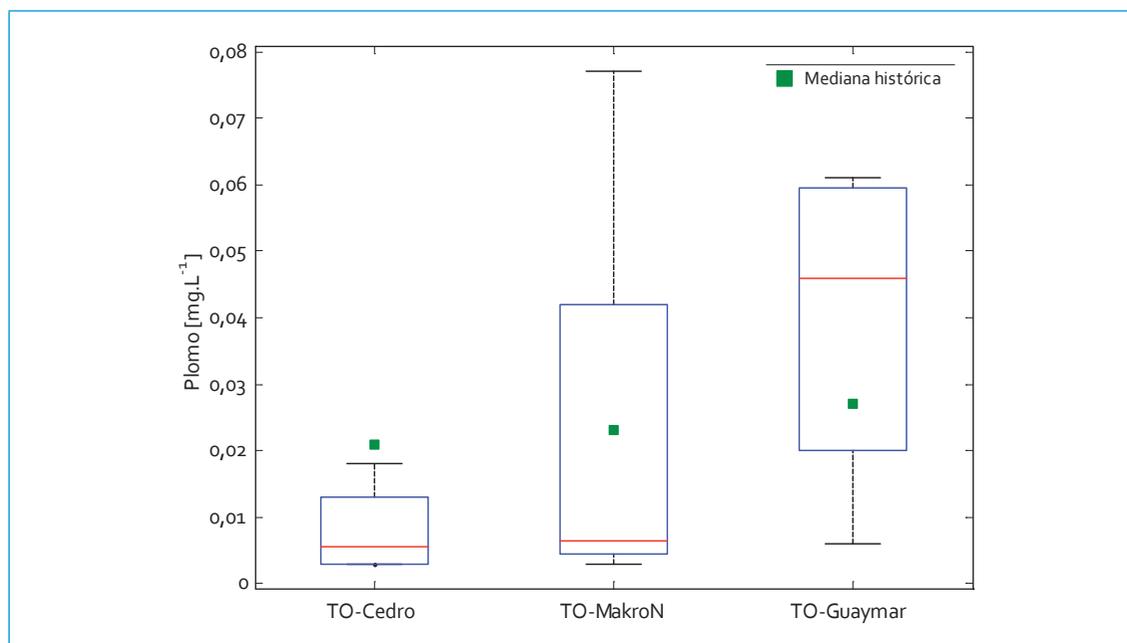


FIGURA 2.29. Perfil plomo: río Torca

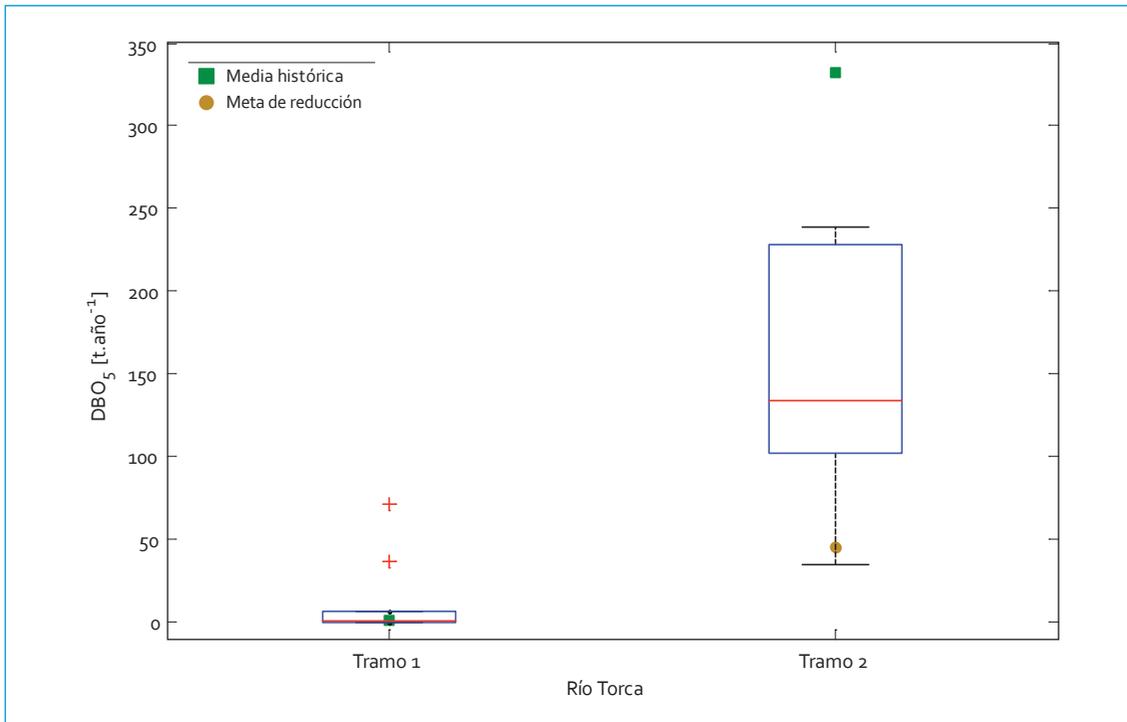


FIGURA 2.30. Perfil cargas DBO<sub>5</sub>: río Torca

las demás (2010) se encontraron entre 0,2 y 0,8 t/año, lo que muestra una baja dispersión de datos. Comparando la carga promedio actual con la histórica, se puede decir que las cargas del período 2009-2010 fueron más elevadas que las históricas, pues como se mencionó, el período hidrológico desempeña un papel importante en el comportamiento de las cargas e influye en las cargas de algunos meses del año.

Las cargas de DBO<sub>5</sub> para el tramo 2 fueron muy variables y más elevadas que las del tramo 1. En este punto las cargas fluctuaron en un rango de 35 a 239 t/año. Al igual que para el tramo 1, las menores cargas se presentaron en los monitoreos del 2010; sin embargo, la diferencia no fue tan importante como para el tramo 1. Aun considerando la dispersión de los datos, se puede inferir que hay una tendencia de reducción de cargas a lo largo del tiempo, pues se observó que la carga promedio actual fue inferior a la histórica (332 t/año). Aunque

las cargas se presentan por tramo, entre los resultados obtenidos para Makro 193 y Club Guaymaral hubo una variación importante (cargas promedio: Makro 193 = 283 t/año vs. Club Guaymaral = 136 t/año).

Los resultados de cargas de DBO<sub>5</sub> muestran comportamientos aparentemente similares en los dos tramos del río Torca. En el primer tramo se percibió una posible disminución de las cargas, y en el segundo tramo la reducción en carga si es evidente.

#### 2.1.2.2 DQO

En la figura 2.31 se muestran las cargas de DQO en los dos tramos del río Torca, pero es el tramo 2 el principal participante en carga. Las diferencias de las cargas entre el tramo 1 y el tramo 2 son más notables para este parámetro que para la DBO<sub>5</sub>; en este caso el tramo 2 supera en 170 veces más la carga del 1 (tabla 2.3).

En el tramo 1, las cargas fueron casi despreciables en comparación con las del tramo 2; éstas variaron entre 0,4 y 22 t/año. La carga promedio del tramo 1 fue ligeramente inferior a la carga promedio histórica (7,2 t/año), por lo que se puede asumir una pequeña reducción de la carga en el tiempo. Esto es acorde con los resultados de la  $DBO_5$ , pues las cargas también se han reducido para este tramo.

TABLA 2.3. Carga promedio transportada DQO: río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
DQO	5,7	986

En el tramo 2 la variabilidad de los datos fue alta: el rango varió de 201 a 2139 t/año. A partir de estos resultados se pudo ver que la carga promedio de DQO aumentó en el tiempo; actualmente el promedio se encuentra en 986 t/año; mientras que históricamente esta cifra era de 862 t/año. Es de esperarse que las cargas de  $DBO_5$  y DQO se comportaran de manera similar, pues los dos son indicadores de la materia orgánica; sin embargo, en el tramo 2 los comportamientos fueron diferentes, mientras que las cargas promedio de  $DBO_5$  disminuyeron las de DQO aumentaron. No se puede descartar un proceso de transformación de  $DBO_5$  en DQO en el tránsito del río a través del humedal, pues la materia orgánica puede estar sufriendo cambios, dado que la relación  $DBO_5/DQO$  no se mantiene para todos los puntos (tabla 2.4).

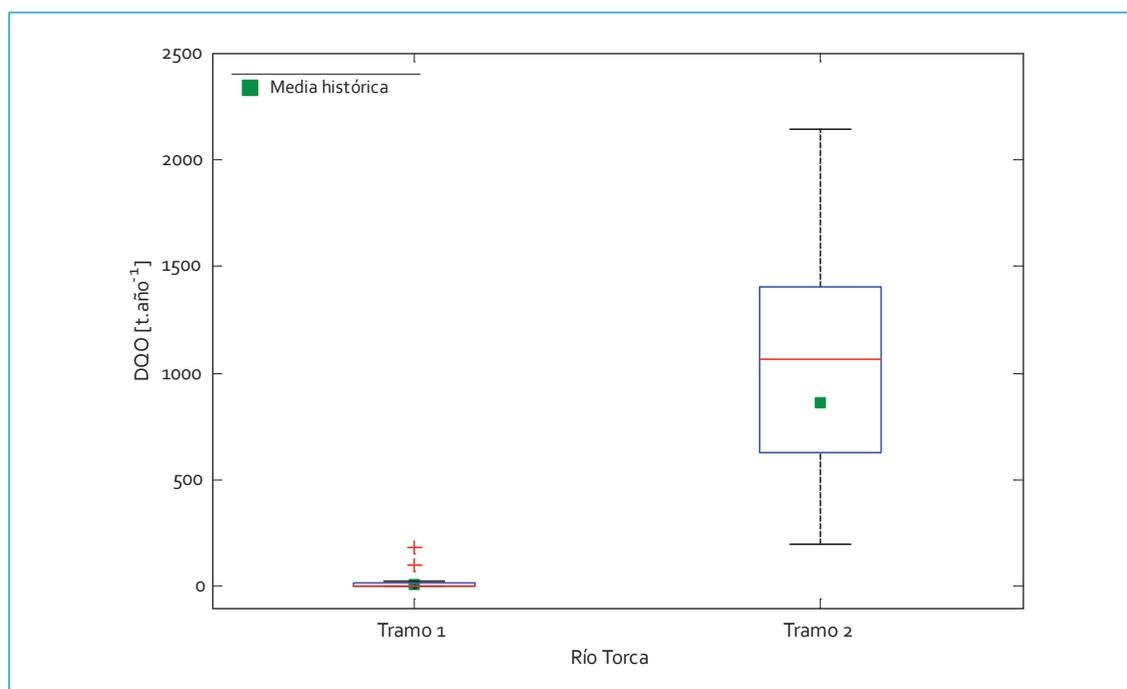


FIGURA 2.31. Perfil cargas DQO: río Torca

TABLA 2.4. Relación DBO<sub>5</sub>/DQO

Punto monitoreo	DBO <sub>5</sub> /DQO
TO-Cedro	0,33
TO-Makro 193N	0,34
TO-Guaymar	0,17

2.1.2.3 SST

El perfil longitudinal de las cargas de SST del río Torca, estimadas en la campaña 2009-2010 se presenta en la figura 2.32. A partir de los resultados obtenidos en este período, se apreció que también la diferencia en cargas entre el tramo 1 y el tramo 2 fue significativa; la participación de la carga del tramo 2 es del 99% (tabla 2.5).

TABLA 2.5. Carga promedio transportada SST: río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
SST	5,5	1356

En el tramo 1 las cargas son medianamente variables con un rango de 0,2 a 29 t/año, y bastante inferiores a las que se presentaron en el tramo 2. En comparación con la carga promedio histórica (2,8 t/año), es notable que para el tramo 1 las cargas hayan aumentado. No obstante, al igual que para DBO<sub>5</sub>, se debe aclarar que las mayores cargas se presentaron durante el 2009, y sin tener en cuenta los datos de dicha campaña, el promedio sería de 0,9 t/año, por debajo de la carga promedio histórica. Es muy fuerte el efecto que la condición

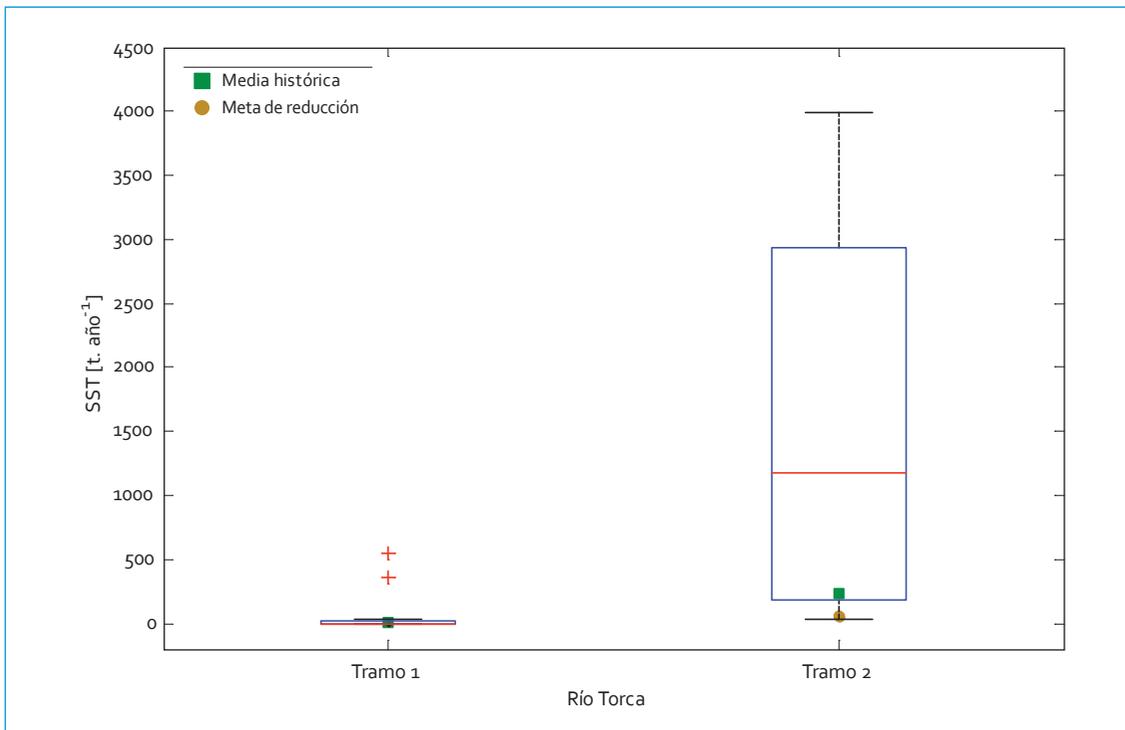


FIGURA 2.32. Perfil cargas SST: río Torca

hidrológica predominante genera en la determinación de cargas en este tramo.

El tramo 2 cuenta con cargas más elevadas (cargas actuales de 28 a 3990 t/año), lo que muestra gran variabilidad en los datos. A partir del cambio del punto a San Simón, la carga promedio pasó de 1725 t/año (datos recolectados en Club Guaymaral) a 433 t/año (datos recolectados en San Simón).

En comparación con los datos históricos, las cargas han aumentado en el tiempo, pues se pasó de un promedio histórico de 233 t/año a 1356 t/año. Entre los resultados de Makro 193 y Club Guaymaral hay una variación al igual que para la DQO. En el punto Club Guaymaral la carga media es menor que en Makro 193 (1414 t/año). Las diferencias en carga entre estos puntos de monitoreo se hace más grande sólo teniendo en cuenta los datos de San Simón. Al igual que la DBO<sub>5</sub> es posible que en algún punto entre Makro 193 y San Simón o club Guaymaral se estén reteniendo los SST por efecto del buchón y del tránsito puntual a través del humedal.

La meta de reducción (60 t) es inferior a la carga actual. Dicha meta representa aproximadamente el 4% de la carga promedio actual; sin embargo, es importante resaltar que con el cambio del punto Club Guaymaral, la carga promedio actual de sólo los datos recolectados en San Simón es de 433 t/año, y para este caso la meta de reducción representa el 14% del total de la carga en el tramo.

#### 2.1.2.4. Nitrógeno total

Para este contaminante en el tramo 1 las cargas variaron entre 0,18 y 4,1 t/año (figura 2.33), y ello muestra poca variabilidad en los resultados. Además, se observó un leve aumento entre las cargas (tabla 2.6) actuales frente a la

carga promedio histórica (0,9 t/año). Aunque el aumento no fue significativo, cuando se revisaron sólo los monitoreos realizados en el 2010, se pudo apreciar que las cargas disminuyeron entre el 2009 y el 2010, y el promedio de carga para sólo el 2010 fue de 0,6 t/año, inferior a la carga de toda la campaña (1,1 t/año) y al promedio histórico. Las cargas monitoreadas durante el 2009 fueron resultado de altos caudales y altas concentraciones en comparación con las demás campañas.

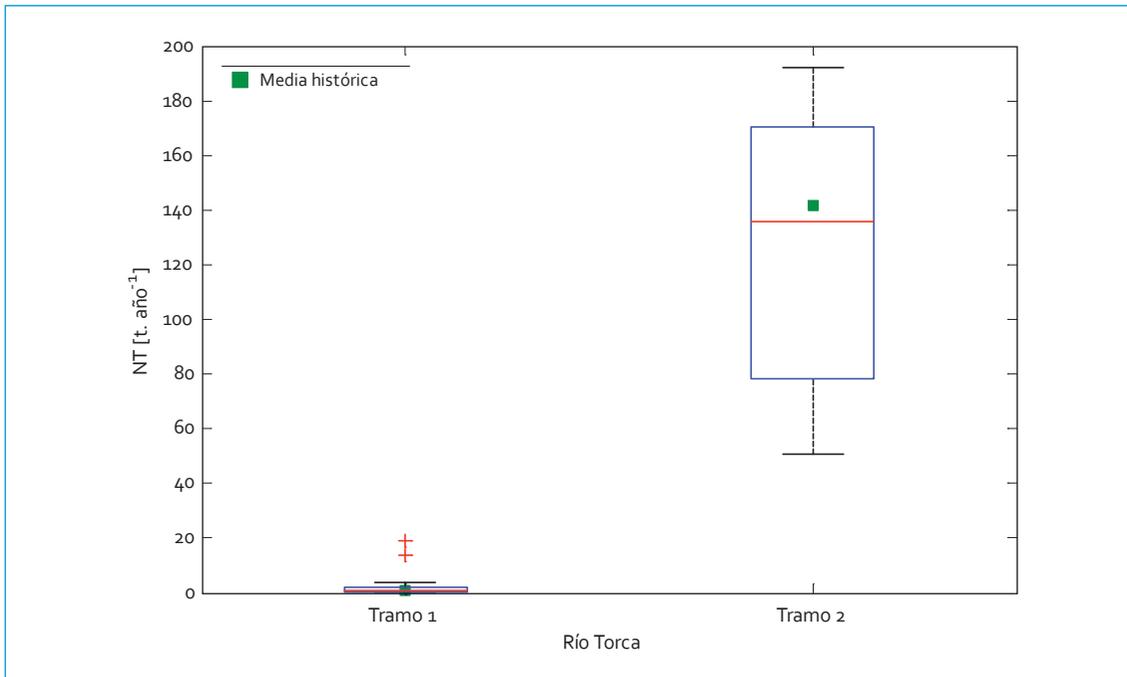
TABLA 2.6. Carga promedio transportada  $N_{total}$ : río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
$N_{total}$	1,1	118

Por otro lado, en el tramo 2 la carga promedio 2009-2010 fue inferior a la carga promedio histórica (141 t/año), lo que muestra una posible reducción de la carga en el tiempo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la dispersión de las cargas obtenidas en este punto no permite afianzar esta hipótesis, puesto que el 40% de los datos superaron el promedio histórico. En contraste con el primer tramo, las mayores cargas de  $N_{total}$  en el tramo 2 se dieron en los monitoreos del 2010; los máximos datos (192 y 191 t/año) se presentaron en horas de la madrugada y mañana (entre 3:00 y 6:00).

#### 2.1.2.5. Fósforo total

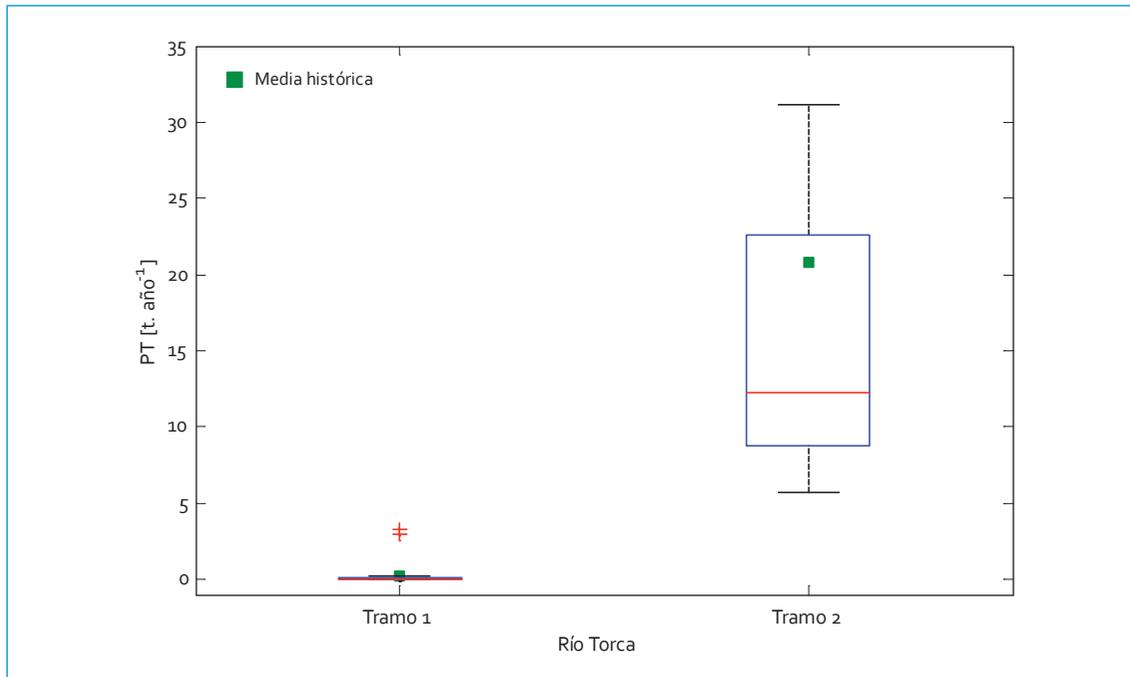
El perfil longitudinal de las cargas de fósforo del río Torca medidas en la campaña 2009-2010 se presenta en la figura 2.34. La diferencia en cargas entre el tramo 1 y tramo 2 fue significativa, pues la participación de la carga del segundo tramo es muy importante (tabla 2.7).

FIGURA 2.33. Perfil cargas  $N_{total}$ : río TorcaTABLA 2.7. Carga promedio transportada  $P_{total}$ : río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
$P_{total}$	0,07	14

Las cargas en el primer tramo del río fueron muy pequeñas, van de 0,01 a 0,2 t/año y muestran una disminución considerable en el tiempo, pues la carga promedio histórica fue de 0,2 t/año; mientras que la actual fue de 0,07 t/año. Para validar esta disminución, se analizaron las concentraciones y se encontró que se han mantenido relativamente constantes a lo largo del tiempo para caudales aproximadamente secos; por lo tanto, la reducción de cargas de fósforo total es el reflejo de los bajos caudales registrados particularmente en las jornadas del 2010, cuando la mayoría estuvo por debajo del rango histórico.

La diferencia entre las cargas del tramo 1 del río y el 2 fue notoria, ya que la mínima carga del tramo 2 supera en más de 25 veces a la máxima del 1, siendo uno de los parámetros con el cambio más importante a lo largo del río. En la tabla 2.8 se puede apreciar el cambio que tienen las concentraciones promedio de  $N_{total}$  a lo largo del río, que se mantienen casi constantes en el tramo 2 (Makro 193 y Club Guaymaral); mientras que las concentraciones de  $P_{total}$  presentan diferencias importantes entre cada punto de monitoreo, especialmente entre el primer y último punto. A pesar de esto, las cargas promedio en el tramo 2 disminuyeron levemente entre los resultados 2009-2010 y los históricos (media histórica = 21 t/año). La reducción se hace más evidente al ver que sólo tres de catorce datos actuales de carga superan el promedio histórico, y cómo para  $N_{total}$  dos de estos se presentaron en horas de la madrugada y mañana (ente 3:00 y 6:00).

FIGURA 2.34. Perfil cargas  $F_{total}$ : río TorcaTABLA 2.8. Concentraciones promedio  $N_{total}$  y  $F_{total}$ : río Torca

Punto	$N_{total}$	$F_{total}$
	mg/L	mg/L
Canal El Cedro	8,1	0,7
Makro 193	17,7	2,5
Club Guaymaral	19,3	4,0

### 2.1.2.6. Grasas y aceites

De las cargas totales del río, la participación del tramo 2 fue de aproximadamente 98% (tabla 2.9). Aunque en la figura 2.35 no se puede apreciar, las cargas en el primer tramo del río fueron pequeñas: variaron entre 0,08 y 1,2 t/año. A pesar de que las cargas promedio se han mantenido constantes en el tiempo, se observó una tendencia hacia la reducción.

Este hecho se evidenció analizando las concentraciones, pues del total de datos (quince) sólo cinco (33%) estuvieron por encima del límite de detección. Es importante resaltar que el promedio histórico (3,2 t/año) es mucho más elevado que el medido entre 2009 y 2010 (0,6 t/año). En el tramo 2 las cargas de grasas y aceites fueron más elevadas: variaron entre 14 y 73 t/año. Los resultados presentaron una notable disminución en el tiempo, pues la carga promedio histórica (120 t/año) es el triple que la medida en la campaña 2009-2010 (41 t/año).

TABLA 2.9. Carga promedio transportada GyA: río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
G y A	0,6	41

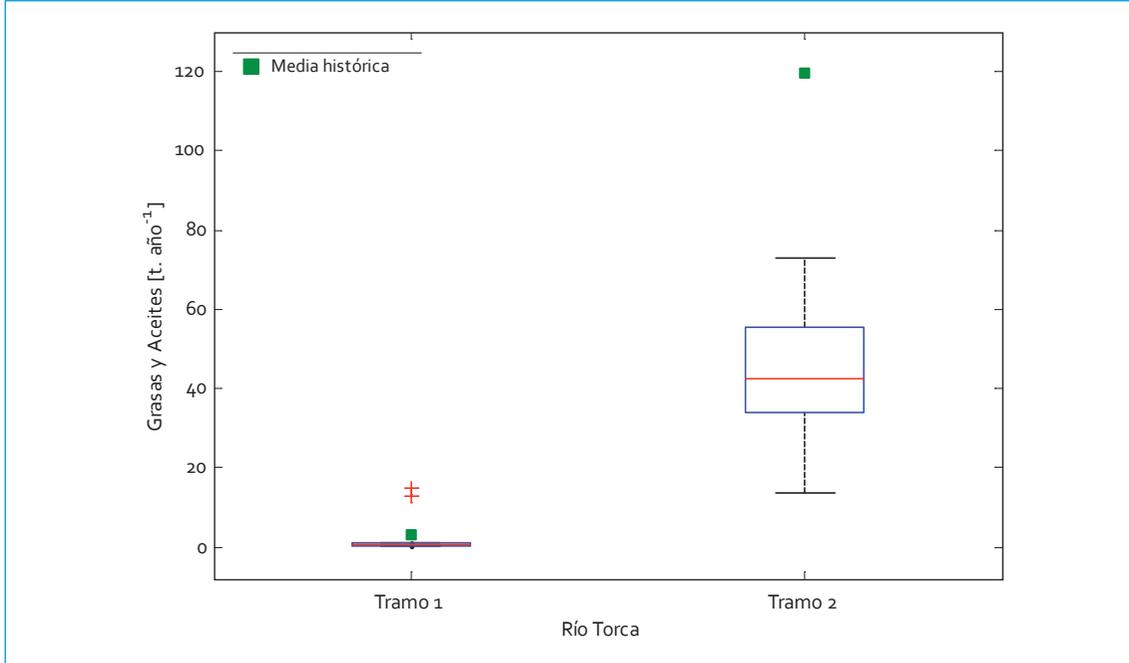


FIGURA 2.35. Perfil cargas GyA: río Torca

Es importante decir que la carga promedio de GyA fue más elevada en el punto Makro 193, que en Club Guaymaral, lo cual ocurre al comparar todos los resultados actuales (Makro 193 = 52 t/año vs. Club Guaymaral = 41 t/año). Estas diferencias en carga entre estos puntos pueden ser por el mismo fenómeno que afecta la  $DBO_5$ , posible degradación en el humedal o simplemente retención de las grasas y aceites en el buchón presente en la zona.

#### 2.1.2.7. SAAM

En la figura 2.36 se presenta el perfil longitudinal de cargas de SAAM en el río Torca, generado a partir de los monitoreos 2009-2010. A partir del perfil de las cargas se pudo ver un comportamiento ascendente y una alta participación del tramo 2 en los valores globales de carga (tabla 2.10).

TABLA 2.10. Carga promedio transportada SAAM: río Torca

Parámetro	río Torca (t/año)	
	T1	T2
SAAM	0,08	14

Las cargas obtenidas en el tramo 1 mostraron un comportamiento constante en el tiempo y la media histórica (0,2 t/año) fue similar a la actual. Los resultados del 2010 presentaron cargas muy pequeñas en referencia con el histórico (0,03-0,11 t/año), puesto que los días de monitoreo en la madrugada se registraron caudales bajos en el punto canal El Cedro y concentraciones no muy elevadas. Para este tramo las variaciones de carga de todos los datos obtenidos hasta la fecha se encuentran en un rango de 0,03 a 0,2 t/año.

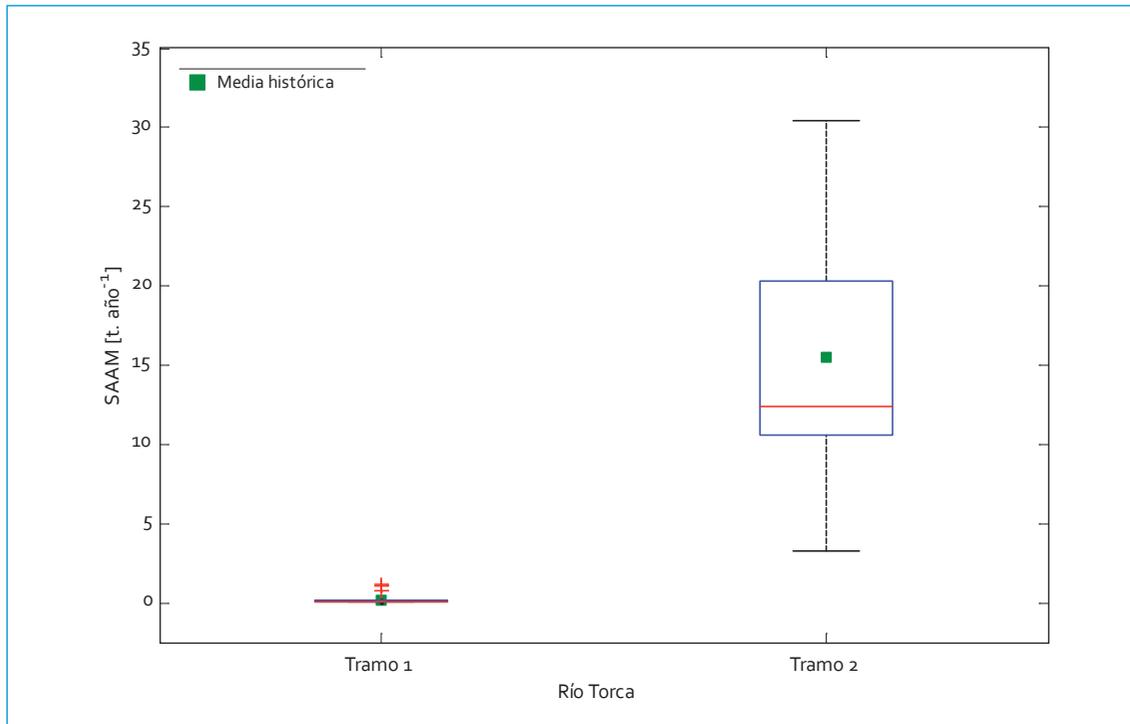


FIGURA 2.36. Perfil cargas SAAM: río Torca

En el tramo 2 las cargas de SAAM fueron más elevadas que para el primer tramo, pero presentan también un comportamiento constante en el tiempo (carga promedio histórica = 15 t/año). Sin embargo, la variabilidad de los datos no permite concluir sobre la observación, puesto que el 43% de los datos superan la carga promedio histórica. Es importante resaltar que las cargas permanecen casi constantes entre los dos puntos de monitoreo del tramo 2 (Makro 193: 17 t/año y Guaymaral: 14 t/año), por lo que se podrían inferir que no hay vertimientos aportantes de SAAM entre los dos puntos.

## 2.2. Calidad del agua (WQI)

En el tramo 1 de este río en el punto canal El Cedro se recolectaron un total de 185 datos, de los cuales ocho excedieron los objetivos de calidad, lo cual permitió establecer que la

calidad del agua en este primer tramo para el período evaluado fue buena. Los parámetros que excedieron los objetivos fueron  $N_{total}$ , seguido de SAAM y coliformes fecales (tabla 2.11).

TABLA 2.11. WQI río Torca: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
OD	0	F1	30,00
DBO	0	F2	4,30
DQO	0	nse	0,02
$N_{total}$	5	F3	1,76
$F_{total}$	0	WQI	82,47
SST	0		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	1		
pH	0		
SAAM	2		

En comparación con los resultados obtenidos anteriormente (2008-2009), el  $N_{\text{total}}$  sigue siendo el parámetro que más se excede: de ocho datos cinco estuvieron (rango 5,4-10,2 mg/L) por encima del objetivo de calidad (5 mg/L) y muestran una recurrencia a lo largo del tiempo. Por otro lado, las SAAM presentaron igualmente valores por encima del objetivo en menor proporción. Aunque en los resultados de 2008-2009 también fue una variable que excedió los objetivos, para el período 2009-2010 los valores por encima de los objetivos fue un poco más alto, pues el 14% de los valores superaron el objetivo (1 mg/L). Por su parte, los coliformes fecales presentaron un solo valor por encima del objetivo, al igual que ocurrió en los resultados de 2008-2009; sin embargo, en este caso este valor superó en un orden de magnitud a los demás reportados en este tramo ( $2,4 \times 10^5$  NMP/100 mL).

Para el tramo 2 (Makro 193 y Club Guaymaral) se generaron 380 datos de calidad, de los cuales 28 no satisficieron los objetivos de calidad. El WQI para este tramo fue regular. En este caso, los parámetros que estuvieron dentro de los objetivos de calidad fueron DBO, DOO,  $N_{\text{total}}$  y  $F_{\text{total}}$ ; mientras que los parámetros que más excedieron fueron oxígeno disuelto, SAAM y coliformes fecales, evidenciado en que el deterioro de la calidad del agua en este tramo se da principalmente por las descargas de aguas domésticas (tabla 2.12).

En cuanto al oxígeno disuelto, los datos que no estuvieron dentro del objetivo (38%) no presentaron algún comportamiento en particular. Sin importar la hora del día, la fecha de los monitoreos o el punto de monitoreo, el oxígeno estuvo por debajo del límite de detección frecuentemente. Los tensoactivos presentes

TABLA 2.12. WQI río Torca: tramo 2

Parámetro	No. datos que no cumplen	Variables	Valor
OD	9	F1	60,00
DBO	0	F2	7,40
DOO	0	NSE	0,09
$N_{\text{total}}$	0	F3	8,57
$F_{\text{total}}$	0	WQI	65,00
SST	2		
Grasas y aceites	1		
Coliformes fecales	6		
pH	3		
SAAM	7		

en el agua en este tramo del río también fueron críticos para la calidad del agua, especialmente en Makro 193, donde el 42% de los datos superó el valor de los objetivos de calidad, frente al 14% en Club Guaymaral. El 33% de los datos de coliformes fecales estuvo por encima del objetivo de calidad ( $1 \times 10^6$  NMP/100 mL); los datos correspondientes al punto de monitoreo Makro 193 que cumplieron con el objetivo se presentaron en horas de la madrugada (entre las 2:00 y las 6:00), mientras que los máximos se dieron entre las 14:30 y las 15:30, que mostraron el efecto de las aguas residuales vertidas en la calidad del agua del río. Por otro lado, en el punto de monitoreo Guaymaral, los datos que excedieron el objetivo se presentaron entre enero y marzo del 2010 (figura 2.37).

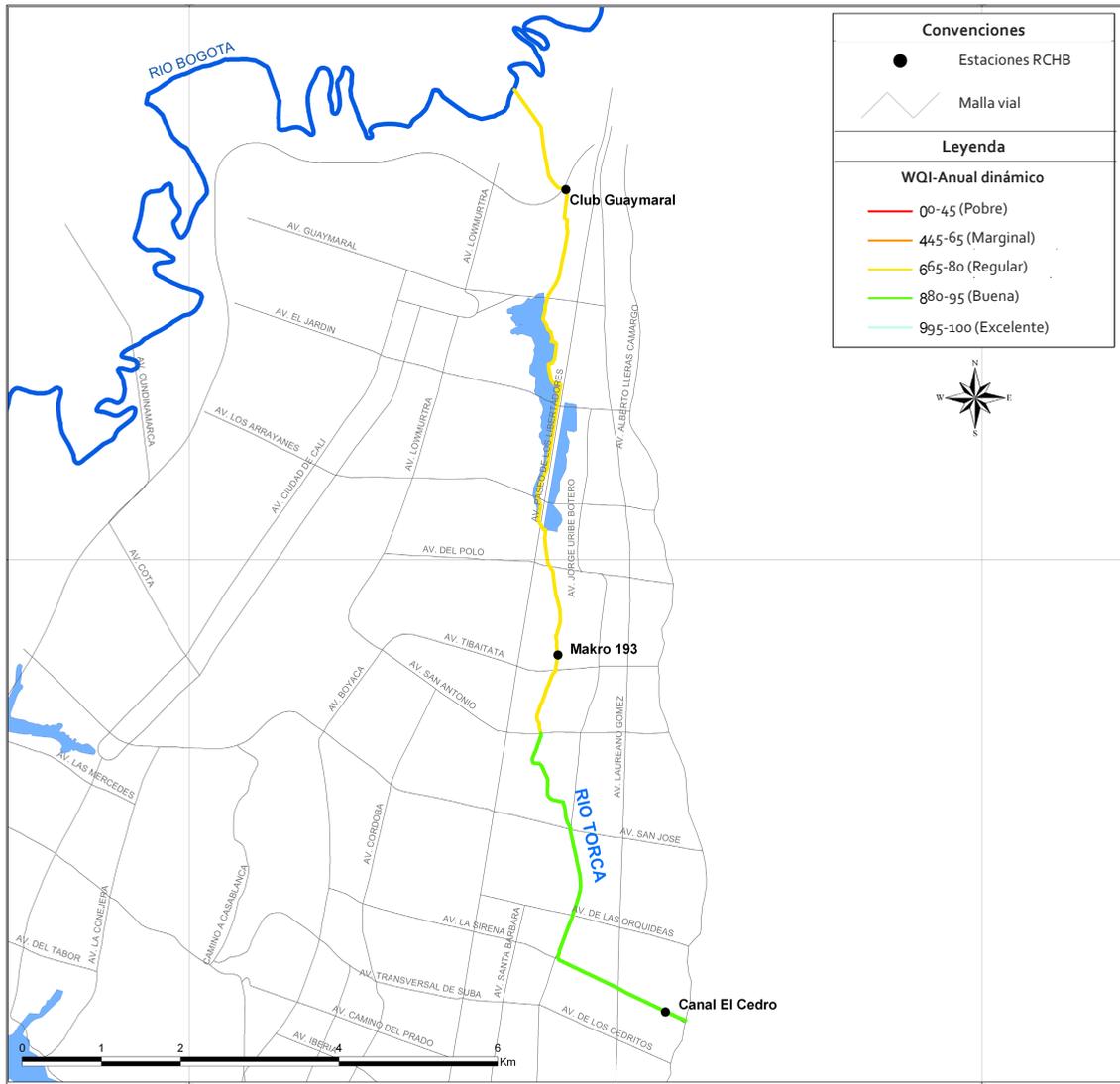


FIGURA 2.37. Mapa de calidad: río Torca

## 3. RÍO SALITRE

### 3.1. Resultados del monitoreo fisicoquímico

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

##### 3.1.1.1. Caudal

En general, los datos de caudal para la mayoría de los puntos se encontraron dentro de los rangos históricos con similitudes entre las medianas reportadas en campañas anteriores

y las de esta campaña 2009-2010 (figura 3.1), como se refleja en el caso de Arzobispo (36 y 37 L/s respectivamente) y Carrera 30 Calle 53 (138 y 171 L/s, respectivamente).

Un caso particular se presentó en el punto Salitre Carrefour Avenida 68 (SA-Carrefo), donde la mediana histórica (834 L/s) está por encima del valor actual (582 L/s). Esto se debe al cambio temporal del sitio de monitoreo hacia aguas arriba durante la campaña, debido a las obras que para la época adelantaba la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de

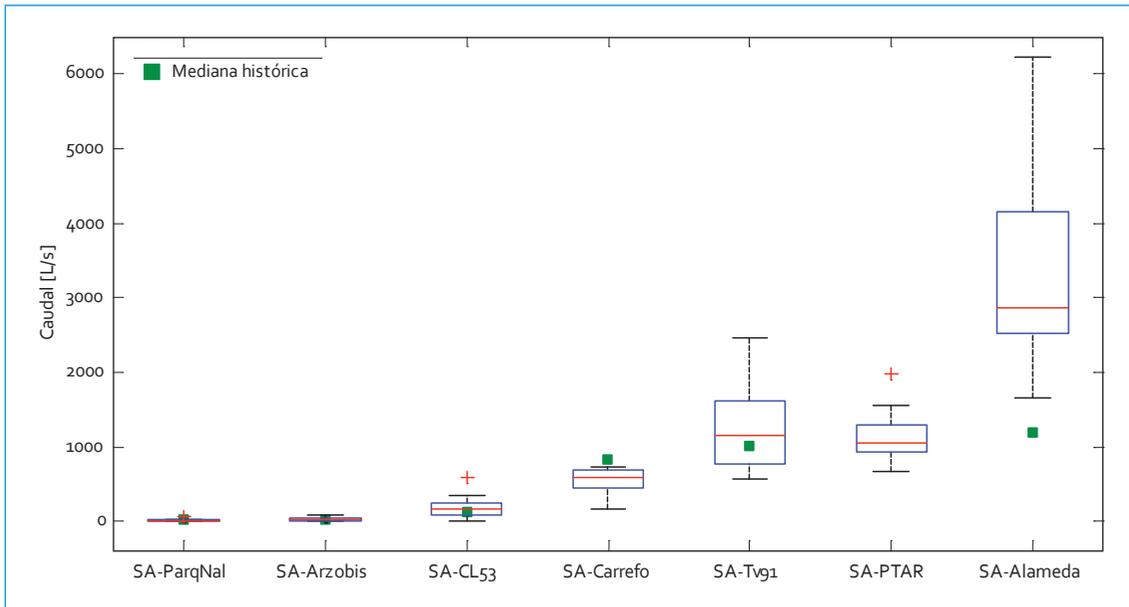


FIGURA 3.1. Perfil caudal: río Salitre

Bogotá (EAAB). Este movimiento del punto aguas arriba no tuvo en cuenta los aportes de caudal del río Nuevo y río Negro. El incremento de los caudales en Transversal 91 (580-2459 L/s) podría estar influenciado por el aporte de los ríos mencionados y que hacen parte del comportamiento en este punto.

En Salitre Alameda el caudal tuvo un incremento importante: la mediana actual (2859 L/s) es mayor al doble del histórico (1187 L/s) y alcanzó valores cercanos a 6000 L/s. El aporte del interceptor Tibabuyes y el efecto de remanso que se presenta en esta sección del río incrementan los valores de caudal y, a su vez, dificultan los procedimientos de aforo.

### 3.1.1.2. Alcalinidad

En la figura 3.2 no se incluye la mediana histórica, ya que para las campañas anteriores no se reportaron valores de alcalinidad. A pesar de

esto, la concentración en el río tuvo un comportamiento creciente hacia aguas abajo y varió de acuerdo con el grado de deterioro de la calidad. La concentración en Parque Nacional fue muy pequeña (mediana 5,8 mg/L), lo cual refleja las condiciones de buena calidad que presenta el río en este punto. A partir del punto Carrera 30 Calle 53 el rango de alcalinidad (80-199 mg/L) aumentó considerablemente en comparación con el punto anterior (SA-Arzobis: 24-62 mg/L).

En Carrefour Avenida 68 se presentaron los valores más altos de alcalinidad, con un rango entre 131 y 207 mg/L, y mediana de 180 mg/L, asociados principalmente a los aportes de materia orgánica y especies de fosfatos, bicarbonato e hidróxidos provenientes, entre otros, de las aguas residuales domésticas. En este caso, la descarga del colector La Vieja tiene un efecto importante en el aumento de este parámetro. Para el caso del sitio de monitoreo Transversal 91, el comportamiento de los

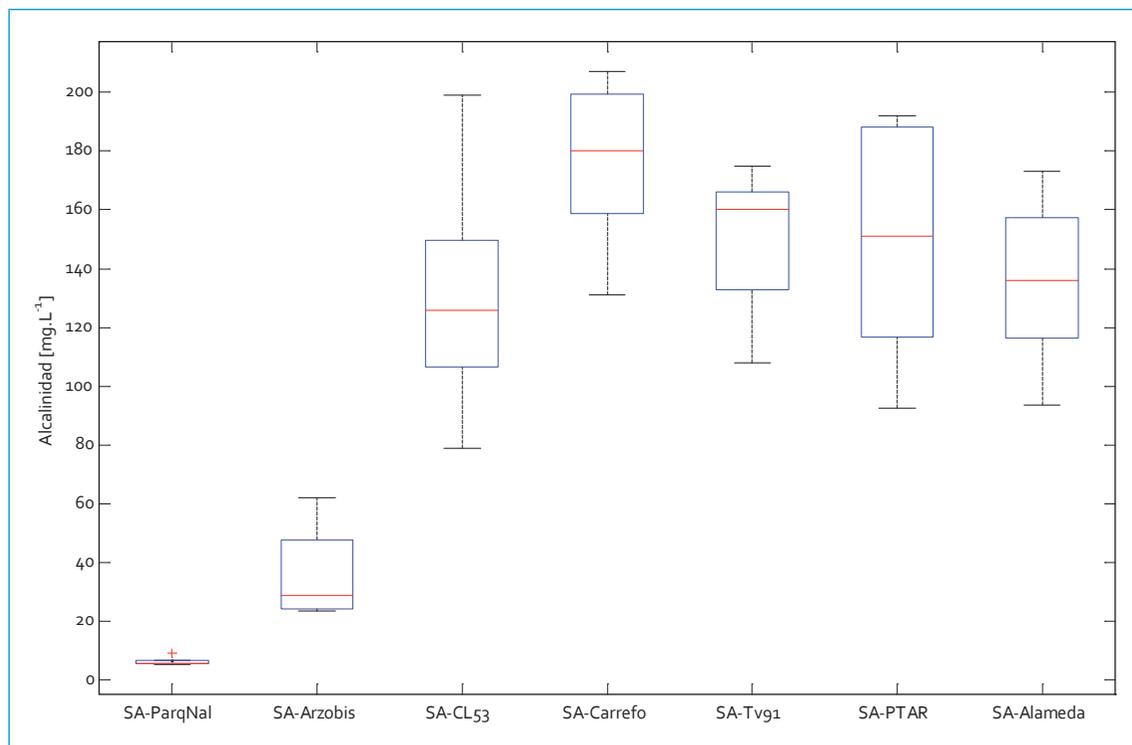


FIGURA 3.2. Perfil alcalinidad: río Salitre

datos mostró una asimetría positiva, puesto que la mediana es cercana al cuartil 75, lo cual indica que la mayoría de las mediciones tuvo valores altos. En Planta Salitre se observó una gran variabilidad de las concentraciones con un rango entre 93 y 192 mg/L, relacionado posiblemente con la descarga del humedal Juan Amarillo en ese punto. Finalmente, en Salitre Alameda, la mediana y el rango de concentraciones disminuyeron con respecto al punto anterior, SA-PTAR (mediana: de 151 a 136 mg/L y rango entre 94 y 173 mg/L). Esto podría relacionarse con el efecto de remanso, que favorece los procesos de sedimentación en este punto del río y hacen que la concentración de este parámetro varíe.

### 3.1.1.3. Dureza

Al igual que para el parámetro anterior, no se reportan datos históricos. El incremento de

la dureza fue gradual (menos brusco que para alcalinidad), y en la mayoría de los puntos el comportamiento de los datos tuvo una variación pequeña (figura 3.3). En Parque Nacional la dureza en el río está relacionada con las condiciones naturales para un río de montaña. A partir del punto Carrefour Avenida 68 se presentaron valores característicos de agua semidura: entre 75 y 150 mg/L.

A pesar de presentarse una gran variabilidad de los datos en algunos puntos, la mediana presentó una asimetría negativa. Ello indica que la mayoría de los valores reportados fueron cercanos a la dureza mínima correspondiente para cada caso. Esto ocurrió en los últimos sitios de monitoreo (SA-Carrefo, SA-Tvg1, SA-PTAR y SA-Alameda), donde la mediana estuvo muy cerca del cuartil 25.

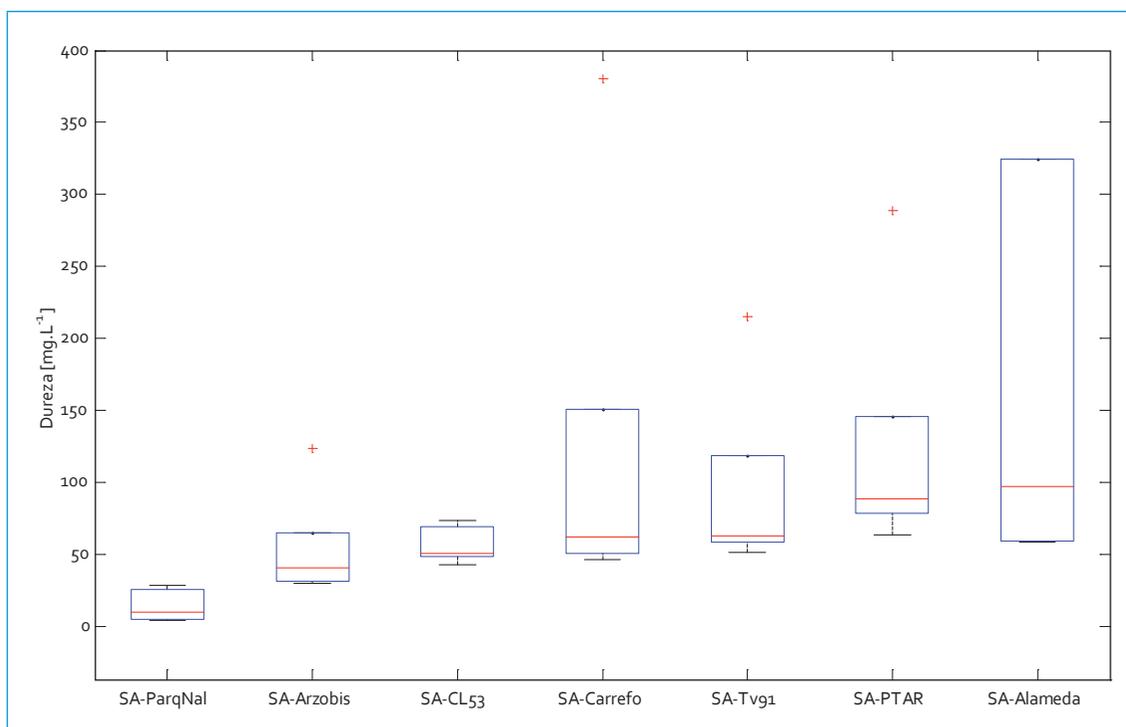


FIGURA 3.3. Perfil dureza: río Salitre

### 3.1.1.4. pH

En Parque Nacional se presentó una alta variabilidad de las lecturas de pH, entre 6 y 8 unidades, con valores por fuera de este rango (8,31 y 8,84 unidades), que hacen parte de los monitoreos realizados durante el primer trimestre del 2010 (de 13:00 a 15:00 y de 13:30 a 15:30). Estos cambios que se presentan durante el día pueden estar asociados, principalmente, a las condiciones ambientales que se presentan en la zona.

Los resultados obtenidos en la campaña 2009-2010 muestran que el comportamiento de este parámetro es poco variable en comparación con lo reportado en campañas anteriores, con valores de la mediana similares en la mayoría de los puntos de monitoreo del río. Por otra parte, los datos que se presentan como atípicos y por debajo del rango en Carrefour Avenida 68 (5,9 y 6,6), Transversal 91 (6,35; 6,45; 6,6 y 6,7), Planta Salitre (6,16 y 6,35) y Salitre Alameda (6,42; 6,43; 6,48 y 6,9)

corresponden a los monitoreos realizados durante la madrugada en las campañas del primer semestre de 2010.

Para los sitios de monitoreo Planta Salitre (SA-PTAR) y Salitre Alameda (SA-Alameda), el comportamiento del pH fue constante entre estos dos puntos. Tanto la mediana como los rangos fueron muy similares (mediana: 7,23 y rango: 6,83-7,5; mediana: 7,19 y rango: 6,94-7,41 respectivamente). Esto se debe a que en este punto los altos índices de saturación por efectos de la contaminación y sus condiciones hidráulicas (poca pendiente y velocidad de flujo) amortiguan el efecto de las descargas domésticas.

### 3.1.1.5. Conductividad

En la figura 3.5 se presenta el perfil de conductividad para cada uno de los puntos de monitoreo del río Salitre. En ella se observa un incremento importante en los valores a partir del punto Carrera 30 Calle 53, donde la

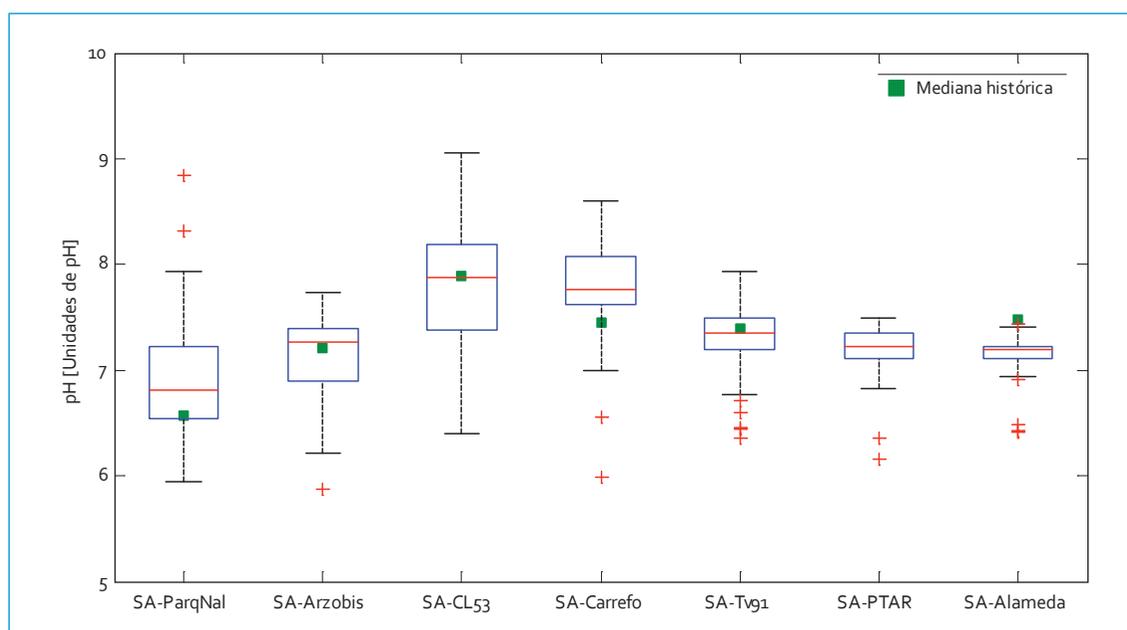


FIGURA 3.4. Perfil pH: río Salitre

mediana va de 117 a 384  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respecto a Arzobispo (con valores entre 100 y 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La variabilidad de datos es mayor (118-708  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) especialmente durante el día (9:00-16:00), cuando la concentración se encontró entre 366 y 671  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este aumento continúa en Carrefour Avenida 68 con una mediana mayor al punto anterior (609  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La presencia de sales disueltas en este punto incrementa la conductividad. Los valores que se encuentran por fuera del rango reportado correspondieron, la mayoría, a los monitoreos realizados durante la madrugada (00:30-6:00).

En Transversal 91 disminuyeron los valores de conductividad; la mediana en este punto fue 539  $\mu\text{S}/\text{cm}$  probablemente por el volumen de agua transportada por el río en este punto y que sirve como mecanismo de amortiguamiento de las descargas que se presentan en esa zona. La conductividad permanece cerca a ese rango hasta Salitre Alameda, donde el rango finalmente se observó entre 232 y 843

$\mu\text{S}/\text{cm}$ , influenciado por la descarga del humedal Juan Amarillo en esa zona.

### 3.1.1.6. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto tuvo valores de saturación en el punto Parque Nacional, donde las concentraciones oscilaron entre 3,5 y 9,5 mg/L. En comparación con los datos históricos, la mediana actual disminuyó, al pasar de 7,6 a 6,2 mg/L. La concentración de este parámetro en Arzobispo tuvo valores más cercanos a 7 mg/L y la mediana (7,1 mg/L) fue mayor al punto anterior.

Una disminución importante en los valores de este parámetro se observó en Carrera 30 Calle 53 (figura 3.6), donde la mediana pasó de 7,1 a 2,2 mg/L, en comparación con Arzobispo y con variaciones durante el día (0,1-3,5 mg/L entre 6:00 y 18:00). Esta reducción se debe principalmente al aporte de materia orgánica proveniente de las descargas de agua

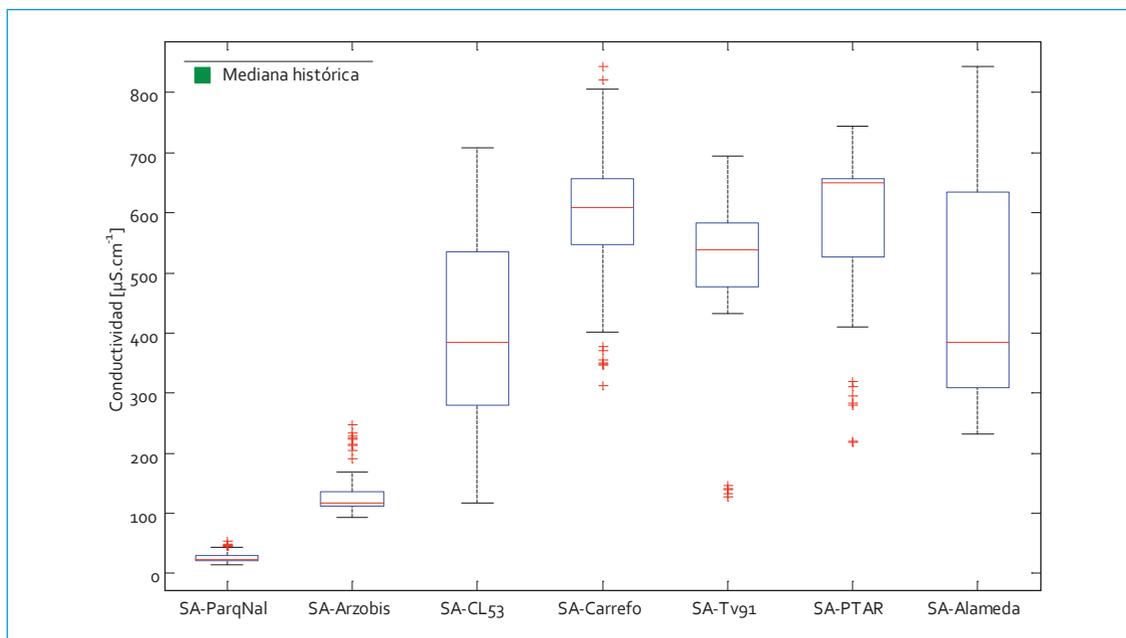


FIGURA 3.5. Perfil conductividad: río Salitre

residual doméstica presentes en esa zona y que tienen mayor afectación durante el día; sin embargo, la mediana histórica se encuentra dentro del rango de las concentraciones de oxígeno disuelto para este punto. En los puntos Carrefour Avenida 68, Transversal 91, Planta Salitre y Salitre Alameda, la concentración de oxígeno se encontró por debajo de 2 mg/L y con pocas variaciones durante el día. En estos puntos, el deterioro de la calidad es mayor como consecuencia de las descargas de agua residual doméstica, las condiciones hidráulicas del río y la disminución de su capacidad de autodepuración.

### 3.1.1.7. DBO

El incremento de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el río comienza a manifestarse en Arzobispo, con valores muy pequeños entre 2 y 13 mg/L. Este parámetro tuvo un comportamiento muy variable a partir del punto Carrera 30 Calle 53, donde el aporte de materia

orgánica hacia el río, por las descargas de agua residual doméstica en esa zona, incrementa los valores respecto al punto anterior, al pasar la mediana de 6,2 a 66 mg/L. Sin embargo, en comparación con los datos históricos, el valor de la mediana disminuyó notoriamente (de 141 a 66 mg/L). Los valores más pequeños correspondieron a las ventanas bihorarias de la madrugada (00:30-6:00), cuando la concentración osciló entre 10 y 25 mg/L.

El rango de DBO más amplio (26-252 mg/L) se encontró en Carrefour Avenida 68. El valor mínimo correspondió a un monitoreo realizado en la madrugada (4:00-6:00) durante el segundo trimestre del 2010. Las mayores concentraciones fueron las reportadas en la mañana y en la tarde (115-252 mg/L, entre 7:45 y 15:00). Este comportamiento es característico de las descargas residuales domésticas, en que la mayor actividad se presenta durante el día.

Se puede apreciar que la mediana es más cercana al cuartil 75 (asimetría positiva de los datos), al mostrar una mayor dispersión en

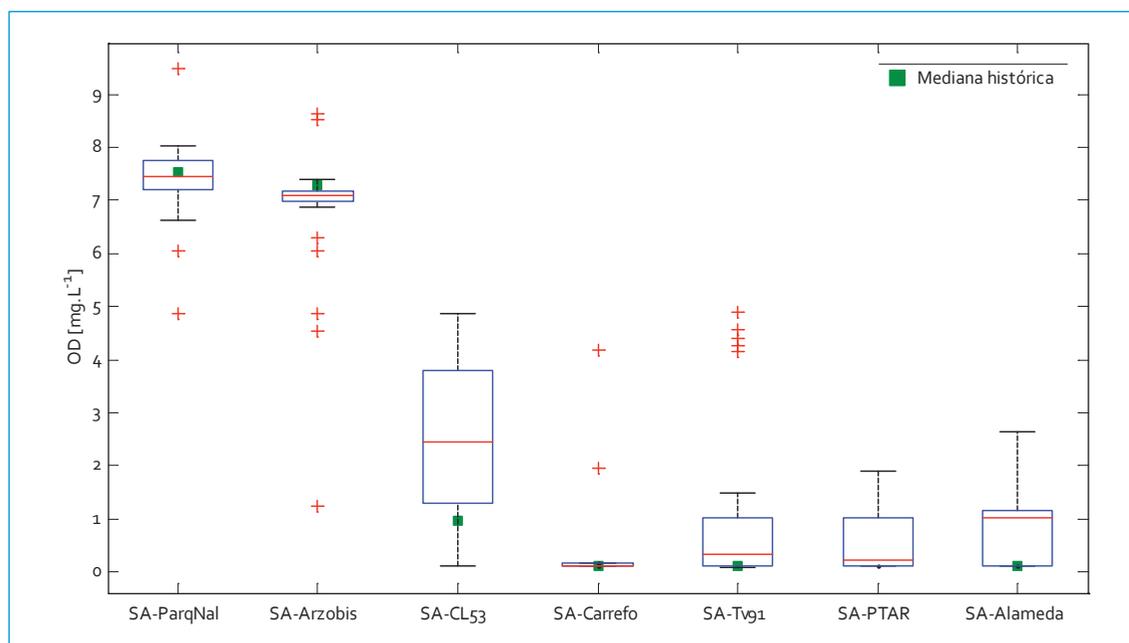


FIGURA 3.6. Perfil oxígeno disuelto: río Salitre

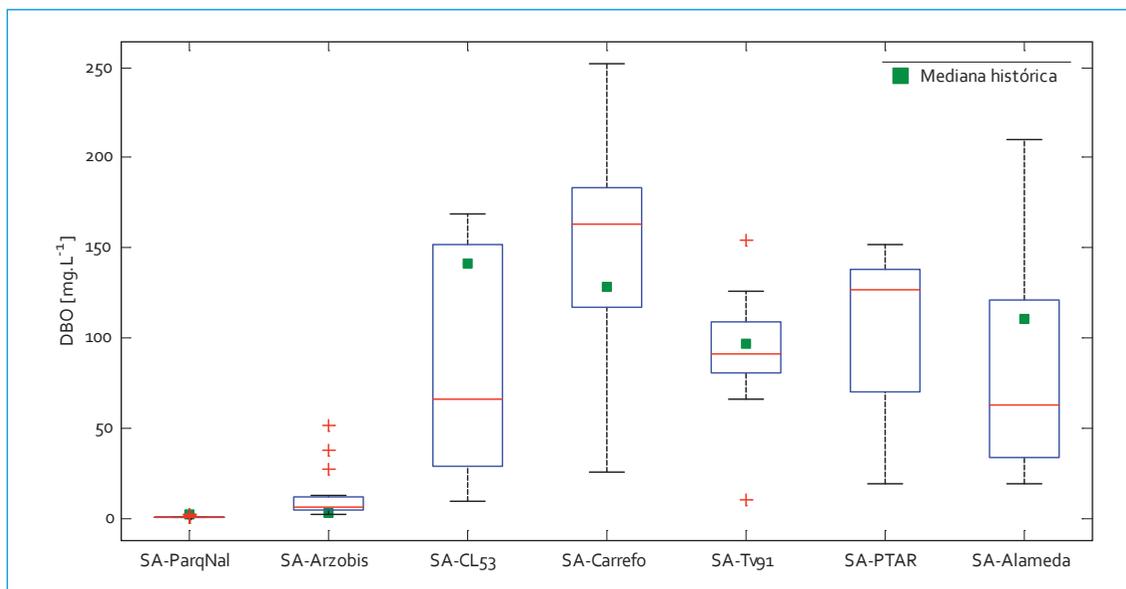


FIGURA 3.7. Perfil DBO: río Salitre

los valores menores del intervalo (19-152 mg/L). Las concentraciones reportadas en las jornadas del 2009 fueron mayores a las del 2010, debido a que en las primeras se tiene en cuenta el efecto de la madrugada. Finalmente, la mediana actual (63 mg/L) para Salitre Alameda tuvo una disminución considerable en comparación con el valor histórico (111 mg/L). A pesar de la variabilidad del rango de concentraciones (19-210 mg/L), la DBO tendió a estar más cerca de los valores más pequeños.

### 3.1.1.8. DQO

La demanda química de oxígeno (DQO) tuvo un comportamiento similar a la DBO con relación al incremento importante en concentración a partir del punto Carrera 30 Calle 53, aun cuando la variabilidad de los datos en este punto fue mayor (entre 30 y 842 mg/L). Durante la madrugada (1:00-6:00) la DQO fue muy pequeña (30-55 mg/L), en contraste con los valores reportados en el día (6:00-16:00), los cuales se encontraron por encima de 225 mg/L y

alcanzaron concentraciones de hasta 842 mg/L en la mañana (8:00-10:00). En Parque Nacional las condiciones óptimas del agua hacen de éste un referente de calidad que se podría presentar a lo largo del río.

En general, las medianas actuales en los puntos de monitoreo fueron muy cercanas a las históricas, lo cual indica que los valores de DQO estuvieron dentro de los rangos históricos y que el comportamiento de este parámetro en el tiempo es poco variable. La reducción de concentración observada en Transversal 91 (rango poco variable 199-336 mg/L y mediana 263 mg/L) puede estar ligada, entre otros factores, a las características hidráulicas en este punto del río, donde la poca pendiente, la baja velocidad de flujo y la distancia entre las descargas y el punto de monitoreo favorecen los procesos de sedimentación que, en cierta medida, funciona como un proceso de autodepuración. En Salitre Alameda, la mediana 2009-2010 (207 mg/L) fue inferior a los registros históricos (271 mg/L); las concentraciones oscilaron entre 65 y 376 mg/L, con

valores extremos en las ventanas bihorarias de la madrugada, 376 mg/L (00:30-2:30), 330 mg/L (3:00-5:00) y 82 mg/L (4:00-6:00).

### 3.1.1.9. SST

Las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) medidos en Parque Nacional fueron muy bajas (2-6 mg/L), comparadas con los demás puntos de monitoreo en el río, debido a que en este punto no se presentan descargas de agua residual que alteren las condiciones de calidad. En la mayoría de los puntos del río se presentó una disminución de la mediana actual en comparación con la histórica (figura 3.9). Los casos más notorios fueron Carrefour Avenida 68 y Transversal 91, donde los valores disminuyeron de 120 a 94 mg/L y de 122 a 80 mg/L, respectivamente. La disminución en el primer punto se debe al cambio temporal del sitio de monitoreo hacia aguas arriba del sitio original, donde no se considera el efecto del río Nuevo y río Negro sobre este parámetro.

Adicionalmente, la variabilidad del rango de concentraciones que se presentó en el día (36-218 mg/L) podría estar ligada a la intermitencia del colector La Vieja, que desemboca aguas arriba de este punto. Por otra parte, la disminución en la concentración en Transversal 91 se relaciona con los procesos de mezcla y sedimentación que ocurren en este punto, dadas las condiciones que se presentan, donde la distancia y la hidráulica favorecen estos procesos. Los valores de SST en Planta Salitre (47-225 mg/L) y Salitre Alameda (15-297 mg/L) fueron semejantes, posiblemente, por el efecto de amortiguación en estos puntos, causado por el remanso que el río Bogotá genera sobre el río Salitre en estos puntos.

### 3.1.1.10. Nitrógeno total

En el caso de Arzobispo, las concentraciones 2009-2010 tuvieron un comportamiento similar durante el día, con incrementos en la mañana (9,8 mg/L, 10:00-12:00) y un rango

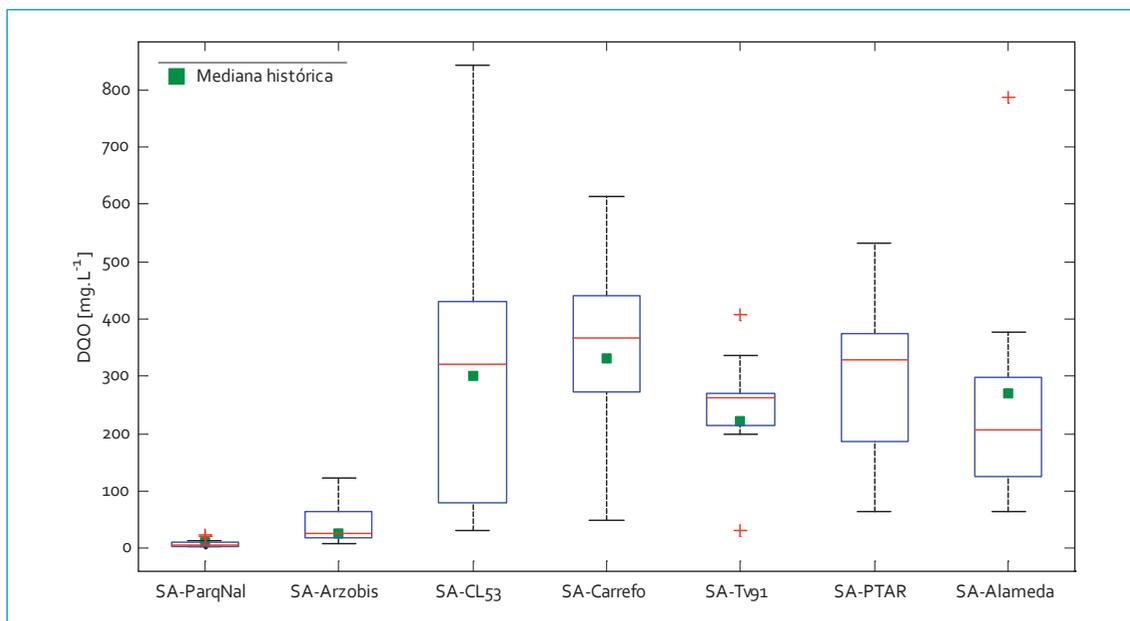


FIGURA 3.8. Perfil DQO: río Salitre

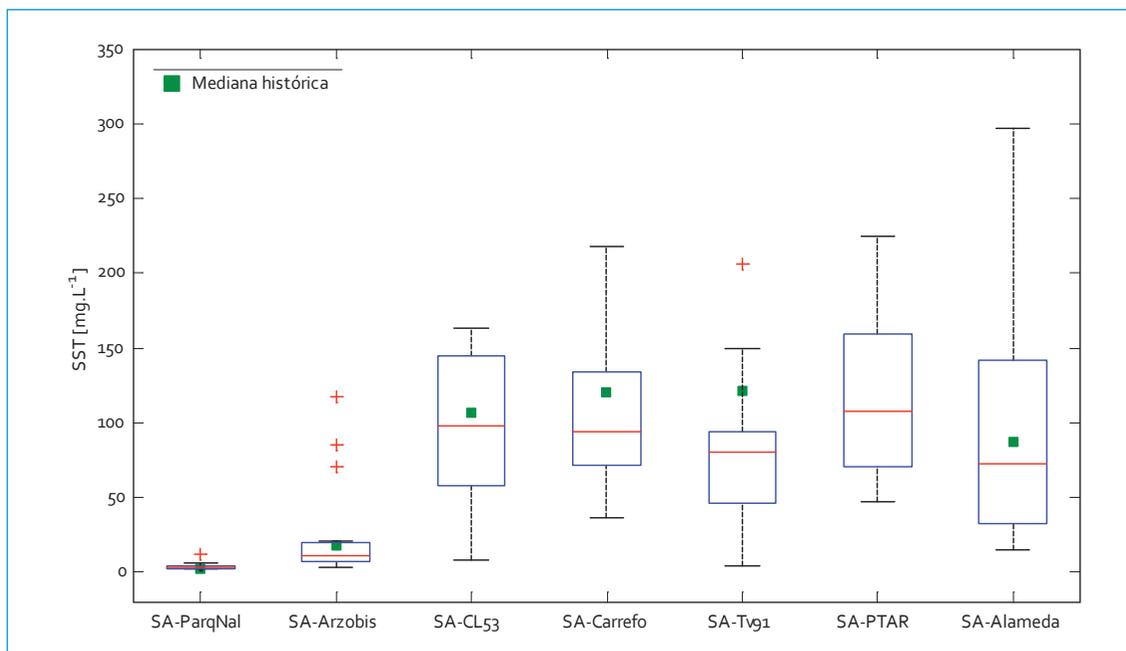


FIGURA 3.9. Perfil SST: río Salitre

entre 1 y 9,8 mg/L. No se observaron cambios significativos entre las medianas de la campaña (3,6 mg/L) y las medianas históricas (4 mg/L), fenómeno este similar en los puntos Carrera 30 Calle 53 y Transversal 91, donde la mediana 2009-2010 e histórica tuvieron casi los mismos valores (SA-CL53: 31 y 32 mg/L, respectivamente, y SA-Tv91: 32 y 33 mg/L, respectivamente). Esto muestra que no ha habido mejora alguna de la calidad del agua en estos puntos con referencia a este parámetro.

En Planta Salitre, la amplitud del rango de concentraciones fue mayor (entre 12 y 46 mg/L) al reportado en el punto anterior. Los valores cercanos a la concentración menor podrían deberse al efecto de dilución de contaminantes atribuible a la descarga de agua del humedal Juan Amarillo. Por otra parte, la variabilidad del nitrógeno en Carrera 30 x Calle 53 se debe a las diferencias entre las concentraciones que se presentan durante el día (27 y 57 mg/L entre las 8:00 y las 15:30) y en la madrugada (8-14 mg/L, 00:00-6:00). En Salitre

Alameda se observó una disminución drástica de este parámetro en comparación con lo reportado en campañas anteriores: la mediana pasó de 36 a 20 mg/L, con valores entre 1 y 58 mg/L.

En la figura 3.11 se muestra el comportamiento de los nitritos a lo largo del río Salitre en la campaña de monitoreo 2009-2010. Las mayores variaciones se presentaron en los puntos Arzobispo, Carrera 30 x Calle 53 y Planta Salitre con concentraciones que van entre 0,01 y 0,13 mg/L. Para este parámetro no se reportan medias históricas comparables con los valores actuales.

Para el caso de los nitratos (figura 3.12), se observó que en Arzobispo la concentración de este parámetro en el agua tuvo un incremento importante en comparación con Parque Nacional. Se presentó una reducción paulatina a medida que el río pasa por los puntos de monitoreo. En cuanto la concentración de oxígeno disuelto en el río disminuye, las condiciones anaerobias favorecen el uso de los nitratos por

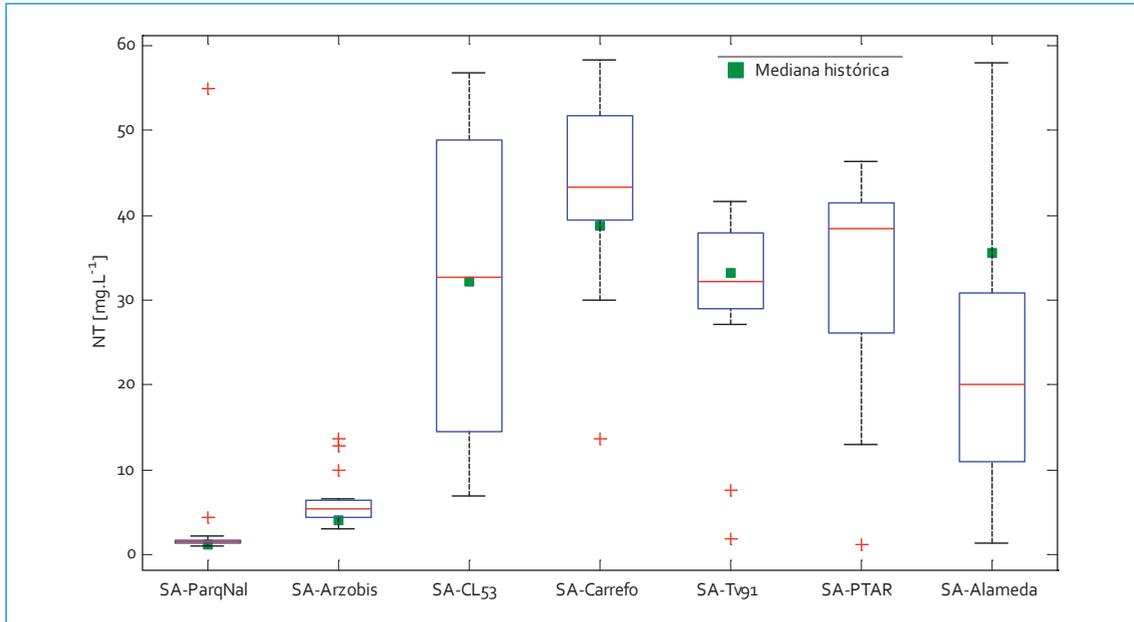
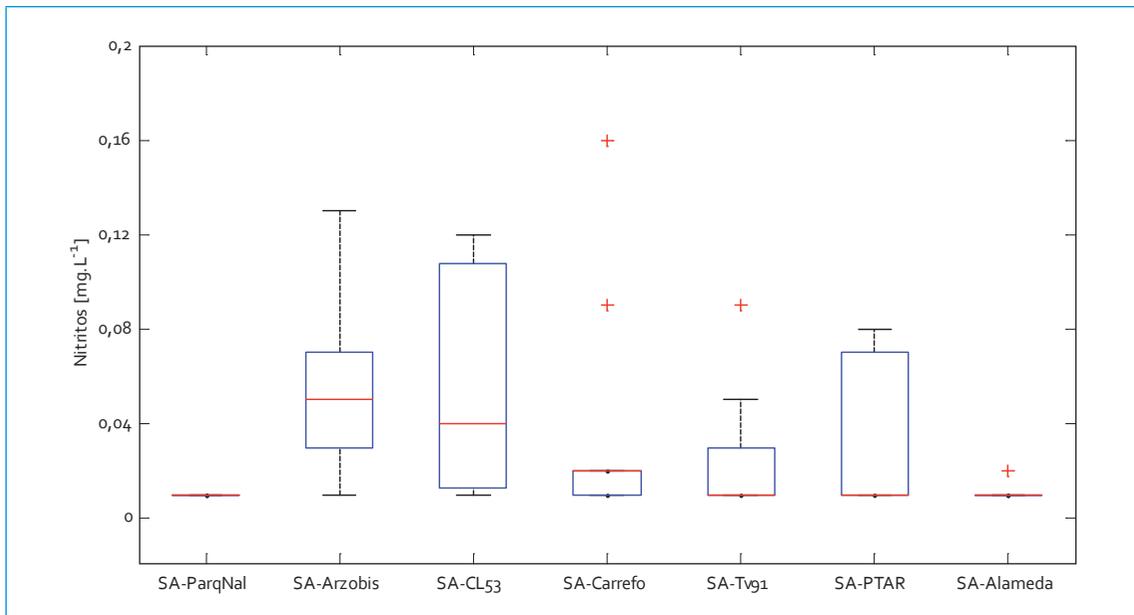
FIGURA 3.10. Perfil N<sub>total</sub>: río Salitre

FIGURA 3.11. Perfil nitritos: río Salitre

microorganismos y la ausencia simultánea de nitrificación, lo cual gradualmente disminuye su contenido. En la mayoría de los puntos, la mediana fue más cercana al cuartil 25, lo cual indica que los datos son cercanos al valor mínimo.

En comparación con los valores reportados en campañas anteriores, el nitrógeno amoniacal tuvo un comportamiento constante en Parque Nacional, Arzobispo, Carrera 30 x Calle 53 y Carrefour, puesto que la mediana actual e histórica son muy parecidas (SA-PqNal = 0,4

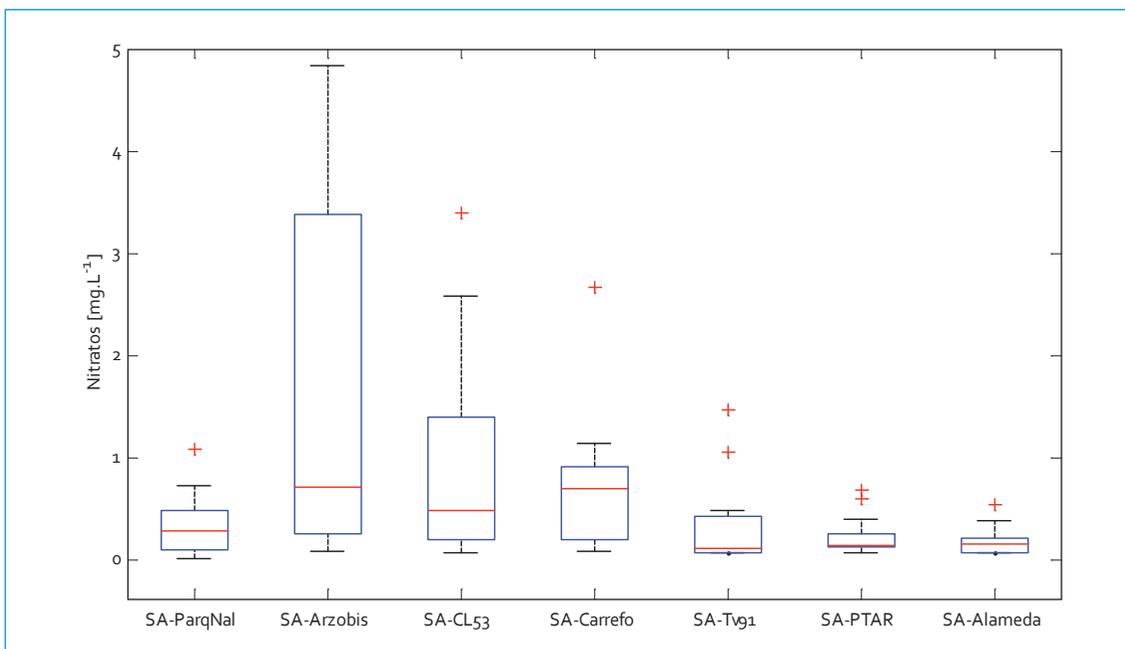


FIGURA 3.12. Perfil nitratos: río Salitre

y 0,3 mg/L, SA-Arzobis = 2,9 y 2,6 mg/L, SA-CL53 = 20,4 y 20,3 mg/L y SA-Carrefo = 31,4 y 32,8 mg/L). Por otra parte, en Transversal 91 y Salitre Alameda, las concentraciones mostraron una disminución de los valores de amonio (figura 3.13).

### 3.1.1.11. Fósforo total

Se observó una reducción en las cantidades de fósforo en el río. En comparación con los datos históricos, la mediana pasó de 5 a 2 mg/L en Carrera 30 x Calle 53, de 7,7 a 5,6 mg/L en Carre-

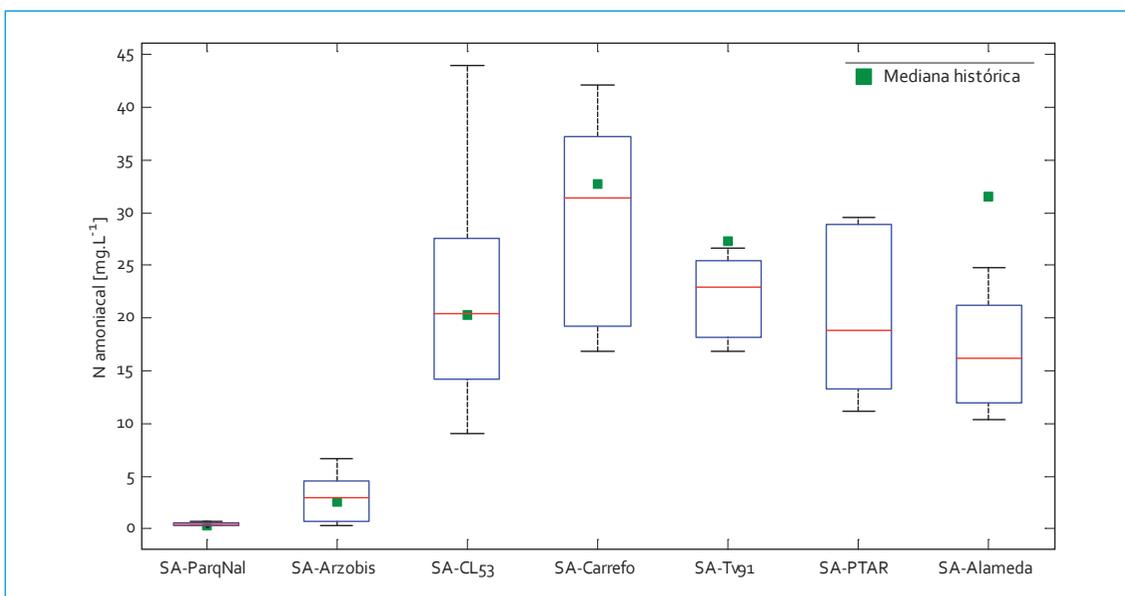


FIGURA 3.13. Perfil nitrógeno amoniacal: río Salitre

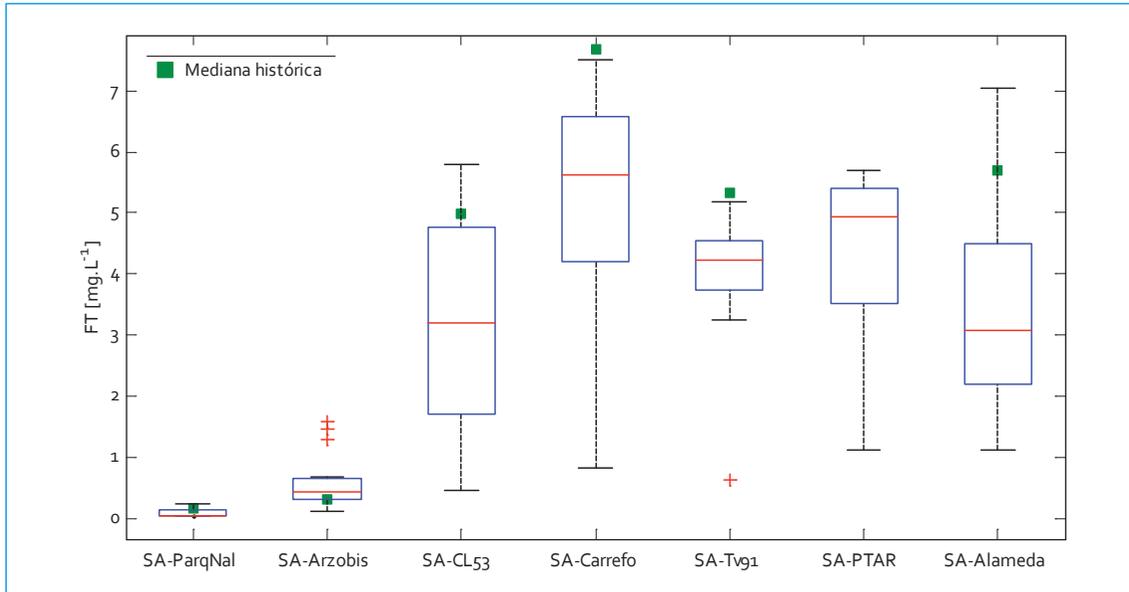


FIGURA 3.14. Perfil  $F_{\text{total}}$ : río Salitre

four, de 5,3 a 4,2 mg/L en Transversal 91 y de 5,7 a 3,1 mg/l en Salitre Alameda (figura 3.14).

Respecto al punto Parque Nacional, la concentración de fósforo fue muy pequeña (0,04-0,23 mg/L) y se puede atribuir a los valores normales en el río como consecuencia de los procesos naturales de mineralización y descomposición. Al igual que en el caso del nitrógeno total, los incrementos en la concentración y en la variabilidad de los datos se presentaron a partir de Carrera 30 x Calle 53, especialmente en las horas del día (2,6-5,8 mg/L, entre 7:00 y 16:00). En Carrefour Avenida 68 el amplio rango de concentraciones podría reflejar la afectación del colector La Vieja sobre la calidad del río respecto al fósforo, ya que su intermitencia hace que los valores sean muy diferentes en el día, en la madrugada y en la noche. En Transversal 91, las concentraciones de fósforo totales tuvieron un comportamiento similar en casi todas las ventanas bihorarias del día, madrugada y noche, el cual osciló entre 3,3 y 5,2 mg/L. Por su parte, en Planta Salitre

el aporte de agua del humedal Juan Amarillo y del sistema Córdoba que descarga en el Club Los Lagartos puede disminuir la concentración del fósforo por el efecto de dilución que tiene este en el río; los monitoreos realizados en la madrugada (1:30-2:30 y 4:00-6:00) y en el día (9:30-11:30 y 13:00-15:00) para el primer semestre del 2010 reportaron los valores más bajos del rango (1,1; 3,3; 3,5 y 1,8 mg/L, respectivamente). Finalmente, el rango de fósforo en Salitre Alameda se encontró entre 1,1 y 7 mg/L, y alcanzó valores extremos especialmente en la madrugada (de 6,3 mg/L entre 00:30 y 2:00, 6,2 mg/L de 3:00 a 5:00 y 1,7 mg/L entre 4:00 y 6:00) y en la noche (4,72 y 3,27 mg/L de 19:30-21:30 y 23:00-1:00, respectivamente).

#### 3.1.1.12. Grasas y aceites

En relación con las grasas y aceites el comportamiento de la concentración en Parque Nacional y Arzobispo fue muy similar, ya que al comparar las medianas históricas y de la

campaña 2009-2010 se observó que en los dos puntos la concentración fue de 3,6 a 10,0 mg/L y de 3,7 a 10,0 mg/L, respectivamente. La concentración aumentó en Carrera 30 x Calle 53, donde la amplitud del rango de concentraciones (3,5-79 mg/L) refleja el aporte de descargas de agua residual doméstica presentes en la zona. Una mayor variabilidad se cuantificó en el día y en la tarde (6:00-18:00) con valores entre 22 y 79 mg/L. Un caso particular ocurre en Carrefour Avenida 68, donde, tal y como se ha venido mencionando, el efecto del colector La Vieja amplía significativamente los valores de grasas y aceites en este punto, especialmente en el día (5,6-263 mg/L entre las 6:00 y 18:00).

A partir de Transversal 91 los valores de grasas y aceites disminuyen (6,4-27 mg/L) con pequeñas fluctuaciones durante el día, la noche y la madrugada. Los datos que se encontraron fuera del intervalo (figura 3.15) corresponden a los reportados para las campañas del primer semestre del 2010 en la tarde (13:30-15:30) y madrugada (1:30-3:30), que mostraron un aumento significativo en comparación con

los otros resultados de la misma campaña. En Planta Salitre y Salitre Alameda los rangos en los que se movieron las concentraciones de este parámetro fueron muy cercanos (5,6-46 mg/L y 3,3-43 mg/L), muy posiblemente, debido al efecto de remanso y eculización causado por el río Bogotá sobre la parte final del río Salitre.

### 3.1.1.13. SAAM

En relación con los datos históricos, los tensoactivos en el río Salitre tuvieron incrementos importantes de las concentraciones en los puntos Carrefour Avenida 68, Transversal 91 y Salitre Alameda (figura 3.16), para los cuales la media 2009-2010 (8,7; 6,0 y 5,4 mg/L) sobrepasa la histórica (2,0; 1,9 y 2,7 mg/L) en casi tres veces. El rango de concentraciones también fue mayor (SA-Carrefo: 4,3-15 mg/L, SA-TV91: 2,4-11 mg/L y SA-Alameda: 2,7-11 mg/L). La poca variación que se observó a partir de Transversal 91 podría estar ligada a las condiciones del río, donde el

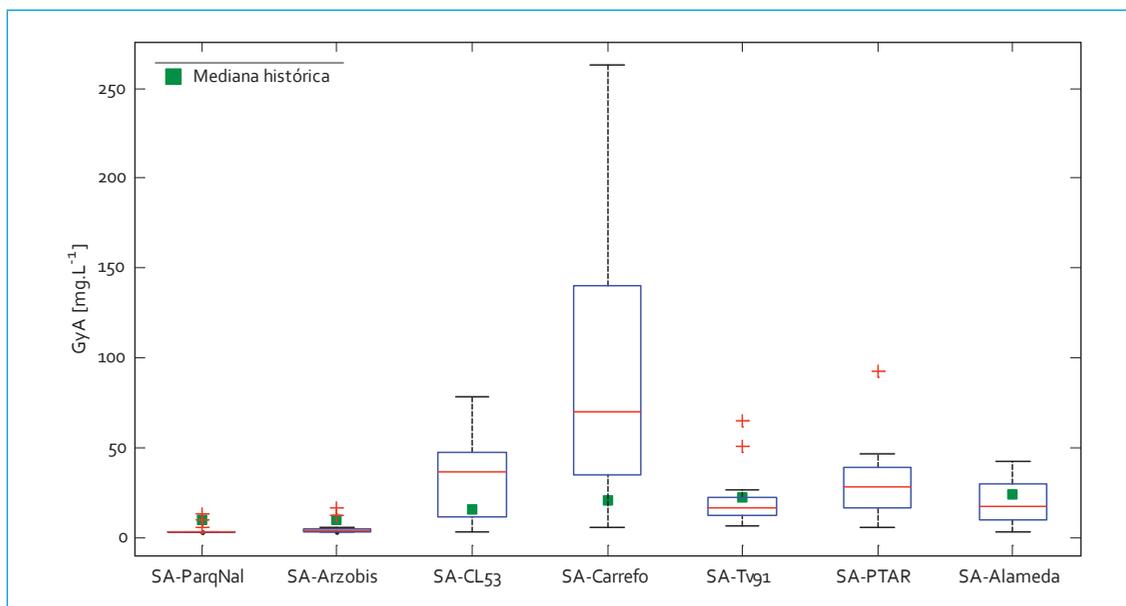


FIGURA 3.15. Perfil grasas y aceites: río Salitre

caudal transportado es mayor (580-2459L/s) y, por ende, se pueden dar procesos de dilución, y a la longitud de mezcla que se presenta aguas arriba, haciendo que el nivel de afectación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM), por las descargas de agua residual doméstica disminuya. En Planta Salitre los valores más pequeños (2,7 y 1,0 mg/L) se presentaron en las ventanas bihorarias 13:00-15:00 y 1:30-2:30, respectivamente, para los monitoreos del primer semestre del 2010; mientras que para Salitre Alameda, las concentraciones mayores (30, 31 y 39 mg/L) correspondieron a los monitoreos realizados en el día (8:00-14:30) durante la campaña del cuarto trimestre del 2009.

#### 3.1.1.14. Coliformes fecales

En Parque Nacional y Arzobispo los coliformes fecales tuvieron concentraciones muy pequeñas ( $3,0-3,5 \times 10^2$  NMP/100 mL y  $30-4,6 \times 10^5$  NMP/100 mL). El primer punto es considerado referente de calidad del río Salitre, ya que las concentraciones de los parámetros de calidad

son óptimas, mientras que en Arzobispo las descargas que se presentan en esa zona tienen una poca afectación en la calidad del agua. Nuevamente, a partir de Carrera 30 x Calle 53 y en Carrefour Avenida 68 se midieron incrementos muy importantes en este parámetro en el río (figura 3.17), que alcanzaron valores máximos de  $2,4 \times 10^7$  y  $4,0 \times 10^7$ , respectivamente, durante el día. Las cantidades más bajas en Carrera 30 x Calle 53 se presentaron durante la madrugada  $1,6 \times 10^3-9 \times 10^5$  NMP/100 mL, entre 1:00 y 6:00, como consecuencia de las descargas domésticas que se presentan en esa zona y que tienen mayor actividad durante el día. Al igual que en los parámetros anteriores, el cambio del punto de monitoreo en Carrefour Avenida 68 sugiere que el principal aporte corresponde al colector La Vieja, que transporta las aguas residuales domésticas de la zona.

En Transversal 91, el rango de datos varió entre  $2,4 \times 10^4$  y  $4,3 \times 10^6$  NMP/100 mL. Así mismo, se presentó una muy fuerte disminución de la mediana en comparación con los datos históricos, al pasar de  $5,9 \times 10^{10}$  a  $2,4 \times 10^6$  NMP/100 mL.

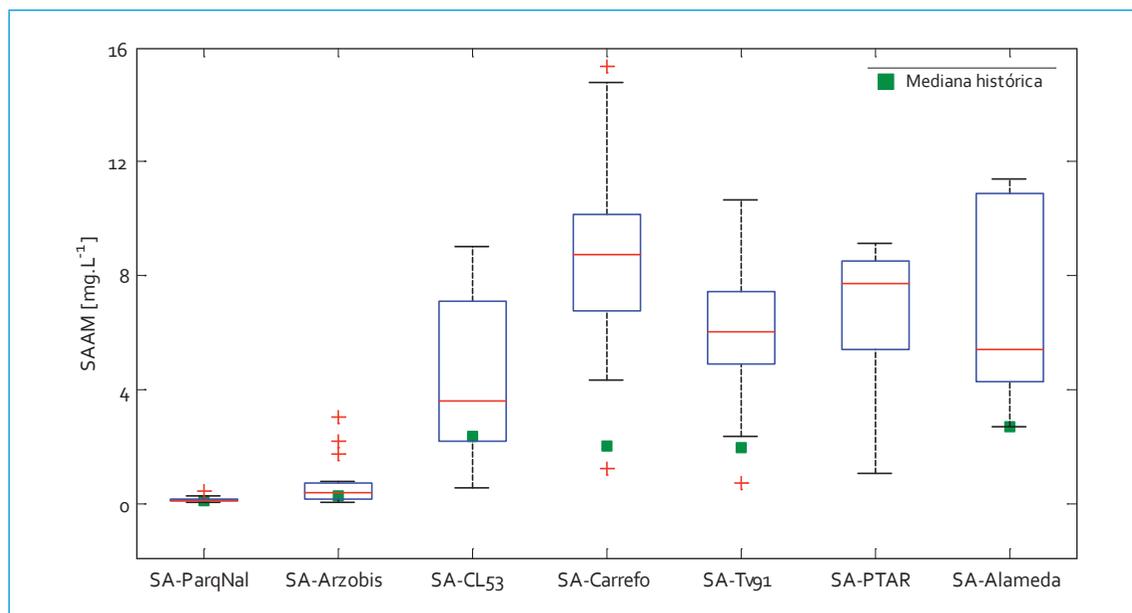


FIGURA 3.16. Perfil SAAM: río Salitre

De igual forma que en Transversal 91, en Planta Salitre los coliformes fecales oscilaron dentro de un pequeño intervalo ( $9,3 \times 10^5$ - $4,9 \times 10^6$  NMP/100 mL) con pequeñas fluctuaciones durante el día y en las demás horas (mañana y noche). Como se mencionó, las condiciones que se presentan en este río (baja pendiente, poca velocidad y mayores valores de caudal, entre otros) regulan la concentración de diferentes parámetros en este punto.

### 3.1.1.15. Coliformes totales

El comportamiento de este parámetro a lo largo del río se representa en la figura 3.18, donde el punto más crítico fue Carrefour Avenida 68 con la mayor variabilidad de datos (entre  $2,4 \times 10^5$  y  $2,4 \times 10^8$  NMP/100 mL) y mayor valor de la mediana ( $4,6 \times 10^7$  NMP/100 mL); entre las 9:00 y 13:00 la concentración de coliformes en este punto fue mayor: se encontraba entre  $9 \times 10^7$  y  $1,5 \times 10^8$  NMP/100 mL. En los demás puntos, Carrera 30 x Calle 53, Transversal 91 y Salitre Alameda, se presentó un aumento

en las concentraciones de coliformes totales de la mediana actual ( $1,5 \times 10^7$ ,  $9,3 \times 10^6$  y  $9,3 \times 10^6$  NMP/100 mL respectivamente) frente a los datos históricos (medianas:  $4,1 \times 10^6$ ,  $5,9 \times 10^6$ ,  $7,5 \times 10^6$  NMP/100 mL, respectivamente).

### 3.1.1.16. Cianuro

El cianuro tuvo un comportamiento particular en los puntos Parque Nacional, Arzobispo, Carrera 30 x Calle 53 y Salitre Alameda, donde la concentración reportada fue la del límite de detección. Para este parámetro las medianas históricas son muy bajas y, además, el límite de detección es mucho menor que el obtenido para la campaña 2009-2010 (0,5 mg/L). Por lo tanto, el análisis no permite establecer ningún tipo de dinámica temporal. Las medianas reportadas en todos los puntos equivalen al límite de detección (0,5 mg/L) del ensayo.

En Transversal 91 el rango de valores osciló entre 0,5 y 1,1 mg/L; la amplitud de este intervalo se debe a dos valores que se presentaron en los monitoreos del 2009 durante el día: 0,9

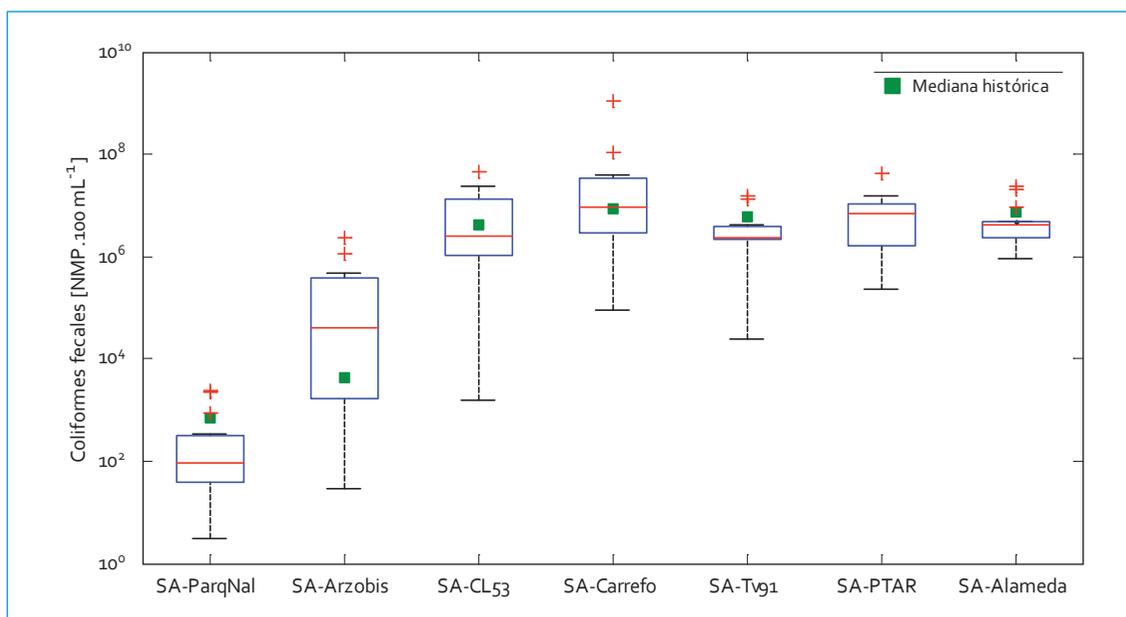


FIGURA 3.17. Perfil coliformes fecales: río Salitre

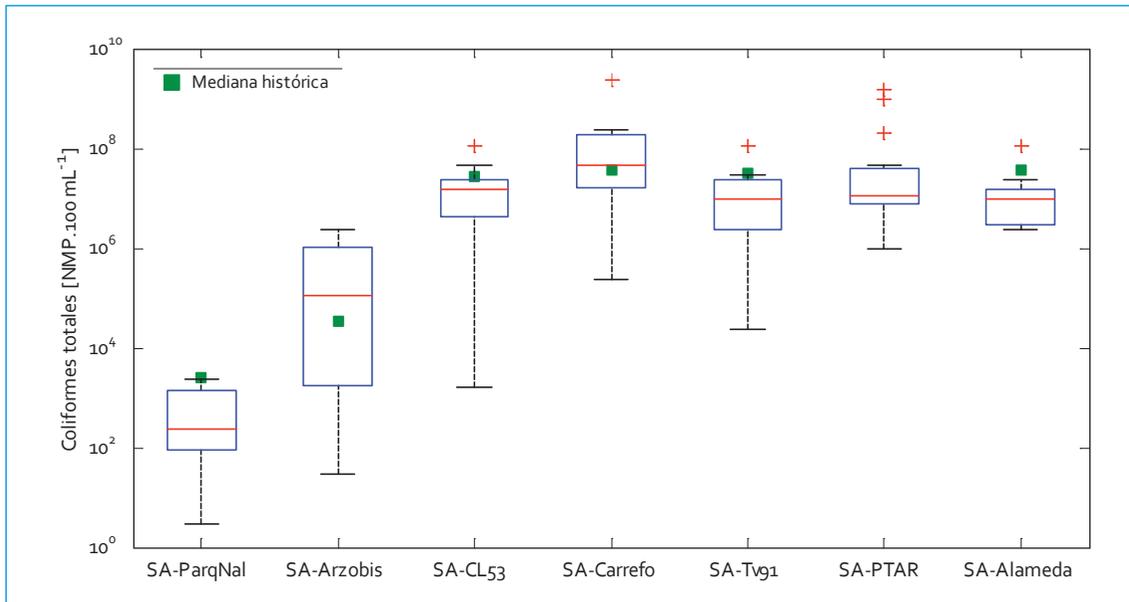


FIGURA 3.18. Perfil coliformes totales: río Salitre

mg/L entre 8:00 y 10:00, y 1,1 mg/L entre 12:30 y 14:30. El número total de datos reportados a partir de la campaña realizada son muy pocos y, por lo tanto, es de esperarse que la amplitud del diagrama de cajas sea mayor. Un fenómeno similar se presenta en Carrefour Avenida 68 y en Planta Salitre, para los cuales se reporta un solo dato mayor al límite de detección (0,7 y 1,1 mg/L respectivamente).

### 3.1.1.17. Fenoles

La figura 3.19 muestra el perfil de los fenoles medidos en la campaña 2009-2010 para el río Salitre en una escala que va desde 0,02 hasta 0,4 mg/L. Las medianas de la campaña indican que la mayoría de los datos en Arzobispo (mediana: 0,02 mg/L), Carrera 30 x Calle 53 (mediana: 0,04 mg/L), Planta Salitre (0,11 mg/L) y Salitre Alameda (0,13 mg/L) tienden a ser valores pequeños. Por el contrario, en Transversal 91, la mayoría de los datos se encuentran por encima de 0,2 mg/L. El pequeño aporte de fenol

en el río puede estar ligado a las descargas de agua residual doméstica, que se presentan a lo largo del río como consecuencia del uso de productos de cuidado personal, medicamentos y agentes desinfectantes.

### 3.1.1.18. Metales

En esta sección se analiza el comportamiento de los metales en el río Salitre a partir de la información de campo obtenida en la campaña de monitoreo 2009-2010. Dado que el número de datos es pequeño (cinco datos), la descripción del comportamiento de estos parámetros está enfocada en conocer la variación de estos valores en las horas especificadas y su relación con los datos históricos.

#### 3.1.1.18.1. Barrio

El barrio tuvo una variación similar en los puntos Arzobispo, Carrera 30 x Calle 53, Carrefour Avenida 68 y Transversal 91 (figura 3.20), para los

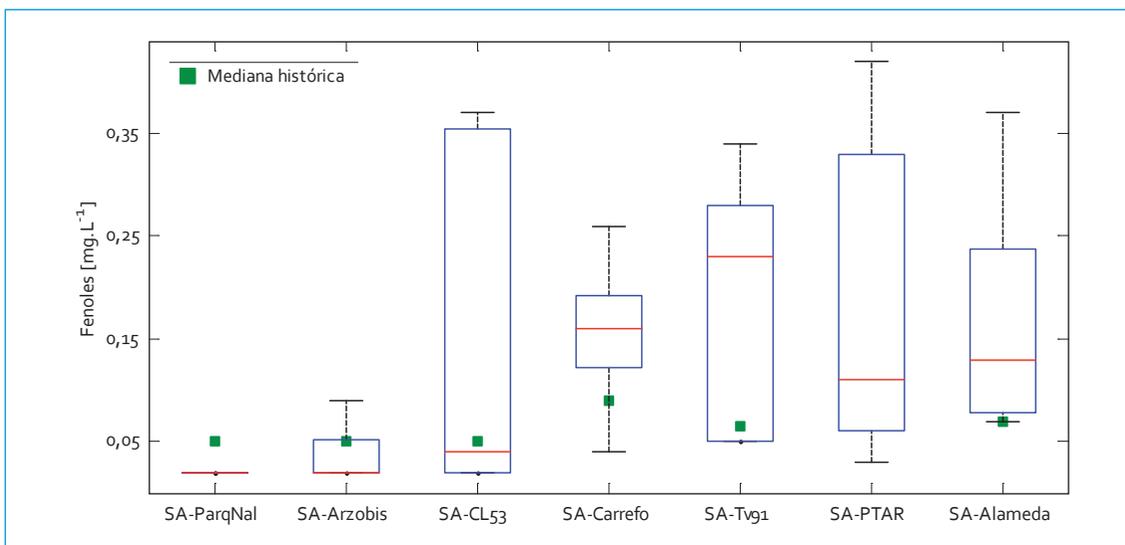


FIGURA 3.19. Perfil fenoles: río Salitre

cuales la concentración se encontró entre 0,03 y 0,07 mg/L. Los valores máximos encontrados en el río correspondieron a 0,8 mg/L en Planta Salitre, lo que sugiere que la concentración es muy baja si se tiene en cuenta que los límites de este parámetro en agua potable se encuentran entre 0,7 mg/L (OMS) y 1 mg/L (Canadá).

En comparación con los datos históricos, la mediana 2009-2010 tiende a ser menor en la mayoría de los puntos, especialmente en Carrefour Avenida 68 (mediana histórica: 0,08 mg/L y mediana actual: 0,05 mg/L), Transversal 91 (0,07 y 0,04 mg/L) y Salitre Alameda (0,07 y 0,05 mg/L).

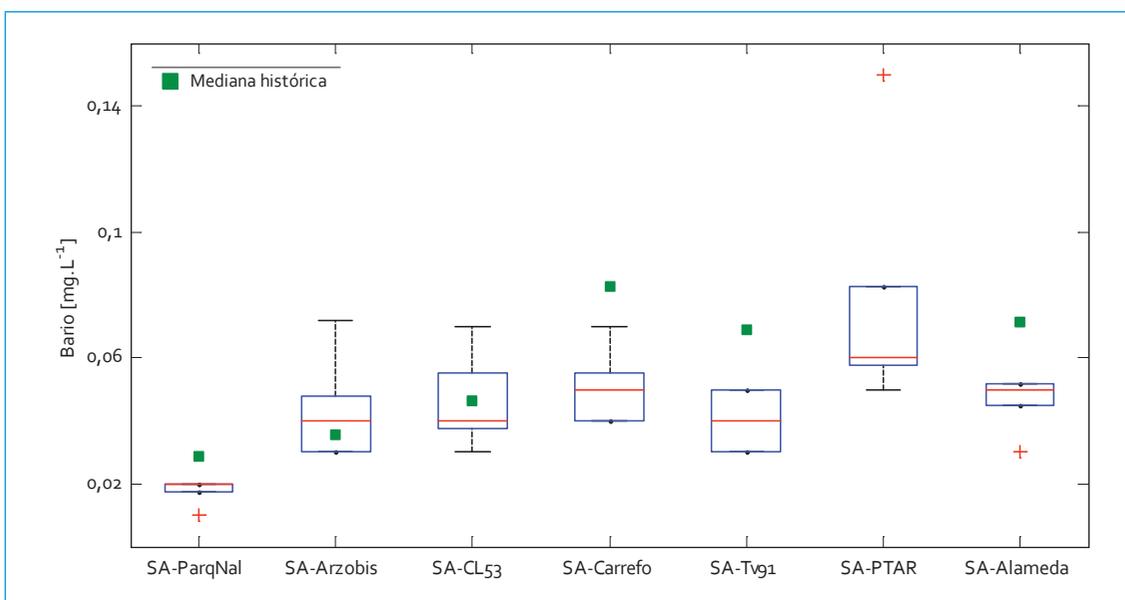


FIGURA 3.20. Perfil bario: río Salitre

### 3.1.1.18.2. Cadmio

Las cantidades de este parámetro en el río fueron muy bajas (figura 3.21), si se tiene en cuenta que —de acuerdo con el decreto 1594 de 1984— el límite máximo de cadmio para el control de vertimientos es 0,1 mg/L. Las medianas históricas en los siete puntos de monitoreo del río equivalen a 0,001 mg/L, con incrementos en la concentración en Arzobispo por un dato de 0,01 mg/L, reportado en el día (14:00-16:00), Carrefour Avenida 68 dos valores en la tarde 0,002 mg/L (13:00-15:00) y 0,004 mg/L (14:00-16:00), y Salitre Alameda relacionados con un valor 0,002 mg/L, presentado entre las 8:30 y las 10:30. En Transversal 91 la mediana de la campaña (0,001 mg/L) fue muy pequeña en comparación con la histórica (0,004 mg/L). Es muy importante resaltar para el cadmio, así como para los otros metales, que el hecho de no encontrar muy altas concentraciones de metales pesados en la fase líquida de los ríos de la ciudad no garantiza que dichos elementos

no se encuentren precipitados en los sedimentos de los cauces de estos ríos.

### 3.1.1.18.3. Cinc

En general, el cinc tuvo una variabilidad limitada al número de datos reportados en los puntos de monitoreo del río Salitre y una reducción mínima de las medianas en comparación con los datos históricos (figura 3.22). En Arzobispo, las mayores concentraciones (0,14 y 0,43 mg/L) correspondieron a los monitoreos realizados entre las 10:00-12:00 y 19:00-21:00; sin embargo, la mediana (0,037 mg/L) y el análisis de percentiles reflejó que la mayoría de los datos son muy cercanos a este valor. Para Carrera 30 x Calle 53 las concentraciones de cinc oscilaron entre 0,08 y 0,14 mg/L para los monitoreos realizados en la mañana (8:00-11:30), en la tarde (12:00-15:00) y en la noche (19:00-21:00). En Carrefour Avenida 68 se observó una distribución simétrica de los datos con mediana 0,11 mg/L y un rango

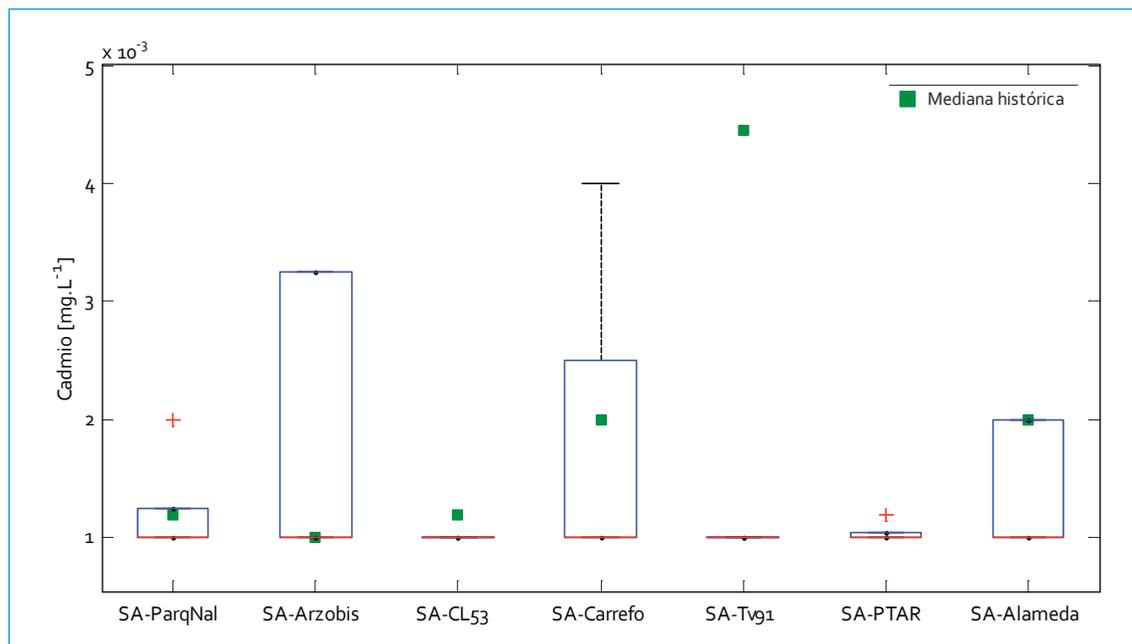


FIGURA 3.21. Perfil cadmio: río Salitre

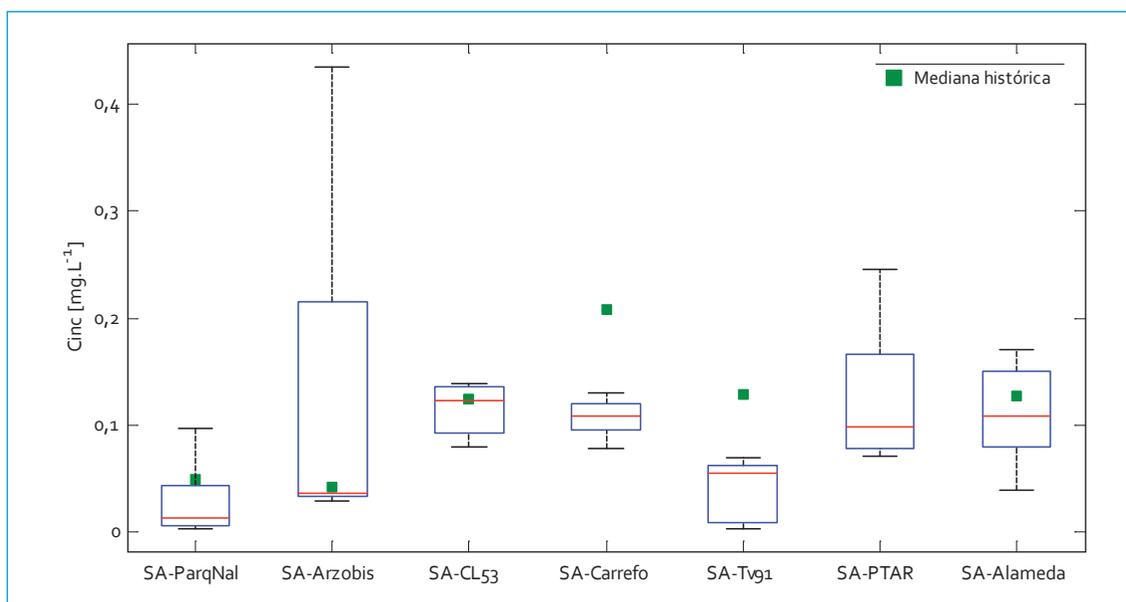


FIGURA 3.22. Perfil cinc: río Salitre

de datos entre 0,8 y 0,13 mg/L, que refleja la poca variación de las concentraciones durante los intervalos monitoreados en la campaña. En Planta Salitre, la mayor concentración (0,25 mg/L) correspondió al intervalo de la noche (19:00-21:00), a diferencia de los valores menores en Transversal 91 y Salitre Alameda, reportados en la tarde y noche.

#### 3.1.1.18.4. Cobre

Se cuantificaron concentraciones bajas de cobre en el agua del río (figura 3.23); menor concentración de 0,005 mg/L (Parque Nacional) y máxima concentración de 0,15 mg/L (Carrefour Avenida 68). En Parque Nacional la concentración de cobre varió entre 0,005 y 0,085 mg/L. El contenido de este metal puede estar determinado por procesos naturales, como la lluvia y la escorrentía. Se observó un leve aumento de las cantidades de cobre en Carrera 30 x Calle 53 y Carrefour Avenida 68, donde la mediana de la campaña fue de 0,019 a 0,05 mg/L y de 0,03 a 0,06 mg/L, respectivamente; para el segundo

punto de monitoreo la mayor concentración (0,15 mg/L) se presentó en los intervalos de la tarde (13:00-15:00 y 14:00-16:00).

En Transversal 91 se encontró que los valores de cobre medidos en las ventanas bihorarias de la mañana (0,36 y 0,34 mg/L, de 8:00 a 10:00 y de 9:40 a 10:40) fueron mayores a los reportados en las horas de la tarde (0,17 y 0,18 mg/L, de 12:30 a 14:30 y de 13:00 a 15:00, respectivamente). Es posible afirmar que la concentración tiende a ser constante en ventanas de tiempo similares; en este caso, en las horas de la mañana y en la tarde. La amplitud del rango de datos en Planta Salitre y Salitre Alameda se debe a que los valores obtenidos en el segundo trimestre del 2010 (0,077 y 0,079 mg/L) fueron mayores a los de las demás campañas (0,022 y 0,033 mg/L).

#### 3.1.1.18.5. Cromo total

Al igual que con el cadmio, las medianas 2009-2010 en todos los puntos equivalen al límite de detección de 0,006 mg/L; en Parque Nacional,

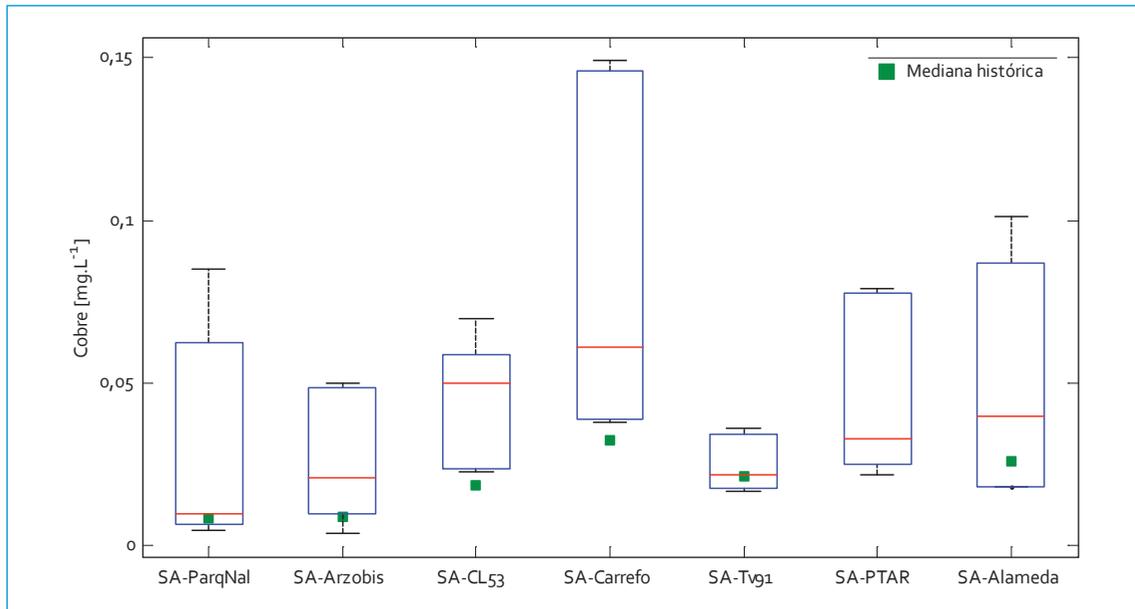


FIGURA 3.23. Perfil cobre: río Salitre

Carrefour Avenida 68 y Transversal 91 la concentración de cromo fue constante. En la figura 3.24 se representa el comportamiento de este parámetro en los diferentes puntos de monitoreo. La variación en las concentraciones de

cromo en Carrera 30 x Calle 53, Planta Salitre y Salitre Alameda se debe a los datos obtenidos en la ventana bihoraria de la noche de 19:00 a 21:00 (0,007; 0,017 y 0,02 mg/L, respectivamente).

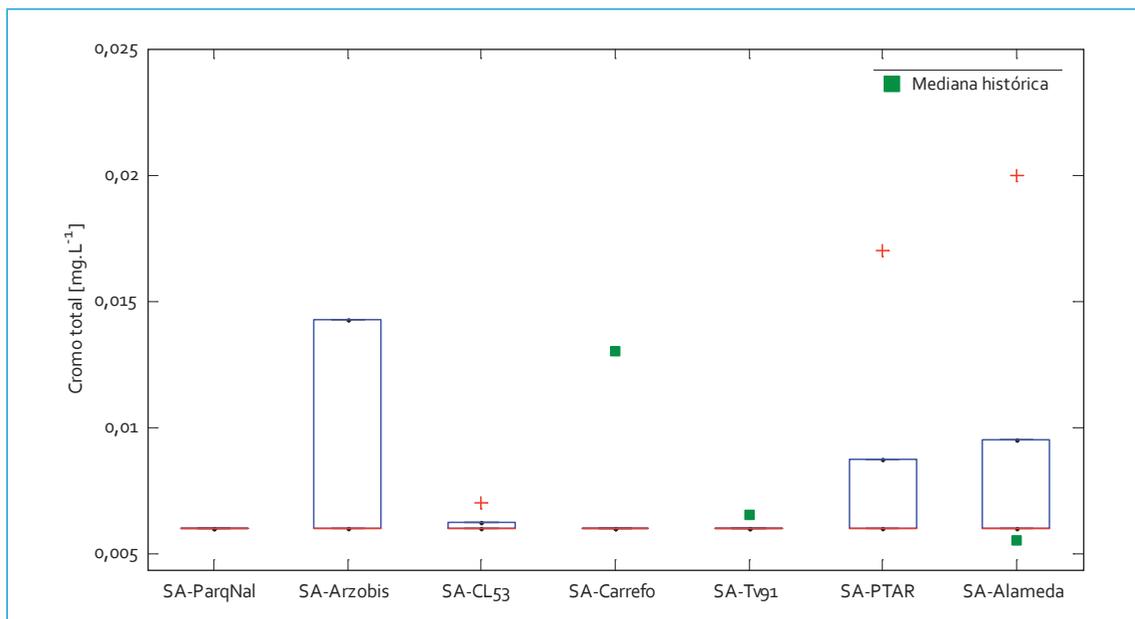


FIGURA 3.24. Perfil cromo total: río Salitre

## 3.1.1.18.6. Manganeso

La concentración de manganeso tuvo pequeñas fluctuaciones en los diferentes puntos del río (entre 0,006 y 0,13 mg/L). En la mayoría de los puntos de monitoreo la mediana actual e histórica son similares y, por lo tanto, se observó que el comportamiento de este parámetro fue casi constante (figura 3.25). El mayor valor de manganeso (0,105 mg/L) se presentó en el intervalo de la noche en Planta Salitre. En Carrefour Av. 68 los valores de este parámetro (0,04-0,06 mg/L) se encontraron por debajo de la media histórica (0,07 mg/L), al presentar un dato por fuera del rango de 0,08 mg/L, reportado en la ventana de la tarde (14:00-16:00). Para el caso de Transversal 91, las concentraciones de manganeso se cuantificaron entre 0,05 y 0,07 mg/L con valores mayores en las ventanas bihorarias de la tarde y noche. Finalmente, en Salitre Alameda la concentración máxima fue de 0,11 mg/L reportada para la mañana (9:00-11:00).

## 3.1.1.18.7. Níquel

En la figura 3.26 se presenta el comportamiento del níquel en cada uno de los puntos de monitoreo del río Salitre establecidos durante la campaña de monitoreo 2009-2010. En general, se observa que las concentraciones reportadas tienden a ser menores que los reportes históricos; las medianas 2009-2010 disminuyen en todos los puntos. Las concentraciones de níquel fueron similares en la mayoría de los puntos (Parque Nacional: 0,001-0,006 mg/L; Salitre Carrefour: 0,001-0,005 mg/L; Transversal 91: 0,001-0,005 mg/L; Planta Salitre: 0,001-0,007 mg/L, y Salitre Alameda: 0,001-0,006 mg/L) con pequeñas variaciones en Arzobispo y Carrera 30 x Calle 53, donde se alcanzan concentraciones cercanas a 0,034, valor atípico presentado en la noche (19:00 y 21:00), y 0,015 mg/L en la ventana bihoraria de la tarde (12:00-14:00), respectivamente. Se puede afirmar que no se presentan aportes importantes de níquel por las descargas de agua residual do-

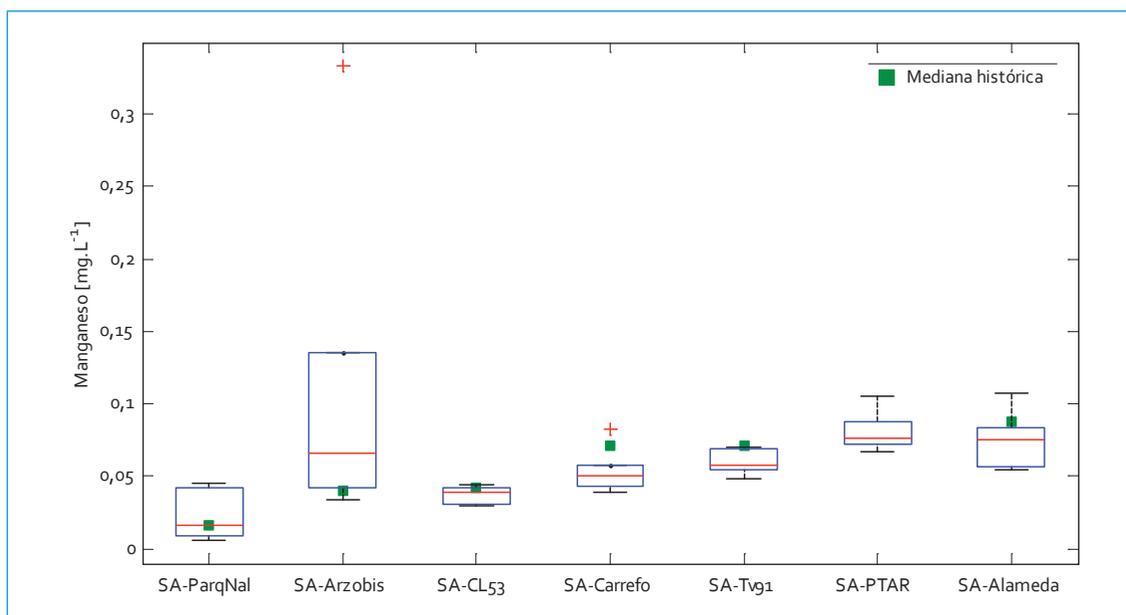


FIGURA 3.25. Perfil manganeso: río Salitre

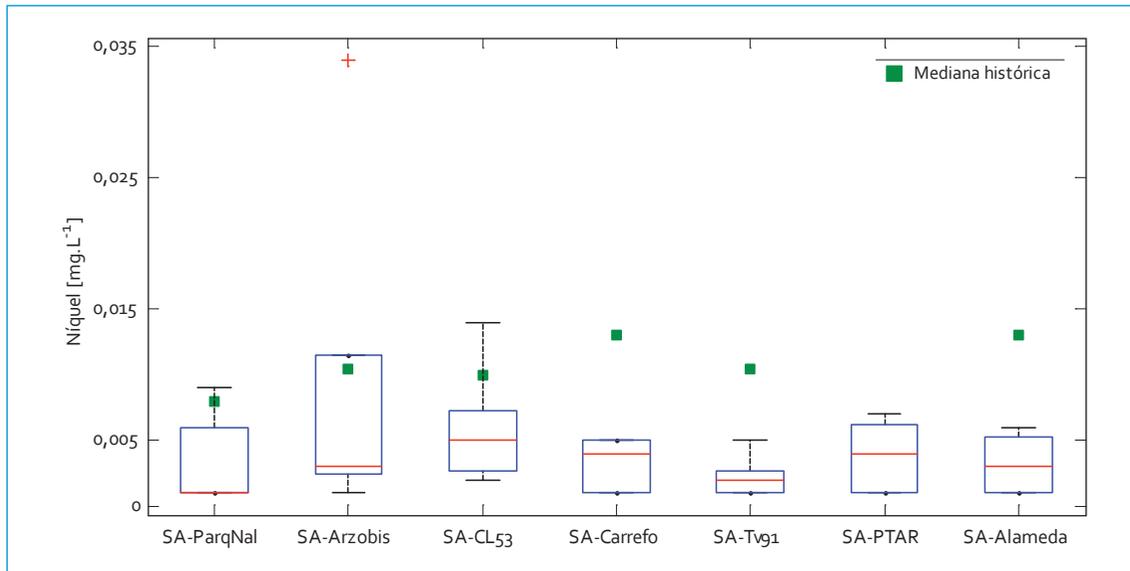


FIGURA 3.26. Perfil níquel: río Salitre

méstica y, en su lugar, la concentración inicial con la que va el río en Parque Nacional tiende a mantenerse a lo largo del río.

### 3.1.1.18.8. Plomo

Al igual que el níquel, las concentraciones de plomo reportadas para la campaña de monitoreo 2009-2010 se encuentran por debajo de los valores históricos (figura 3.27). En los primeros puntos, Parque Nacional y Arzobispo, las medianas 2009-2010 tuvieron valores de 0,004 mg/L y los rangos de concentraciones en estos puntos fueron muy pequeños. En los puntos de monitoreo donde se presentan descargas importantes de agua residual doméstica (Carrera 30 x Calle 53, Carrefour Avenida 68 y Transversal 91), las cantidades de plomo se mantienen constantes y con medianas muy parecidas (0,005; 0,008 y 0,006 mg/L, respectivamente). En Planta Salitre se dio la mayor variabilidad (0,001-0,063 mg/L). Finalmente, en Salitre Alameda, la concentración vuelve a estar dentro de las concentraciones de plo-

mo reportadas en los puntos anteriores con mediana 0,008 mg/L y rango entre 0,004 y 0,013 mg/L.

### 3.1.2. Cargas contaminantes

#### 3.1.2.1. DBO

En la tabla 3.1 se presentan las cargas promedio transportadas por los cuatro tramos del río Salitre para la campaña de monitoreo 2009-2010.

TABLA 3.1. Carga promedio transportada DBO<sub>5</sub>: río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
DBO <sub>5</sub>	0,6	476	5134	8900

En la figura 3.28 se presenta el perfil de cargas para la campaña, donde se observa una disminución de la DBO<sub>5</sub> (0,6 t/año) frente

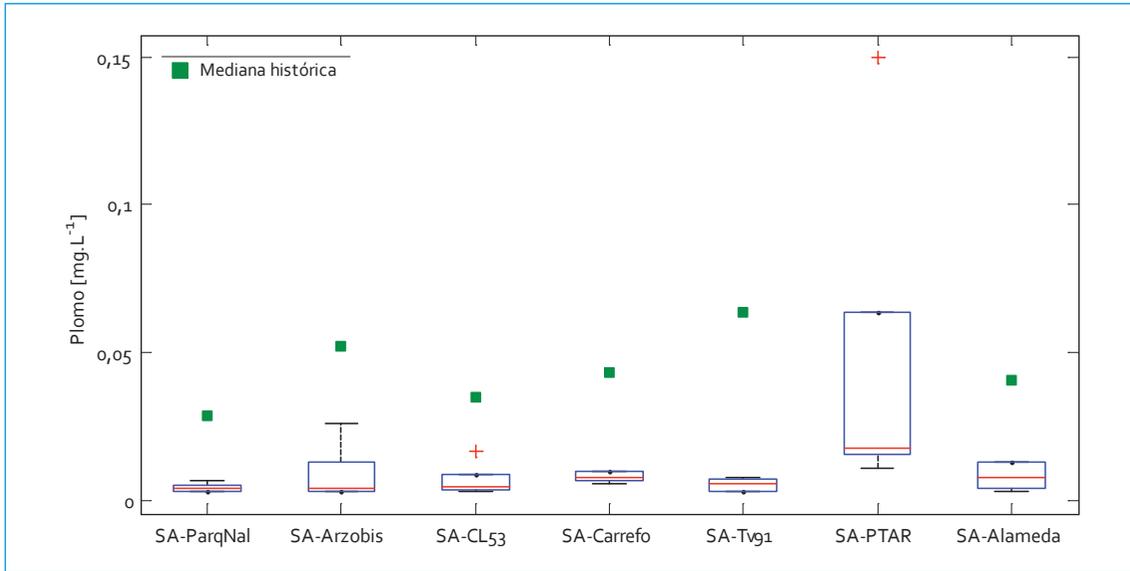


FIGURA 3.27. Perfil plomo: río Salitre

al valor medio histórico (3,2 t/año) para el tramo 1. Este cambio está ligado a la disminución del rango de concentraciones (de 0,2-16 mg/L pasó a 0,9-2,2 mg/L).

Para el segundo tramo la carga media 2009-2010 (4,76 t/año) fue menor al promedio histórico (967 t/año); mientras que el caudal pasó de 122 a 192 L/s, al presentar mayores

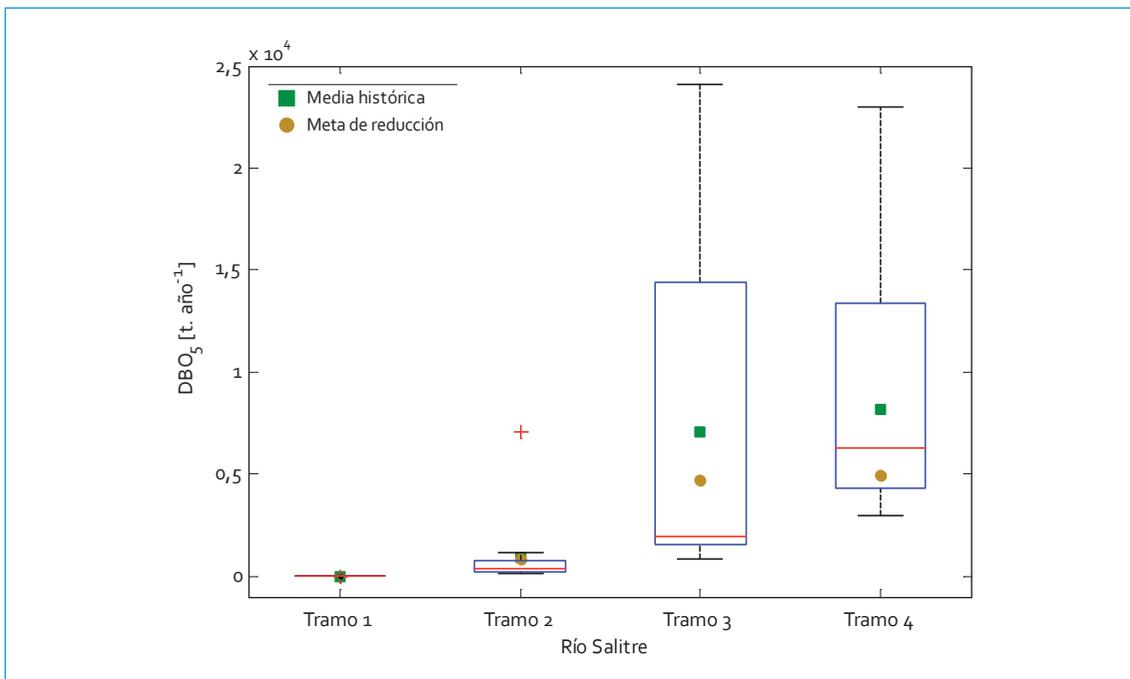


FIGURA 3.28. Perfil carga DBO<sub>5</sub>: río Salitre

valores durante los monitoreos realizados en condición hidrológica húmeda, correspondientes al cuarto trimestre del 2009 (360 L/s entre 23:00 y 1:00 y 585 L/s entre 14:00 y 16:00), y segundo trimestre del 2010 (253, 251 y 283 L/s entre 8:00 y 14:00). Por otra parte, la meta de reducción (850 t) establecida en la resolución 4328 del 2010 se encuentra por encima de la carga promedio 2009-2010. Ello indica que en este tramo la meta de  $DBO_5$  se está cumpliendo.

Para el tramo 3 la carga media de  $DBO_5$  fue de 5134 t/año. Este valor se encuentra en el rango de los valores históricos y muestra un comportamiento poco variable que tiende a disminuir, ya que el promedio histórico fue mayor (7041 t/año). En comparación con los tramos anteriores, se evidenciaron los efectos de las descargas de agua residual doméstica, en cuanto a su aporte de materia orgánica. La meta de reducción 4750 t del tramo 3 (resolución 4328 de 2010) representa una remoción de más del 90% de la carga que actualmente está transportando el río.

Respecto al rango de cargas (2951-22996 t/año) en el tramo 4, la variabilidad de datos fue menor que para el tramo anterior (865-24 084 t/año), así como su valor máximo. Las concentraciones para los dos tramos mostraron un comportamiento similar (tramo 3: 26-252 mg/L y tramo 4: 19-210 mg/L); pero el caudal en el último tramo del río fue significativamente mayor (caudal promedio: 3445 L/s). Adicionalmente, el valor medio reportado para el tramo final del río (8900 t/año) fue mayor que el histórico (8201 t/año). Ello evidencia un pequeño incremento en la carga promedio para este parámetro. La meta de reducción en este caso implicaría una alta remoción en la carga contaminante cercana al 80%.

### 3.1.2.2. DQO

De acuerdo con la estimación de cargas de DQO en el río Salitre (tabla 3.2 y figura 3.29), se presentó un incremento en la carga promedio transportada a medida que el río atraviesa la ciudad.

TABLA 3.2. Carga promedio transportada DQO: río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DQO	4,8	1143	4257	20890

En el primer tramo la carga fue la más baja en comparación con los siguientes. La carga media para este punto (4,8 t/año) fue menor que la carga histórica (10 t/año), lo que muestra una pequeña reducción en el rango de valores actuales, lo cual podría estar relacionado con la disminución del intervalo de concentraciones, que pasó de 2,3-48 mg/L a 3-23 mg/L, pero se mantuvo dentro de los valores históricos. Para el tramo 2 se presentó un incremento en la carga media respecto al tramo anterior, lo cual puede deberse a los vertimientos de agua residual doméstica que se presentan en esa zona. En comparación con el promedio histórico, la carga media para este segundo también tramo mostró una leve disminución (1455 a 1143 t/año). En este punto, el efecto de las concentraciones no muestra una mayor influencia sobre la estimación de cargas, puesto que al comparar los rangos, éstos difieren muy poco (histórico: 94-506 mg/L vs. 2009-2010: 30-576 mg/L).

Se presentaron variaciones importantes en la carga y el caudal medio de este parámetro en el tramo 3. Los valores históricos de cargas

y caudal promedio (10 872 t/año y 818 L/s) fueron mayores a los medidos en la campaña 2009-2010 (4257 t/año y 554 L/s). Este cambio en las cargas se debe a que los puntos de monitoreo entre las dos series de tiempo fueron diferentes. Durante esta campaña el punto Carrefour Avenida 68 fue reubicado temporalmente aguas arriba de su lugar original debido a las obras que adelanta la EAAB en ese sitio.

A diferencia de los tramos anteriores, el tramo 4 mostró un aumento en la carga media (24 544 t/año) de más del doble que el promedio histórico (9716 t/año). En este punto, el río ha recibido los aportes de las descargas de agua residual doméstica que se presentan a lo largo de su recorrido por la ciudad. El incremento del rango de concentraciones actuales (65-786 mg/L), que se encuentran ligeramente por fuera del rango histórico (22-659 mg/L), tienen un efecto importante en el valor de las cargas.

3.1.2.3. SST

En cuanto a los SST, la tabla 3.3 presenta las cargas transportadas por el río Salitre en los cuatro tramos del río, donde se observa que los mayores valores se presentan en el último tramo.

TABLA 3.3. Carga promedio transportada SST: río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SST	1,8	475	3790	5842

En el tramo 1, las condiciones de calidad frente a este parámetro fueron buenas. La carga media de SST respecto a los otros tramos es muy pequeña y la carga media presenta un aumento mínimo, que pasa de 1,7 a 1,8 t/año, y en el rango con valores entre 0,4-6 t/año frente al histórico 0,2-3,8 t/año (figura 3.30).

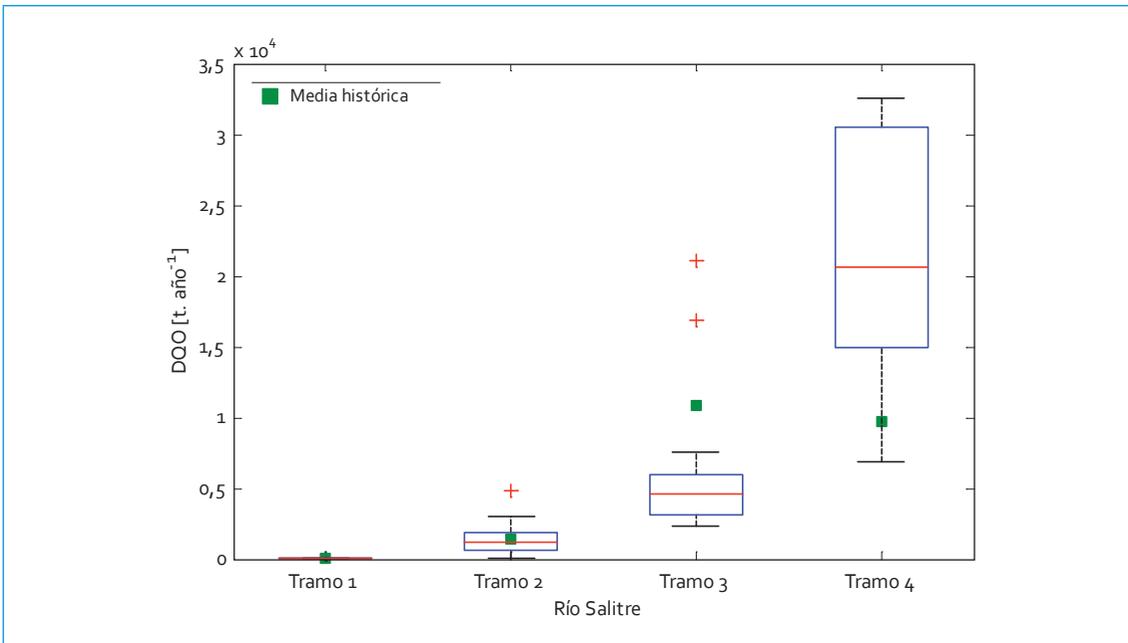


FIGURA 3.29. Perfil cargas DQO: río Salitre

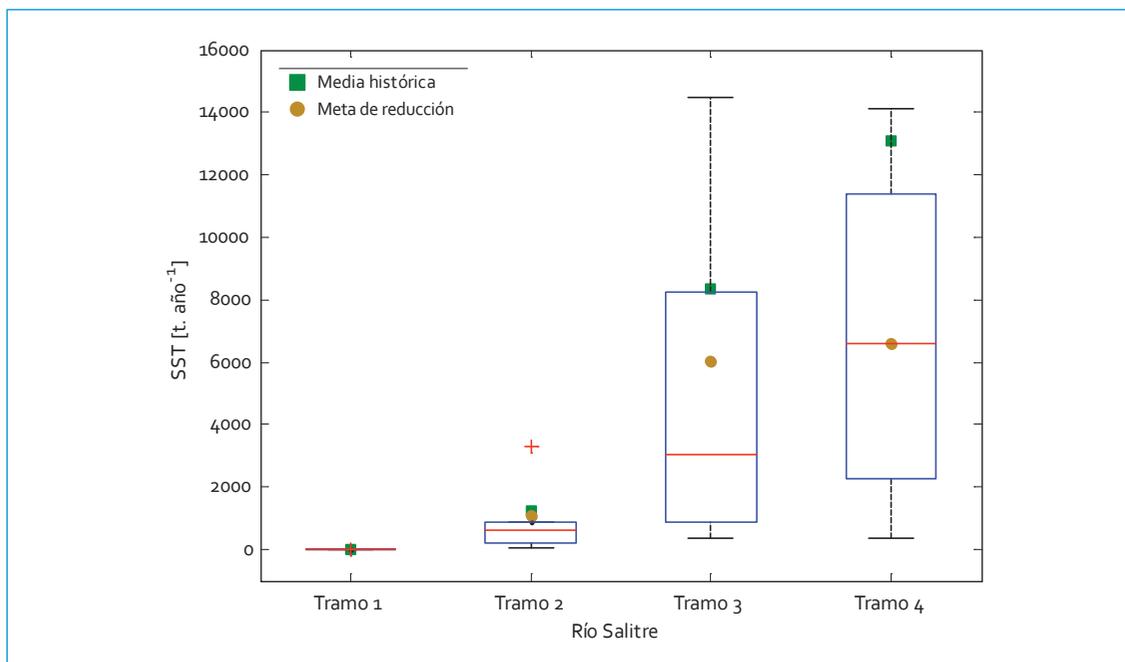


FIGURA 3.30. Perfil cargas SST: río Salitre

En el tramo 2, la media actual (475 t/año) se encontró por debajo del promedio histórico (1227 t/año), que mostró una reducción de casi la mitad. Las cargas oscilaron entre 74 y 893 t/año durante el día y en la noche. Respecto a las campañas 2009-2010 se presentaron variaciones entre ventanas bihorarias similares (2009/13:30-15:30 y 2010/13:00-15:00) y en diferentes días, para lo cual la carga de SST fue de 152 t/año (concentración: 57 mg/L y caudal: 134 L/s) y 152 t/año (concentración: 165 mg/L y caudal: 85 L/s), respectivamente. Ya que las condiciones hidrológicas no fueron las mismas, pues durante el cuarto trimestre del 2009 se presentaron condiciones de tiempo seco y, en el primer trimestre del 2010 condiciones húmedas, es de esperarse que las cargas varíen. Adicionalmente, la meta de reducción para este tramo 1100 t se encuentra por encima del promedio actual.

Para el caso del tramo 3 se observó un comportamiento similar al del tramo anterior, don-

de la carga media disminuyó en el tiempo, al pasar de 8336 a 3790 t/año. El rango de cargas presentó una amplitud mayor en contraste con el histórico, donde los valores mínimos fueron similares (histórico: 383 t/año y 2009-2010: 356 t/año); mientras que los máximos fueron muy diferentes (histórico: 33 118 t/año y 2009-2010: 14 501 t/año). La meta de reducción (6050 t) muestra una remoción elevada en cuanto a la carga actual.

La tendencia de reducción en SST continúa para el tramo 4, donde se observó un cambio entre los valores de la campaña 2009-2010 y los históricos, que variaron en promedio de 13 070 t/año a 5842 t/año. Luego de comparar las concentraciones reportadas para el cuarto trimestre del 2009 con las del segundo trimestre de 2010, entre las 13:00-15:00, caudal 625 L/s y régimen hidrológico húmedo para ambas campañas, se observó una disminución de la concentración (105 a 73 mg/L). Un efecto similar se presentó en ventanas horarias y caudales

parecidos (8:30-10:30, 438 L/s y 9:00-10:00, 458 L/s), donde la concentración cambió de 92 a 46 mg/L en las mismas campañas. Dadas las condiciones para este tramo, la meta de reducción (6600 t) refleja una alta remoción.

#### 3.1.2.4. Nitrógeno total

En el análisis de las cargas promedio de este parámetro se observó que la carga media en el primer tramo del río aumentó levemente en relación con el promedio histórico (figura 3.31), de 0,7 a 1,1 t/año y se presentó un cambio en el rango de variabilidad de cargas (al pasar de 0,03-1,7 t/año a 0,3-3 t/año).

TABLA 3.4. Carga promedio transportada  $N_{total}$ : río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
$N_{total}$	1,1	148	2779	1782

En el tramo 2, el rango de cargas se encontró entre 64 y 299 t/año. Se identificaron valores altos durante el día (8:00-14:00) relacionados con concentraciones elevadas entre 32 y 57 mg/L; por el contrario, durante la madrugada (12:00-5:00) se presentaron concentraciones bajas (9 y 14 mg/L), pero se obtuvieron las cargas máximas, debido a la sensibilidad de la curva de 24 horas en la extrapolación de cargas en la madrugada. Así mismo, la carga media (293 t/año) fue mayor que el promedio histórico (169 t/año).

Un incremento en la variabilidad de los datos se muestra en el tramo 3, donde el valor más grande fue 10 413 t/año respecto al histórico (1860 t/año), y el promedio de las cargas fue mayor (pasó de 1552 a 2279 t/año). El cambio del sitio de monitoreo para las campañas actuales limita una comparación más detallada entre las variaciones de caudal y concentración con los datos históricos reportados para este tramo.

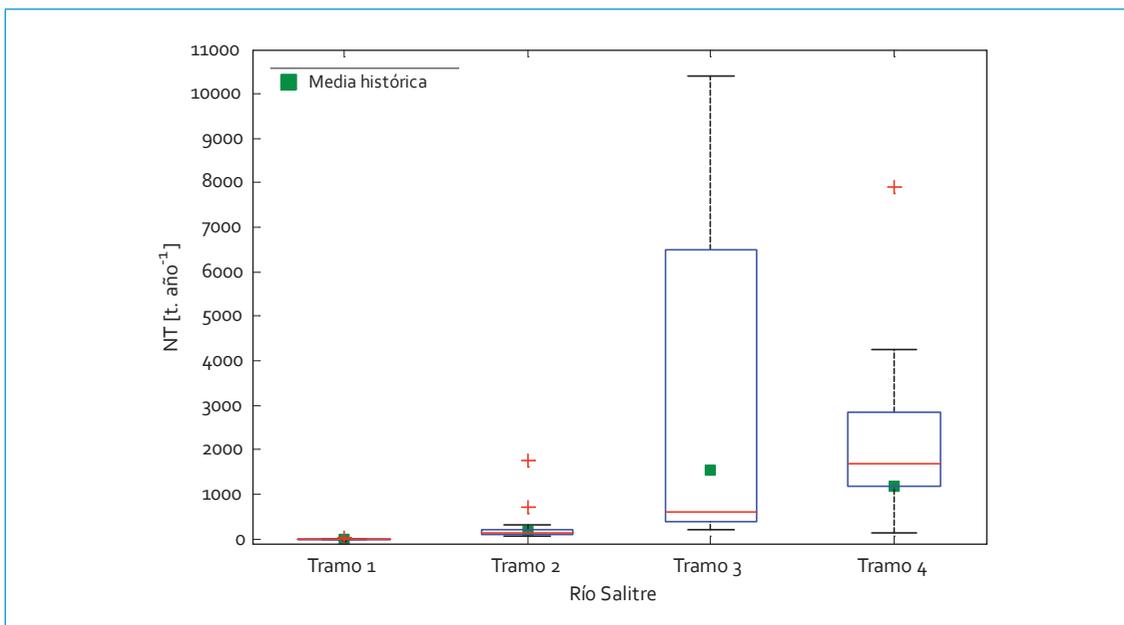


FIGURA 3.31. Perfil cargas  $N_{total}$ : río Salitre

Finalmente, en el tramo 4 las cargas que se presentaron tienen una variabilidad mucho menor que para el tramo anterior, con un rango entre 147 y 4262 t/año. La carga promedio (1782 t/año) aumentó en comparación con el valor histórico (1180 t/año). En este punto, el efecto de las descargas de agua residual doméstica que vierten a lo largo del río eleva las concentraciones de nitrógeno.

### 3.1.2.5. Fósforo total

La carga media promedio de fósforo total para los cuatro tramos del río Salitre se presenta en la tabla 3.5. Estos valores fueron calculados a partir de los resultados reportados en la campaña de monitoreo 2009-2010.

TABLA 3.5. Carga promedio transportada  $F_{total}$ : río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
$F_{total}$	0,04	13	156	293

Respecto a este parámetro, se observó que en el tramo 1 el valor de las cargas promedio medidas durante 2009-2010 frente a los valores históricos (0,1 t/año) ha disminuido (figura 3.32). Las concentraciones tuvieron poca variabilidad durante el día entre 0,05 y 0,2 mg/L, lo cual se refleja en los valores de carga (0,03-0,1 t/año).

El tramo 2 mostró una disminución en la carga media actual que varió de 25 a 13 t/año. Así mismo, se presentó una disminución de las cargas y de las concentraciones durante el día en comparación con los valores históricos. Los rangos correspondientes que se encontraban entre 3-293 t/año y 1-14 t/año oscilaron entre 6-29 t/año y 1-6 mg/L, respectivamente.

En el tramo 3 el 75% de los datos se encontró por encima de la carga media actual (156 t/año). Sin embargo, este valor fue menor al promedio histórico (336 t/año), lo que refleja una reducción en la carga contaminante para este punto. Este comportamiento muestra las diferencias que hay entre el punto de

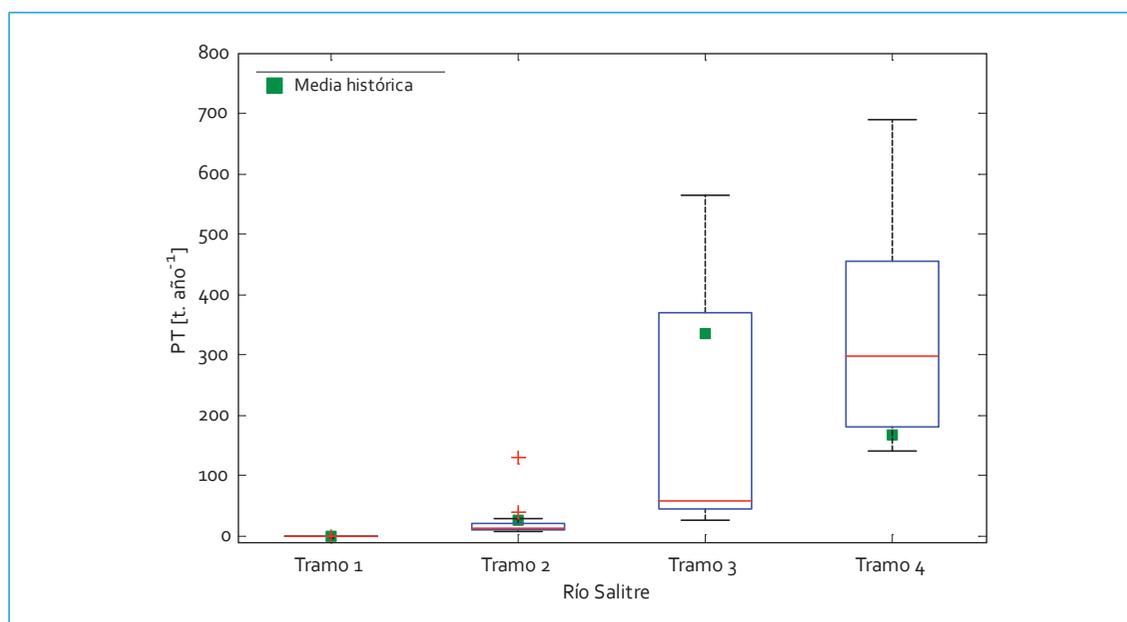


FIGURA 3.32. Perfil cargas  $F_{total}$ : río Salitre

monitoreo histórico, en el cual se contempla el efecto de río Nuevo y río Viejo y el utilizado durante la campaña 2009-2010, ubicado aguas arriba.

Finalmente, en el tramo 4 el incremento de las cargas mostró un deterioro de las condiciones del río respecto al fósforo total, donde la media del periodo 2009-2010, 293 t/año, excedió el promedio histórico, 168 t/año.

### 3.1.2.6. Grasas y aceites

En relación con las grasas y aceites, la tabla 3.6 presenta la carga promedio transportada en el río Salitre, medida en la campaña 2009-2010, donde la menor concentración se presentó en el primer tramo, y a partir del segundo, la carga aumentó debido a las descargas de agua residual doméstica que se presentan a lo largo del río, mismo fenómeno observado para todos los otros parámetros de calidad.

TABLA 3.6. Carga promedio transportada grasas y aceites: río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
Grasas y aceites	2,4	125	1437	3396

El tramo 1 presentó una disminución en la carga media de grasas y aceites que va de 5,2 a 2,4 t/año con variaciones entre 1,3 y 1,8 t/año durante el día y rango de 0,7 a 7,4 t/año (figura 3.33). Este comportamiento muestra que la calidad en este punto sigue siendo buena.

A partir del tramo 2 se percibieron incrementos en la carga media, que variaron las condiciones de calidad de este parámetro respecto al tramo anterior. Esto, nuevamente, se debe a los vertimientos domésticos que comienzan a presentarse en esta zona y que aportan concentraciones mayores de grasas y aceites. Este deterioro del río fue más evidente a partir del tramo 3, donde el promedio de las

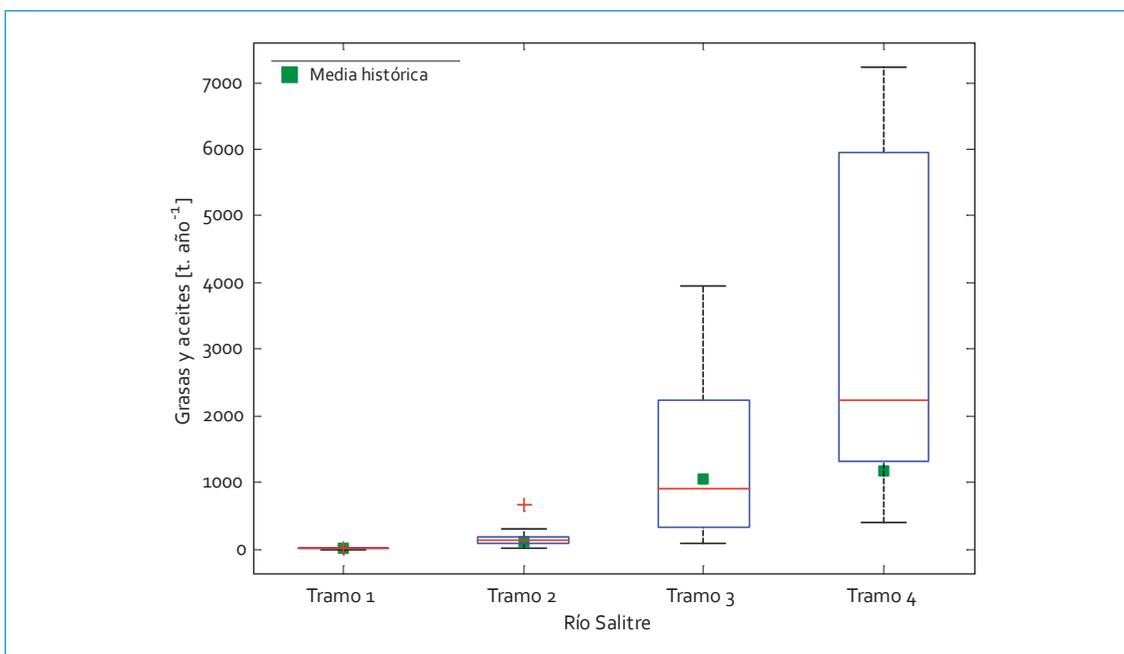


FIGURA 3.33. Perfil cargas grasas y aceites: río Salitre

cargas 2009-2010, 1437 t/año, fue mayor que el valor histórico 1053 t/año. Finalmente, en el tramo 4 la carga media se incrementó significativamente con un valor de más del doble de la carga histórica (1172 t/año).

### 3.1.2.7. SAAM

En el tramo 1, las condiciones del agua respecto a este parámetro se mantuvieron constantes (figura 3.34). La carga media de la campaña 2009-2010 fue igual al valor histórico (0,1 t/año), y el rango de valores presentó pocas variaciones en el día, entre 0,02 y 0,3 t/año.

TABLA 3.7. Carga promedio transportada SAAM: río Salitre

Parámetro	río Salitre (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
SAAM	0,1	16	119	766

Para el segundo tramo las cargas aumentaron gradualmente con respecto a los valores históricos. El período de mayor variación se presentó durante el día, entre las 7:00 y 16:00, con un rango entre 2 y 25 t/año. Se encontró que las cargas correspondientes a horas del día similares (9:00-11:00 y 9:30-10:30 respectivamente) fueron iguales (25 t/año). La carga promedio transportada reflejó un comportamiento relativamente constante en el tiempo (promedio histórico 18 t/año). En el tramo 3 la carga media presentó un incremento importante, ya que su valor (119 t/año) fue mayor al doble del histórico (55 t/año). Al igual que en el segundo tramo, la mayor actividad se presentó durante el día con cargas entre 50 y 235 t/año como resultado de las descargas domésticas presentes en la zona. Las cargas más altas de SAAM en el río se encontraron en el tramo 4. Los valores de la campaña fueron mayores que los históricos y, por lo tanto, se alejan de su rango (figura 3.34).

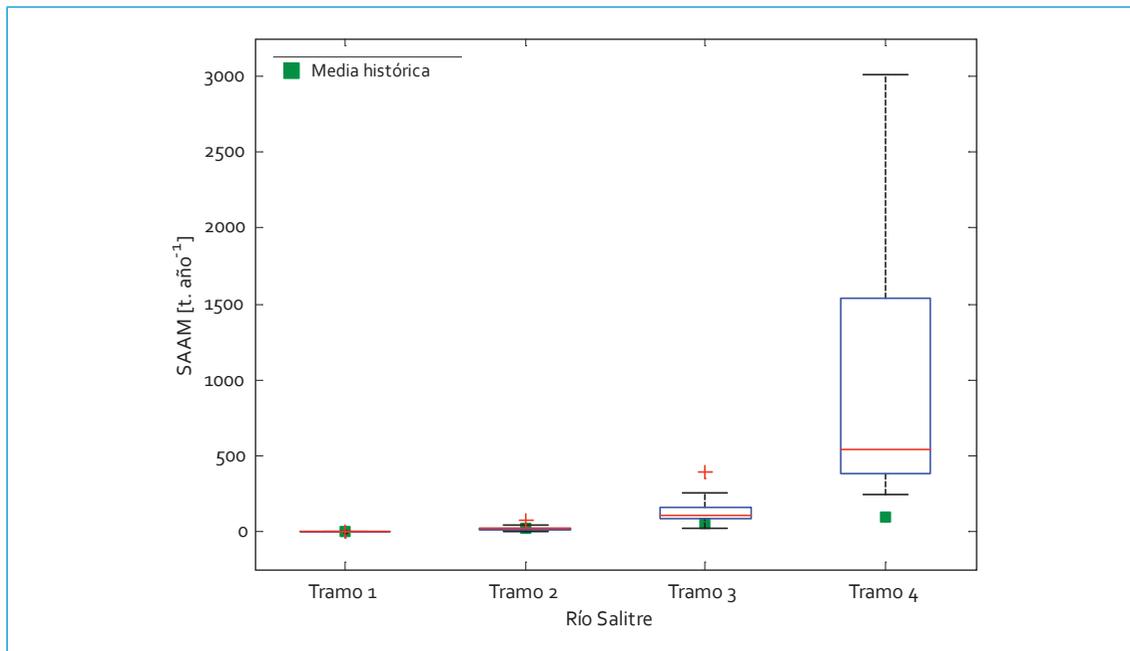


FIGURA 3.34. Perfil cargas SAAM: río Salitre

### 3.2. Calidad del agua (WQI)

Los resultados para el tramo 1 corresponden al punto de monitoreo Parque Nacional, para el cual se evaluaron 202 datos de los cuales doce excedieron los objetivos de calidad. A partir del cálculo del WQI, se observó que la calidad en este punto es buena y se mantuvo constante en comparación con el período 2008-2009 (tabla 3.8). Se presentó un incremento en el número de datos fuera de los objetivos de calidad, en comparación con los valores reportados para el período anterior (2008-2009), especialmente para el oxígeno disuelto, donde once datos de trece se encuentran por debajo del objetivo de calidad (7 mg/L), mientras que el rango de datos que exceden estuvo entre 5,2 y 6,2 mg/L. Por otra parte, la cantidad de parámetros que excedieron al menos una vez se mantuvo constante. A diferencia del período 2008-2009, las grasas y aceites se encuentran por debajo del límite (10 mg/L), y en su lugar se observa que el pH está por fuera del rango establecido como objetivo de calidad (5-9 unidades).

De acuerdo con esto es posible afirmar que aunque la calidad del río en este tramo siga siendo buena, se presentan incrementos en los datos que no satisfacen los objetivos, lo cual podría modificar sustancialmente su calidad si no se controlan estas variaciones.

El tramo 2 tiene dos puntos de monitoreo, Arzobispo y Carrera 30 x Calle 53, y un total de 418 datos de los cuales 82 no alcanzaron los objetivos de calidad. En este punto se presentaron incrementos en los datos de excedencia para los diferentes parámetros (tabla 3.9). Frente al WQI obtenido en el período 2008-2009 la calidad del río se mantuvo en marginal. El parámetro que mayor efecto tuvo sobre la variación de la calidad fueron los SST, donde el 40% de los datos, es decir doce valores de

TABLA 3.8. WQI río Salitre: tramo 1

Parámetro	Num. datos que no cumplen	VARIABLES	Valor
OD	11	F1	20
DBO	0	F2	5,941
DQO	0	NSE	0,013
N <sub>total</sub>	0	F3	1,304
F <sub>total</sub>	0	WQI	87,93
SST	0		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	1		
SAAM	0		

un total de treinta, excedieron el objetivo de calidad (80 mg/L), con un rango de datos que excedía entre 85 y 163 mg/L. Lo contrario fue observado para el oxígeno disuelto, pues el porcentaje de datos que no cumplió disminuyó de 35,3% a 27,6%, si se compara con el período 2008-2009 y con el objetivo de calidad para este tramo (2 mg/L). Los valores que se encontraban por debajo de 2 mg/L correspondían al punto Carrera 30 x Calle 53, donde el efecto de las descargas de agua residual doméstica durante el día (entre 6:00 y 16:00) no sólo disminuye la concentración de oxígeno disuelto, sino que también aumenta la concentración de materia orgánica, nitrógeno total y coliformes fecales en el río. Este último parámetro se encuentra dentro de los que más incumple y al igual que los SST, el 40% de los datos exceden el objetivo ( $1 \times 10^6$  NMP/100 mL).

Para el caso del tramo 3 (tabla 3.10), donde se encuentran los puntos Carrera 30 x Calle 53 y Carrefour Avenida 68, el total de datos evaluados fue 416, entre ellos 139 valores que sobrepasan los objetivos de calidad. Al igual que

TABLA 3.9. WQI río Salitre: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
OD	8	F <sub>1</sub>	90
DBO	7	F <sub>2</sub>	19,570
DQO	10	NSE	0,348
N <sub>total</sub>	10	F <sub>3</sub>	25,800
F <sub>total</sub>	0	WQI	45,000
SST	12		
Grasas y aceites	10		
Coliformes fecales	12		
pH	2		
SAAM	11		

en el segundo tramo, ocurre un deterioro en la calidad del río, al pasar de marginal (período 2008-2009) a pobre, a su vez ocasionado por el incremento de datos fuera de los objetivos de calidad. En este punto todos los parámetros exceden, al menos una vez, los objetivos. Los tensoactivos, grasa y aceites y coliformes fecales, seguido del oxígeno disuelto son los que en mayor grado excedieron los valores objetivo (67% de grasas y aceites y coliformes fecales y 77% de SAAM). Durante los monitoreos diurnos (entre las 9:00 y 13:00) se presentó un incremento en la concentración de DBO, nitrógeno total y coliformes fecales en los dos puntos de monitoreo, relacionados con la materia orgánica presente, debido a las descargas de agua residual doméstica que se presentan en ese tramo. La DBO mostró un incremento importante en el número de datos para el

período actual: de treinta valores en total trece de estos excedieron los objetivos, en contraste con los resultados para 2008-2009, donde tan sólo uno de veinticuatro datos en total se encontraba por encima del objetivo de calidad (150 mg/L).

Es importante aclarar que la variación de los parámetros entre el período anterior 2008-2009 y el actual 2009-2010 puede estar influenciada por la nueva ubicación del punto de monitoreo Carrefour Avenida 68 hacia aguas arriba para las campañas que se realizaron.

TABLA 3.10. WQI río Salitre: tramo 3

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
OD	19	F <sub>1</sub>	100
DBO	13	F <sub>2</sub>	33,40
DQO	14	Nse	0,38
N <sub>total</sub>	17	F <sub>3</sub>	27,40
F <sub>total</sub>	7	WQI	37,10
SST	4		
Grasas y aceites	20		
Coliformes fecales	20		
pH	2		
SAAM	23		

Finalmente, en el tramo 4 se encuentran los puntos Carrefour Avenida 68, Transversal 91, Planta Salitre y Salitre con Alameda, para los cuales se evaluaron en total 822 datos, de los cuales 234 excedieron los objetivos de calidad (tabla 3.11).

TABLA 3.11. WQI río Salitre: tramo 4

Parámetro	No. datos que no cumplen	Variables	Valor
OD	45	F1	100
DBO	13	F2	28,782
DQO	16	Nse	0,3682
N <sub>total</sub>	22	F3	26,910
F <sub>total</sub>	10	WQI	37,94
SST	10		
Grasas y aceites	22		
Coliformes fecales	48		
pH	1		
SAAM	47		

En este punto la calidad del río fue pobre. El efecto de las actividades domésticas a lo largo del río refleja un aumento en los datos que exceden los objetivos, sobre todo si se tiene en cuenta que a partir del segundo tramo del río el WQI muestra esta clasificación. Respecto al período anterior 2008-2009, el WQI se mantuvo en el mismo rango con una variación pequeña de 35,89 a 37,94. Los parámetros que presentaron mayor excedencia fueron oxígeno disuelto (con 83% de los datos), coliformes fecales (con 89%) y tensoactivos (con 87%), que se encuentran por encima de los objetivos de calidad establecidos para cada uno (0,5 mg/L,  $1 \times 10^6$  NMP/100 mL y 3 mg/L respectivamente). El nitrógeno total presentó una excedencia del 40% de los datos, al igual de las grasas y aceites durante el día (10:00 y 15:30), con pequeños incrementos en la madrugada (figura 3.35).

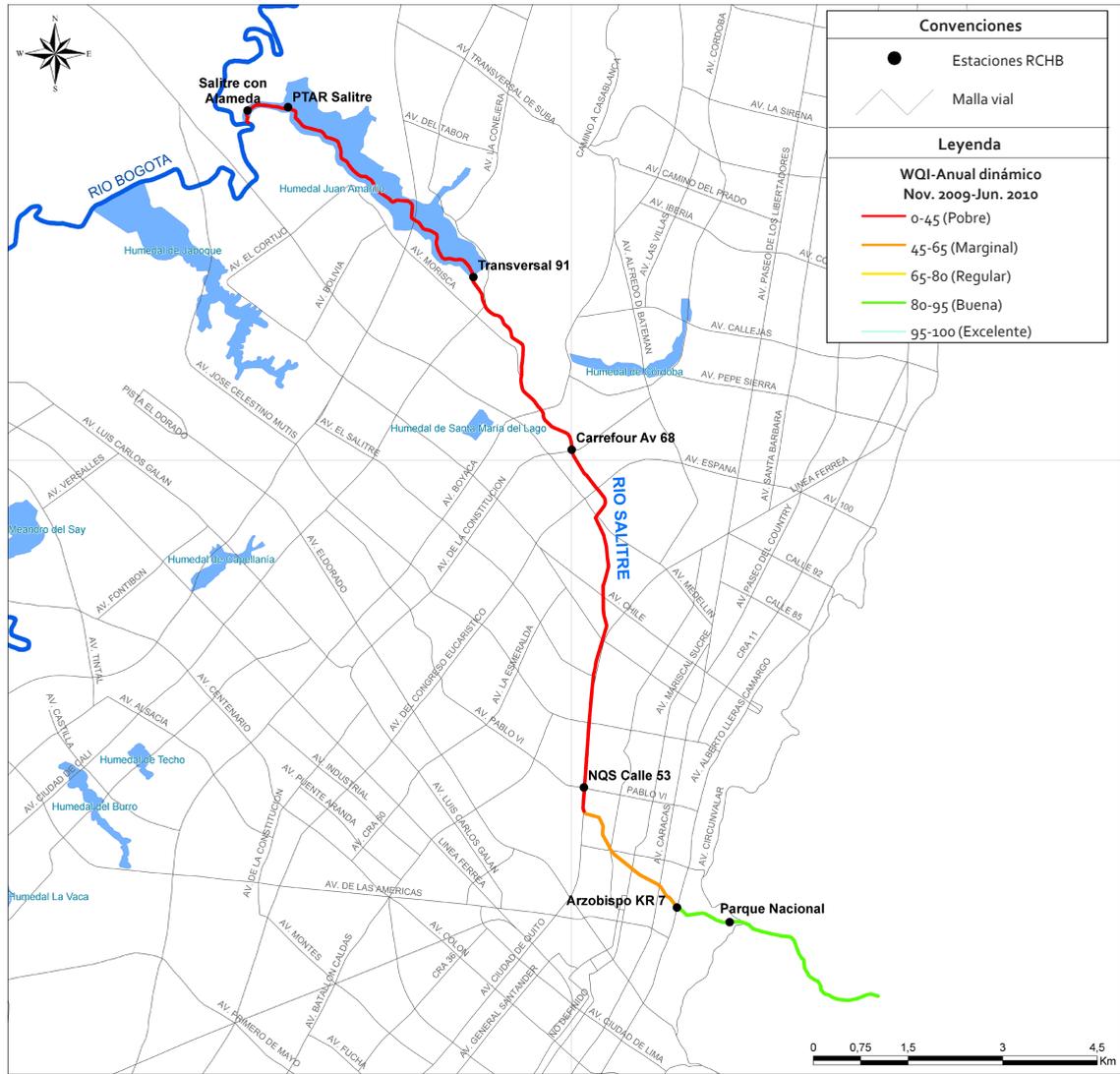


FIGURA 3.35. Mapa de calidad: río Salitre

## 4. RÍO FUCHA

### 4.1. Resultados del monitoreo físicoquímico

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

##### 4.1.1.1. Caudal

El comportamiento del caudal para el río Fucha presentó un incremento constante causado por las numerosas descargas vertidas a lo largo de su curso (figura 4.1). Para el primer punto FU-Delirio, la mediana 2009-2010 fue un poco mayor a la histórica (166 y 119 L/s, respectivamente). A partir de ese punto se constató un aumento gradual de la mediana de la campaña respecto a la histórica hasta el punto Avenida Ferrocarril (FU-Ferroca). Se presentó una mayor diferencia en el punto Carrera 7ª (FU-KR7), donde se registraron caudales del orden de 766 L/s, 70% mayor que la mediana histórica (452 L/s). Esto se debe a que los caudales registrados para el primer semestre del 2010 pertenecieron a una época de lluvias que predominó en los meses abril a junio, y cuando se registraron los caudales más altos del semestre. Para este punto se registró un caudal atípicamente alto (2452 L/s), en mayo del 2010, el cual coincidió con una fuerte

precipitación entre las 12:00 y las 14:00. Para FU-Ferroca las diferencias entre la mediana 2009-2010 y la histórica fueron bajas (623 y 579 L/s, respectivamente). El leve aumento para este período de monitoreo también estuvo asociado a la época de lluvias, especialmente en los meses de abril a junio del 2010.

Para los puntos Avenida Las Américas (FU-América) y Visión Colombia (FU-VisiónC) se presentó el mismo caso de Av. Ferrocarril, pues la mediana 2009-2010 y la histórica difiere en un 10% aproximadamente para Av. Las Américas, y para Visión Colombia ambas medianas son prácticamente iguales.

Los caudales registrados para esta campaña se encuentran dentro del rango histórico. Es importante resaltar el muy alto incremento en el caudal entre el punto Av. Boyacá (FU-Boyacá) y Visión Colombia, en los cuales se descargan cerca de 4000 L/s de aguas residuales provenientes de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur. Para los puntos de monitoreo Zona Franca (FU-ZFranca) y Fucha con Alameda (FU-Alameda) las medianas de la campaña estuvieron cercanas a las históricas; además, todos los valores se encontraron dentro de los rangos típicos de comportamiento de cada punto monitoreado (figura 4.1).

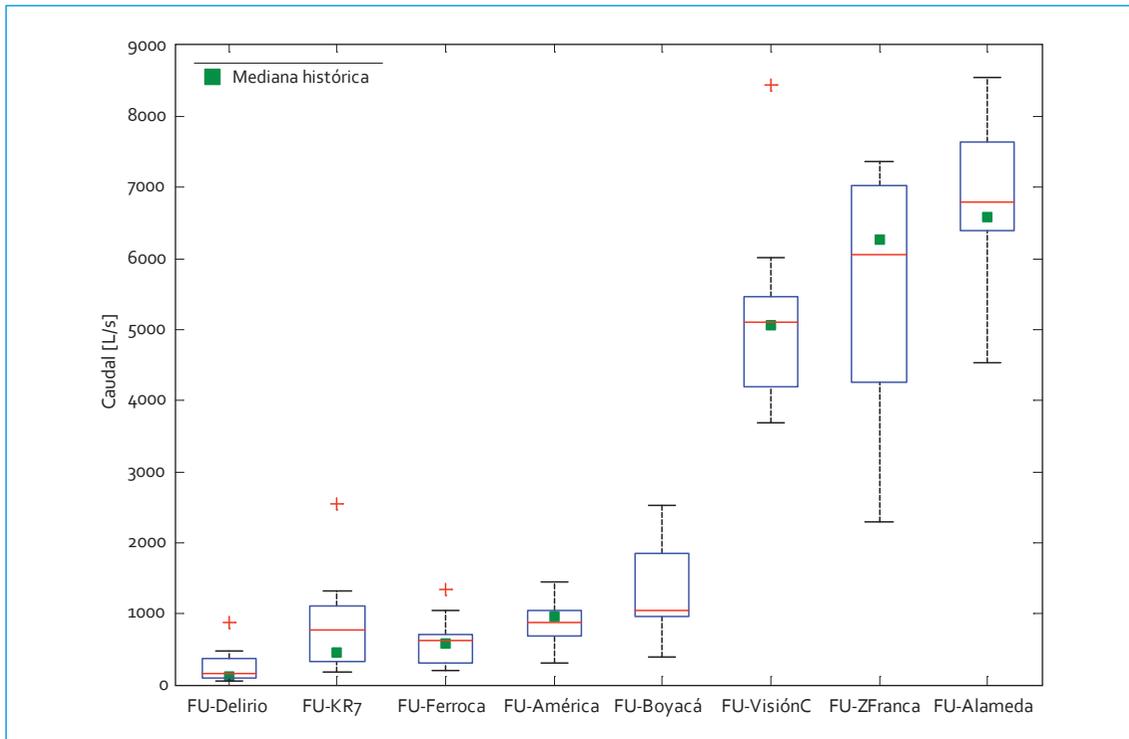


FIGURA 4.1. Perfil caudal: río Fucha

#### 4.1.1.2. Alcalinidad

El comportamiento de la alcalinidad en el río Fucha fue ascendente a medida que llega a su desembocadura (figura 4.2). Para FU-Delirio las concentraciones de alcalinidad fueron muy bajas, teniendo una mediana de 12 mg/L, cuya fuente es principalmente el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en el agua natural. En FU-KR7, la alcalinidad aumentó considerablemente (mediana 125 mg/L), lo cual está relacionado con la presencia de aguas residuales, ya que los nitratos y los fosfatos presentes en estas descargas también contribuyen a aumentar alcalinidad. Para FU-Ferroca la mediana de alcalinidad fue idéntica a FU-KR7 (125 mg/L); sin embargo, se presentaron valores más altos (198 y 196 mg/L) que

podieron estar relacionados con concentraciones altas de fósforo total que se registraron el mismo día del monitoreo. Para FU-América, el rango de variabilidad fue mayor, lo que hizo disminuir la mediana (103 mg/L) respecto a los anteriores puntos de monitoreo; no obstante, el rango de comportamiento fue similar que para los puntos Cra 7ª y Av. Ferrocarril.

En el punto FU-Boyacá se encontró un aumento importante en la mediana de alcalinidad (90%), muy seguramente causado por la presencia de descargas de aguas residuales industriales aguas arriba de la avenida Boyacá. En FU-VisiónC la mediana de alcalinidad aumentó a 276 mg/L y siguió un comportamiento constante en FU-ZFranca y FU-Alameda, donde las medianas de alcalinidad se encontraron en 253 y 271 mg/L, respectivamente.

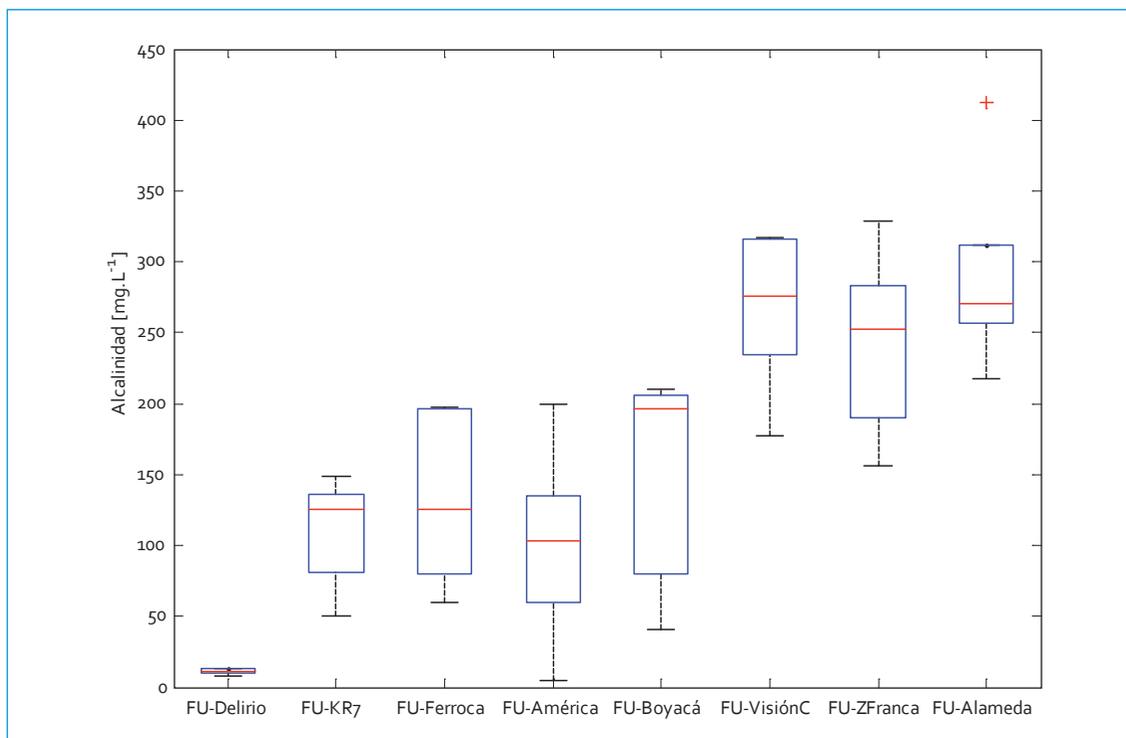


FIGURA 4.2. Perfil alcalinidad: río Fucha

#### 4.1.1.3. Dureza

Al igual que la alcalinidad, no se tienen datos históricos para dureza y el comportamiento de la dureza en el río fue ascendente hacia aguas abajo (figura 4.3); sin embargo, su variación en términos de mediana no fue tan significativa entre cada punto de monitoreo. Para FU-Delirio, la dureza fue muy baja, al tener una mediana de 14 mg/L. En FU-KR7, los niveles de dureza aumentaron considerablemente (mediana 45 mg/L), lo cual nuevamente está relacionado con la descarga de aguas residuales sobre el río. En FU-Ferroca la mediana de dureza fue idéntica a FU-KR7 (45 mg/L); pero el rango de variabilidad en este punto fue menor (36 a 87 mg/L). En FU-América, el rango de variabilidad fue mayor, lo que hizo incrementar la mediana (108 mg/L) respecto a los puntos anteriores de monitoreo. Es importante resaltar la

similitud que tiene el comportamiento de la alcalinidad analizado en el inciso anterior, con el de la dureza, pues los datos más altos de dureza coinciden con concentraciones altas de alcalinidad.

Para el punto FU-Boyacá la dureza disminuyó levemente, pero en FU-VisiónC se observó un aumento importante en la mediana de alcalinidad (138 mg/L) y, además, se registraron valores tan altos como 662 mg/L de dureza. A partir de este punto, la dureza sigue un comportamiento constante en FU-ZFranca y FU-Alameda, donde las medianas de alcalinidad fueron de 95 y 103 mg/L, respectivamente.

#### 4.1.1.4. pH

En el caso del pH, el comportamiento de las medianas no fue muy diferente y su variación entre los puntos de monitoreo fue moderada

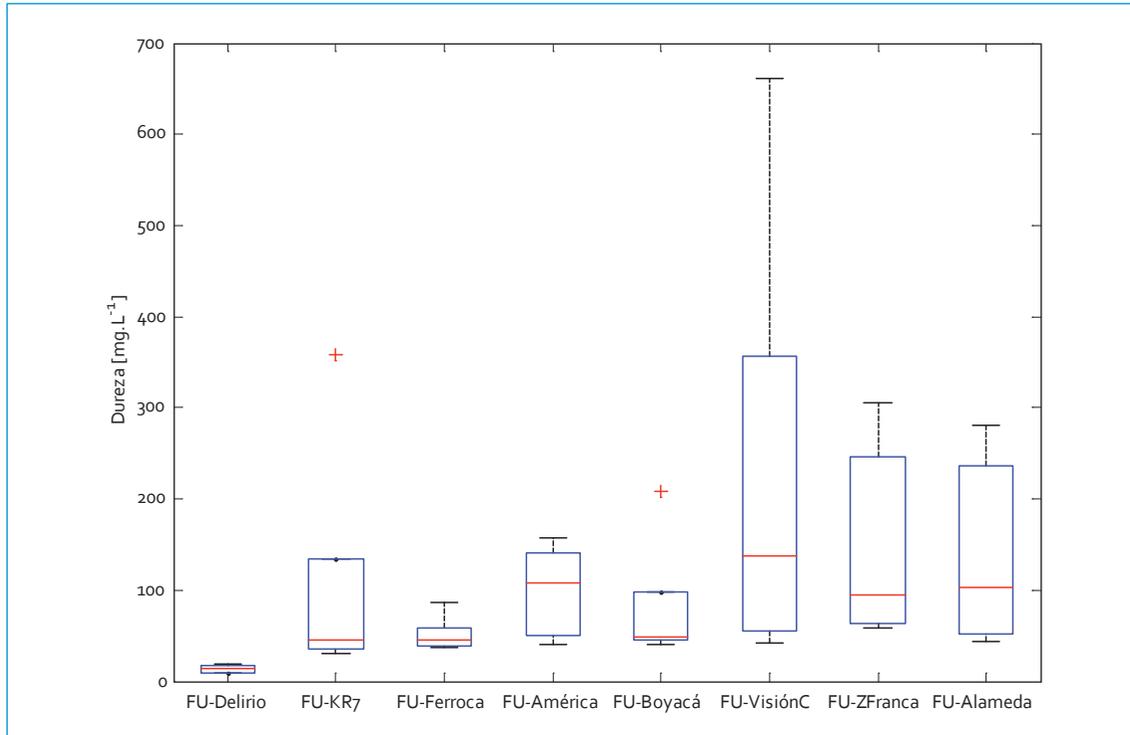


FIGURA 4.3. Perfil dureza: río Fucha

(figura 4.4). Las medianas históricas están muy cercanas a los registros obtenidos en la campaña, lo que dio lugar a un comportamiento constante para este parámetro. De lo más destacado se debe resaltar el comportamiento que tiene el pH en el punto Avenida Boyacá, ya que se midió un aumento en la mediana a 8,2 unidades, y además se registraron valores tan altos como 9,44. Con estos valores se evidencia el efecto de las descargas de agua residual de tipo industrial aguas arriba de este sitio de monitoreo. A partir de este punto, el pH siguió un comportamiento similar en FU-VisionC, FU-ZFranca y FU-Alameda, en que las medianas se encontraron en condiciones neutras. Para el punto Zona Franca también se observó un leve aumento en el pH en relación con la mediana histórica (7,30); además, los valores registrados para estos períodos de monitoreo sobrepasaron el rango histórico

de este sitio (6,65-8,17), dado que el registro máximo fue 8,71.

#### 4.1.1.5. Conductividad

Aunque no existan valores históricos para este parámetro, se observa la importancia de monitorear este parámetro en el río Fucha, ya que evidencia grandes afectaciones provenientes de las descargas de agua residual. La medición de conductividad permite obtener una aproximación indirecta de la presencia de contaminantes en el agua. Entre otros parámetros determinantes de calidad de agua, la conductividad también demuestra una afectación importante de las descargas que están ubicadas aguas arriba de la Avenida Boyacá.

Se presentaron diferencias significativas entre los primeros puntos de monitoreo (figura 4.5), especialmente en el sitio Avenida Boyacá,

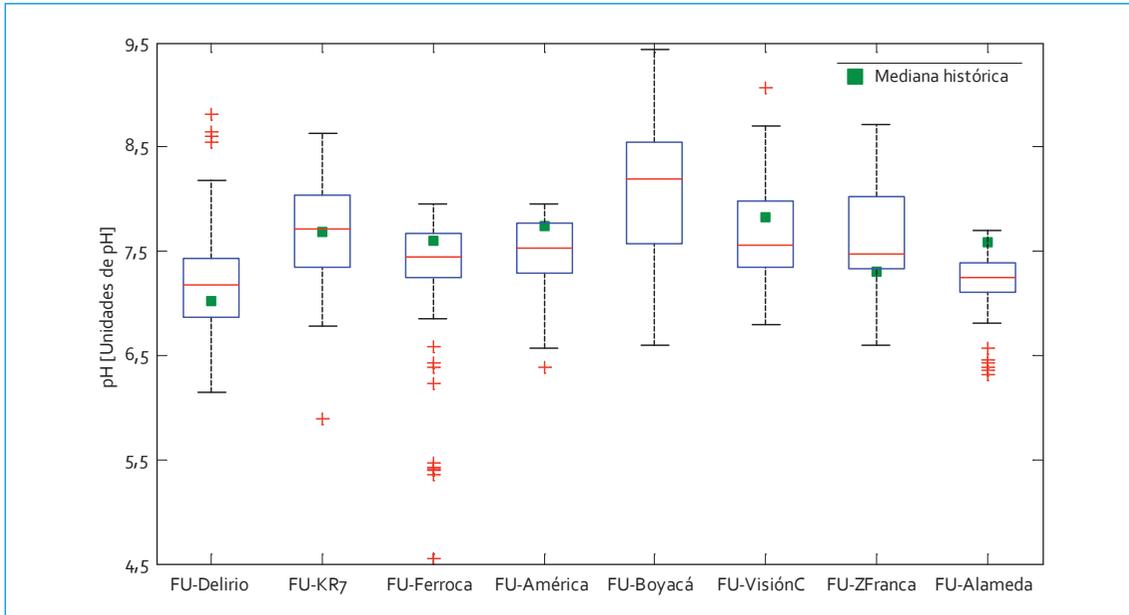


FIGURA 4.4. Perfil pH: río Fucha

donde la conductividad aumentó considerablemente, al alcanzar valores hasta  $1754 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Es evidente el aumento en la conductividad a

medida que el río va llegando a su desembocadura. En la parte alta del río (FU-Delirio) se presentaron valores bajos (aproximadamente

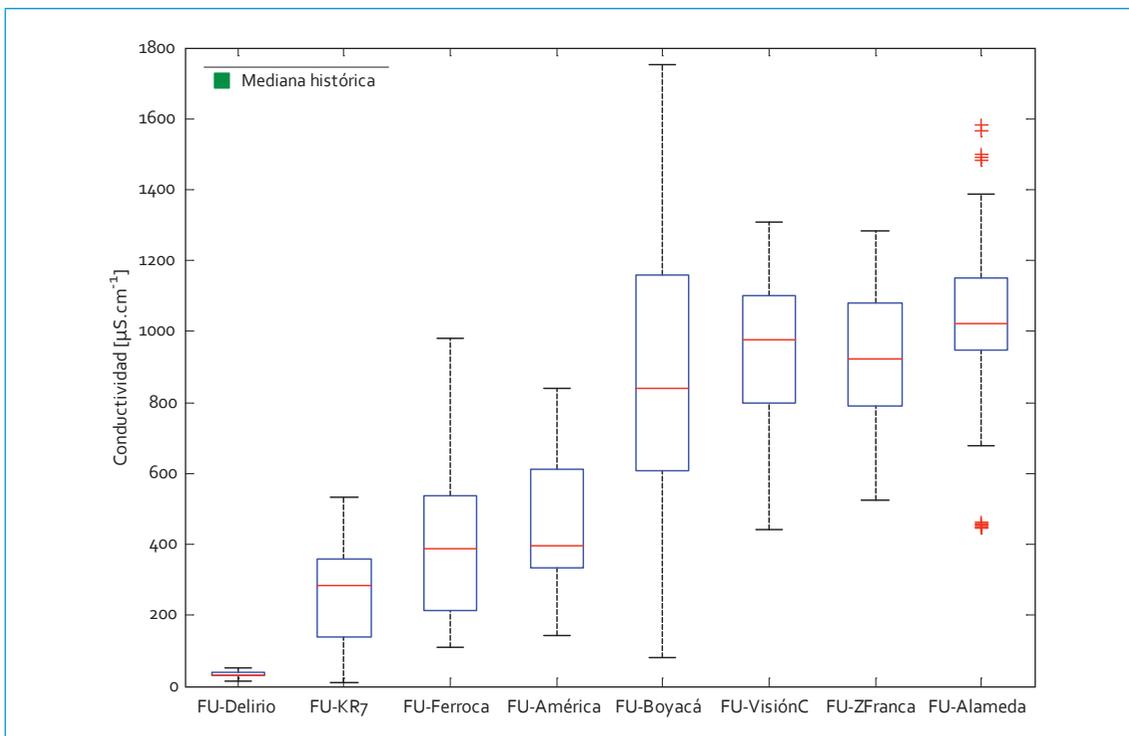


FIGURA 4.5. Perfil de conductividad: río Fucha

30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); mientras que en la zona baja se presentaron valores medios alrededor de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esto claramente evidencia la afectación que presenta el río a lo largo de su recorrido. Para los demás sitios de monitoreo, todos los valores se encontraron dentro de los rangos típicos de comportamiento de cada punto estudiado. Desde la Av. Boyacá hasta la desembocadura, la mediana de conductividad tuvo un comportamiento muy similar (por el orden de 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

#### 4.1.1.6. Oxígeno disuelto

Se encontraron diferencias significativas entre los puntos El Delirio y Carrera 7ª respecto a los puntos aguas abajo (figura 4.6). En estos dos primeros puntos se presentaron medianas de concentración de 8 y 5 mg/L, respectivamente;

mientras que en los otros puntos monitoreados la concentración cayó abruptamente a valores menores a 1 mg/L, incluso a valores no detectables, como es el caso de los puntos ubicados aguas abajo de la Avenida Boyacá.

En cuanto a los valores históricos, se pudo observar que la concentración de oxígeno disuelto se ha mantenido en el punto FU-Delirio, donde la mediana para este punto es cercana a 7,9 mg/L. Para el punto FU-KR7 se evidenció una leve disminución en la mediana 2009-2010, ya que históricamente la mediana de concentración es 5,8 mg/L y para la campaña de monitoreo este valor fue 5,2 mg/L, causado por el registro de oxígeno disuelto de hasta 1,2 mg/L en este punto de monitoreo, aun cuando los datos registrados para 2009-2010 se encuentran dentro del rango histórico.

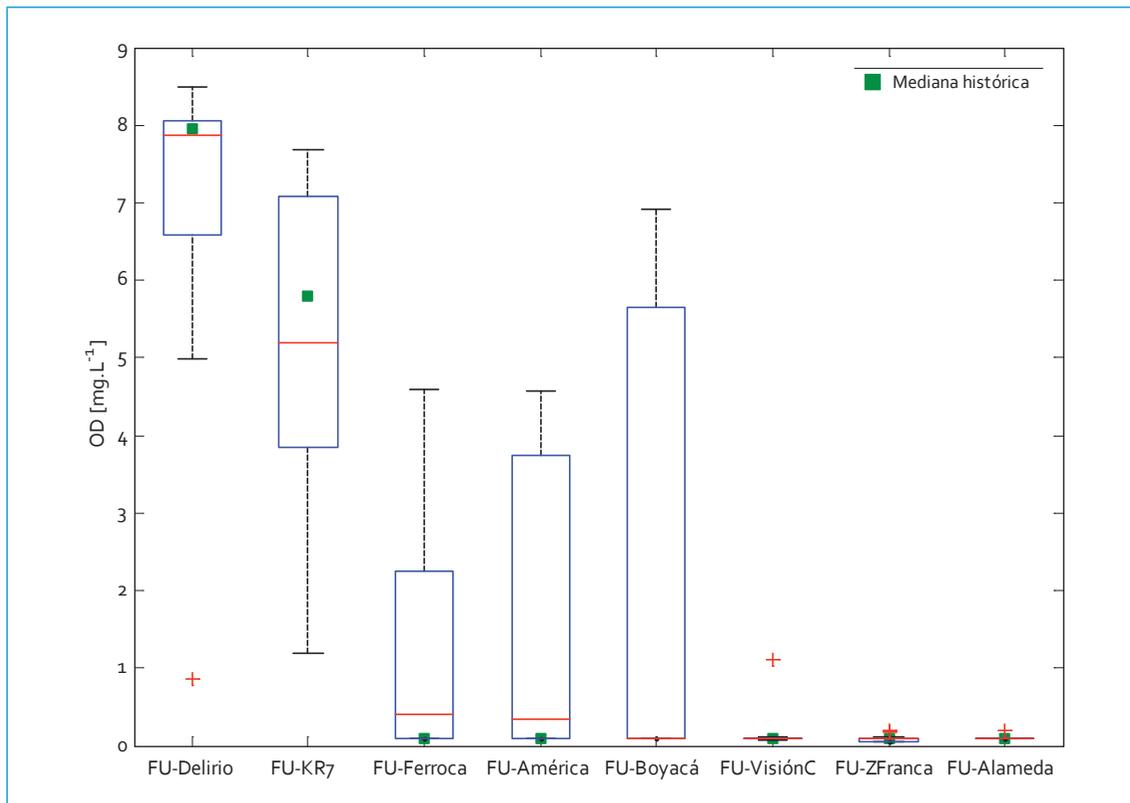


FIGURA 4.6. Perfil de oxígeno disuelto: río Fucha

En el punto FU-Ferroca es evidente la fuerte caída de las cantidades de oxígeno disuelto, cuya mediana 2009-2010 fue 0,4 mg/L, que aunque tiene una gran variabilidad en los datos, el 75% de éstos se encuentran por debajo de 2,3 mg/L, las concentraciones de oxígeno disuelto han aumentado un poco, teniendo en cuenta que la mediana histórica se encuentra en 0,1 mg/L. En el punto Av. Las Américas también se encontró alta variabilidad en los datos registrados, pues tuvo un comportamiento muy similar al punto aguas arriba Av. Ferrocarril. La mediana de concentración se mantuvo en 0,4 mg/L, pero se obtuvieron datos de hasta 4,6 mg/L en monitoreos realizados entre las 4:00 y las 6:00, lo cual puede indicar que en la madrugada las cantidades de oxígeno disuelto suben un poco, posiblemente causado por la disminución o ausencia de descargas a estas horas del día. Caso similar se presentó en el punto FU-Boyacá, el cual, a pesar de que las cantidades de oxígeno disuelto caen a valores no detectables, se registraron concentraciones por el orden de 6 mg/L, justamente en la ventana horaria de 4:00 a 6:00. Finalmente, en los últimos puntos del río Fucha, Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda, las concentraciones de oxígeno disuelto son nulas, lo cual refleja las muy altas cargas orgánicas transportadas por el río en estos puntos bajos.

#### 4.1.1.7. DBO

La demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) tuvo un comportamiento ascendente a lo largo del río Fucha (figura 4.7). Se observó un incremento en la concentración de la  $DBO_5$  a partir del punto de monitoreo Carrera 7ª hasta el punto Visión Colombia, donde se incrementó súbitamente, debido a la descarga de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur,

que se encuentran aguas arriba de este punto de monitoreo.

Para el punto FU-KR7 se encontró un aumento en la mediana actual (73 mg/L) respecto a la histórica (28 mg/L); además, los registros de la campaña 2009-2010 superan el rango histórico (DBO máx. 89 mg/L vs. 171 mg/L). En Avenida Ferrocarril, Avenida Las Américas y Visión Colombia se registró una disminución en el valor de la mediana 2009-2010 frente a la mediana histórica, que indica un posible leve mejoramiento en la calidad de agua en relación con este parámetro. Para el punto Avenida Boyacá no se tienen datos históricos; sin embargo, se pudo constatar el aumento en la mediana de DBO desde el punto Av. Las Américas (88 a 148 mg/L) y se resalta el efecto que tienen las descargas industriales vertidas aguas arriba de la Avenida Boyacá. Para los puntos de monitoreo Zona Franca y Fucha Alameda se encontró un aumento respecto a los registros históricos, en el cual cada mediana (230 y 282 mg/L, respectivamente) fue mayor a la mediana histórica (202 y 232 mg/L, respectivamente). Al parecer, para la mayoría de puntos, las condiciones críticas de concentración se dan en horas de la tarde.

#### 4.1.1.8. DQO

Al igual que la *demanda química de oxígeno* ( $DBO_5$ ), la DQO se incrementa a lo largo del río Fucha (figura 4.8). También se encontró un progresivo aumento en la concentración de la DQO desde el punto de monitoreo Carrera 7ª hasta el punto Visión Colombia, donde el aumento se da de forma muy fuerte, y a partir de allí las medianas de DQO varían muy poco hasta la desembocadura del río.

Para el punto FU-Delirio el comportamiento de la DQO no presentó variaciones

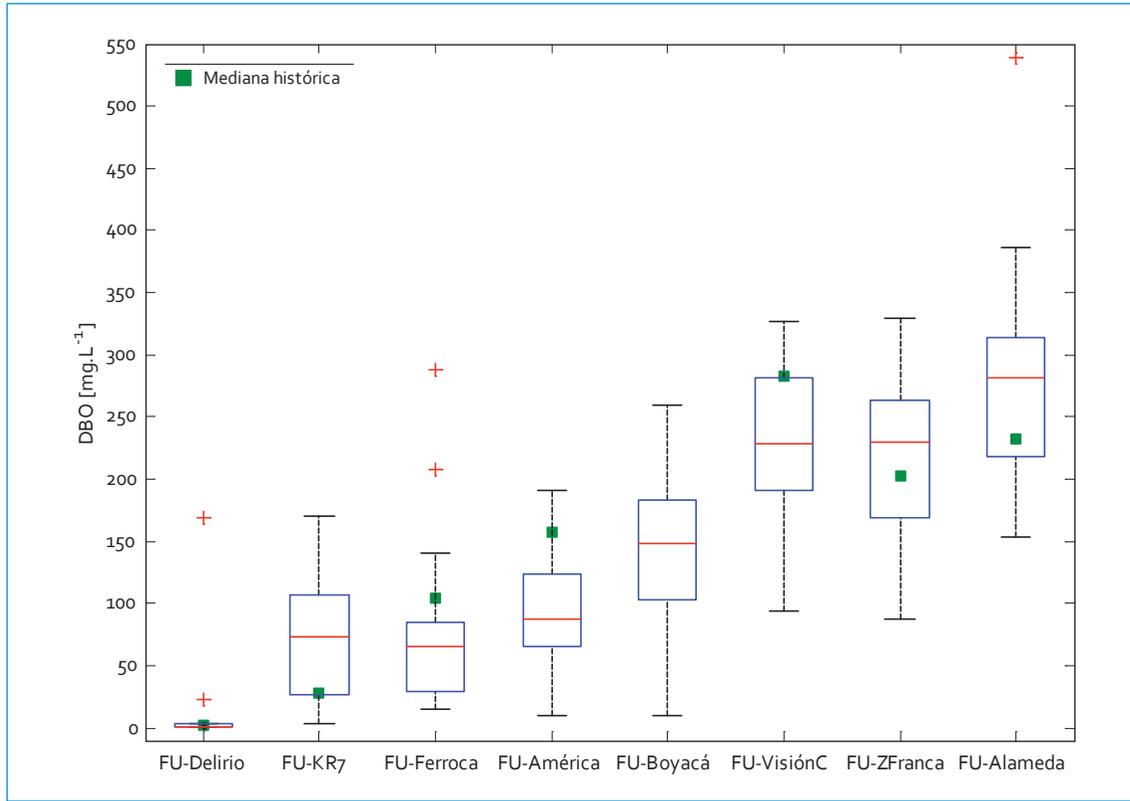


FIGURA 4.7. Perfil DBO: río Fucha

importantes, dados los cercanos valores entre mediana de la campaña y los registros históricos (10 y 12 mg/L, respectivamente). Para el punto FU-KR7 fue evidente el aumento de la mediana 2009-2010 (219 mg/L) respecto a la histórica (90 mg/L); sin embargo, los registros de los monitoreos de la campaña se encuentran dentro del rango histórico.

Similar al caso de la  $DBO_5$ , para los puntos Avenida Ferrocarril y Avenida Las Américas se registraron disminuciones en el valor de la mediana 2009-2010 en relación con la mediana histórica, que indica un posible mejoramiento en la calidad de agua, en términos de materia orgánica. Para el punto Avenida Boyacá no se tienen datos históricos; sin embargo, se puede evidenciar el aumento en la mediana de DBO desde el punto Avenida Las Américas (257 a 508

mg/L), que resalta el efecto de las descargas vertidas aguas arriba de la Avenida Boyacá.

Para el punto FU-VisionC el comportamiento de la DBO no ha variado sustancialmente, pues las medianas de la campaña 2009-2010 e histórica fueron similares (590 y 604 mg/L, respectivamente). Caso contrario ocurre con los puntos Zona Franca y Fucha Alameda, donde las medianas 2009-2010 exceden las medianas históricas. Sin embargo, estos valores no sobrepasan el máximo valor histórico (904 y 1636 mg/L), respectivamente, por lo que es posible obtener concentraciones dentro de este rango.

#### 4.1.1.9. SST

En general, se presentó una gran variabilidad en los datos registrados para la mayoría

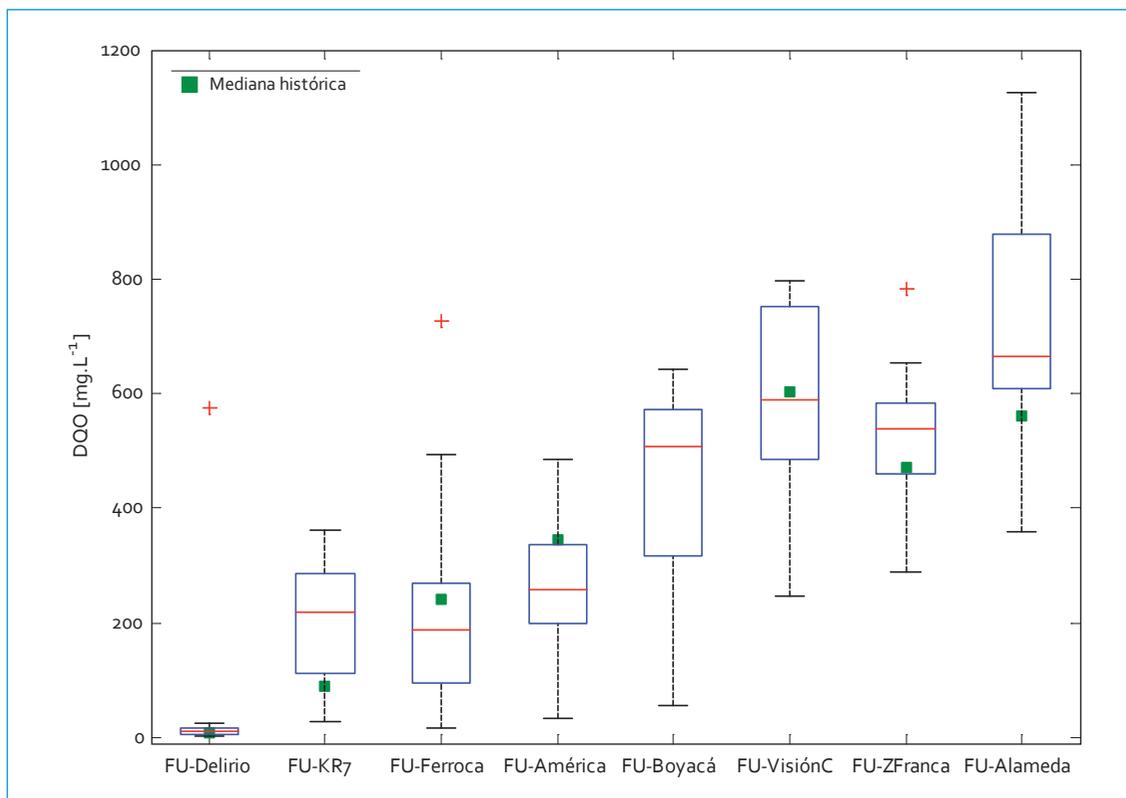


FIGURA 4.8. Perfil de DQO: río Fucha

de puntos monitoreados (figura 4.9). Para el punto FU-Delirio, la mediana 2009-2010 e histórica fueron similares, y el rango de valores registrado durante la campaña se encontró dentro del comportamiento típico para este punto. Para el punto Carrera 7ª se excedió el valor de mediana histórica (35 mg/L) por parte de la mediana 2009-2010 (76 mg/L). Sin embargo, las concentraciones obtenidas para esta campaña no sobrepasaron el valor máximo histórico (914 mg/L); por lo tanto, los valores de sólidos suspendidos totales (SST) obtenidos en esta campaña estuvieron dentro del rango histórico (16-914 mg/L). Para el punto Avenida Ferrocarril se presentó el caso contrario: los valores obtenidos estuvieron por debajo de la mediana histórica (118 mg/L); además, el 75% de los datos registrados para la campaña 2009-2010 fueron inferiores a 86 mg/L. Se observa

un descenso considerable en la concentración de sólidos para este punto de monitoreo, en conjunto con una disminución en la materia orgánica, como se mencionó.

Para los puntos Avenida Las Américas y Visión Colombia también se registró una leve disminución en el valor de la mediana 2009-2010 (92 y 191 mg/L, respectivamente) respecto a la mediana histórica (140 y 220 mg/L, respectivamente). En el punto ubicado en Avenida Boyacá la mediana 2009-2010 de SST (110 mg/L) fue levemente mayor en cuanto al punto agua arriba FU-América; el 75% de los datos para este punto estuvieron por debajo de los 170 mg/L. Para ninguno de los puntos anteriores se identificaron concentraciones de SST atípicas.

Finalmente, para los puntos Zona Franca y Fucha Alameda las medianas 2009-2010 fueron

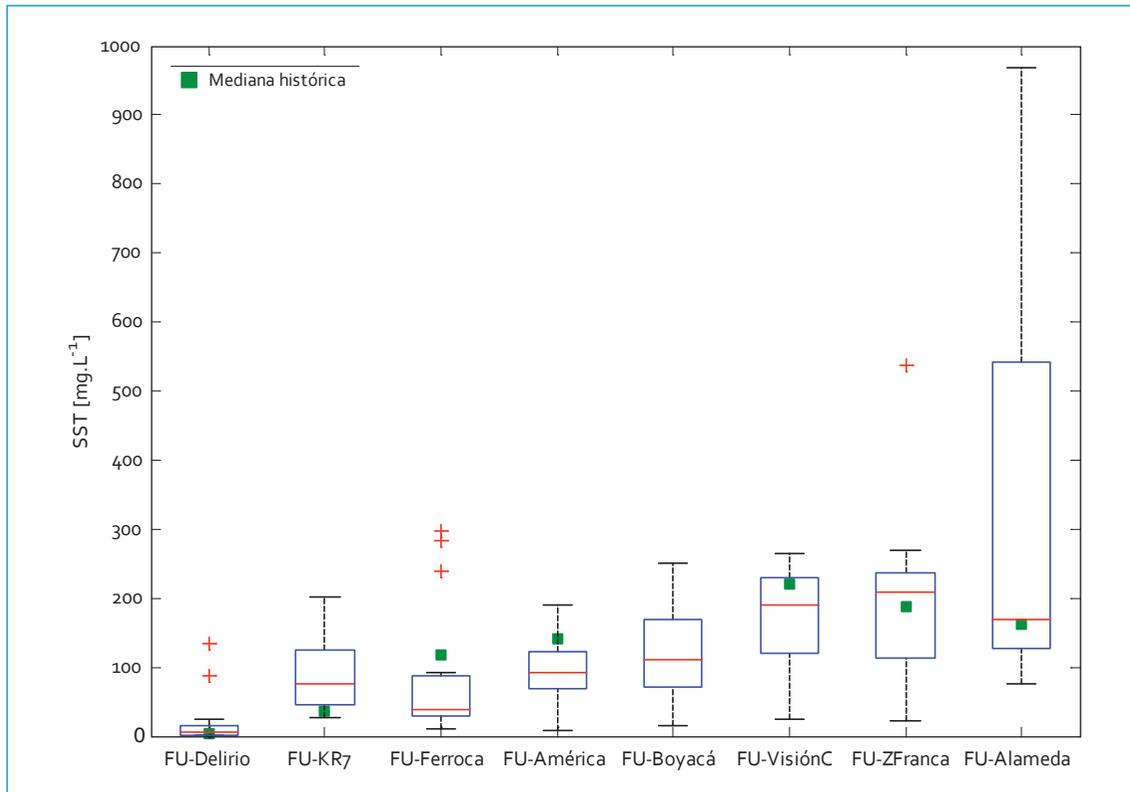


FIGURA 4.9. Perfil SST: río Fucha

muy cercanas a las históricas; no obstante, para Fucha Alameda se presentó una gran variabilidad en los datos registrados, algunos de los cuales han superado el máximo histórico (770 mg/L).

#### 4.1.1.10. Nitrógeno

Para el punto FU-Delirio el comportamiento del nitrógeno ha sido constante en el tiempo, ya que las medianas de la campaña y las históricas son similares. Para este punto se pudo ver que las concentraciones de especies como el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) (figura 4.10) y nitrógeno amoniacal son muy bajas, índice de baja contaminación. Al igual que con los otros determinantes de calidad a partir de FU-KR7, se observó un incremento progresivo en la con-

centración de nitrógeno hasta el punto Visión Colombia, donde se dio un aumento brusco en la concentración, causado por las descargas de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur. Para Fucha Cra 7ª se presenta un incremento en las concentraciones de nitrógeno, ya que las medianas 2009-2010 superan en gran medida las medianas históricas e incluso los máximos valores registrados en el tiempo. Para NTK y nitrógeno amoniacal las concentraciones máximas históricas son 22 y 14 mg/L, respectivamente; en los monitoreos 2009-2010 estos valores fueron 43 y 20 mg/L.

En cuanto a nitritos y nitratos, el rango de variabilidad en los datos fue mayor (figuras 4.11 y 4.12), debido a que en este punto las cantidades de oxígeno disuelto, aunque han disminuido respecto a El Delirio, todavía

se registran concentraciones por el orden de 5 mg/L, que permiten que se lleven a cabo procesos de nitrificación.

Para el punto Avenida Ferrocarril las medianas de concentración de NTK y nitrógeno amoniacal (figura 4.13) aumentan en relación con Cra. 7ª; mientras que el contenido de nitritos y nitratos disminuye, ya que en este punto las cantidades de oxígeno disuelto decaen a 1 mg/L. Por lo tanto, los procesos de nitrificación no se dan y la mayoría de concentración queda como nitrógeno amoniacal. Se evidenció un aumento en el NTK, pues la mediana de concentración medida en 2009-2010 (30 mg/L) fue mayor a la histórica (20 mg/L) y, además, se superó el máximo histórico de 40 mg/L, con un registro de 64 mg/L medido en el tercer trimestre del 2009. En el nitrógeno amoniacal las medianas 2009-2010 e histórica son similares, y el comportamiento de concentraciones de la

campana no sufrió cambios importantes que indique presencia de mayor contaminación.

En FU-América el comportamiento no cambia significativamente respecto al punto de monitoreo anterior. Las medianas 2009-2010 son similares para NTK, nitritos y  $N_{\text{amoniacal}}$ . El NTK y el nitrógeno amoniacal no han variado, porque el rango de concentraciones para este período de monitoreo fue similar al histórico; sin embargo, se evidencia un leve aumento de la mediana actual (15 mg/L) del  $N_{\text{amoniacal}}$  en relación con la histórica (27 mg/L), que puede estar asociado a la gran variabilidad de datos que se obtuvieron para nitritos y nitratos durante ese lapso. En Avenida Boyacá la contaminación del río Fucha es crítica porque aumentan las concentraciones para todas las especies nitrogenadas, excepto nitritos y nitratos que disminuyen, dada la muy baja concentración de oxígeno disuelto en este punto. Desde Visión

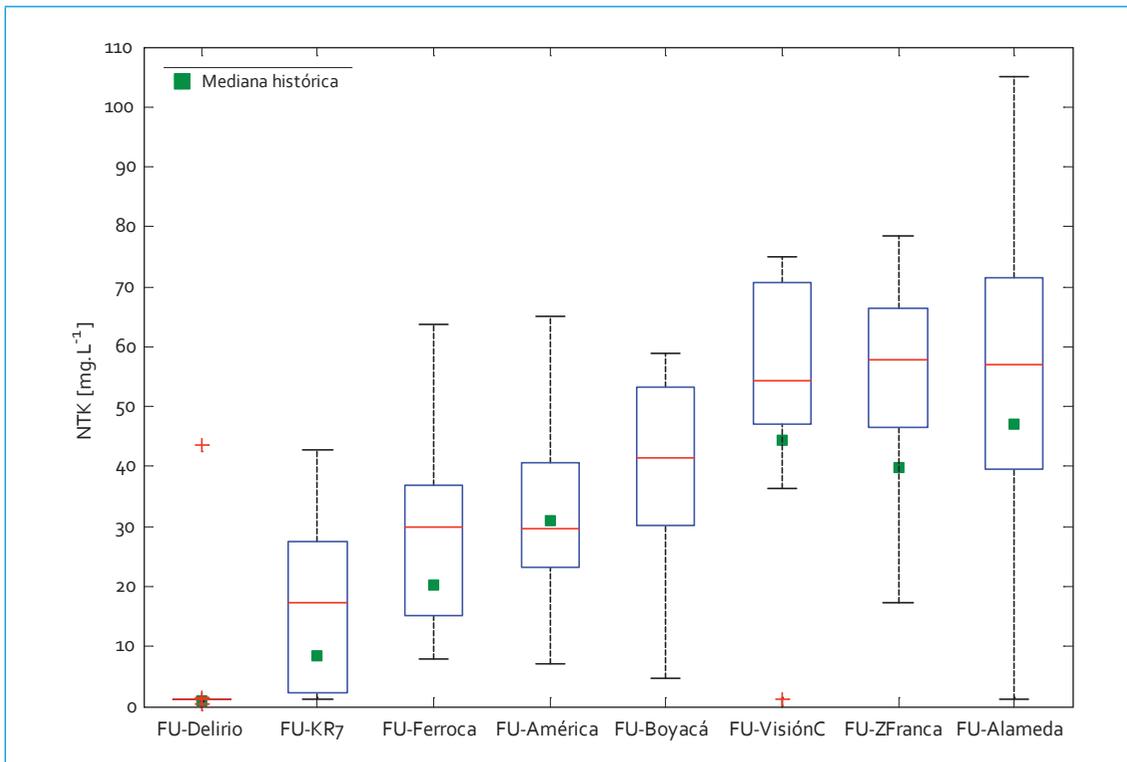


FIGURA 4.10. Perfil NTK: río Fucha

Colombia hasta Fucha Alameda las medianas de la campaña de NTK aumentaron respecto a las históricas, pero respecto a nitrógeno amoniacal las medianas fueron similares. Ello se traduce en un posible aumento en nitrógeno orgánico. El comportamiento de las especies nitrogenadas en los puntos Visión Colombia, Zona Franca y Fucha Alameda es poco variable; se observa una mayor variabilidad en los datos en el punto Fucha Alameda, punto de monitoreo en el cual se superan los máximos históricos para NTK y  $N_{\text{amoniacal}}$ .

#### 4.1.1.11. Fósforo total

El fósforo total tuvo también un comportamiento ascendente a lo largo del río Fucha

(figura 4.14). Al igual que para el caso de la materia orgánica, se observó un incremento en la concentración de fósforo total desde el punto de monitoreo Carrera 7ª hasta el punto Visión Colombia, donde nuevamente, debido a la descarga de altos caudales de aguas residuales, se da un aumento súbito de la concentración. A partir de este punto el comportamiento de las medianas es similar hasta la desembocadura del río. Para el punto El Delirio las concentraciones de fósforo total se mantuvieron muy bajas, por lo que no se evidencia alguna afectación en la calidad de agua para este punto. Similar al caso de materia orgánica y SST, en FU-KR7 se cuantificó un aumento de la mediana 2009-2010 (2,4 mg/L) respecto a la histórica (1,5 mg/L), lo cual resalta la afectación de este

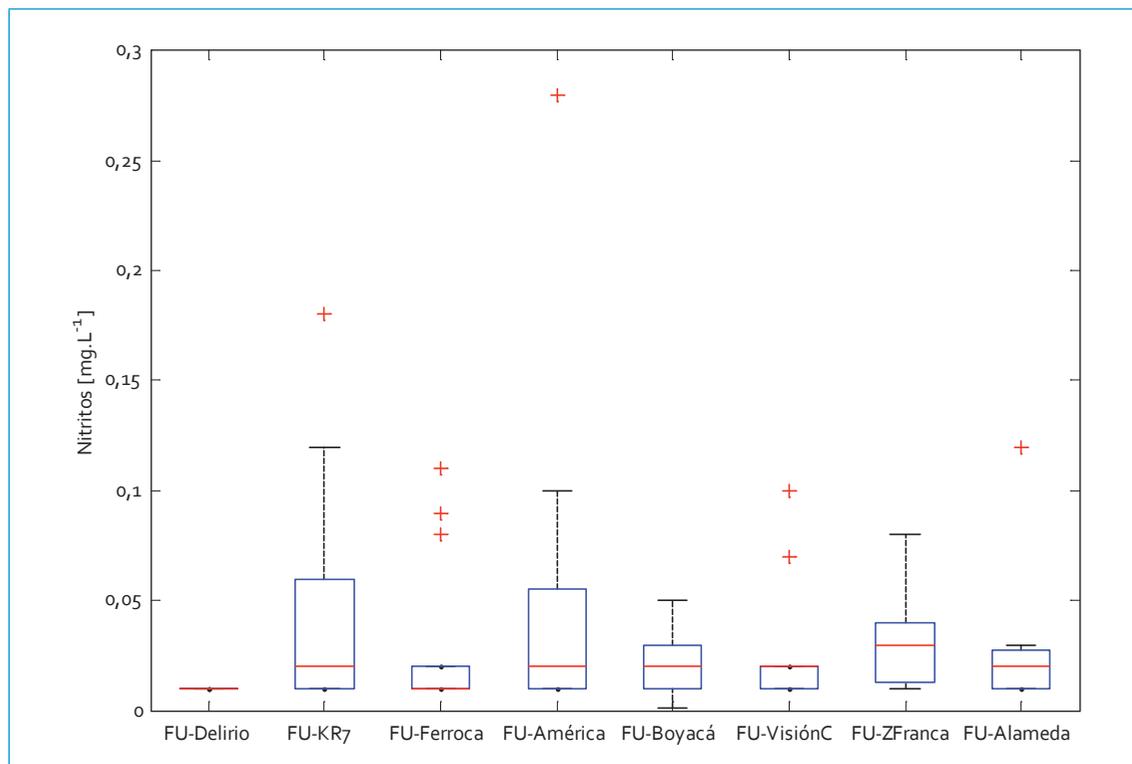


FIGURA 4.11. Perfil nitritos: río Fucha

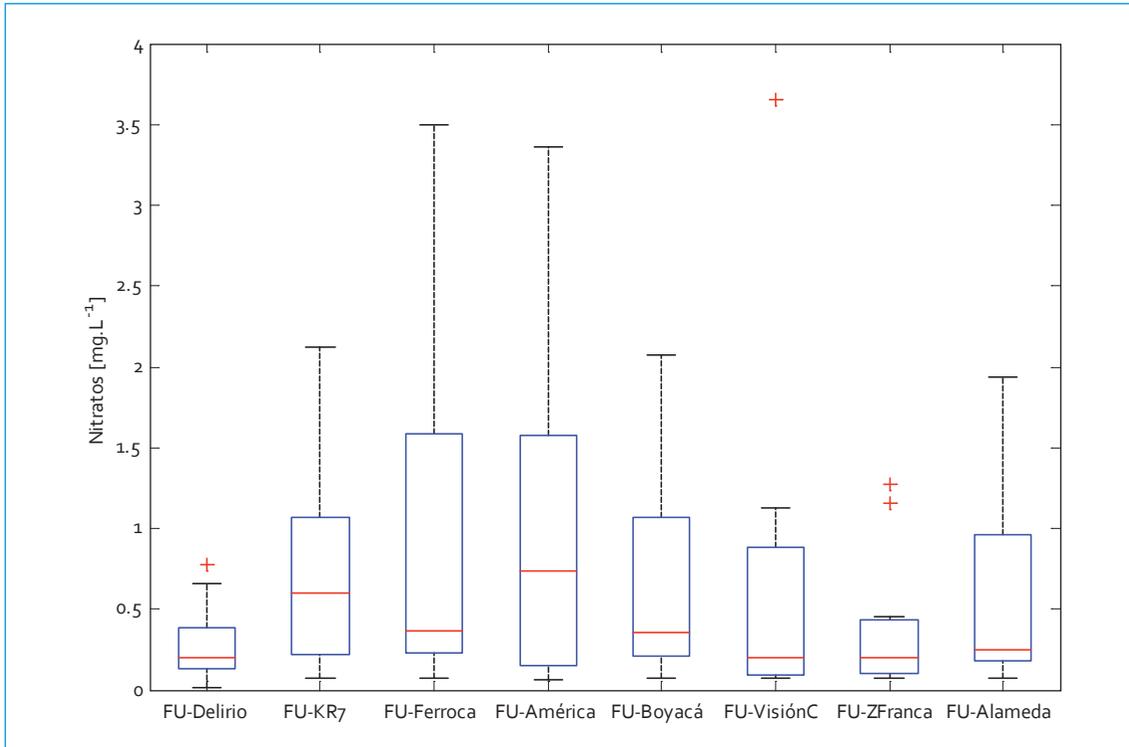


FIGURA 4.12. Perfil nitratos: río Fucha

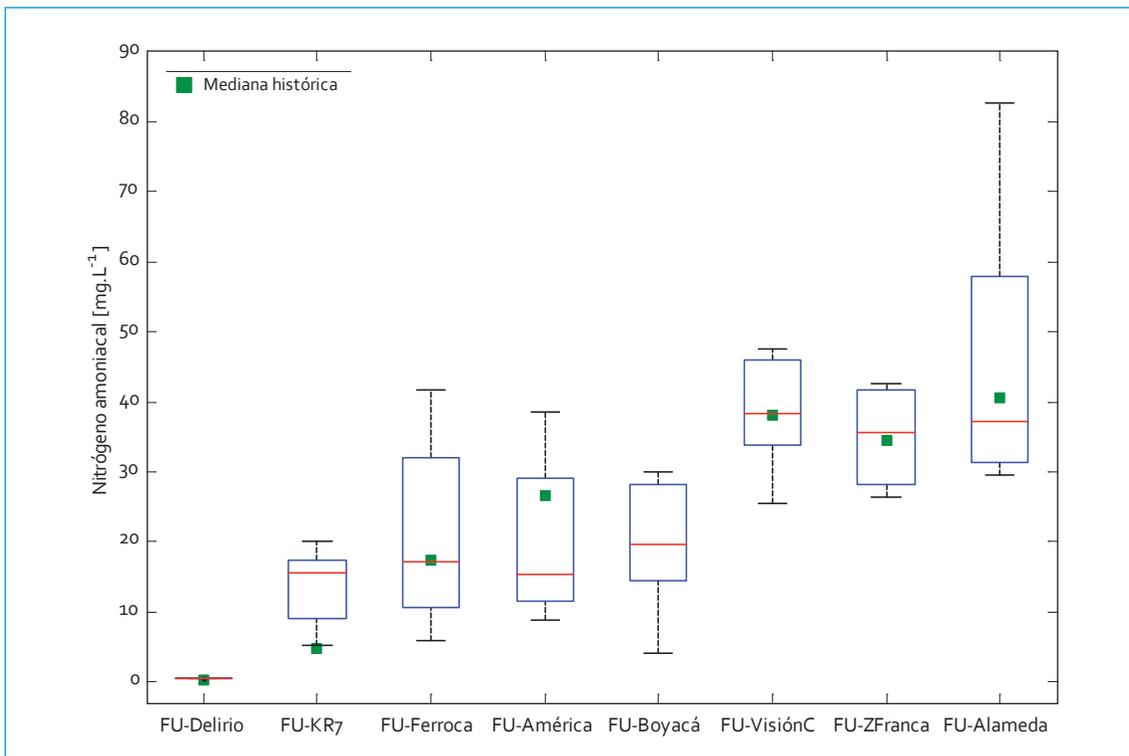


FIGURA 4.13. Perfil nitrógeno amoniacal: río Fucha

punto en la actualidad. Para Avenida Ferrocarriil, el comportamiento de las concentraciones de fósforo se ha mantenido, dado que tanto la mediana de la campaña como la histórica son similares; además, los valores registrados para 2009-2010 se encuentran dentro del rango registrado para este punto.

Para los puntos Avenida Las Américas y Visión Colombia se registró una disminución en el valor de la mediana 2009-2010 (3,4 y 7,5 mg/L, respectivamente) respecto a la mediana histórica (5,2 y 10 mg/L, respectivamente), que coincide con el mismo comportamiento para materia orgánica y SST. En el punto FU-Boyacá, las concentraciones de fósforo aumentan respecto a Avenida Las Américas, cuya mediana asciende a 5,3 mg/L. En Zona Franca el comportamiento en relación con la mediana ha sido constante durante el tiempo

y también presentó una tendencia muy similar, comparado con el punto aguas arriba FU-VisiónC. En Fucha Alameda se mantiene el rango de concentraciones obtenido en los puntos Visión Colombia y Zona Franca, pues las medianas correspondientes no variaron de manera significativa.

#### 4.1.1.12. Grasas y aceites

Las grasas y aceites (GyA) también presentan un comportamiento ascendente a lo largo del río (figura 4.15). Para el punto El Delirio las concentraciones de GyA se mantienen muy bajas y los datos que se identifican como atípicos no son muy altos, por lo que no se evidencia alguna afectación en la calidad de agua para este punto. En el punto FU-KR7 el comportamiento no ha variado significativamente, ya

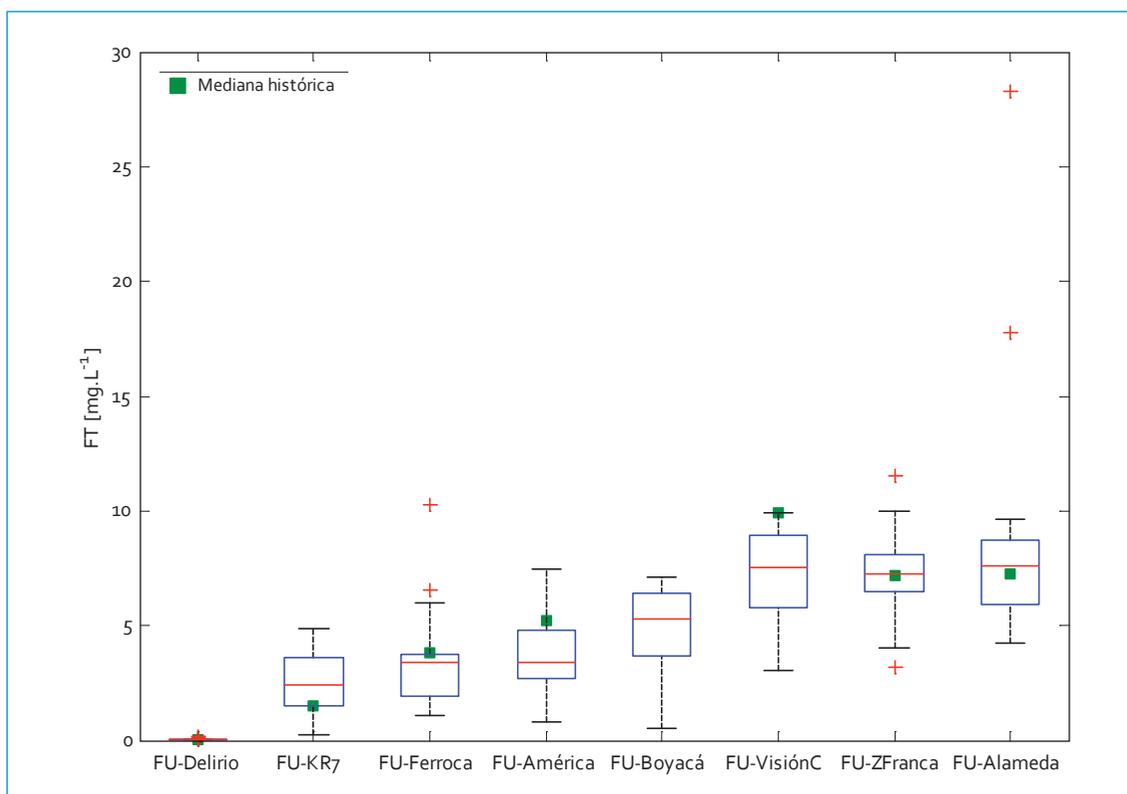


FIGURA 4.14. Perfil  $F_{total}$ : río Fucha

que la mediana 2009-2010 (10 mg/L) y la histórica (13 mg/L) son cercanas. Para este punto se registraron valores de hasta 50 mg/L, valor superior al máximo histórico (25 mg/L) y que puede indicar una contaminación diferente a aguas residuales domésticas. En el punto Avenida Ferrocarril el comportamiento de GyA no ha variado mucho, ya que tanto la mediana de la campaña como la histórica son similares; además, los valores registrados para 2009-2010 se encuentran dentro del rango para ese punto (10-235 mg/L). En Avenida Las Américas el comportamiento de GyA es parecido al punto aguas arriba Avenida Ferrocarril; a diferencia que para FU-América el rango de variación fue mayor y no se presentaron concentraciones atípicas en este período de monitoreo.

Respecto a los registros históricos en este punto, el rango de concentraciones no ha variado, por lo que se puede decir que el

comportamiento de GyA ha sido constante durante el tiempo. Para FU-Boyacá, al igual que en los demás parámetros, se evidencia un aumento importante en la presencia de GyA, por las descargas de industrias aledañas a este punto. En este parte del río Fucha la mediana de concentración pasó de 24 (en Avenida Las Américas) a 43 mg/L.

A partir del punto Visión Colombia las medianas de concentración medidas en 2009-2010 fueron similares, por lo que el comportamiento de GyA hasta la desembocadura del río Fucha no sufre cambios importantes. Sin embargo, se evidenció un leve aumento en la mediana de concentración 2009-2010 tanto para FU-VisiónC como para FU-ZFranca y FU-Alameda respecto a los registros históricos. Zona Franca es el punto donde se registró un mayor rango de variabilidad en los datos.

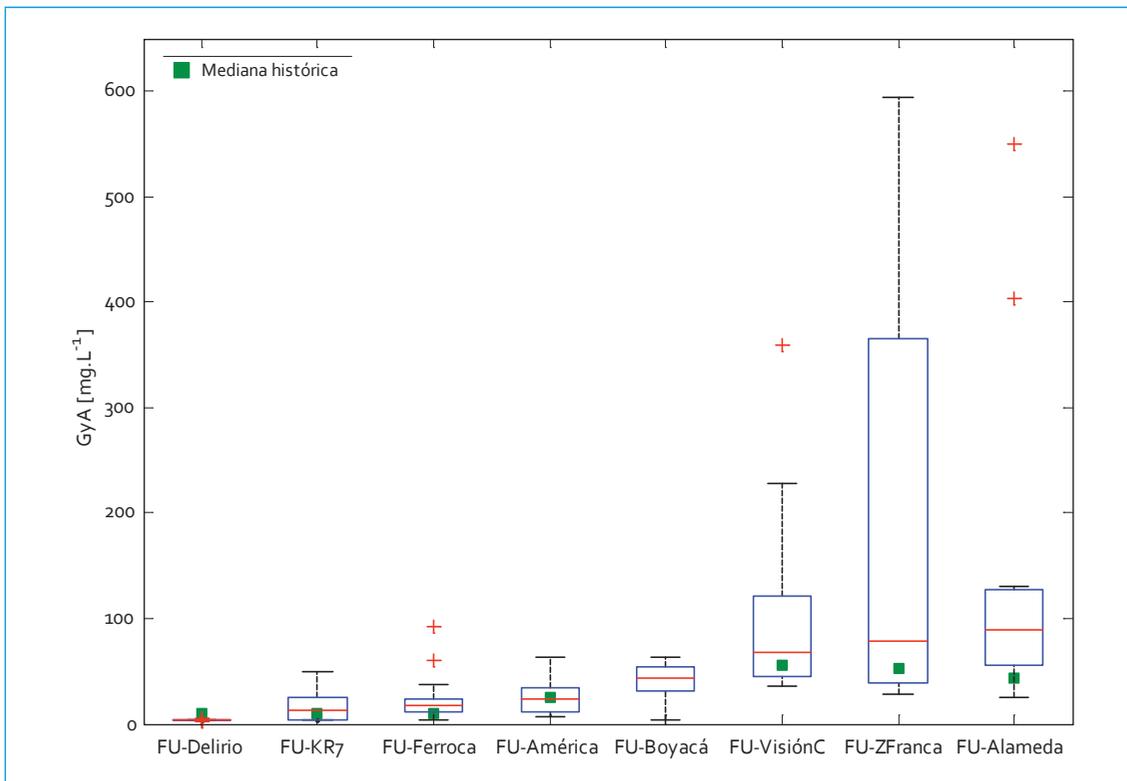


FIGURA 4.15. Perfil de grasas y aceites: río Fucha

#### 4.1.1.13. SAAM

Para el punto El Delirio las concentraciones de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) siguen siendo muy bajas (figura 4.16), y solo se presentó un dato atípico (0,29 mg/L), que coincide con el mismo monitoreo donde se identificó un atípico para  $F_{total}$  (0,1 mg/L). Dado que SAAM se relaciona con la presencia detergentes y, por lo tanto, de fosfatos, es posible que ese día se presentará un evento puntual en el cual habitantes de la zona hayan realizado labores domésticas en el río (como lavandería), que aumentó la concentración tanto de tensoactivos (SAAM) como de fosfatos.

Se observó un incremento paulatino en la concentración de SAAM desde el punto de monitoreo Carrera 7ª hasta el punto Visión Co-

lombia, donde abruptamente se incrementó la concentración, al pasar de una mediana de 3 mg/L a un valor medio cercano a 8 mg/L en Visión Colombia. Es evidente el fuerte impacto causado por las descargas de agua residual a lo largo del río Fucha, además que disminuye el poder autodepurador del río, ya que estos compuestos son poco biodegradables. En la tabla 4.1 se presentan los registros históricos de valores mínimos y máximos para cada punto. Como se puede ver, para los puntos Carrera 7ª, Avenida Ferrocarril, Visión Colombia, Zona Franca y Fucha con Alameda, las concentraciones obtenidas para 2009-2010 exceden los máximos históricos; por ende, se puede identificar un mayor impacto de estos productos químicos (sustancias tensoactivas), dada su posible acumulación en el río.

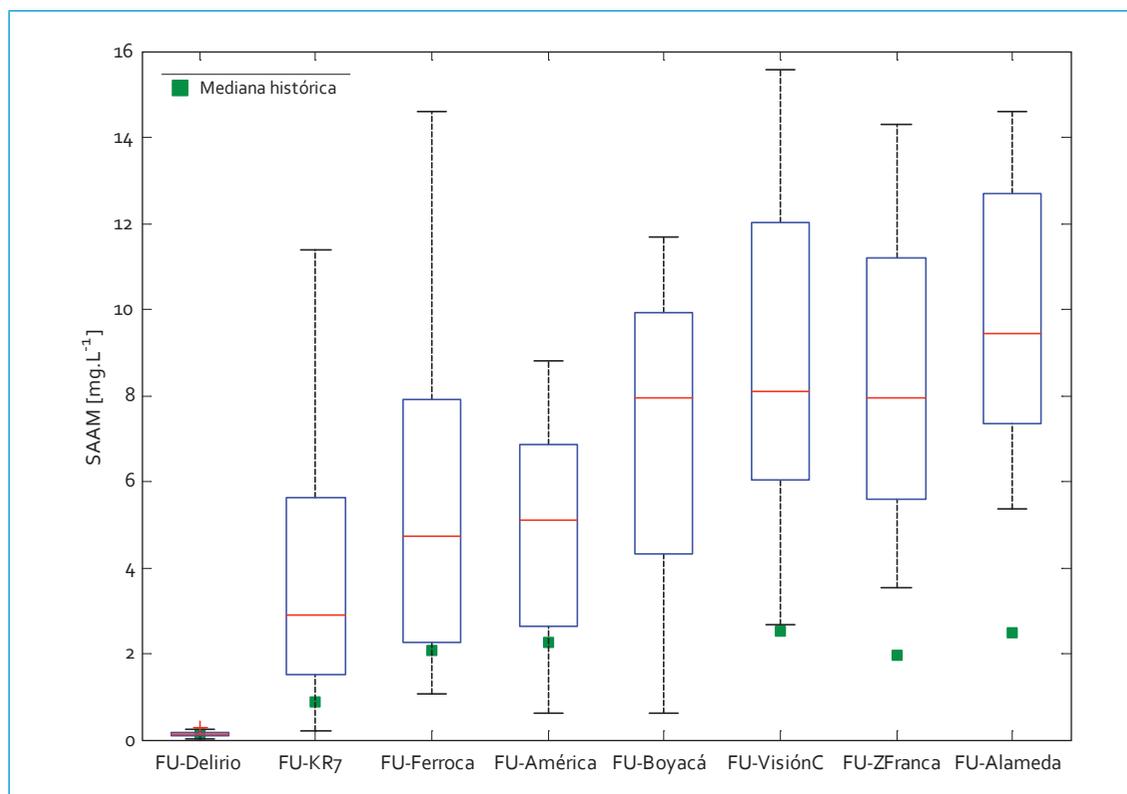


FIGURA 4.16. Perfil SAAM: río Fucha

TABLA 4.1. Rango histórico SAAM: río Fucha

Punto de monitoreo	SAAM (mg/L)	
	Mín.	Máx.
El Delirio	0,025	1
Carrera 7ª río Fucha	0,025	3
Avenida Ferrocarril	0,222	4
Fucha Avenida Las Américas	0,130	8
Visión Colombia	0,855	4
Fucha Zona Franca	0,341	5
Fucha con Alameda	0,949	4

4.1.1.14. Coliformes fecales

Al observar los registros de la campaña de monitoreo 2009-2010 se puede afirmar que a partir del punto FU-KR7 las medianas de concentración se encontraron por el orden de  $10^6$  NMP/100 mL (figura 4.17). En el primer punto FU-Delirio el comportamiento se ha mantenido constante a lo largo del tiempo, ya que las medianas de la campaña e histórica son similares. Se presentaron dos datos atípicos (200 y 3000 NMP/100 mL), que se registraron particularmente en monitoreos de la madrugada. En el punto FU-KR7 no se presentaron valores atípicos; sin embargo, se evidenció un aumento en la mediana 2009-2010 ( $1,5 \times 10^6$  NMP/100 mL) respecto a la histórica ( $2,9 \times 10^5$  NMP/100 mL) lo que corresponde a un

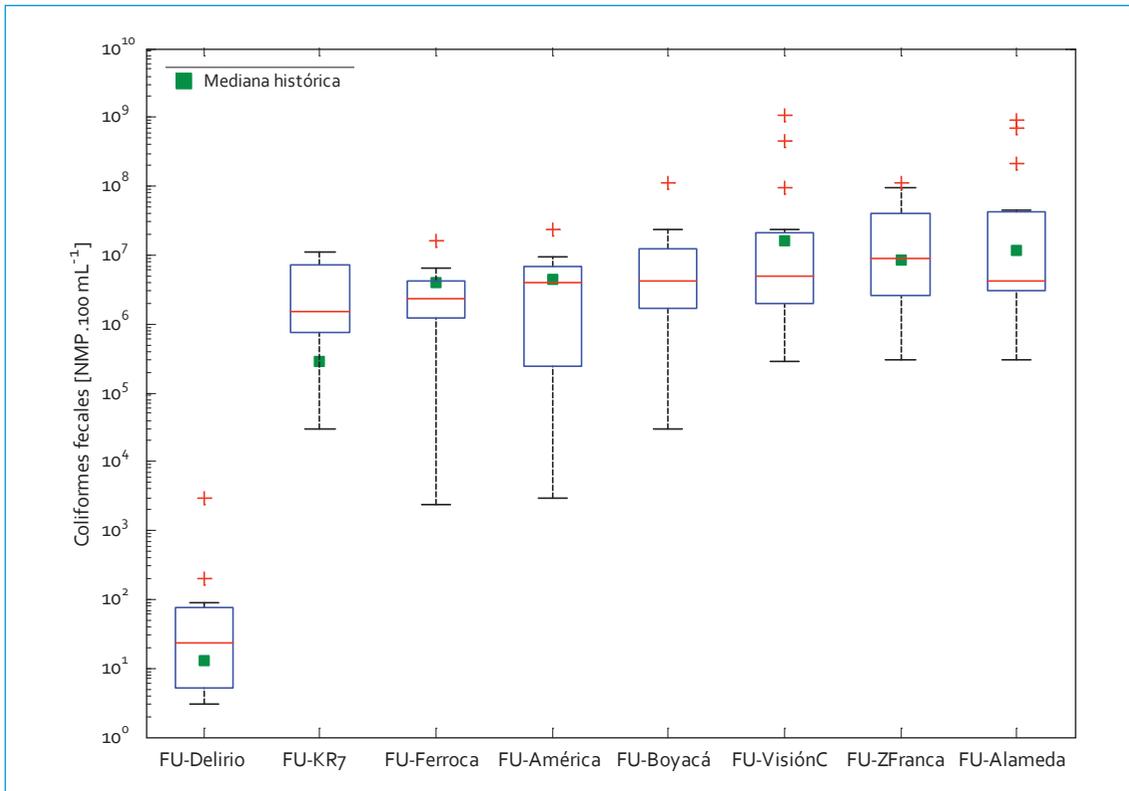


FIGURA 4.17. Perfil de coliformes fecales: río Fucha

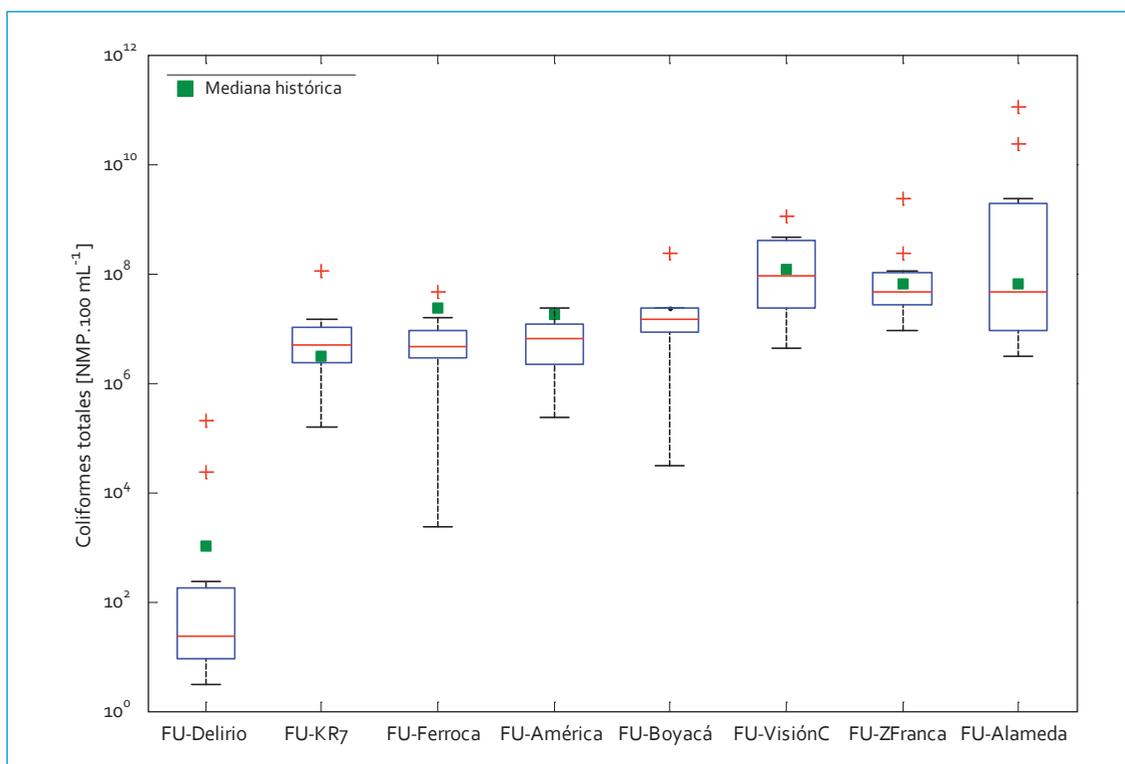


FIGURA 4.18. Perfil coliformes totales: río Fucha

incremento en la contaminación por aguas residuales domésticas.

En Avenida Ferrocarril la mediana actual aumentó un poco en relación con Carrera 7ª, pero se mantuvo poco variable comparada con el registro histórico. Para FU-América el rango de comportamiento es muy similar a Avenida Ferrocarril, y comparando la mediana 2009-2010 ( $4 \times 10^6$  NMP/100 mL) con la histórica ( $4,3 \times 10^6$  NMP/100 mL) se puede decir que se han mantenido las condiciones en el tiempo. En FU-Boyacá el comportamiento no se altera, ya que la mediana es similar al punto aguas arriba FU-América.

En Visión Colombia se observó una disminución de la mediana de la campaña respecto a la histórica y su comportamiento es similar que en el punto Avenida Boyacá. En Zona Franca y Fucha Alameda el rango de concentraciones fue muy similar.

#### 4.1.1.15. Coliformes totales

A partir de las concentraciones obtenidas para estos períodos de monitoreo, se puede identificar un aumento desde el punto FU-KR7, en que las medianas de concentración se encontraron por el orden de  $10^6$  NMP/100 mL (figura 4.18). En el primer punto FU-Delirio el comportamiento se ha mantenido constante a lo largo del tiempo, con medianas similares. Se presentaron dos datos por fuera de registros históricos ( $10^4$  y  $10^5$  NMP/100 mL), correspondientes a coliformes fecales, atribuibles a situaciones particulares. En Avenida Ferrocarril la mediana 2009-2010 fue similar a Carrera 7ª; además, se mantiene poco variable comparado con el registro histórico. Para FU-América el rango de concentraciones fue similar a Avenida Ferrocarril, y comparando la mediana de la campaña ( $6 \times 10^6$  NMP/100 mL) con la histórica ( $1,8 \times 10^7$

NMP/100 mL) se observa una leve disminución en el tiempo. En FU-Boyacá la concentración de coliformes totales aumenta un poco respecto al punto aguas arriba FU-América. En Visión Colombia la mediana 2009-2010 y la histórica no difieren significativamente, y se registró mayor presencia de coliformes totales en cuanto al punto Avenida Boyacá. En Zona Franca y Fucha Alameda el rango de concentraciones fue similar: las medianas de concentración se han mantenido, ya que no varían mucho respecto a la histórica.

#### 4.1.1.16. Cianuro

La presencia de cianuro en el río indica contaminación de origen industrial, el cual imposibilita varios tipos de vida acuática en un cuerpo de agua. Las mayores concentraciones de cianuros se encontraron a partir del punto Avenida Boyacá hasta Fucha Alameda. Es importante tener en cuenta que los datos históricos de cianuro se realizaron con un método analítico diferente al que se aplicó para esta campaña; por lo tanto, los límites de detección son diferentes, y son de 0,01 mg/L para los registros históricos y de 0,5 mg/L para los monitoreos 2009-2010. Por lo tanto, al realizar las comparaciones no quiere decir que las concentraciones de cianuro hayan aumentado para este período de monitoreo, sino que el mínimo de detección es más alto para este caso.

Para los puntos de monitoreo El Delirio, Carrera 7ª, Avenida Ferrocarril y Avenida Las Américas, todos los registros para este período de monitoreo arrojaron valores no detectables (<0,5 mg/L), lo cual es esperado en El Delirio, dada la buena calidad de agua en este punto. Para los siguientes puntos ocurrió lo mismo: indicio que no hay presencia de descargas

de industrias hacia la red de alcantarillado y de esta al río. Caso contrario se presentó para FU-Boyacá: ya que se midieron concentraciones de cianuro por el orden 0,6 mg/L y en Visión Colombia, el cambio en el comportamiento es evidente, ya que se detectó un rango de variabilidad mucho mayor que en los demás puntos de monitoreo (0,5-1,4 mg/L), que indica actividad industrial dada la presencia de metales como el cobre, que se comenta más adelante. En FU-ZFranca el rango de variación bajó y la mayoría de datos fueron menores al límite de detección (<0,5 mg/L). Por último, en el punto Fucha Alameda el comportamiento de los datos respecto al punto aguas arriba FU-ZFranca fue casi el mismo.

#### 4.1.1.17. Fenoles

En la figura 4.19 se evidencia que las concentraciones de fenoles aumentan drásticamente a partir del punto FU-KR7. Para el punto El Delirio todas las concentraciones de fenoles fueron reportadas como no detectables (<0,02 mg/L); por lo tanto, no se refleja alguna afectación en la calidad de agua para este punto. En el punto FU-KR7 el rango de concentraciones registradas para este lapso de monitoreo fue mucho mayor, y aunque la mediana 2009-2010 y la histórica sean prácticamente iguales, el rango para este período de monitoreo superó la concentración máxima histórica (0,22 mg/L), con una concentración máxima para esta campaña de 0,63 mg/L. Este valor se presentó el mismo día en que se identificaron concentraciones atípicas en metales como bario, cromo total, manganeso, níquel y plomo. Esto parece indicar que se trató de una situación particular en que hubo una descarga posiblemente de tipo industrial.

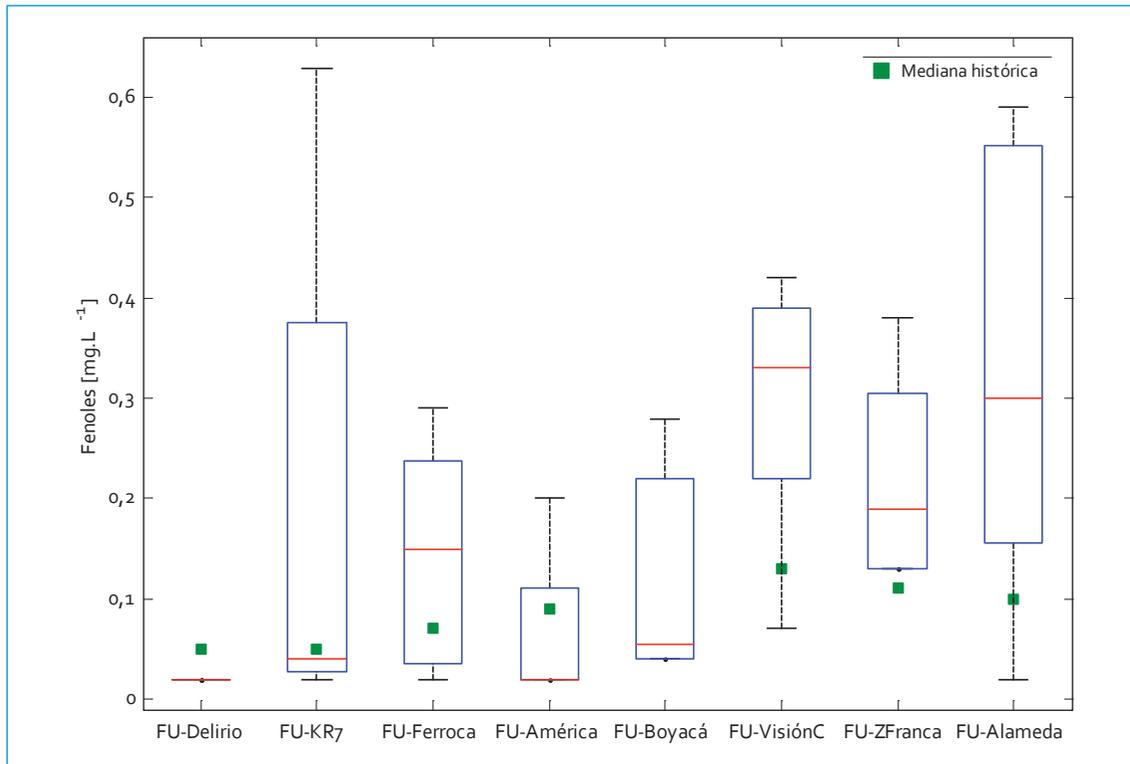


FIGURA 4.19. Perfil fenoles: río Fucha

En el punto Avenida Ferrocarril, el rango de concentraciones de fenoles disminuyó un poco, pero se evidencia un aumento de la mediana 2009-2010 (0,15 mg/L) respecto a la histórica (0,07 mg/L), aun cuando el rango de concentraciones no es muy diferente en relación con los registros históricos. Para el punto de monitoreo Avenida Las Américas se empezaron a registrar menores concentraciones de fenoles y, por lo tanto, la mediana actual disminuyó respecto al punto anterior. No obstante, el rango de concentraciones de fenoles para FU-América se encuentra dentro del comportamiento típico registrado. Para FU-Boyacá las concentraciones de fenoles aumentan otra vez, mas el cambio notorio se presenta en Visión Colombia, en el cual la mediana 2009-2010 aumenta seis veces y llega hasta un valor medio de 0,33 mg/L.

Respecto al rango histórico, se estableció un aumento en la mediana y también en la concentración máxima histórica (0,37 mg/L), ya que para este período de monitoreo se midieron valores de hasta 0,42 mg/L. Es importante resaltar la condición crítica de este punto de monitoreo, no sólo en fenoles, sino en materia orgánica, SST, nutrientes y demás contaminantes. En FU-ZFranca el rango de valores fue similar a Visión Colombia; además, también se evidenció un aumento en los fenoles. Sin embargo, en este punto se han medido concentraciones de fenoles de hasta 0,39 mg/L, lo que valida los datos obtenidos para este lapso de monitoreo. Por último, en el punto Fucha Alameda, el rango de variabilidad fue bastante alto: la mediana 2009-2010 fue tres veces mayor que la histórica, y se registraron concentraciones de hasta 0,54 mg/L.

#### 4.1.1.18. Metales

##### 4.1.1.18.1. Bario

En la figura 4.20 se puede apreciar que las concentraciones de bario aumentan a partir del punto FU-KR7. Para el punto El Delirio todas las concentraciones de bario fueron muy bajas (<0,02 mg/L); por ende, no se evidencia alguna afectación en la calidad de agua para este punto. En el punto FU-KR7 el rango de concentraciones fue mayor, aun cuando la mediana de la campaña y la histórica son similares. Se presentó un valor atípico (0,1 mg/L), que coincide con el mismo día en que se presentaron concentraciones atípicas para cromo total, manganeso, níquel y plomo. Esto parece indicar que se trató de una descarga puntual posiblemente industrial; sin embargo, este valor anormal se encuentra dentro del rango

de concentraciones reportadas para este punto (0,02-0,21 mg/L).

En el punto Avenida Ferrocarril el rango de comportamiento no varía significativamente respecto a Carrera 7ª, pero se cuantificó una leve disminución de la mediana 2009-2010 (0,03 mg/L) respecto a la histórica (0,05 mg/L). Para el punto de monitoreo Avenida Las Américas se registró un aumento en las concentraciones de bario; pero tanto la mediana de la campaña como la histórica fueron similares. A partir del punto Avenida Boyacá la presencia de bario aumentó y siguió sin variaciones importantes hasta Fucha Alameda. En Visión Colombia la mediana 2009-2010 y la histórica son semejantes y el rango de variación de concentraciones para este período estuvo dentro de los valores registrados históricamente. En FU-ZFranca el rango de variación fue mucho mayor que el de Visión Colombia; además,

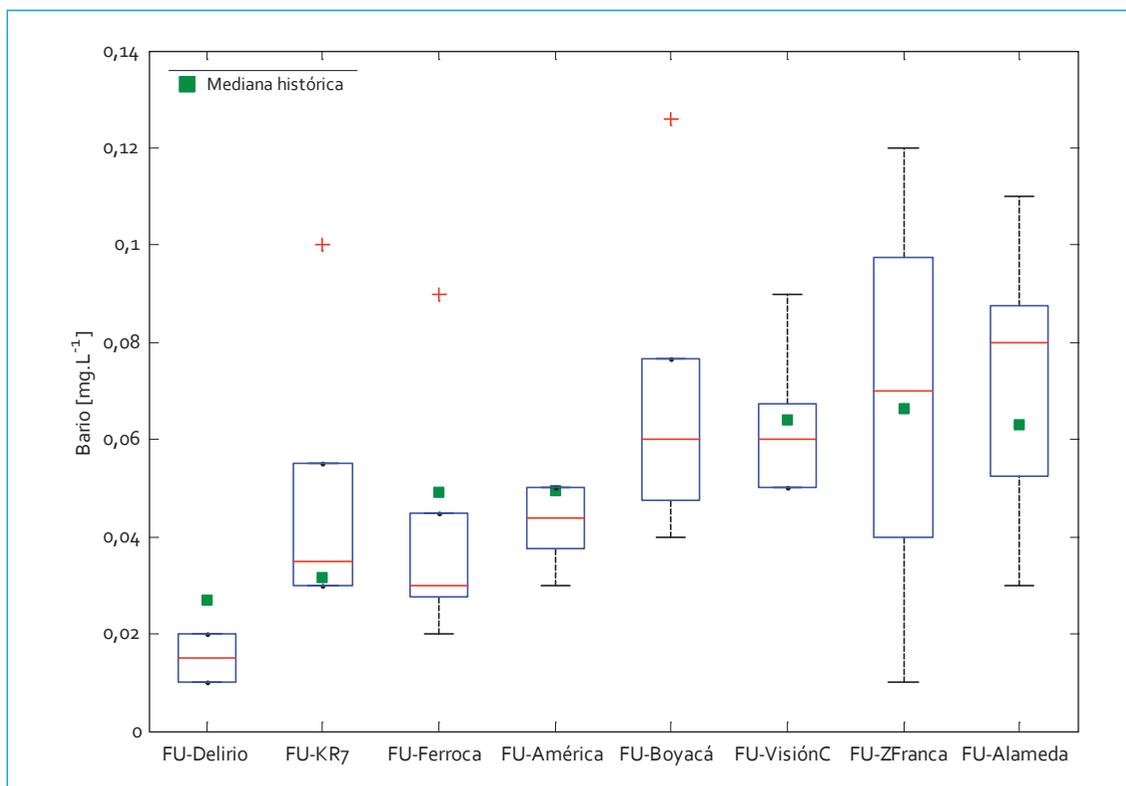


FIGURA 4.20. Perfil bario: río Fucha

también se evidencia un aumento en las cantidades de bario. Por último, en el punto Fucha Alameda el rango de variabilidad fue también alto, y se apreció un aumento en la mediana actual (0,08 mg/L) comparada con la histórica (0,06 mg/L).

#### 4.1.1.18.2. Cadmio

Al igual que con el bario, en la figura 4.21 se puede observar que las concentraciones de cadmio aumentan a partir del punto FU-Ferroca. Para el punto El Delirio y Carrera 7ª todas las concentraciones de cadmio reportadas para este período de monitoreo fueron no detectables (<0,001 mg/L); por lo tanto, no se evidencia alguna afectación en la calidad de agua para ninguno de estos puntos. En el punto Avenida Ferrocarril el rango de comportamiento aumenta respecto a Carrera 7ª y El Delirio, y se evidencia un aumento en las concentraciones en relación con los registros históricos, ya que se obtuvieron concentraciones de hasta 0,006 mg/L en el monitoreo realizado en horas de la mañana. Para el punto de monitoreo Avenida Las Américas, las concentraciones vuelven a ser no detectables (<0,001 mg/L) muy seguramente, porque el cadmio presente en Avenida Ferrocarril se precipita y queda retenido en los sedimentos, además del potencial efecto de dilución que se puede dar hacia aguas abajo. A partir del punto Avenida Boyacá la presencia de cadmio aumentó y siguió sin variaciones importantes desde Visión Colombia hasta Fucha Alameda.

A partir de punto FU-VisiónC se apreció la afectación de descargas de aguas residuales industriales, evidenciado por los mayores niveles de cadmio en el agua. En Visión Colombia el rango de variación de concentraciones para este tiempo de monitoreo se encontró den-

tro de los valores registrados históricamente (0,001-0,004 mg/L). En FU-ZFranca el rango de variación fue mayor que el de Visión Colombia; además que también se registró un aumento en las concentraciones de cadmio. Por último, en el punto Fucha Alameda el rango de variabilidad igualmente fue alto. Para ninguno de estos últimos puntos de monitoreo se identificaron valores atípicos.

#### 4.1.1.18.3. Cinc

En la figura 4.22 se puede apreciar que las concentraciones de cinc ascienden en mayor proporción a partir del punto Avenida Las Américas. Para el punto El Delirio las cantidades medidas de cinc en la campaña son muy bajas. Para Carrera 7ª las concentraciones de cinc aumentan levemente y se asemejan a valores entre las medianas 2009-2010 y la histórica. El comportamiento ha sido relativamente constante durante el tiempo, ya que todos los datos para este período estuvieron dentro del rango de comportamiento típico para este punto. En el punto Avenida Ferrocarril el rango de comportamiento no varía mucho respecto a Carrera 7ª y se evidenció una disminución en las concentraciones en relación con los registros históricos, ya que la mediana actual (0,06 mg/L) es aproximadamente 50% menor que la histórica (0,13 mg/L). Para el punto de monitoreo Avenida Las Américas las concentraciones aumentaron de manera significativa, ya que la mediana 2009-2010 para este punto fue de 0,3 mg/L en contraste con la mediana de FU-Ferroca (0,06 mg/L). Así mismo, se encontró un aumento respecto a los registros históricos, donde la mediana actual es 50% mayor que la histórica. El aumento en cinc puede deberse a la descarga del Canal Comuneros aguas arriba de este punto de monitoreo.

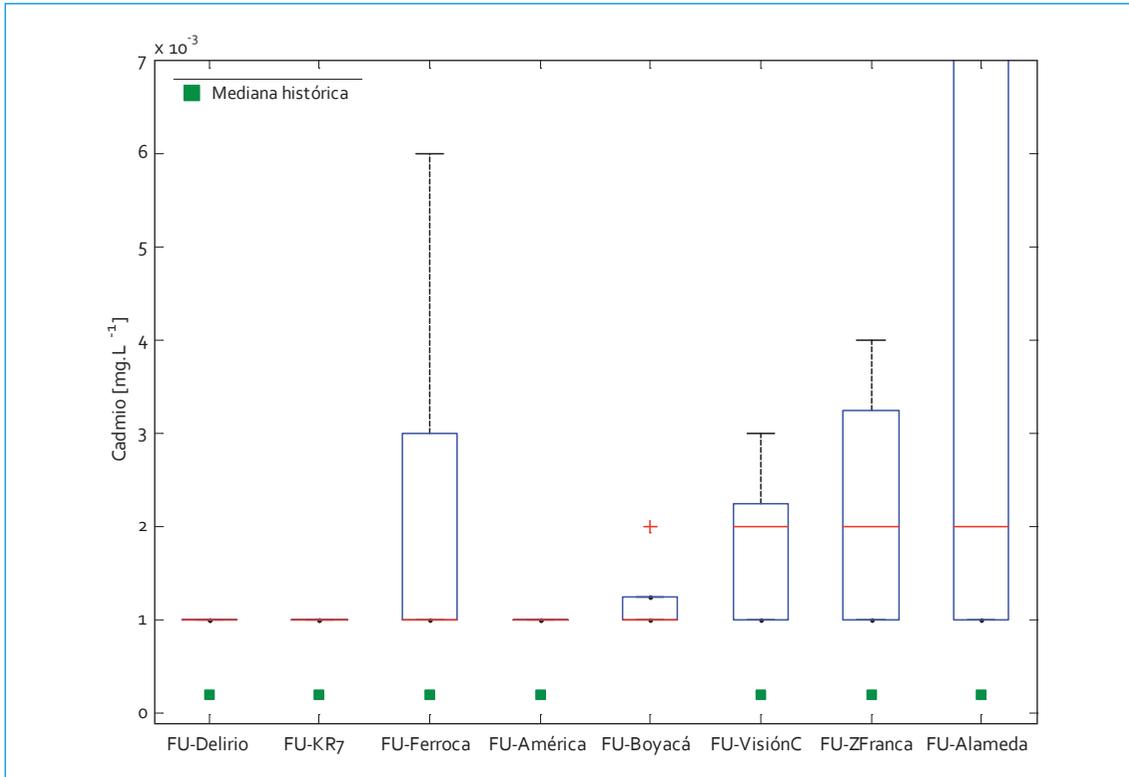


FIGURA 4.21. Perfil cadmio: río Fucha

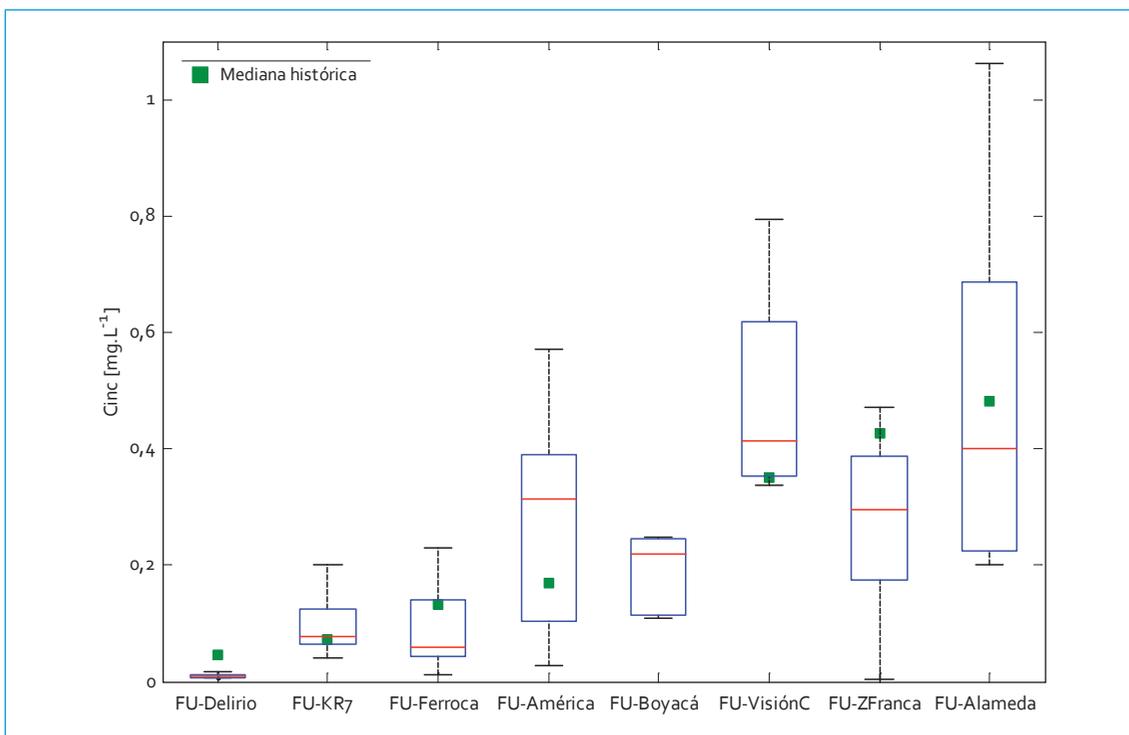


FIGURA 4.22. Perfil cinc: río Fucha

En FU-Boyacá, las concentraciones de cinc disminuyen un poco, pero en FU-VisiónC aumentan un 50% respecto al punto Avenida Boyacá; sin embargo, el rango de variación de concentraciones para este período está dentro de los valores registrados históricamente. En FU-ZFranca las concentraciones de cinc vuelven a bajar, además que la mediana 2009-2010 (0,3 mg/L) es menor que la histórica (0,4 mg/L). Por último, en el punto Fucha Alameda el rango de variabilidad aumentó, al registrarse valores de hasta 1 mg/L; sin embargo, todos los datos para este período se encuentran dentro del rango medido en este punto (0,005-3 mg/L).

#### 4.1.1.18.4. Cobre

En la figura 4.23 se puede observar el perfil de las concentraciones de cobre en el río Fucha para la campaña de monitoreo 2009-2010.

En el punto El Delirio y Carrera 7ª las concentraciones de cobre fueron muy bajas; sin embargo, se evidencia un leve aumento respecto a las medianas históricas. Los datos 2009-2010 se encuentran dentro de las concentraciones medidas históricamente, excepto en Zona Franca, donde el máximo valor para este lapso (0,21 mg/L) supera el máximo histórico (0,11 mg/L). En el punto Avenida Ferrocarril el rango de concentraciones es semejante en relación con Carrera 7ª y El Delirio, y no se apreció un aumento en las concentraciones en cuanto a los registros históricos. Para el punto de monitoreo Avenida Las Américas las concentraciones aumentaron considerablemente (la mediana es un 50% superior respecto a Avenida Ferrocarril). También se evidencia un aumento de la mediana 2009-2010 (0,09 mg/L) comparada con la histórica (0,04 mg/L). En el punto Avenida Boyacá la presencia de cobre

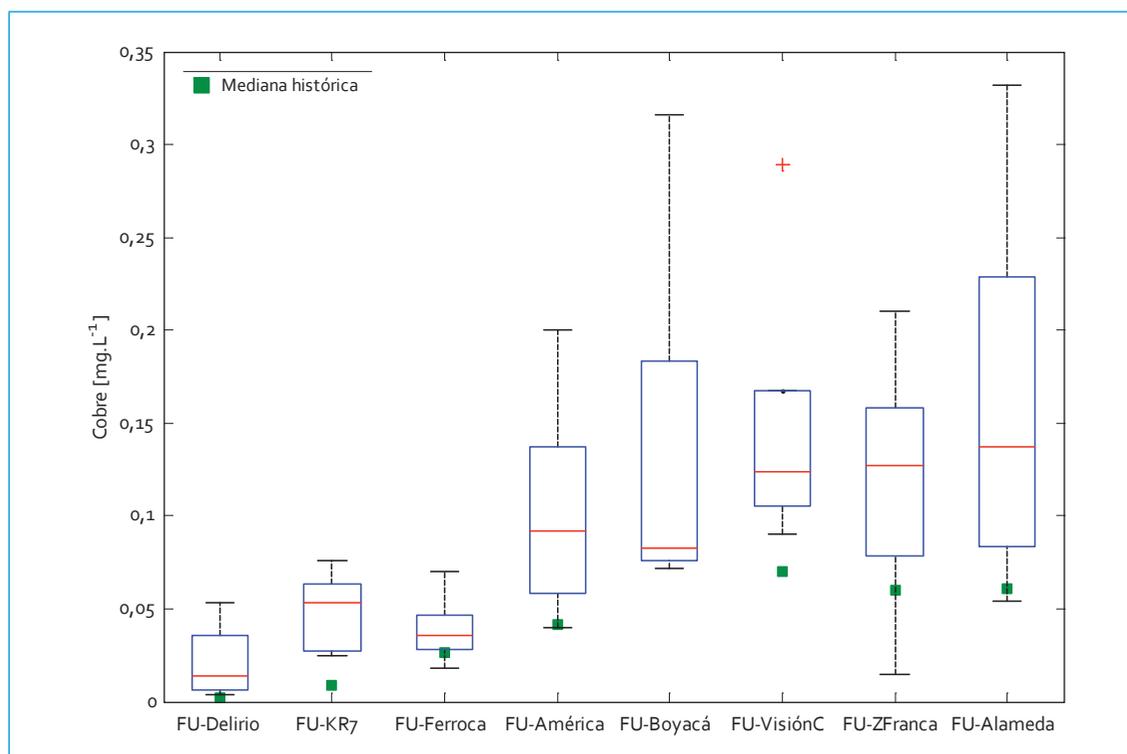


FIGURA 4.23. Perfil cobre: río Fucha

no cambia mucho respecto a las medianas y desde Visión Colombia hasta Fucha Alameda el comportamiento de cobre es constante.

En FU-ZFranca el rango de variación de concentraciones fue mayor que el de Visión Colombia; además, también hubo un aumento de aproximadamente el 50% de la mediana actual en relación con la histórica. La concentración máxima registrada para este intervalo de tiempo de monitoreo superó el registro histórico, por lo que se evidencia una afectación reciente en este punto. Por último, en el punto Fucha Alameda, el rango de variabilidad fue también alto; también se presentó un aumento de más del 50% de las medianas; no obstante, los datos para estos períodos de monitoreo se encuentran dentro del rango monitoreado en este punto.

#### 4.1.1.18.5. Cromo total

Para el punto El Delirio todas las concentraciones de cromo fueron muy bajas ( $<0,006$  mg/L). Ello sugiere ningún tipo de afectación en la calidad de agua para este punto (figura 4.24). En el punto FU-KR7 todos los valores también estuvieron por debajo del límite de detección ( $<0,006$  mg/L), excepto un valor atípico ( $0,01$  mg/L), que coincide con el día cuando se presentaron concentraciones atípicas para bario, manganeso, níquel y plomo; sin embargo, este valor se encuentra dentro del rango de concentraciones reportadas para este punto ( $0,001$ - $0,015$  mg/L). En Avenida Ferrocarril las concentraciones de cromo total empiezan a aumentar levemente, aunque no se presentan variaciones considerables en cuanto a los registros históricos. Para el punto de monitoreo

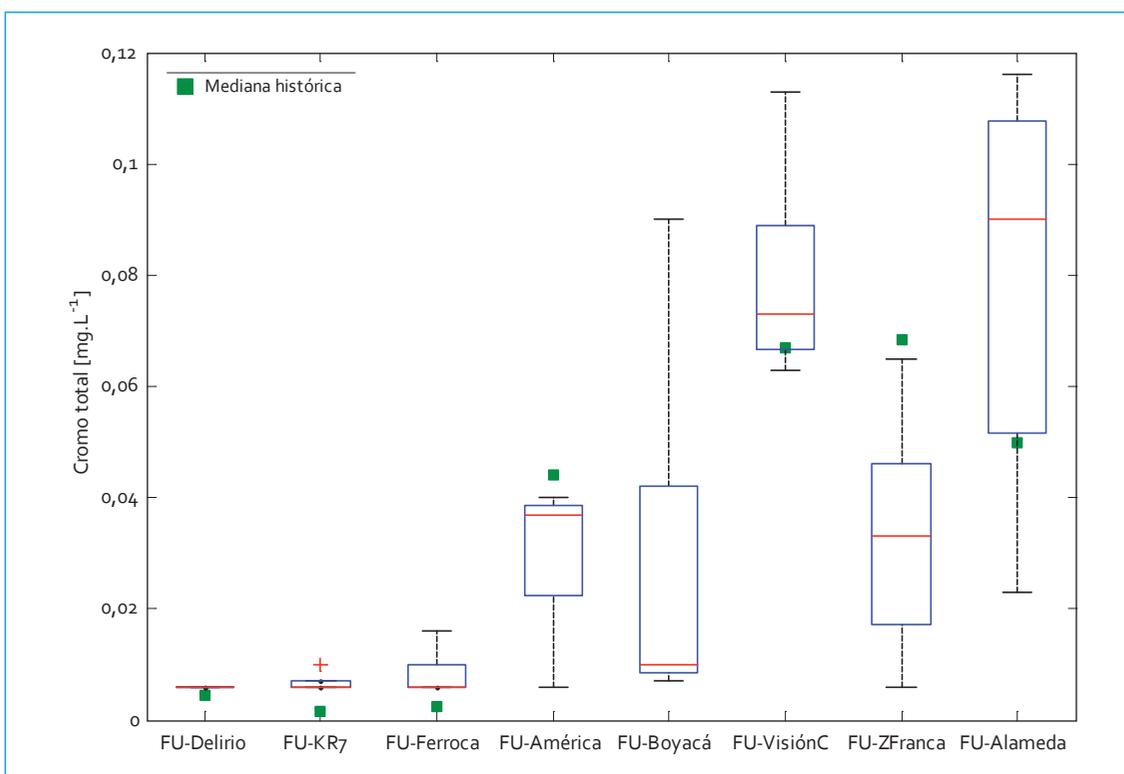


FIGURA 4.24. Perfil cromo total: río Fucha

Avenida Las Américas fue notorio un aumento importante en las concentraciones de cromo total, ya que la media en Avenida Ferrocarril fue 0,006 mg/L y ascendió en este punto hasta concentraciones medias de 0,037 mg/L, aun cuando tanto la mediana 2009-2010 como la histórica fueron similares. A partir del punto Avenida Boyacá la presencia de cromo total también aumentó, y presentó concentraciones hasta 0,09 mg/L, posiblemente por la presencia de descargas de tipo industrial aguas arriba de este punto de monitoreo.

En Visión Colombia la mediana de la campaña e histórica fueron semejantes; sin embargo, se evidencia un importante aumento en las cantidades de cromo total respecto al punto Avenida Boyacá. Para FU-VisiónC el rango de variación de concentraciones para este período de monitoreo se encontró dentro de los valores registrados históricamente. En FU-ZFranca, las

concentraciones de cromo total disminuyeron levemente. Así, se observó un leve descenso entre la mediana 2009-2010 (0,03 mg/L) y la mediana de los registros históricos (0,07 mg/L). Por último, en el punto Fucha Alameda el rango de variabilidad fue el más alto: se observó un aumento en la mediana de la campaña (0,09 mg/L) frente a la histórica (0,05 mg/L). Para este punto se han detectado concentraciones de cromo total de hasta 0,31 mg/L.

#### 4.1.1.18.6. Manganeso

En la figura 4.25 se puede observar que las concentraciones de manganeso aumentaron a partir del punto FU-KR7. En El Delirio todos los niveles de manganeso, al igual que para los otros metales, fueron bajos y su presencia se debe a condiciones naturales. En el punto FU-KR7 el rango de concentraciones fue de nuevo

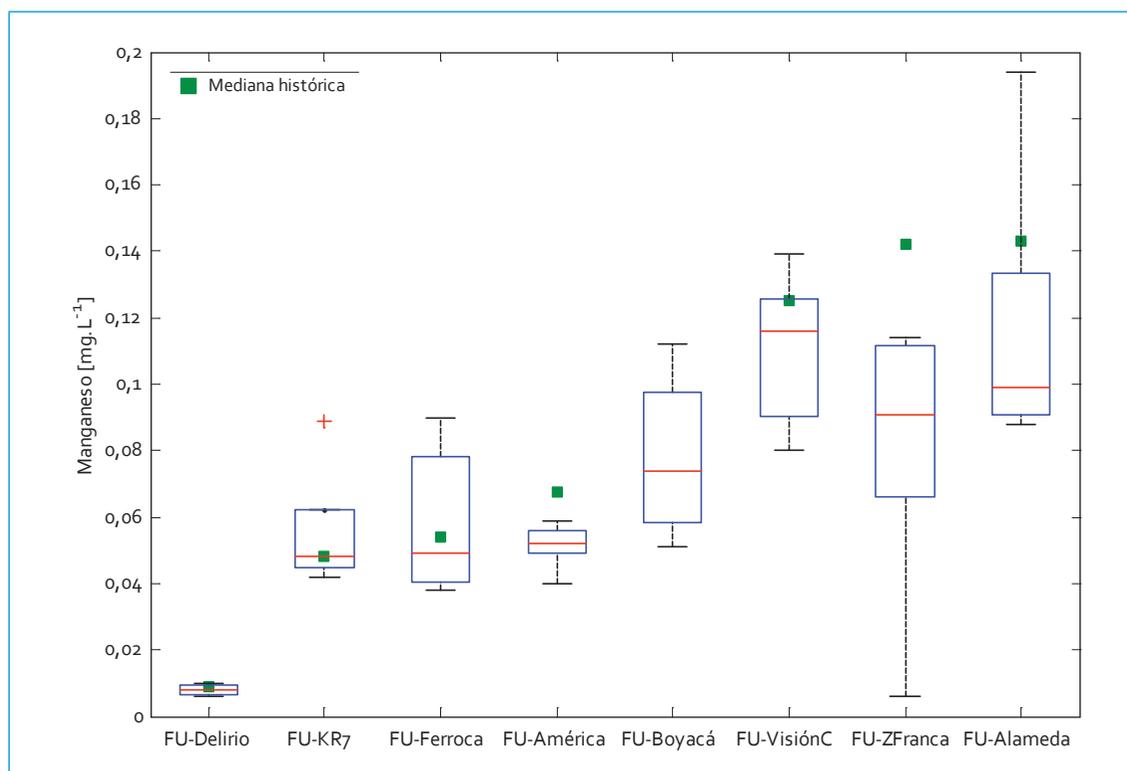


FIGURA 4.25. Perfil manganeso: río Fucha

mayor, sin embargo la mediana 2009-2010 y la histórica no difieren. Se presentó un valor atípico (0,089 mg/L) el cual coincidió con el mismo día en que se presentaron concentraciones elevadas para cromo total, bario, níquel y plomo. Esto puede confirmar la afectación de una descarga de tipo industrial. Este valor anormal se encontró dentro del rango de concentraciones reportadas para este punto (0,005-0,17 mg/L).

En el punto Avenida Ferrocarril el rango de concentraciones de manganeso aumentó un poco en relación con Carrera 7ª, pero no hubo variaciones importantes, pues las medianas no difieren significativamente. Para este punto no se evidencian cambios importantes en las cantidades de manganeso, ya que el rango de variación para este período de monitoreo se encontró dentro del comportamiento típico para este punto. En Avenida Las Américas el manganeso disminuyó levemente con respecto a FU-Ferroca, pero tanto la mediana actual como la histórica fueron similares. A partir del punto Avenida Boyacá la presencia de manganeso aumenta y sigue sin variaciones importantes hasta Fucha Alameda. En Visión Colombia la mediana 2009-2010 e histórica no sufrieron cambios importantes, y el rango de variación de concentraciones para este lapso de monitoreo estuvo dentro de los valores registrados históricamente. En FU-ZFranca, el rango de variación fue mayor que el de Visión Colombia; además, se observó una leve disminución de la mediana de la campaña (0,09 mg/L) frente a la histórica (0,14 mg/L). Por último, en el punto Fucha Alameda, el rango de variabilidad fue alto, pues se encontraron concentraciones de hasta 0,2 mg/L. Al igual que en FU-ZFranca, la mediana 2009-2010 (0,09 mg/L) fue menor que la histórica (0,14 mg/L).

#### 4.1.1.18.7. Níquel

Al igual que para los otros metales analizados, el níquel aumentó a partir del punto FU-Ferroca (figura 4.26). Para El Delirio, las concentraciones de níquel fueron muy bajas, lo que sugiere ausencia de afectación por metales en este punto. En FU-KR7 el rango de concentraciones fue similar al FU-Delirio; además, la mediana de la campaña y la histórica no difirieron de manera significativa. En el punto Avenida Ferrocarril el rango de concentraciones de níquel aumentó levemente respecto a Carrera 7ª, pero no hubo diferencias significativas entre las medianas. Para Avenida Las Américas las concentraciones de níquel fueron mayores, aun cuando la mediana 2009-2010 fue muy cercana a los registros históricos. En FU-Boyacá, el rango de variación fue mayor y en Visión Colombia las concentraciones de níquel aumentaron a un valor medio de 0,04 mg/L. Pese a esta situación, la mediana de la campaña y la histórica fueron semejantes y el rango de variación de concentraciones para este período de monitoreo se encontró dentro de los valores registrados históricamente.

En FU-ZFranca, el rango de variación de concentración de níquel en el río fue mayor que el de Visión Colombia; sin embargo, no hubo evidencia de mayores cantidades de níquel, ya que los datos reportados para este período de monitoreo también estuvieron dentro del rango histórico. Por último, en el punto Fucha Alameda el rango de variabilidad de concentraciones disminuyó un poco y no se apreciaron cambios importantes en cuanto al níquel en el tiempo.

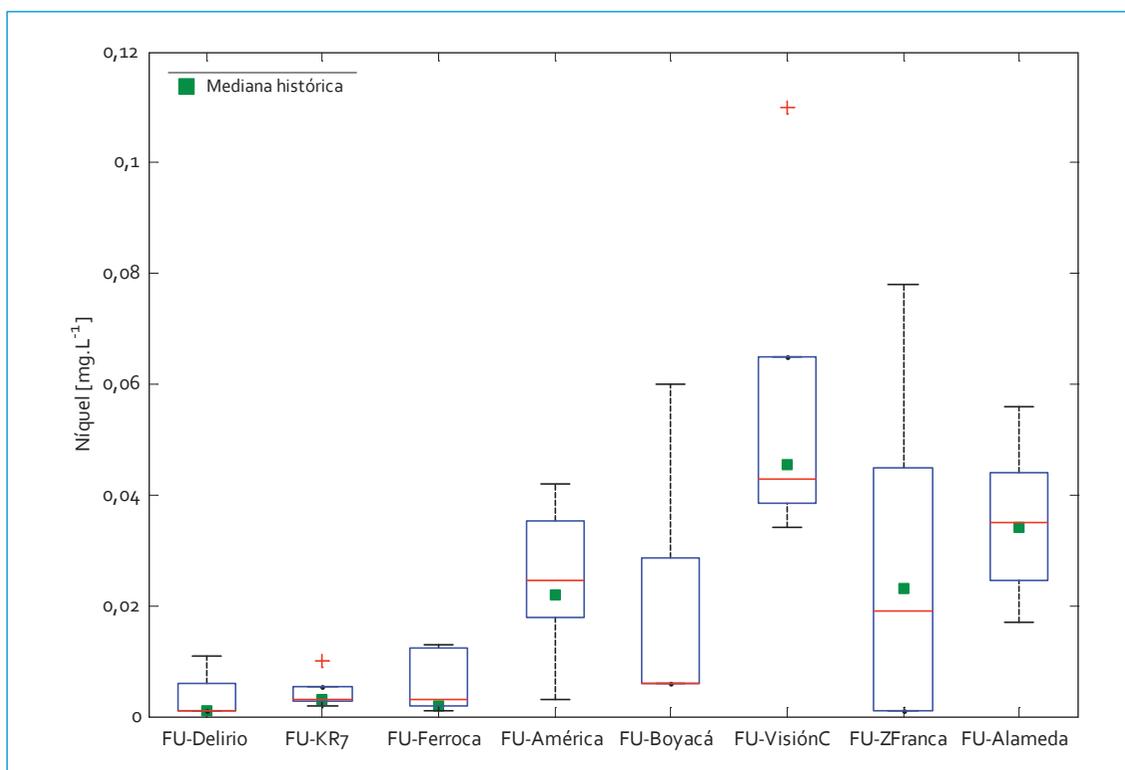


FIGURA 4.26. Perfil níquel: río Fucha

#### 4.1.1.18.8. Plomo

Las medianas 2009-2010 y los rangos de concentración en Avenida Ferrocarril fueron superiores a los registros históricos (figura 4.27), aun cuando para el punto El Delirio todas las concentraciones de plomo fueron no detectables ( $<0,003$  mg/L). En el punto Avenida Ferrocarril el rango de concentraciones aumenta respecto a Carrera 7ª; además, la mediana de la campaña (0,013 mg/L) fue cuatro veces superior que la histórica (0,003 mg/L). En Avenida Las Américas el rango de concentraciones volvió a disminuir (muy posiblemente por efectos de dilución al igual que para los otros metales), aunque la mediana 2009-2010 no varió mucho en relación con Av. Ferrocarril. En FU-Boyacá, el plomo se mantuvo similar a los valores históricos, mientras que en Visión Colombia se detectaron valores de hasta 0,15 mg/L.

Hubo un aumento del 50% de la mediana 2009-2010 respecto a la histórica; sin embargo, el rango de variación de concentraciones para este período de monitoreo se encontró dentro de los valores registrados históricamente. En FU-ZFranca, el rango de variación fue menor que el de Visión Colombia, aunque la mediana actual superó la histórica. Por último, en el punto Fucha Alameda el comportamiento fue similar al observado en Zona Franca: se presentó un aumento en la mediana actual (0,023 mg/L) comparada con la histórica (0,003 mg/L).

#### 4.1.2. Cargas contaminantes

##### 4.1.2.1. DBO

Las cargas de  $DBO_5$  mostraron un comportamiento ascendente a lo largo del río (figura 4.28). Se observó un incremento en las cargas

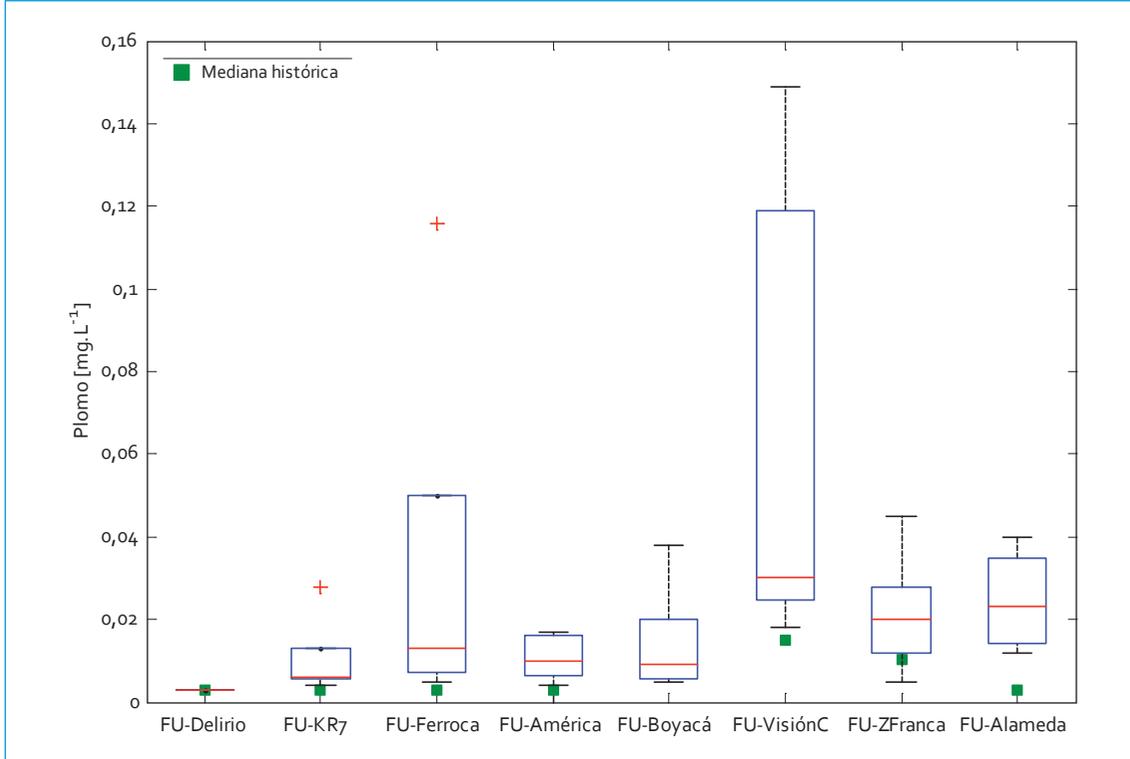


FIGURA 4.27. Perfil plomo: río Fucha

de DBO<sub>5</sub> a partir del tramo 2 (tabla 4.2), donde aumentaron significativamente las cargas por las descargas de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur que se encuentran en este tramo.

TABLA 4.2. Carga promedio transportada DBO<sub>5</sub>: río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DBO <sub>5</sub>	7	1198	2209	44228

Dada la buena calidad que tiene el tramo 1, no existen metas de reducción para cargas a esta altura del río. La carga media para esta campaña (7 t/año) es idéntica a la media histórica (6,6 t/año) y, por lo tanto, se observa un

comportamiento constante dada la ausencia de descargas en este tramo.

Para los tramos 2 y 3 se presentó un caso similar, pues el promedio histórico está por encima de los valores obtenidos para todo el período de monitoreo. Los promedios históricos para cada tramo son 2313 y 6447 t/año y las cargas promedio para la campaña 2009-2010 fueron 1198 y 2209 t/año, respectivamente. En cuanto a las metas de reducción establecidas en la resolución 4328 del 2010 (1750 y 2150 t para los tramos 2 y 3, respectivamente), se puede obtener una alta remoción de carga de DBO<sub>5</sub> para ambos tramos, ya que estos valores son próximos al 50% de las cargas obtenidas para cada tramo.

Se presentó un caso particular para el tramo 4, ya que la variabilidad de las cargas registradas para todo el período de monitoreo

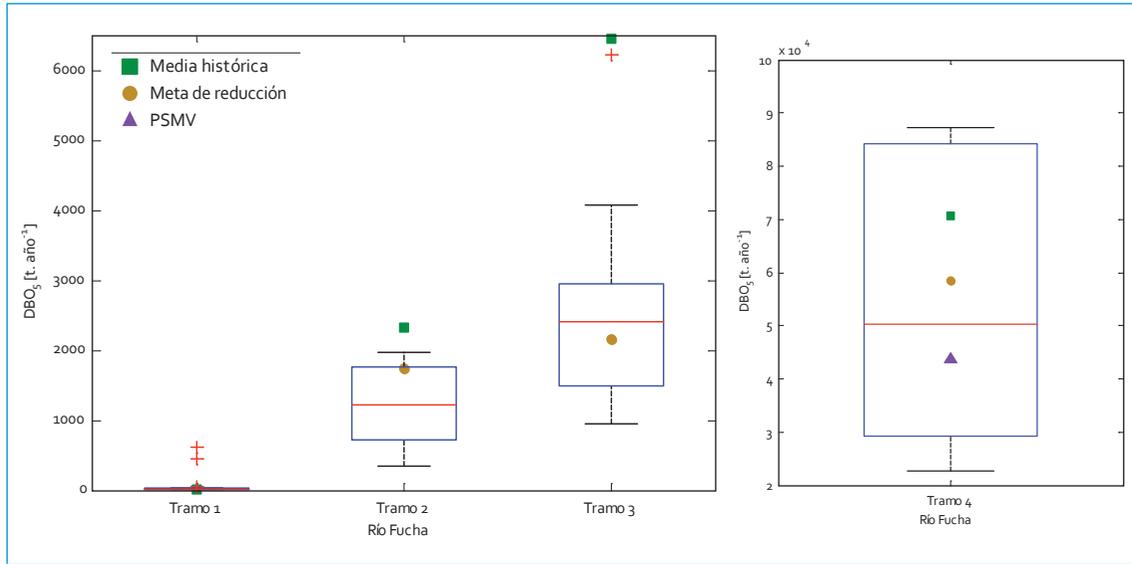


FIGURA 4.28. Perfil cargas  $DBO_5$ ; río Fucha

fue mayor que para los demás tramos. Esto puede estar influenciado por las descargas importantes que recibe durante el día, pues gran porcentaje del total de carga vertida se encuentra en este tramo. En cuanto al primer trimestre del 2010 la carga de  $DBO_5$  transportada no presentó cambios importantes; la carga promedio para ese período fue 48 542 t/año y la carga promedio para todas la campaña fue 44 228 t/año.

El promedio histórico para este tramo está por debajo de la carga promedio registrada para todo el período de monitoreo. El promedio histórico para el tramo 4 es 70 594 t/año y la carga promedio para 2009-2010 fue de 44 228 t/año, lo que se traduce en una disminución del 37% en carga de  $DBO_5$  aproximadamente. Para este tramo la meta de reducción es 58 500 t (superior a la mediana de carga registrada en estas campañas). La meta de remoción de carga de 43 728 t para el 2012, por lo cual se puede ver que el efecto del cumplimiento del objetivo de calidad en este tramo del río

será positivo para el saneamiento de este tramo.

4.1.2.2. DQO

En la figura 4.29 se presenta el comportamiento de cargas de DQO a lo largo del río Fucha, establecido a partir de las medidas hechas en el período 2009-2010, y, al igual que para  $DBO_5$  se observa un incremento en las cargas de DQO a partir del tramo 2 (tabla 4.3).

TABLA 4.3. Carga promedio transportada DQO: río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DQO	68	2925	6490	103037

Para el tramo 1 la carga media para estas campañas (68 t/año) ha aumentado un 26% aproximadamente respecto a la media histórica (54 t/año). Esto está asociado al aumento

del caudal promedio en relación con el histórico (76%), el cual afecta directamente en el estimativo de cargas. Al igual que para la  $DBO_5$ , en los tramos 2 y 3 el promedio histórico estuvo por encima de los valores obtenidos para esta campaña. Los promedios históricos para cada tramo son 4731 y 13 071 t/año, y las cargas promedio para todo el período de monitoreo fueron 2925 y 6490 t/año, respectivamente.

En el tramo 4 se presentó el mismo caso que para la  $DBO_5$ , donde la variabilidad de las cargas registradas para todo el período de monitoreo (2009-2010) fue mayor que para los demás tramos. El promedio histórico de este tramo está por encima de la carga promedio registrada para el lapso de monitoreo. El promedio histórico del tramo 4 es 126 397 t/año y la carga promedio para la campaña fue 103 037 t/año, lo que se traduce en una disminución del 20% en carga de DQO aproximadamente.

4.1.2.3. SST

Las cargas de SST, al igual que para  $DBO_5$  y DQO, tuvieron un comportamiento ascendente a lo largo del río (figura 4.30). El tramo 4 es el más afectado por estas cargas provenientes de las descargas de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur, que se encuentran aguas abajo de la Avenida Boyacá (tabla 4.4).

TABLA 4.4. Carga promedio transportada SST: río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SST	99	920	1685	135654

La carga media para 2009-2010 (99 t/año) en el tramo 1 aumentó respecto a la media histórica (11 t/año), lo cual se pudo presentar por varias razones: incremento en el caudal

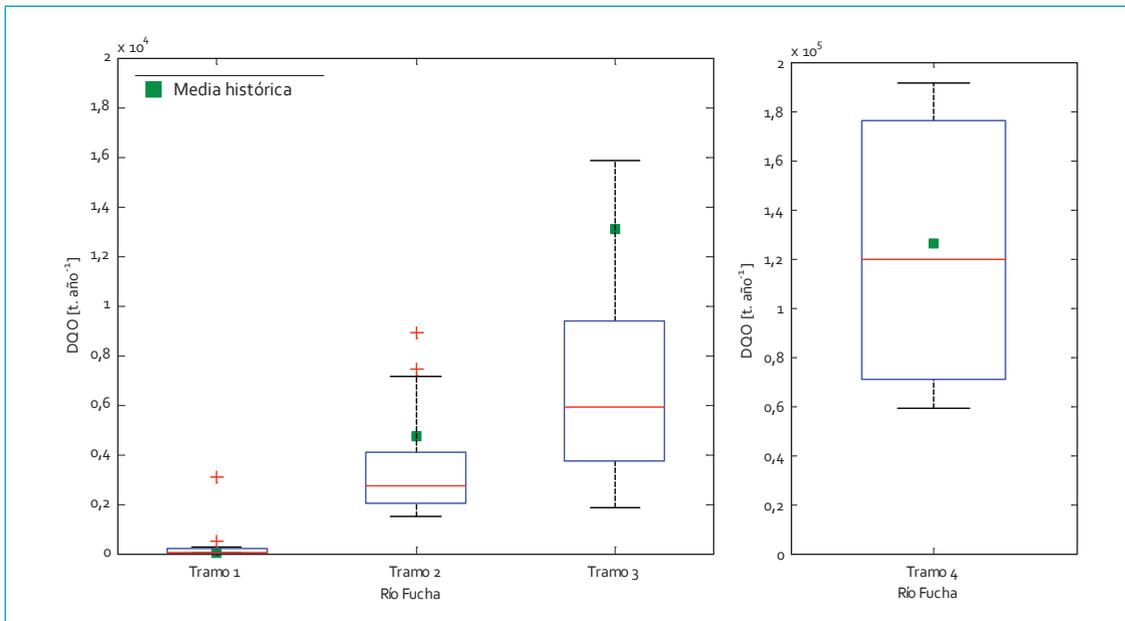


FIGURA 4.29. Perfil cargas DQO: río Fucha

promedio que tiende a generar un mayor arrastre, transporte o resuspensión de sedimentos y, ligado a esto, un aumento en la concentración de SST de 4 (primer trimestre del 2010) a 8,5 mg/L (segundo trimestre del 2010). Por otro lado, este aumento en carga de SST está más relacionado con el período de lluvias, que a mayor presencia de materia orgánica, porque no hubo un aumento equivalente en las cargas de  $\text{DBO}_5$  o  $\text{DQO}$  como para ligar este incremento a eventos de contaminación por materia orgánica.

En los tramos 2 y 3, el promedio histórico está por encima de los valores obtenidos para esta campaña. Los promedios históricos para cada tramo son 2505 y 4842 t/año y las cargas promedio para el período 2009-2010 fueron 920 y 1685 t/año, respectivamente. En cuanto a las metas de reducción propuestas (2150 y 2250 t para los tramos 2 y 3, respectivamente), se puede notar que en el tramo 2 la meta está por encima de las cargas registradas para todo el período de monitoreo y ello indica una

disminución de la carga de SST transportada. Para el tramo 3 no ocurre lo mismo, pero más del 50% de las cargas están por debajo de la meta, lo cual demuestra que se puede lograr una buena remoción de carga de SST para este tramo.

Para el tramo 4 se presentó una mayor variabilidad en las cargas obtenidas en todas las campañas de monitoreo. Se presentó un caso diferente para este tramo, respecto a la comparación de los valores promedio histórico y de la campaña, pues la carga 2009-2010 (135 654 t/año) fue mayor al promedio histórico (103 527 t/año). Se presentó un aumento del 31% aproximadamente en cuanto al histórico, causado por mayores concentraciones promedio en SST, puesto que para el primer trimestre del 2010 los SST en Fucha Alameda fueron 490 mg/L, y para el segundo trimestre, 525 mg/L.

Además, la carga máxima reportada para esta campaña (527 330 t/año) supera el valor promedio histórico (103 527 t/año) y la meta

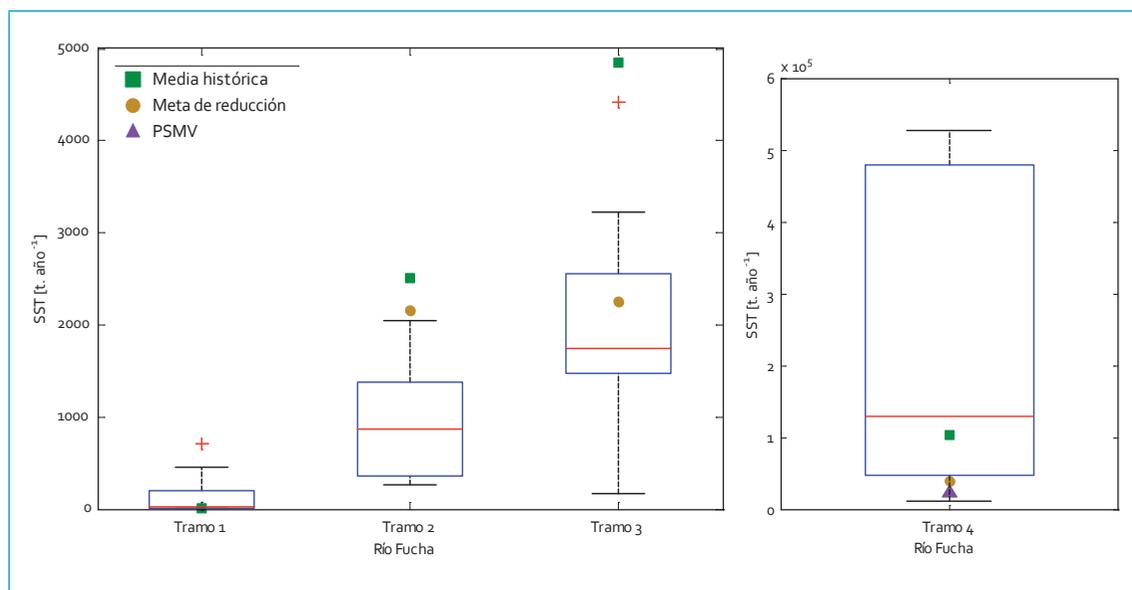


FIGURA 4.30. Perfil cargas SST: río Fucha

de reducción (39 300 t). Estos incrementos son fruto de las diferentes obras que sobre el cauce del río ha venido adelantando la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en este tramo. El Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) sólo toma en cuenta el tramo 4 y para los SST establece una carga de 22 879 t/año. Este valor es menor a lo que se debería reducir para mejorar la calidad en este tramo (meta de reducción: 39 300 t); por lo tanto, el efecto del PSMV sobre el tramo 4 del río Fucha será mínimo.

#### 4.1.2.4. Nitrógeno total

Similar a los demás parámetros, las cargas de  $N_{total}$  tuvieron un comportamiento ascendente a lo largo del río (tabla 4.5). Al igual que para materia orgánica y sólidos suspendidos, se observó un incremento en las cargas de  $N_{total}$  a partir del tramo 2. En la figura 4.31 se representa el comportamiento de cargas de  $N_{total}$  para el río Fucha. Para el tramo 1 la carga media 2009-2010 (9 t/año) aumentó durante los períodos de monitoreo respecto a la media histórica (4 t/año). De nuevo esto puede ser el resultado de un registro de caudales más altos para estas campañas de monitoreo.

TABLA 4.5. Carga promedio transportada  $N_{total}$ : río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$N_{total}$	9	424	728	6737

Para el tramo 2, los valores promedio histórico y los de la campaña 2009-2010 muestran una disminución del 25% aproximadamente (569 y 424 t/año, respectivamente) en carga

de nitrógeno. Para el tramo 3, los valores promedio histórico y para 2009-2010 difieren. Al igual que para el tramo 2, se evidenció una reducción en la carga transportada (1046 y 728 t/año, respectivamente).

Al igual que para materia orgánica y sólidos, en el tramo 4 existe la misma situación y las cargas se presentan en mayor proporción que para los demás tramos. El tramo 4 tuvo las peores condiciones de calidad en relación con cargas de nitrógeno total. El promedio para 2009-2010 fue de 6737 t/año; entre tanto, el promedio histórico para este tramo es 12 830 t/año y muestra que con el tiempo las cargas han disminuido.

#### 4.1.2.5. Fósforo total

Se observó un incremento en las cargas de  $F_{total}$  a partir del tramo 2 (figura 4.32). Las cargas obtenidas para el tramo 1 en la campaña no presentan evidencia alguna de afectación, pues el promedio 2009-2010 de 0,3 t/año (tabla 4.6) es casi igual al promedio histórico (0,2 t/año). Todas las cargas obtenidas para la campaña se encontraron dentro del rango histórico.

TABLA 4.6. Carga promedio transportada  $F_{total}$ : río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$F_{total}$	0,3	54	87	1091

Para los tramos 2 y 3, los promedios históricos son mayores que los valores obtenidos para la campaña 2009-2010. Los promedios históricos para cada tramo son 115 y 172 t/año, respectivamente, y las cargas promedio para la campaña fueron 54 y 87 t/año. Al igual que para los demás parámetros, las cargas prome-

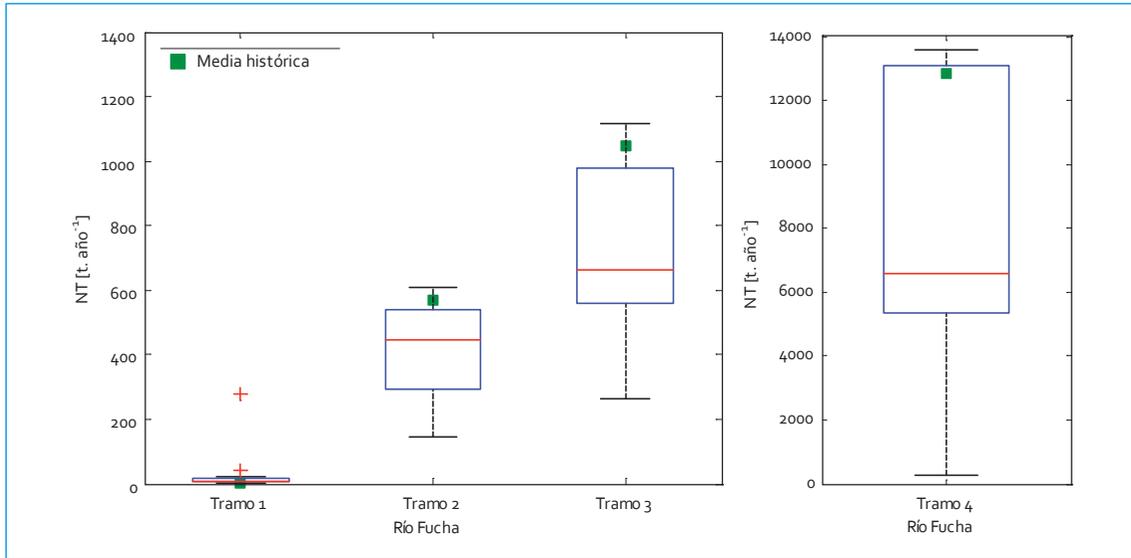


FIGURA 4.31. Perfil cargas  $N_{total}$ : río Fucha

dio transportadas actualmente han disminuido aproximadamente el 50% para cada tramo.

Al igual que para  $N_{total}$  en el tramo 4 las cargas se presentan en mayor proporción que para los demás tramos. Este tramo tuvo las peores condiciones de calidad respecto a cargas de nutrientes. Así, al observar el promedio histórico (2105 t/año) y el promedio para 2009-

2010 (1091 t/año), se evidenció una mejoría, pues se redujo en un 50% aproximadamente las cargas de fósforo.

4.1.2.6. Grasas y aceites

En la figura 4.33 se presenta el perfil de carga para GyA del río Fucha. Como era de esperarse,

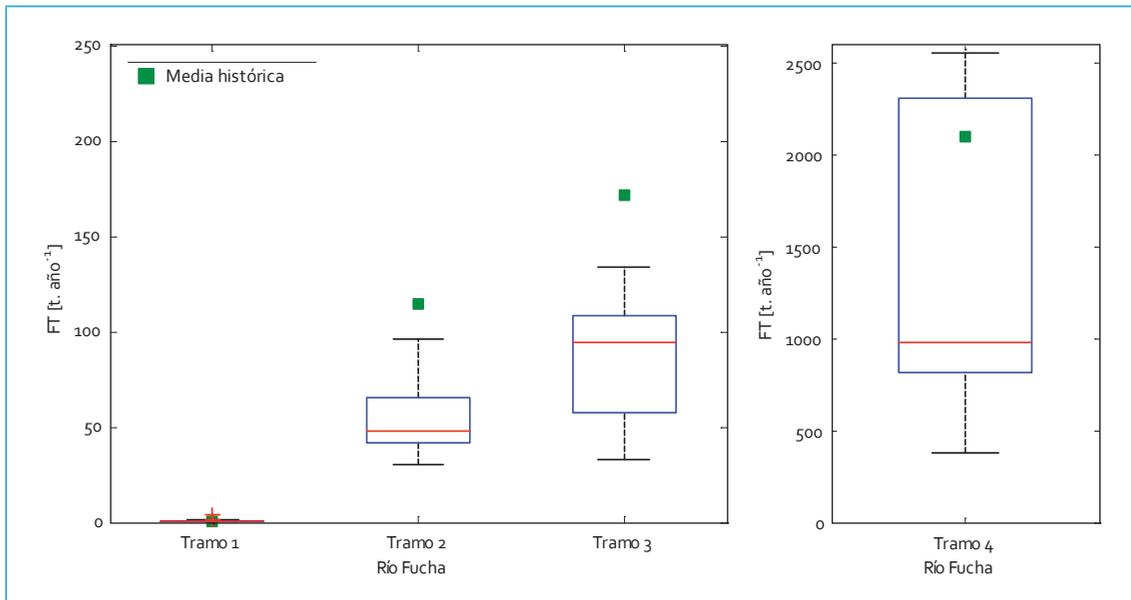


FIGURA 4.32. Perfil cargas  $F_{total}$ : río Fucha

se observa un aumento entre los tramos 1 y 2. Las cargas promedio transportadas de GyA en el río Fucha se pueden observar en la tabla 4.7. El comportamiento de GyA en el tramo 1 del río Fucha presentó muy pocas variaciones respecto a los tramos aguas abajo del río. Sin embargo, dentro de las cargas obtenidas en estas campañas, el valor promedio (39 t/año) fue menor al promedio histórico (55 t/año), que indica un mejoramiento en las cargas transportadas en este tramo. El resto de cargas calculadas para este tramo se encuentran dentro del comportamiento observado en los últimos años de monitoreo.

TABLA 4.7. Carga promedio transportada GyA: río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
GyA	39	323	622	15889

Para el tramo 2 (FU-Ferroca) se observó una reducción de las cargas en relación con el valor promedio histórico (470 t/año). El promedio para los tres trimestres en conjunto (323 t/año) evidencia un mejoramiento en la calidad de este tramo respecto a GyA. Todas las cargas reportadas se encontraron dentro del rango histórico. Para el tramo 3 (FU-América) se evidenció un incremento importante, ya que la carga promedio (622 t/año) aumentó más del doble en cuanto a la carga promedio del tramo 2 (323 t/año), lo que puede deberse al impacto de la descarga del Canal Comuneros.

Respecto al tramo 4, el promedio histórico (12 594 t/año) es un poco menor al promedio obtenido para 2009-2010 (15 889 t/año). Las cargas de GyA del tramo 4 disminuyeron en el segundo trimestre del 2010. Las concentraciones reportadas para este período fueron menores en comparación con el cuarto trimestre del 2009 y con el primer trimestre del 2010, cuando se pasó de una concentración promedio de 236 a 74, y finalmente, a 67 mg/L.

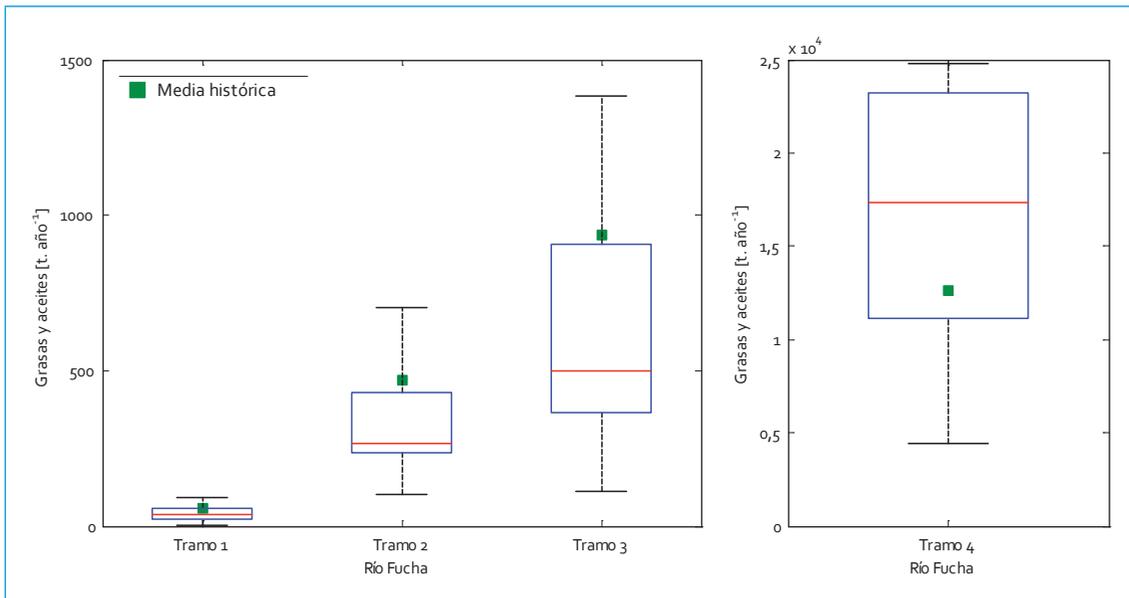


FIGURA 4.33. Perfil cargas GyA: río Fucha

#### 4.1.2.7. SAAM

El comportamiento de SAAM en el tramo 1 del río Fucha presentó muy pocas variaciones en relación con los tramos aguas abajo del río. Como se puede observar en la tabla 4.8, el valor promedio para la campaña 2009-2010 (0,8 t/año) fue muy similar al histórico (0,60 t/año), y por lo tanto esto se ve reflejado en la buena calidad de agua en este tramo.

TABLA 4.8. Carga promedio transportada SAAM: río Fucha

Parámetro	río Fucha (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SAAM	0,8	69	102	1628

Para los tramos 2 y 3 el promedio histórico para cada uno es 46 y 104 t/año, respectivamente, y las cargas promedio para la campaña de monitoreo fueron 69 y 102 t/año (figura 4.34). Para el tramo 2 se presentó un incremento del 50% en la carga promedio respecto

al promedio histórico, posiblemente causado por el aumento en la concentración promedio de SAAM en el primer trimestre del 2010 (9 mg/L); mientras que para el cuarto trimestre del 2009 y el segundo trimestre del 2010 la concentración promedio fue muy similar (4 mg/L). Para el tramo 3 el comportamiento de las cargas de SAAM ha sido casi constante, pues el promedio histórico (104 t/año) y el actual (102 t/año) son prácticamente iguales. Para el tramo 3 (FU-América) se confirma el impacto que tiene la descarga del Canal Comunereros, el cual se ve reflejado en el aumento en las concentraciones no sólo en SAAM, sino en materia orgánica, SST y nutrientes.

El tramo 4, al igual que para los otros parámetros de monitoreo, tuvo las peores condiciones de calidad respecto a cargas de SAAM. La cantidad de carga transportada aumenta considerablemente comparada con el tramo 3 (aumenta dieciséis veces la carga que transporta en el tramo 3). Se evidencia un importante ascenso, ya que el promedio histórico de SAAM para ese tramo es 483 t/año y para este

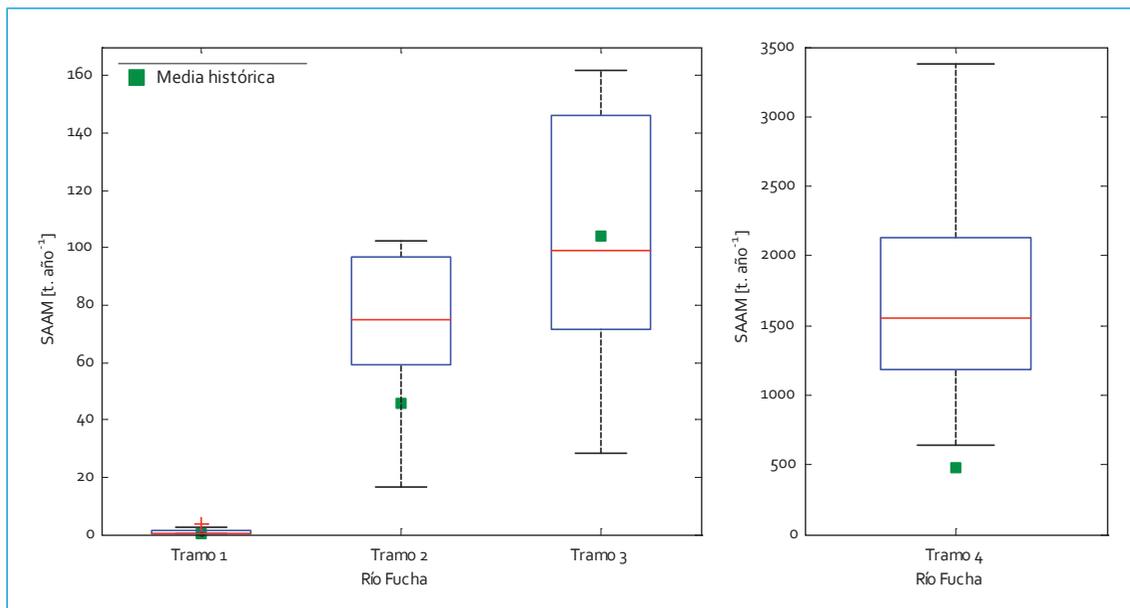


FIGURA 4.34. Perfil cargas SAAM: río Fucha

período de monitoreo la carga promedio fue de 1628 t/año.

## 4.2. Calidad del agua

En el tramo 1 de este río hay un punto (El Delirio) para el cual la calidad del agua (WQI) se calculó con 200 datos, de los cuales 10 excedieron los objetivos de calidad. De esta manera la calidad de agua en este tramo fue buena (tabla 4.9).

TABLA 4.9. WQI río Fucha: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	VARIABLES	Valor
Oxígeno disuelto	7	F1	20
DBO	0	F2	5
DQO	0	NSE	0,02
N <sub>total</sub>	0	F3	1,67
F <sub>total</sub>	0	WQI	88,06
SST	3		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	0		
SAAM	0		

El parámetro que tuvo mayor lejanía del objetivo de calidad fue el oxígeno disuelto, pero la mayoría de los datos que excedieron estuvieron muy cerca a 7 mg/L (objetivo de calidad); por lo tanto, el WQI no se afectó de gran manera. Comparando este valor WQI (2009-2010) con el valor WQI correspondiente para el

período 2008-2009, la calidad de este tramo se ha mantenido, teniendo en cuenta que el WQI de la campaña fue de 88,06 y el del 2008-2009 fue de 88,40.

En el tramo 2 de este río (Carrera 7 y Avenida Ferrocarril) se generaron un total de 409 datos de calidad de agua, de los cuales 176 estuvieron fuera de los objetivos de calidad. Por ende, la calidad de agua de este tramo fue pobre. Todos los parámetros exceden los objetivos de calidad de este tramo, pero los más críticos son el oxígeno disuelto, la materia orgánica, los coliformes fecales y los SST (tabla 4.10). Se evidencia una clara afectación por descargas de aguas residuales domésticas en este tramo. A diferencia del tramo 1, la excedencia en los diferentes parámetros fue de mayor escala, es decir, los valores registrados

TABLA 4.10. WQI río Fucha: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	VARIABLES	Valor
Oxígeno disuelto	19	F1	100
DBO	17	F2	38
DQO	19	NSE	1,09
N <sub>total</sub>	18	F3	52,22
F <sub>total</sub>	13	WQI	31,24
SST	21		
Grasas y aceites	5		
Coliformes fecales	20		
pH	7		
SAAM	17		

para 2009-2010 están muy alejados de los objetivos de calidad propuestos para este tramo. Si se compara el valor  $WQI$  de la campaña con el valor  $WQI$  correspondiente al período 2008-2009, la calidad de este tramo sigue siendo pobre, ya que el  $WQI$  2009-2010 es de 31,24 y el del 2008-2009 fue de 20,15. Ello denota una mejora en la calidad del tramo. Los parámetros más críticos son recurrentes en el tiempo. Así, el oxígeno disuelto, la materia orgánica y los SST exceden con mayor frecuencia los objetivos de calidad.

En el tramo 3 de este río hay dos puntos (Avenida Las Américas y Avenida Boyacá), donde se generaron 416 datos, de los cuales 107 no satisfacen los objetivos de calidad. De este modo, la calidad de agua fue marginal. A diferencia del tramo 2, se excedieron en 9 de los 10 parámetros tenidos en cuenta para el cálculo del  $WQI$ : todos los datos registrados para el  $F_{total}$  estuvieron dentro del objetivo de calidad (8 mg/L). Los parámetros que mayor excedencia presentaron fueron el oxígeno disuelto (65%) y SAAM (73%), seguido por la DQO,  $N_{total}$ , coliformes fecales y GyA (tabla 4.11).

Este tramo tuvo mejor comportamiento que el tramo 2, pues fueron menos los datos que no satisficieron los objetivos de calidad establecidos para el tramo 3. Así, al comparar el valor  $WQI$  2009-2010 con el valor  $WQI$  correspondiente al período 2008-2009, la calidad de este tramo sigue siendo marginal, ya que el  $WQI$  de la campaña fue de 45,53 y el del 2008-2009 de 58,13. La disminución en el valor del  $WQI$  fue causada por dos razones: primera, la cantidad de datos utilizados para el  $WQI$  2008-2009 fue menor, y segunda, para 2008-2009 sólo se tuvo en cuenta el punto Avenida Las Américas, a diferencia del  $WQI$  2009-2010 que tuvo más datos, porque se incluyó el punto de monitoreo Avenida Boyacá. Los parámetros

TABLA 4.11.  $WQI$  río Fucha: tramo 3

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variabes	Valor
Oxígeno disuelto	19	F1	90
DBO	1	F2	25,7
DQO	12	NSE	0,13
$N_{total}$	12	F3	11,33
$F_{total}$	0	WQI	45,56
SST	9		
Grasas y aceites	13		
Coliformes fecales	18		
pH	1		
SAAM	22		

críticos recurrentes en el tiempo son el oxígeno disuelto,  $N_{total}$  y coliformes fecales, y los emergentes (SAAM y GyA) son parámetros críticos, especialmente en el punto Avenida Boyacá, donde se excede con mayor frecuencia los objetivos de calidad.

En el tramo 4 de este río (Visión Colombia, Fucha Zona Franca y Fucha con Alameda) el cálculo del  $WQI$  se realizó con 609 datos, de los cuales 269 estuvieron fuera de los objetivos de calidad; por lo tanto, la calidad de agua de este tramo fue pobre. Los 10 parámetros excedieron los objetivos de calidad, de los cuales los más críticos son SAAM y oxígeno disuelto (95% de los datos), seguidos por la DQO,  $N_{total}$  y coliformes fecales (tabla 4.12). Los tres puntos de monitoreo están igualmente afectados: a partir del punto Visión Colombia las concentraciones

de oxígeno disuelto son nulas. Este tramo es el más crítico en términos de calidad de agua.

TABLA 4.12. WQI río Fucha: tramo 4

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	37	F1	100
DBO	18	F2	45
DQO	37	NSE	0,37
N <sub>total</sub>	34	F3	27,23
F <sub>total</sub>	15	WQI	34,79
SST	20		
Grasas y aceites	29		
Coliformes fecales	35		
pH	1		
SAAM	43		

Al comparar el valor WQI 2009-2010 con el valor WQI correspondiente al período 2008-2009, la calidad de este tramo continúa siendo pobre, ya que el WQI 2009-2010 fue de 34,79 y el del 2008-2009 de 42,16. Los parámetros críticos que fueron recurrentes en el tiempo fueron el oxígeno disuelto, N<sub>total</sub> y materia orgánica. En la figura 4.35 se presenta el mapa de calidad para el río Fucha generado a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010.

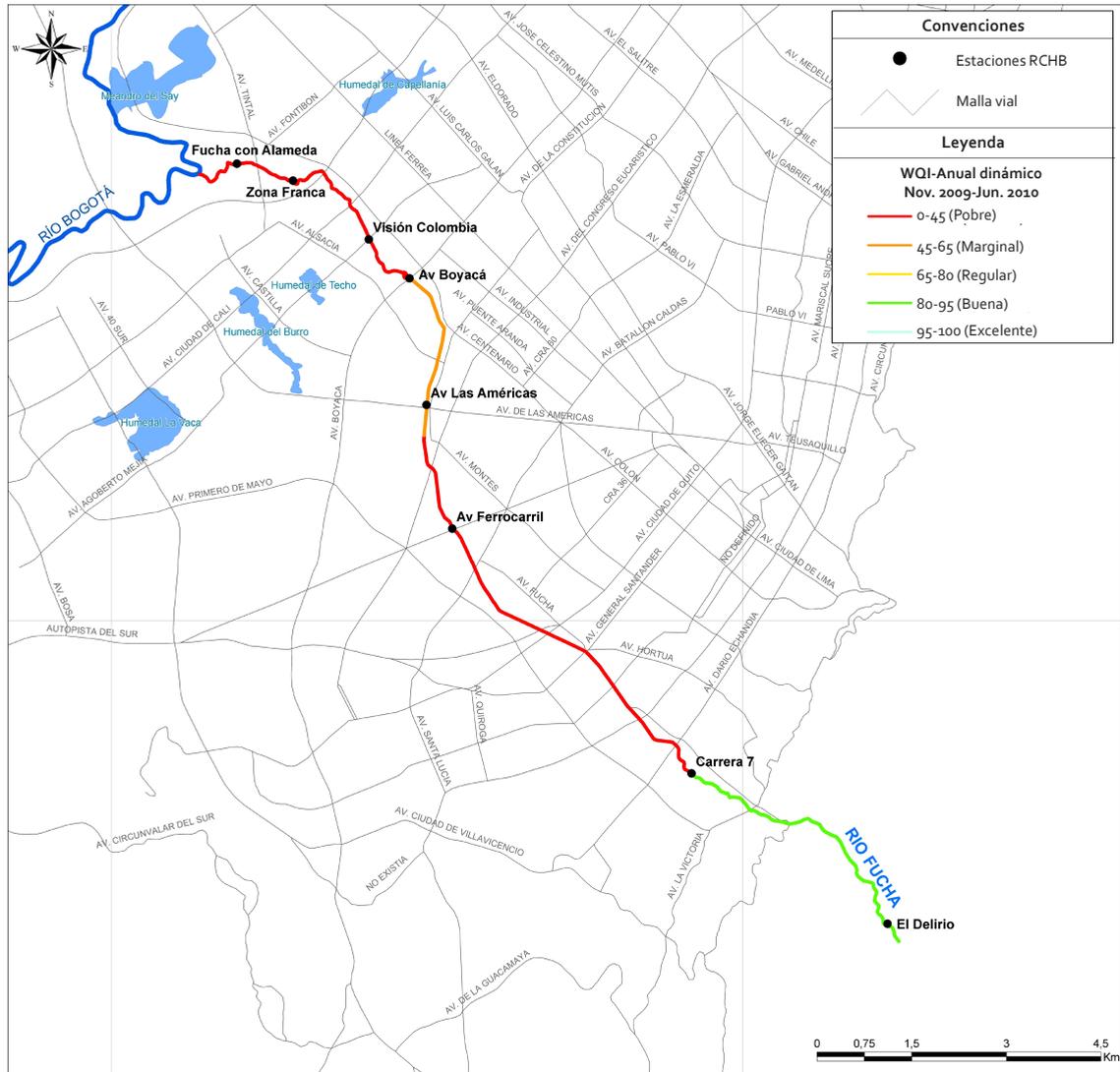


FIGURA 4.35. Mapa de calidad: río Fucha

## 5. RÍO TUNJUELO

### 5.1. Resultados del monitoreo físicoquímico

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

##### 5.1.1.1. Caudal

El río Tunjuelo muestra una dinámica en los perfiles de concentraciones muy diferente a los demás ríos: en la cuenca alta se ve afectado por las descargas de quebradas que aún no han sido saneadas; pero, justo después de su paso por las zonas inundadas, sufre cambios importantes en cuanto a calidad, lo que denota una aparente mejora. Sin embargo, las descargas de aguas residuales en la cuenca media y baja del río son tan significativas que afectan de manera notable la calidad.

La figura 5.1 presenta el perfil longitudinal de los caudales del río Tunjuelo. La variabilidad de los caudales, especialmente en los primeros puntos de monitoreo se debe a la operación de las compuertas del embalse La Regadera por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en el segundo semestre del 2010, ya que a partir de mayo de ese año se incrementaron significativamente los caudales, sobre todo en el punto de monitoreo

La Regadera. Se pudo observar que los caudales en La Regadera y Universidad Antonio Nariño (UAN), fueron muy dispersos, al variar en un rango de 6 L/s a 9,7 m<sup>3</sup>/s.

Es necesario resaltar que los datos estuvieron sesgados hacia el percentil 25, 17,3 y 684 L/s, respectivamente, correspondientes a los caudales normales del río cuando no se abren las compuertas. Estos rangos de variación de caudal van disminuyendo aguas abajo, siendo Yomasa el punto donde más homogéneos fueron los caudales, lo cual es consecuencia del amortiguamiento del caudal a lo largo del río, pues desde Yomasa hasta el Barrio México las medianas de los caudales se mantuvieron relativamente constantes. En San Benito y Makro AutoSur se midieron caudales atípicos obtenidos en los meses donde se presentó la apertura de las compuertas de La Regadera, que muestran que aun en estos puntos del río se puede ver la creciente de los caudales.

En el punto Transversal 86 se apreció un incremento importante del caudal, debido a la descarga del interceptor Tunjuelo Medio y otros vertimientos más pequeños que se presentan entre Makro AutoSur y Tv 86. En Puente Independencia, el caudal del río permaneció relativamente constante respecto al punto de monitoreo anterior, pues el río no recibe

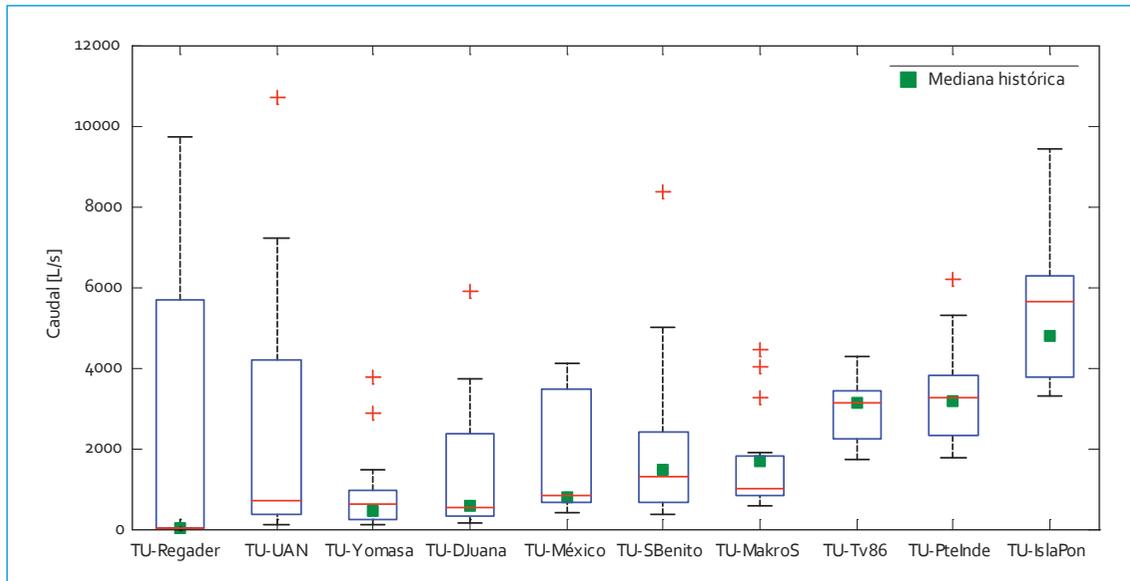


FIGURA 5.1. Perfil caudal: río Tunjuelo

ninguna descarga significativa entre estos dos puntos. Finalmente, en Isla Pontón San José el caudal del río aumenta por la descarga de la estación de bombeo de la EAAB, que vierte todas las aguas residuales recolectadas después de la descarga del interceptor Tunjuelo Medio.

Los caudales medidos durante la campaña 2009-2010 estuvieron dentro del rango de los registros históricos para este río. En La Regadera, como se mencionó, la apertura de las compuertas del embalse generó un incremento fuerte del caudal e hizo que la dispersión de los datos fuera la más alta de todos los puntos; sin embargo, la mediana histórica es muy cercana a la mediana monitoreada. Ello indica que cuando dicha operación no se realiza, el caudal de río se mantiene en un rango mucho más pequeño.

#### 5.1.1.2. Alcalinidad

La figura 5.2 representa el perfil longitudinal de alcalinidad del río Tunjuelo, el cual mostró un aumento de las concentraciones a lo largo

del río, especialmente a partir de Yomasa. El cambio más importante se dio entre UAN y Yomasa, donde la alcalinidad fue cuatro veces mayor, luego de pasar de una mediana de aproximadamente 15 mg/L a 61 mg/L. Las concentraciones en La Regadera y UAN fueron muy similares; sin embargo, en La Regadera no tienen ningún comportamiento en particular en las diferentes horas del día, mientras que en UAN los valores más bajos se dieron en un monitoreo de la noche (19:00-21:00), lo que podría hacer pensar que durante el día hay un aporte de concentraciones de compuestos que aumentan la alcalinidad del agua.

En Yomasa, Doña Juana y Barrio México las concentraciones fueron más elevadas, aun cuando Doña Juana es el punto de monitoreo con las mayores concentraciones de estos tres puntos. La dispersión de los datos en Doña Juana fue alta: las alcalinidades tuvieron una tendencia hacia el cuartil 75, y variaron de 19 a 169 mg/L sin importar la hora del muestreo. En Barrio México también se notaron datos dispersos, pero en menor proporción que en

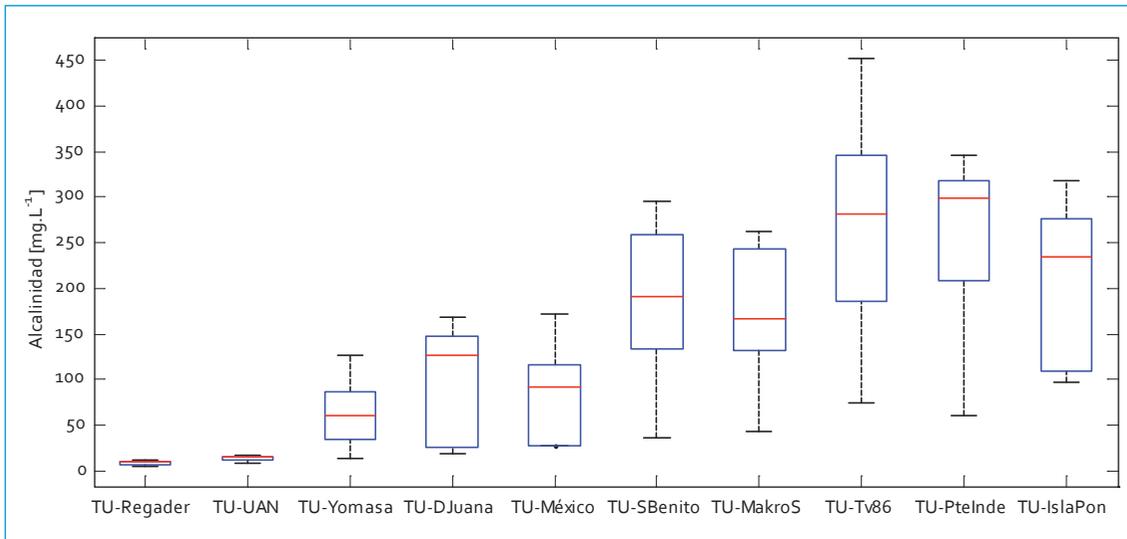


FIGURA 5.2. Perfil alcalinidad: río Tunjuelo

Doña Juana; se pudo ver que la mediana en Barrio México es levemente inferior, lo cual muestra el fuerte impacto de los vertimientos en Doña Juana.

A partir de San Benito, la alcalinidad vuelve a subir notablemente. Así, la mediana en San Benito es aproximadamente el doble de la de Barrio México. Entre estos dos puntos se encuentran las zonas inundadas y la afluencia de la quebrada Chiguaza; por lo tanto, es un tramo donde el río sufre cambios no sólo morfológicos, sino muy seguramente fisicoquímicos, dado el incremento en las concentraciones. Es importante resaltar que en el monitoreo nocturno (19:00) se midió el menor valor de alcalinidad (36 mg/L) y en la tarde el máximo (295 mg/L). Ello mostró que existe la posibilidad de que los cambios de concentraciones sean efectos de vertimientos de aguas residuales.

Aunque en Makro AutoSur el rango de variabilidad fue más pequeño que en San Benito, la mediana de las concentraciones disminuyó respecto al punto anterior. Nuevamente en Tv 86 se presentó otro cambio en las concentra-

ciones: la mediana de las alcalinidades superó en más de 1,5 veces la de Makro AutoSur, y ello mostró el efecto que tiene el interceptor Tunjuelo Medio que, como se mencionó, descarga en este sector. Al igual que en San Benito, las mayores concentraciones se dieron en los monitoreos realizados en la tarde, y las menores, en la noche. Por último, en Isla Pontón San José la mediana de la alcalinidad disminuyó en comparación con los dos puntos anteriores.

#### 5.1.1.3. Dureza

El perfil longitudinal de la dureza del río Tunjuelo se presenta en la figura 5.3. Al igual que la alcalinidad, la mayor variación se presentó en el punto de monitoreo Doña Juana, donde también se dieron las concentraciones más altas del río. Las medianas de las concentraciones de dureza en La Regadera y UAN fueron cercanas (30 y 26 mg/L, respectivamente). Una vez descarga la quebrada Yomasa en el río, la dureza empieza a aumentar, tal como se percibió en el punto Yomasa donde se alcanzaron valores de 162 mg/L.

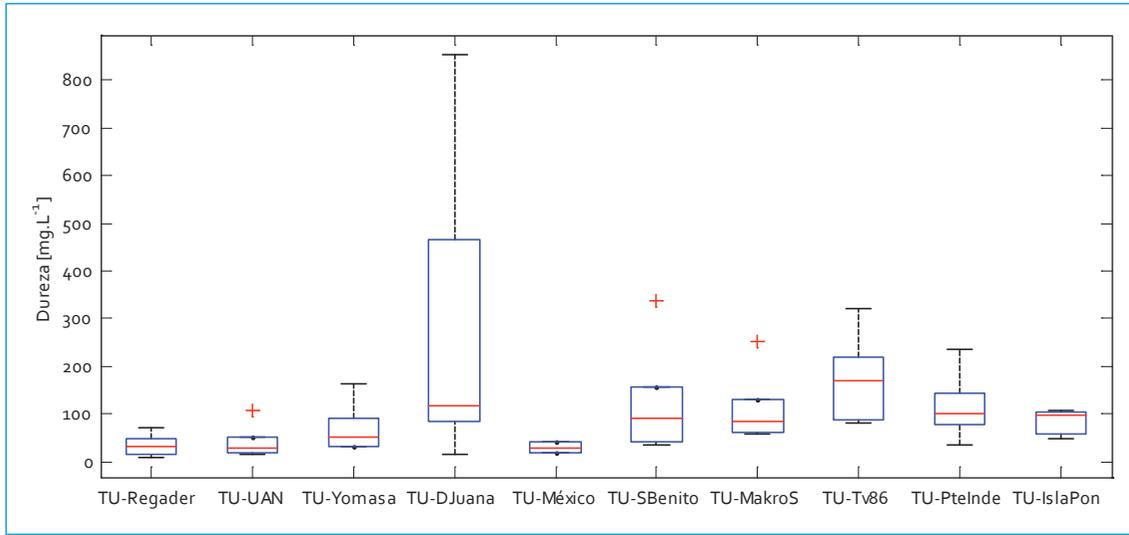


FIGURA 5.3. Perfil dureza: río Tunjuelo

Los vertimientos en Doña Juana afectan notablemente la dureza del río Tunjuelo. En este punto de monitoreo se obtuvieron las más altas concentraciones de dureza, pues llegaron hasta los 853 mg/L, valor muy similar a valores presentados en lixiviados en un relleno sanitario. Por otro lado, después de la zonas inundadas la dureza bajó notablemente, aunque el Barrio México fue el punto donde se presentaron las concentraciones más bajas (el rango estuvo entre 18-42 mg/L). A partir de Barrio México la dureza aumentó hasta Tv 86 y mostró el efecto de las aguas residuales descargadas en este sector sobre la calidad del río. El cambio más drástico se dio entre Barrio México y San Benito, donde la mediana de las concentraciones se triplicó y con ello se evidenció el efecto de la quebrada Chiguaza en las concentraciones de dureza en el río. Entre San Benito y Makro AutoSur, a pesar de las descargas del sector, la dureza se mantuvo relativamente constante, siendo la mediana en San Benito (90 mg/L) muy similar a la de Makro AutoSur (85 mg/L).

La descarga del interceptor Tunjuelo Medio denota un cambio importante entre la dureza de Makro AutoSur y Tv 86, donde la mediana aguas abajo es casi el doble del punto anterior. Por último, a partir de Tv 86 se notó una tendencia hacia la disminución de la dureza, puesto que las medianas en estos últimos tres puntos de monitoreo decrecen aguas abajo, aun cuando la disminución no fue muy significativa.

#### 5.1.1.4. pH

Se observó que el rango de pH en el río varió entre 6,4 y 10,5 unidades y el punto de monitoreo Doña Juana presentó la mayor variabilidad con tendencia a valores de pH alcalinos (figura 5.4). El punto de monitoreo Doña Juana presentó un caso particular respecto a los otros puntos, pues hubo una fuerte tendencia hacia valores altos de pH, ocasionados por las descargas desde el relleno sanitario Doña Juana y que parte de los residuos de las canteras puedan arrastrar piedra caliza. Los valores de

pH en este punto estuvieron entre 7,4 y 10,5 con una mediana de 8,4; mientras que en Yomasa la mediana fue de 7,4 y en Barrio México de 7,1.

También se notó un leve incremento en el pH en Tv 86, con una mediana de 7,9 unidades; entre tanto, en Makro AutoSur y Puente Independencia fue de 7,5. Al comparar las medianas de pH históricas con las medianas de pH actuales, se observó que los puntos de monitoreo de La Regadera y Doña Juana presentaron medianas constantes en el tiempo. Para el resto de puntos de monitoreo se apreció que las medianas históricas tienden a ser mayores que las actuales, cuyos valores fueron más cercanos a los máximos monitoreados para esta fase.

#### 5.1.1.5. Conductividad

El perfil longitudinal de la conductividad del río Tunjuelo generado a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010 se presenta en la figura 5.5. La conductividad aumentó a lo largo del río, aun cuando entre Doña Juana y Barrio México se notó una disminución importante, tal

vez por efecto de las zonas inundadas. También se notó una pequeña reducción entre Puente Independencia e Isla Pontón San José, aunque la diferencia no fue significativa.

El cambio más drástico de conductividad se dio entre UAN y Yomasa, puesto que la mediana de Yomasa ( $241 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) superó en casi cuatro veces la de UAN ( $61 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Nuevamente se aprecia el efecto de la quebrada Yomasa en la calidad del agua en la cuenca alta del río. Por otro lado, también se notó un cambio importante de la conductividad entre Yomasa y Doña Juana. La gran variabilidad en los datos de conductividad en Doña Juana se atribuye principalmente a la descarga de lixiviados, con altas concentraciones de iones en forma disuelta. En Barrio México la disminución de la conductividad posiblemente esté asociada con fenómenos de depuración y acumulación en las zonas de inundación.

En el punto San Benito, nuevamente, la conductividad aumentó debido a la descarga de la quebrada la Chiguaza sobre el río Tunjuelo. Entre los puntos San Benito y Makro AutoSur, el perfil de conductividad mostró que

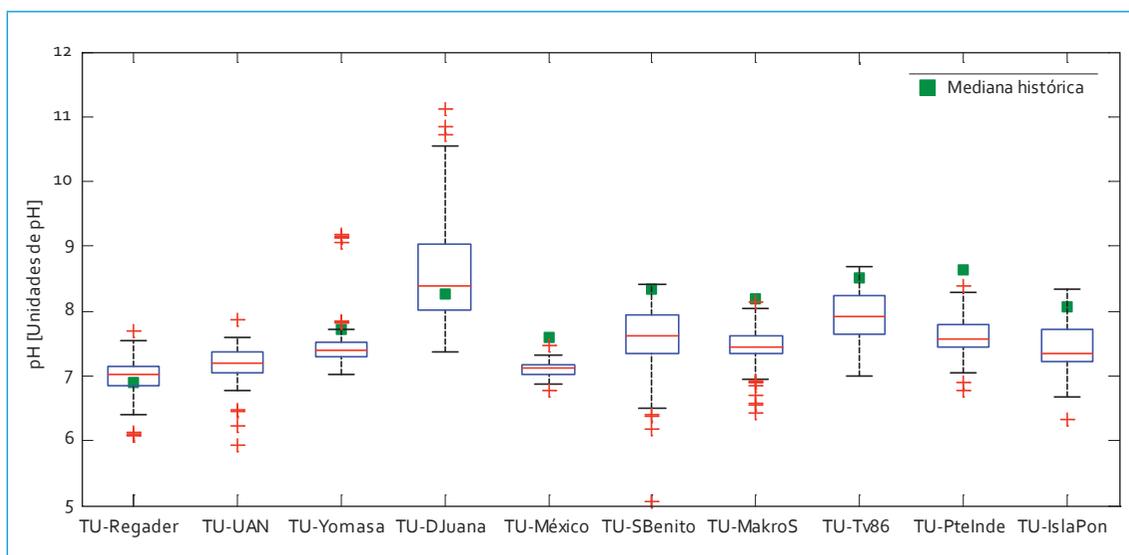


FIGURA 5.4. Perfil pH: río Tunjuelo

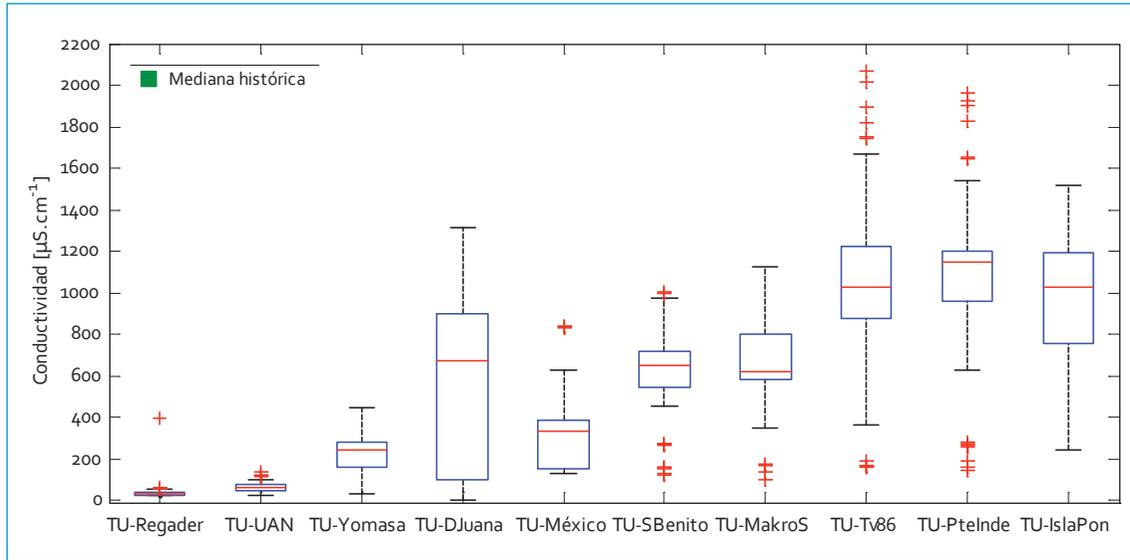


FIGURA 5.5. Perfil conductividad: río Tunjuelo

este parámetro, al parecer, no se ve afectado de manera importante por las descargas de aguas residuales que recibe el río entre estos dos puntos. Contrario a lo sucedido, entre las estaciones Makro AutoSur y Transversal 86 se observó un aumento en la conductividad del río desde valores cercanos a  $600 \mu\text{S}/\text{cm}$  a valores por encima de  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Este aumento, de nuevo, es causado por la descarga del interceptor Tunjuelo Medio, el cual colecta la mayoría de las aguas residuales del sector sur de la ciudad, que afecta de manera importante la calidad del río. Finalmente, aguas debajo del punto de monitoreo Transversal 86 el perfil de conductividad permanece prácticamente constante, sin variaciones significativas.

#### 5.1.1.6. Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto disminuyó a lo largo del río desde los puntos más altos, hasta llegar prácticamente a cantidades no detectables en los puntos de monitoreo de la cuenca baja. La disminución más fuerte se

presentó en entre Doña Juana y Barrio México (figura 5.6). Este fenómeno parecería contradictorio al comportamiento en otros parámetros, en los cuales la mayoría de los casos muestra un mejoramiento de la calidad; sin embargo, la hidráulica de río en Doña Juana permite una mayor transferencia de oxígeno entre la atmósfera y el cuerpo de agua, mientras que en Barrio México el río sale con baja velocidad y turbulencia de las zonas de inundación, lo que dificulta su oxigenación. Además, cabe resaltar que posiblemente en estas zonas de estancamiento exista degradación de la materia orgánica y, por lo tanto, un consumo del oxígeno disuelto.

El perfil de oxígeno disuelto es un buen indicativo del deterioro que va sufriendo el río a lo largo de su recorrido por la ciudad. Es evidente que en la cuenca baja las condiciones del río son prácticamente anaerobias, debido a alta carga orgánica que constantemente recibe el río aguas arriba. La mayoría de datos desde el punto Transversal 86 son inferiores al límite de detección ( $0,1 \text{ mg}/\text{L}$ ), por lo que este

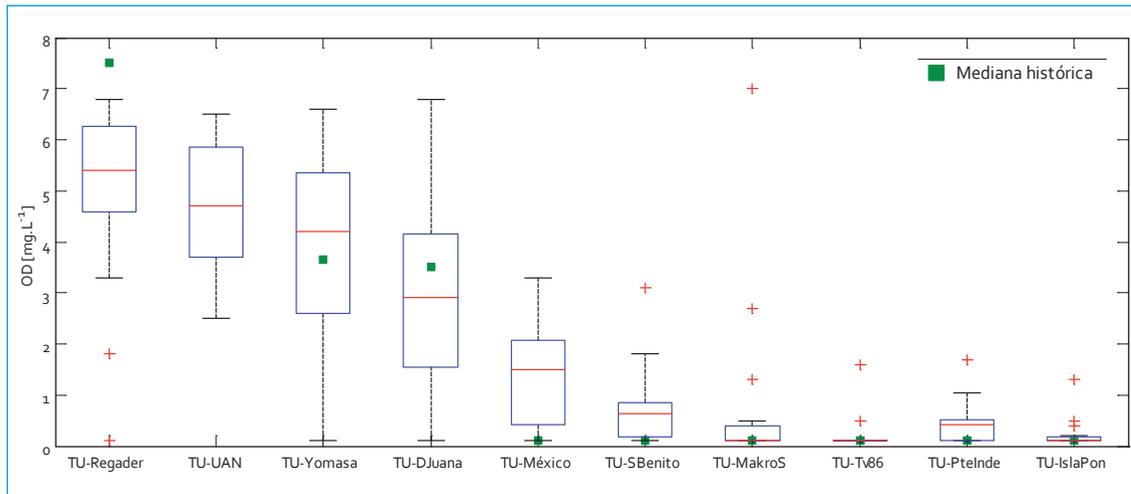


FIGURA 5.6. Perfil oxígeno disuelto: río Tunjuelo

trayecto es el más crítico del río como consecuencia de la descarga del interceptor Tunjuelo Medio aguas arriba de este punto.

Al comparar los registros históricos con los datos de la campaña, se observó que en todos los puntos las medianas 2009-2010 están contenidas dentro del rango histórico de concentraciones. En el punto La Regadera se encontró que la mediana histórica y la de la campaña fueron muy cercanas: mostraron un comportamiento constante en el tiempo. En el punto de Barrio México, el 75% de los datos monitoreados de oxígeno disuelto fueron mayores a la mediana histórica, lo cual sugiere una leve recuperación del río en esta zona.

#### 5.1.1.7. DBO

El perfil de concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del río Tunjuelo establecido para el período 2009-2010 se muestra en la figura 5.7. Para este parámetro sólo se presentaron datos superiores a los registros históricos en los dos primeros puntos de monitoreo. En la cuenca alta, las concentraciones de DBO aumentaron hasta el punto de monitoreo

de Doña Juana. Posteriormente, en Barrio México la DBO bajó debido al tránsito del río por las zonas inundadas, donde muy probablemente se dan procesos de sedimentación y oxidación de la materia orgánica. En San Benito, nuevamente, la concentración de DBO aumentó por la descarga de la quebrada Chiguaza sobre el río Tunjuelo. Entre los puntos de monitoreo San Benito y Makro AutoSur, el perfil de DBO es prácticamente constante. Ello indica que, al parecer, las descargas de aguas residuales que recibe el río en este tramo no alcanzan a afectar la concentración global en el río; no obstante, esto no significa que la eliminación de dichas descargas no sean importantes para el saneamiento del Tunjuelo, simplemente que el río en este tramo ya lleva una carga contaminante importante y, por tal razón, en el perfil de concentraciones no se logra percibir el efecto que tienen las descargas de aguas residuales en ese tramo.

Entre los puntos Makro AutoSur y Transversal 86, el río recibe la descarga de aguas residuales del interceptor Tunjuelo Medio, la cual es muy significativa y logra afectar de manera importante la concentración de materia orgánica

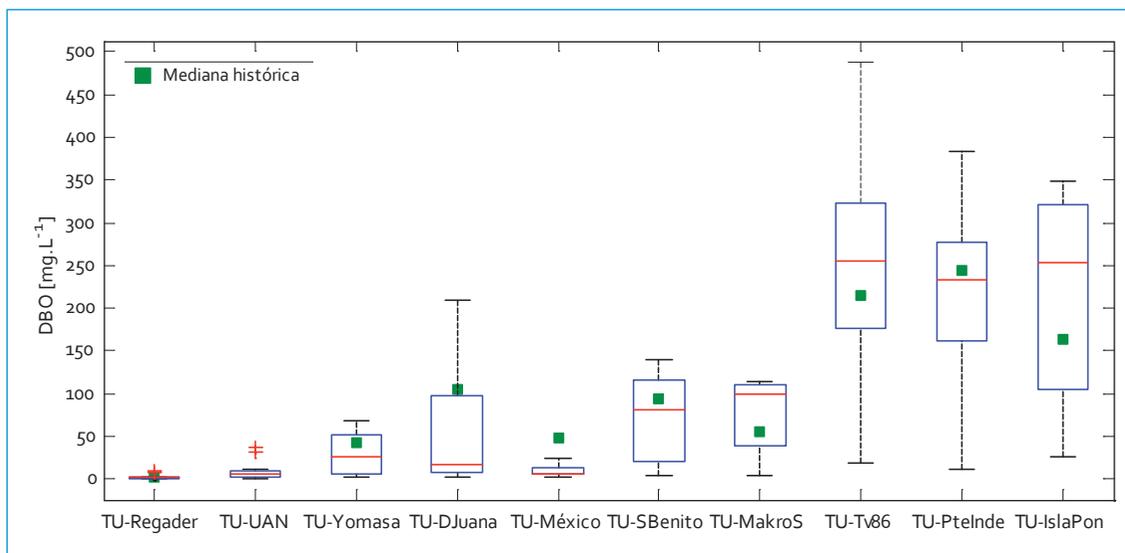


FIGURA 5.7. Perfil DBO: río Tunjuelo

nica del río. Finalmente, en los puntos aguas abajo (Puente Independencia e Isla Pontón San José) las concentraciones permanecieron relativamente constantes.

Es importante resaltar que los cambios más importantes de concentraciones de DBO sobre el río se dieron entre La Regadera y UAN, UAN y Yomasa, Barrio México y San Benito y Makro AutoSur y Tv 86. Las medianas de las concentraciones aumentaron en más del doble de un punto al otro, lo cual muestra que las descargas de Usme, quebrada Yomasa, quebrada Chiguaza e interceptor Tunjuelo Medio son las que impactan de manera más significativa la calidad del agua del río, en términos de materia orgánica. En este sentido, se esperaría que cuando estas descargas dejen de verter aguas residuales al río, la concentración de DBO aguas abajo pueda bajar considerablemente.

Las medianas históricas, en la mayoría de los puntos, estuvieron dentro del rango actual de concentraciones; sin embargo, se notó una disminución de las concentraciones en la cuenca alta y media del río, desde La Regadera hasta San Benito; pero Barrio México es el punto

que denota una mayor reducción a lo largo del tiempo. Por el contrario, en Makro AutoSur, Tv 86 e Isla Pontón San José las medianas de las concentraciones aumentaron en el tiempo.

#### 5.1.1.8. DQO

El comportamiento de la demanda química de oxígeno (DQO) fue similar al de DBO (figura 5.8): las concentraciones aumentaron desde el primer punto de monitoreo hasta Doña Juana, y posteriormente disminuyeron de manera importante en Barrio México. En San Benito y Tv 86 se notó un incremento en la concentración. Se pudo apreciar, igualmente, que después de la descarga del interceptor Tunjuelo Medio, la concentración de DQO aumentó de manera importante y se mantuvo prácticamente constante hasta Isla Pontón San José. Al igual que para la DBO, los cambios más importantes de concentraciones de DQO sobre el río se dieron entre La Regadera y UAN, UAN y Yomasa, Barrio México y San Benito y Makro AutoSur y Tv 86. Las medianas de las concentraciones aumentaron en más del doble de un punto al otro.

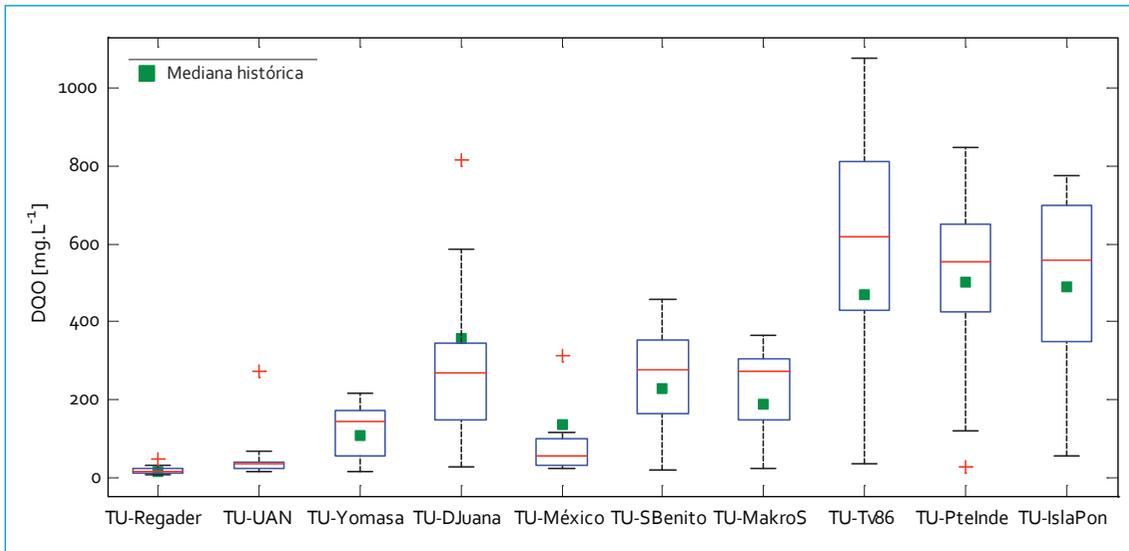


FIGURA 5.8. Perfil DCO: río Tunjuelo

Ello mostró, una vez más, que las descargas de Usme, quebrada Yomasa, quebrada Chiguaza e interceptor Tunjuelo Medio impactan de manera más importante la calidad del agua del río, en términos de materia orgánica.

Los valores de concentración 2009-2010 estuvieron dentro del rango de registros históricos, a excepción de Barrio México, donde hubo una reducción en las concentraciones de DCO respecto a los históricos, similar a lo observado con las concentraciones de DBO para este punto. Esta reducción se atribuye principalmente a los procesos biológicos y fisicoquímicos que ocurren en las zonas de inundación, los cuales posiblemente con el tiempo se han vuelto un poco más eficientes en la remoción de la materia orgánica.

El perfil de la relación DBO/DCO muestra que Doña Juana es el punto que presentó menor cantidad de materia biodegradable frente a los demás (figura 5.9). Ello refleja la influencia que tiene la descarga desde el relleno sanitario Doña Juana en la composición química del río en este punto. Aguas abajo dicha relación aumentó especialmente en el

punto San Benito, después de la descarga de la quebrada Chiguaza. Por último, la relación DBO/DCO alcanzó un valor aproximado de 0,4 en Makro AutoSur, y permaneció constante hasta el punto Isla Pontón San José.

#### 5.1.1.9. SST

El perfil de concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) del río Tunjuelo se representa en la figura 5.10. Dado que en el punto Doña Juana se alcanzaron concentraciones muy altas de SST respecto a los demás puntos de monitoreo, en la figura 5.11 se muestra el perfil sin tener en cuenta el punto de monitoreo Doña Juana, para observar de manera más clara el comportamiento de los SST en los otros puntos de monitoreo.

Dicho perfil de concentraciones mostró un aumento gradual de este parámetro entre el punto La Regadera y Yomasa, que evidenció el deterioro de la calidad por descarga de aguas residuales y sólidos en el sector de Yomasa. En Doña Juana se presentó un incremento muy elevado en la concentración de SST, al pasar

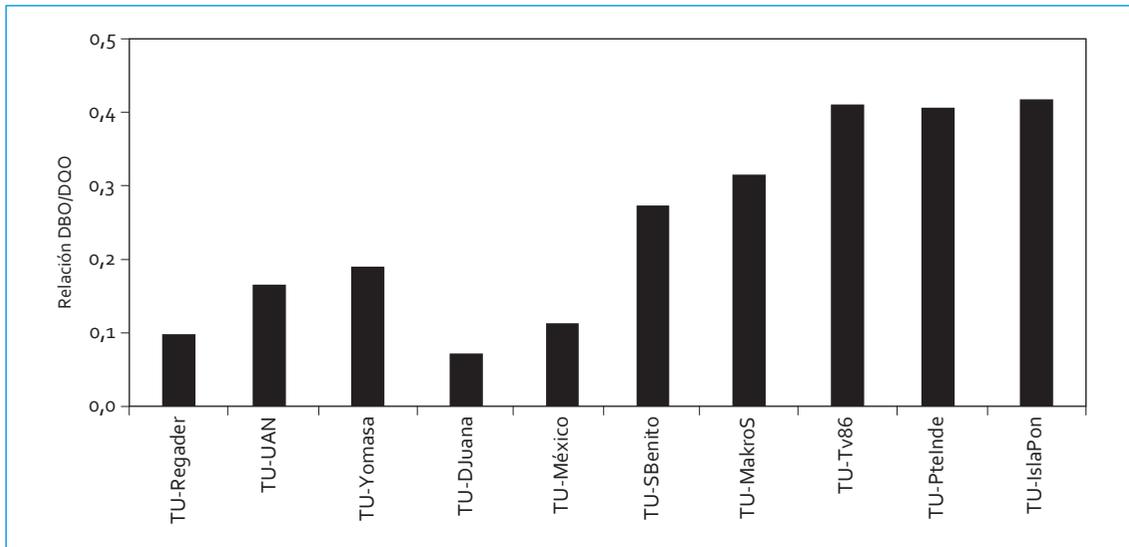


FIGURA 5.9. Perfil relación DBO/DOO: río Tunjuelo

de valores comprendidos entre 25 y 233 mg/L en Yomasa a valores entre 88 y 5295 mg/L en Doña Juana. Este aumento se debe a la actividad minera del sector, donde se presentan actividades de trituración y lavado de materiales que son descargados al río.

En el perfil se observa claramente que dicha actividad minera tiene un impacto negativo, incluso mayor que la descarga de aguas residuales del interceptor Tunjuelo Medio. No obstante, las zonas de inundación aguas abajo de Doña Juana funcionan como grandes sedimentadores que retienen de manera muy eficiente los sólidos vertidos aguas arriba. Dicho efecto se observó en el punto Barrio México, donde la concentración de SST disminuyó a valores por debajo de los encontrados en Yomasa.

En la figura 5.10 se puede apreciar cómo después del punto Barrio México la concentración de SST nuevamente comienza a aumentar, debido a la descarga de la quebrada Chiguaza. Al igual que para otros parámetros, las descargas de aguas residuales en el tramo comprendido entre San Benito y Makro Auto-Sur no generan un aumento de las concentra-

ciones del río. De hecho, el perfil mostró que la concentración de SST tiende a disminuir, posiblemente, porque la hidráulica del río y la distancia entre estos dos puntos (9 km, la más alta entre los puntos de monitoreo de la cuenca media y baja) permite que se den procesos de sedimentación con mayor facilidad. Después del punto Makro AutoSur, la mediana de concentraciones de SST aumentó desde valores de 77 mg/L a 234 mg/L en el punto Transversal 86, al mostrar concentraciones típicas de aguas residuales domésticas como consecuencia de la descarga de aguas residuales del interceptor Tunjuelo Medio. En los puntos de monitoreo aguas abajo (Puente Independencia e Isla Pontón San José), las concentraciones de SST permanecieron prácticamente constantes.

En el punto La Regadera, la mediana (8 mg/L) tendió hacia el percentil 25 y fue diferente al valor medio (17 mg/L), lo cual muy seguramente se debe a que los monitoreos realizados a partir de mayo del 2010 se llevaron a cabo cuando las compuertas del embalse La Regadera estaban abiertas, lo que posiblemente generó arrastre de sólidos e incrementó las

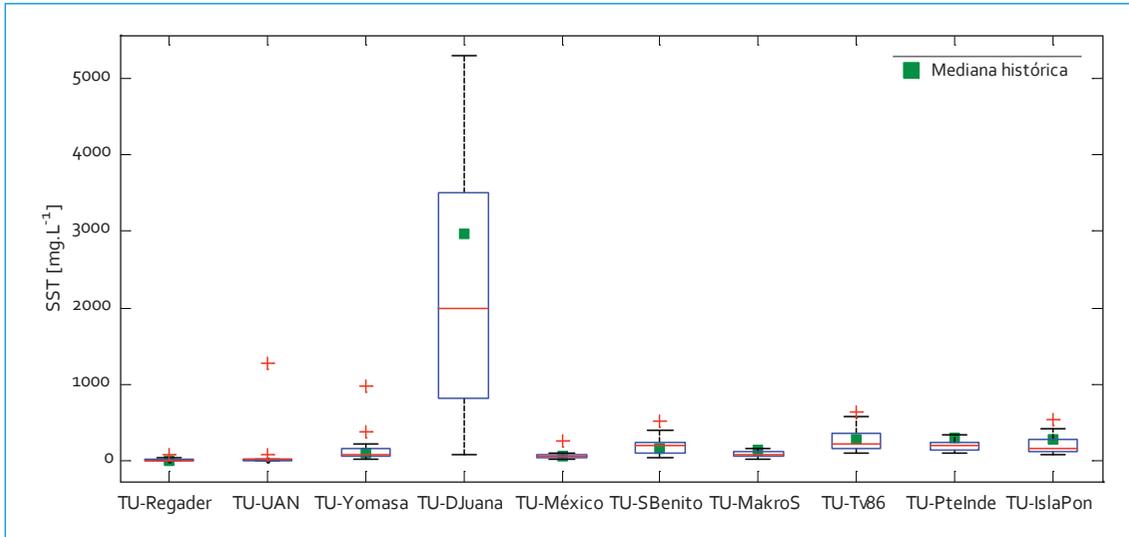


FIGURA 5.10. Perfil SST: río Tunjuelo

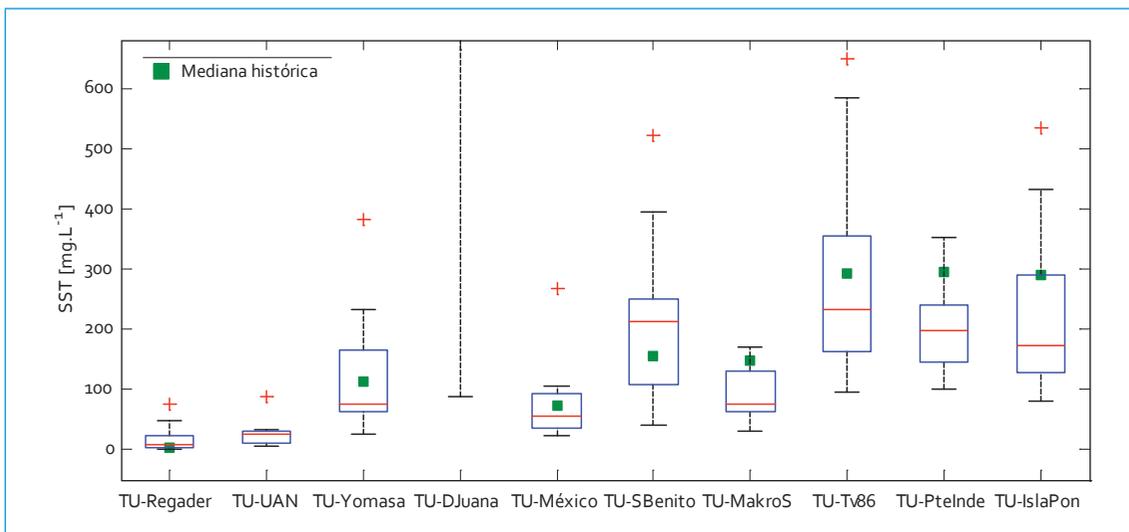


FIGURA 5.11. Perfil SST: río Tunjuelo (sin Doña Juana)

concentraciones en el río. En cuanto a la evolución en el tiempo de los SST, se notó que las medianas 2009-2010 están dentro del rango de concentraciones históricas, y aunque varios monitoreos fueron realizados durante la apertura de las compuertas, los SST en el río han disminuido en el tiempo para todos los puntos de monitoreo, a excepción de La Regadera y San Benito.

#### 5.1.1.10. Nitrógeno total

Para el punto La Regadera el comportamiento del nitrógeno ha sido constante en el tiempo, ya que las medianas de las concentraciones actuales e históricas fueron muy cercanas. Para este punto se puede ver que las concentraciones de especies como el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y el nitrógeno amoniacal fueron

muy bajas, índice de baja contaminación. Para el caso de los nitritos y los nitratos, ambos se presentaron en muy bajas concentraciones. A partir de UAN se midió un incremento en la concentración de nitrógeno hasta el punto Tv 86, donde aumentó significativamente la concentración, causada por las numerosas descargas ubicadas aguas arriba de este punto.

La mediana actual de NTK ascendió a 3 mg/L; además, se detectaron mayores concentraciones de  $N_{\text{amoniacal}}$  (mediana de 0,9 mg/L), que evidencia el efecto que tiene en el río Tunjuelo la entrada al perímetro urbano. A partir del punto Yomasa las concentraciones de NTK fueron mayores (figura 5.12), aun cuando la mediana 2009-2010 (12 mg/L) es idéntica a la histórica. Así mismo, las concentraciones de nitrógeno amoniacal aumentaron a un valor medio de 6 mg/L (figura 5.15), lo que evidencia contaminación por aguas residuales domésticas en el río. Los máximos históricos de NTK y nitrógeno amoniacal para Yomasa son 29 y 23 mg/L. Los valores máximos de estos parámetros medidos en la campaña 2009-2010 fueron 30 y 25 mg/L, lo cual indica poca variación en el comportamiento de estos compuestos.

En cuanto a nitritos y nitratos (figuras 5.13 y 5.14), los valores son mayores que para La Regadera. Ello indica que se pueden estar dando procesos de nitrificación aun en Yomasa, dado que todavía en ese punto se detectan concentraciones en oxígeno disuelto.

Se evidenció un aumento importante en todas las especies de nitrógeno en el punto de monitoreo Doña Juana. La mediana 2009-2010 de NTK ascendió a 29 mg/L, el  $N_{\text{amoniacal}}$  llegó a 15 mg/L, y en cuanto a nitritos y nitratos, las concentraciones llegaron a valores de 4 y 31 mg/L, respectivamente. Estos dos últimos valores son muy altos para un cuerpo natural de agua y podrían generar problemas en los ecosistemas aguas abajo. Estas altas concentraciones tienen muy alta relación con los procesos de eutrofización evidenciados por la alta concentración de macrófitas en la zona de las canteras inundadas aguas abajo. En Barrio México se apreció, de nuevo, el efecto depurador que tienen las zonas inundadas, ya que, al igual que con la materia orgánica, se observaron disminuciones en los contenidos de contaminantes nitrogenados; se cuantificaron reducciones de aproximadamente el 70% en la

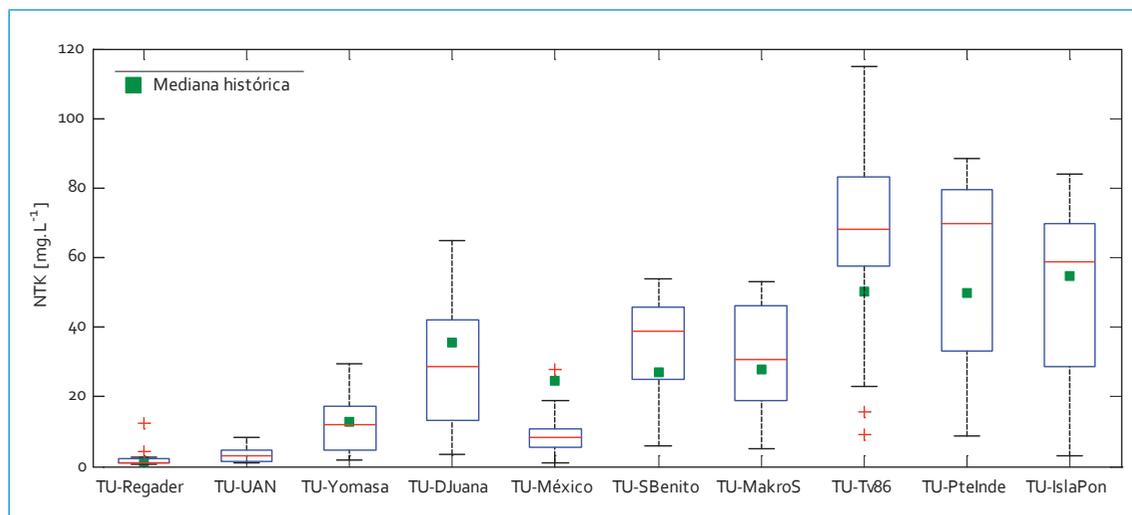


FIGURA 5.12. Perfil NTK: río Tunjuelo

mediana de NTK, más del 90% de reducción en nitritos y nitratos, y el 50% en la mediana de  $N_{\text{amoniaco}}$ . En cuanto a los registros históricos, también se apreció una leve disminución de las medianas actuales de NTK y  $N_{\text{amoniaco}}$ .

El efecto que tiene la descarga de la quebrada Chiguaza en la calidad del punto San Benito se puede observar en el aumento de las concentraciones de NTK,  $N_{\text{amoniaco}}$  y  $N_{\text{total}}$  y, al mismo tiempo, la disminución en los valores de nitritos y nitratos (causado por la escasez de oxígeno disuelto para la nitrificación). La mediana de NTK aumentó cinco veces respecto a Barrio México, y para  $N_{\text{amoniaco}}$  tres veces. En cuanto a los registros históricos se observaron pequeñas diferencias en las medianas actuales e históricas de NTK y  $N_{\text{amoniaco}}$ . Los datos reportados para estos períodos de monitoreo se encuentran dentro del rango para  $N_{\text{amoniaco}}$ ; para NTK se superó ligeramente el máximo histórico (44 mg/L). Los nitritos y nitratos estuvieron en concentraciones muy bajas. Para el punto Makro AutoSur, las medianas de concentración de las diferentes especies de nitrógeno variaron muy poco respecto a San Benito.

Además, los rangos de comportamiento para estos lapsos de monitoreo fueron similares a los históricos.

Se observó un aumento importante en las concentraciones de NTK y  $N_{\text{amoniaco}}$  para el punto Tv 86, muy seguramente asociadas a la descarga del interceptor Tunjuelo Medio. La mediana de concentración 2009-2010 para NTK (68 mg/L) fue mayor que la histórica (50 mg/L), y para  $N_{\text{amoniaco}}$  también hubo aumento, ya que la mediana de la campaña fue 47 mg/L; mientras que el registro histórico fue de 36 mg/L. Las cantidades de nitritos y nitratos para este punto fueron muy bajas. Para el punto TU-PteInde el rango de variabilidad de nitrógeno fue similar a Tv 86 y la mediana no cambió significativamente respecto al punto aguas arriba (Tv 86). También fue evidente el aumento en la mediana 2009-2010 de NTK (70 mg/L) en relación con la histórica (50 mg/L). Entre tanto, para  $N_{\text{amoniaco}}$  las variaciones no fueron importantes; no obstante, el rango de concentraciones para estos períodos de monitoreo no superan los datos históricos. Por último, en TU-IslaPon la mediana de la campaña

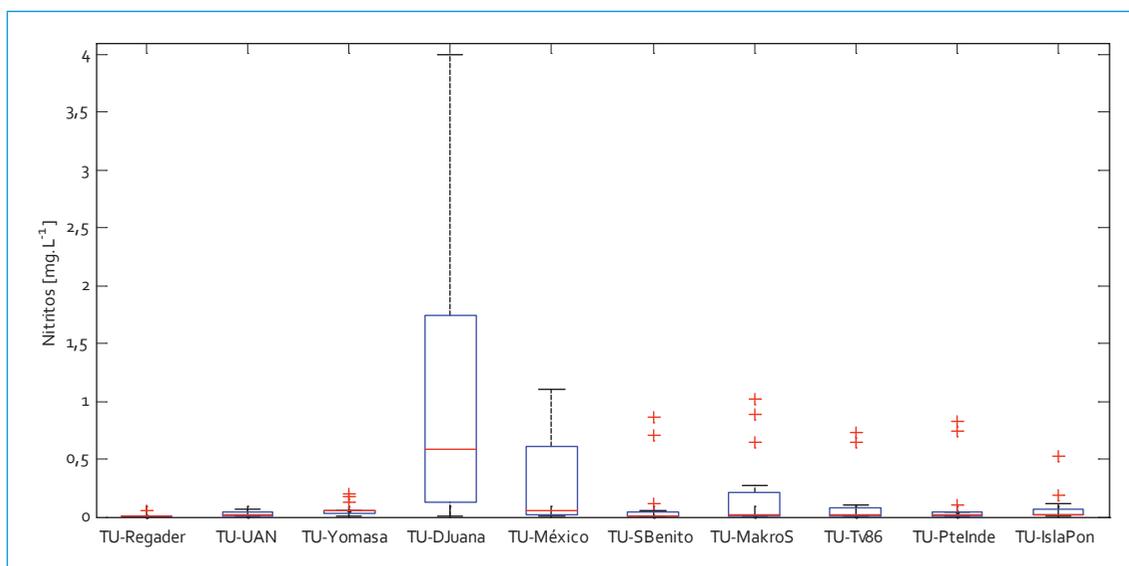


FIGURA 5.13. Perfil nitritos: río Tunjuelo

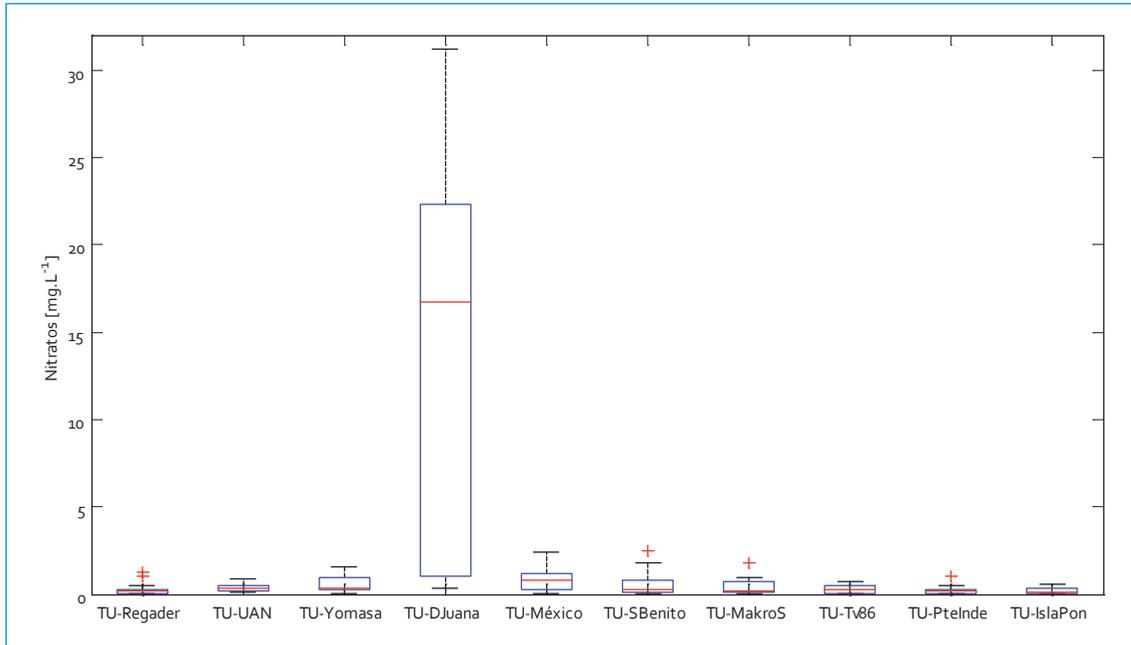


FIGURA 5.14. Perfil nitratos: río Tunjuelo

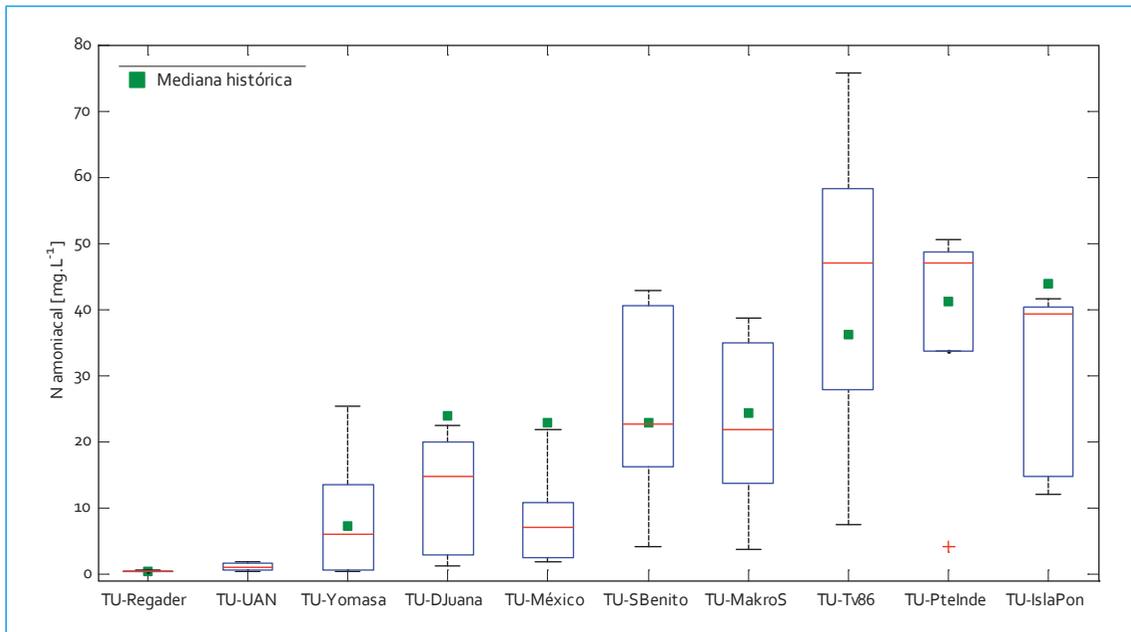


FIGURA 5.15. Perfil nitrógeno amoniacal: río Tunjuelo

de las especies de nitrógeno varió poco; en cuanto a Puente Independencia tampoco se encontraron diferencias significativas en las medianas actuales de NTK y  $N_{\text{amoniacal}}$  respecto

a los registros históricos. El rango de concentraciones para estos períodos de monitoreo no superaron los datos históricos.

### 5.1.1.11. Fósforo total

Al igual que para los SST, en el punto Doña Juana se alcanzaron concentraciones muy altas en comparación con los demás puntos de monitoreo. Por tal motivo fue indispensable representar el perfil de concentraciones de fósforo, elaborado a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010 con la totalidad de los puntos (figura 5.16) y eliminando el punto de Doña Juana (figura 5.17). Las medianas de las concentraciones cambian de manera drástica: la mediana de Doña Juana supera en más de diez veces la de Yomasa.

A partir de los resultados se observó un aumento gradual de fósforo entre La Regadera y Yomasa, el cual muestra que las medianas de las concentraciones aumentaron más de tres veces entre cada punto, muy posiblemente efecto de las descargas de Usme y de la quebrada Yomasa. En Doña Juana se presentó el aumento más significativo en las concentraciones, al pasar de valores entre 0,3 y 4 mg/L en Yomasa, a valores entre 1 y 55 mg/L en Doña Juana. Este aumento está asociado a

la descarga de los lixiviados tratados y sin tratar provenientes del relleno sanitario Doña Juana. También en este punto se dio la variación más amplia en concentraciones de fósforo: las concentraciones cambiaron notoriamente sin importar la hora del día. Estas altas cargas aportadas hacia el río generan problemas de eutroficación hacia aguas abajo, los cuales por lo general son más fácilmente percibidos en cuerpos lénticos.

Después de Barrio México, las concentraciones de fósforo aumentaron, efecto de la quebrada Chiguaza. Se presume que después de Doña Juana en el río se dan condiciones para la precipitación del fósforo, puesto que entre San Benito y Makro AutoSur y Tv 86 e Isla Pontón San José se evidenció una tendencia a la disminución del fósforo. Solamente se notaron aumentos en las medianas aguas debajo de descargas importantes como la Chiguaza y el interceptor Tunjuelo Medio. Este proceso de insolubilización de fósforo es muy posible que se esté generando en la zona de las minas inundadas.

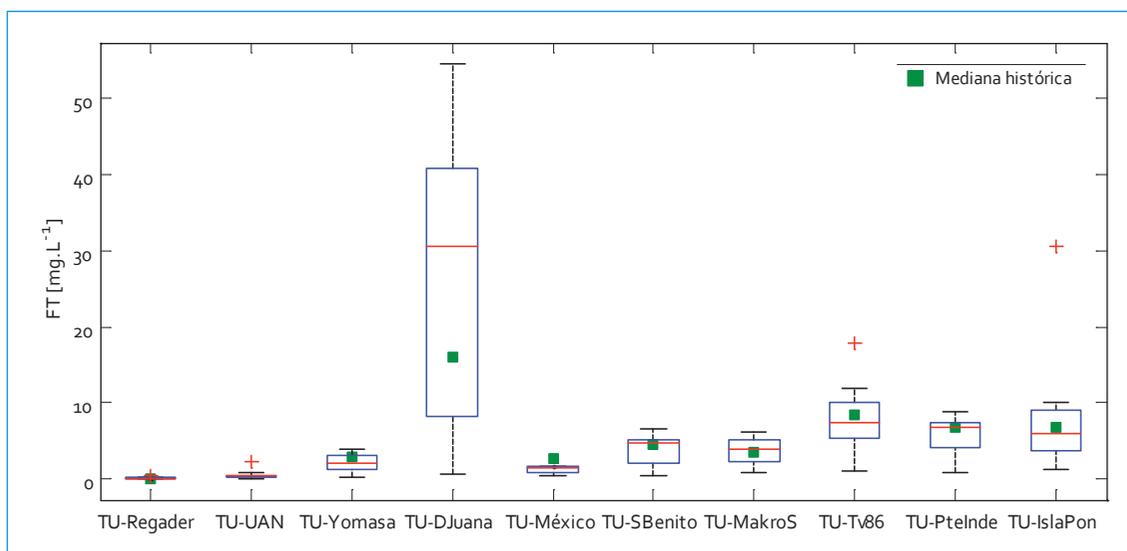


FIGURA 5.16. Perfil  $F_{total}$ : río Tunjuelo

También se encontró que las concentraciones de fósforo han disminuido o se han mantenido constantes en el tiempo, para la mayoría de puntos de monitoreo. Únicamente en Doña Juana fue el punto donde se notó un verdadero cambio a lo largo del tiempo, pues la mediana 2009-2010 (31 mg/L) es casi el doble de la mediana histórica (16 mg/L). Es importante resaltar que el 73% de los datos 2009-2010 superan la mediana histórica, y que el máximo no estuvo por encima del máximo histórico, lo que muestra la dinámica y efecto que puede tener los vertimientos en el sector, en cuanto a las concentraciones de fósforo total en el río.

#### 5.1.1.12. Grasas y aceites

La figura 5.18 y la figura 5.19 muestran el perfil de GyA para los primeros siete puntos de monitoreo del río Tunjuelo y los últimos cuatro puntos, respectivamente. En la primera figura se observa que el rango de GyA varió entre 3,6 y 47 mg/L; mientras que para los puntos aguas abajo dicha variación osciló entre 3,6 y 449 mg/L. Los dos primeros puntos de mo-

nitoreo aguas arriba no tienen una presencia importante de GyA; sin embargo, después de la descarga de la quebrada Yomasa se notó un aumento en las concentraciones: la mediana en este punto aumentó casi el doble. Entre Doña Juana y Barrio México se encontró baja concentración de GyA, mientras que en San Benito se llegaron hasta concentraciones de 57 mg/L, que muestran el aporte y efecto de la quebrada Chiguaza.

En la figura 5.19 se evidencia el cambio drástico en las concentraciones una vez ha descargado el interceptor Tunjuelo Medio. Aunque el cambio entre la mediana no es tan significativo (mediana Makro AutoSur = 18 mg/L vs. mediana Tv 86 = 84 mg/L), la diferencia de los valores máximos es de más de quince veces (máximo Makro AutoSur = 47 mg/L vs. máximo Tv 86 = 796 mg/L).

Al comparar las medianas de GyA históricas con las medianas 2009-2010, se observó una disminución a lo largo del tiempo para los primeros puntos de monitoreo (de La Regadera a Barrio México); sin embargo, debe resaltarse que en estos puntos existe poca presencia de

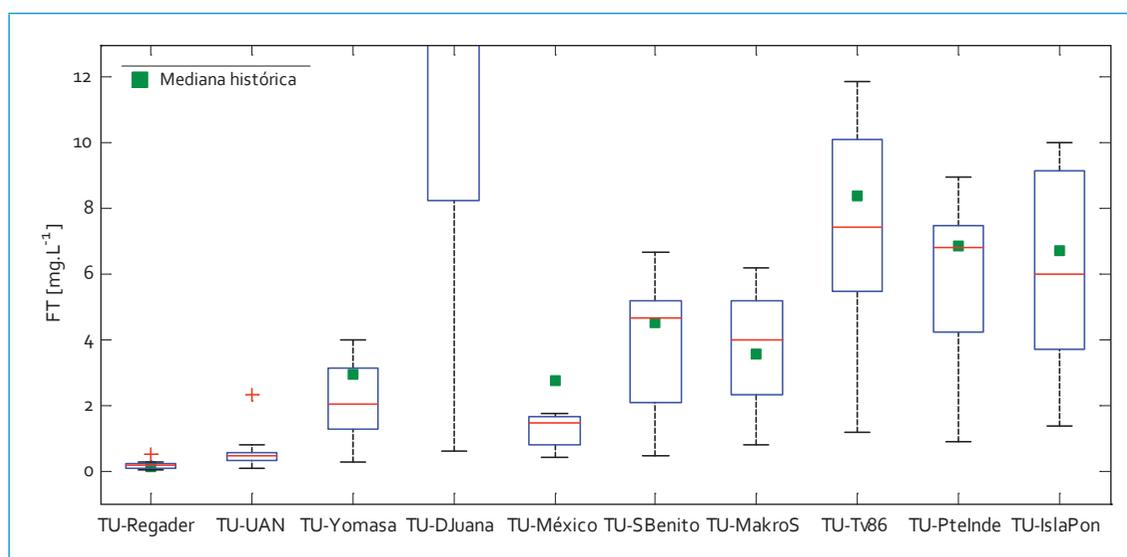


FIGURA 5.17. Perfil  $F_{total}$ : río Tunjuelo (sin Doña Juana)

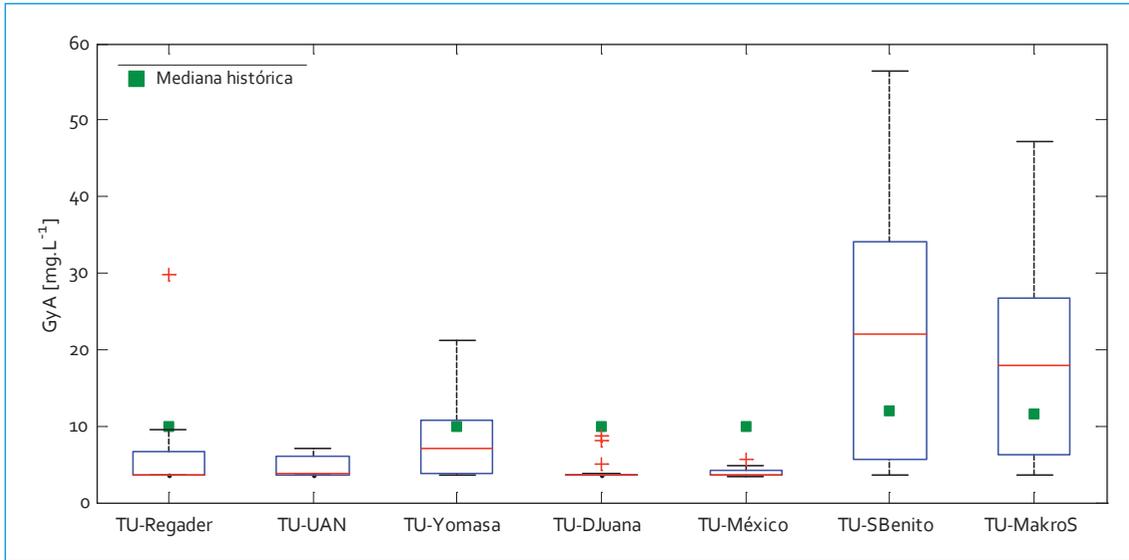


FIGURA 5.18. Perfil 1 de grasas y aceites: río Tunjuelo

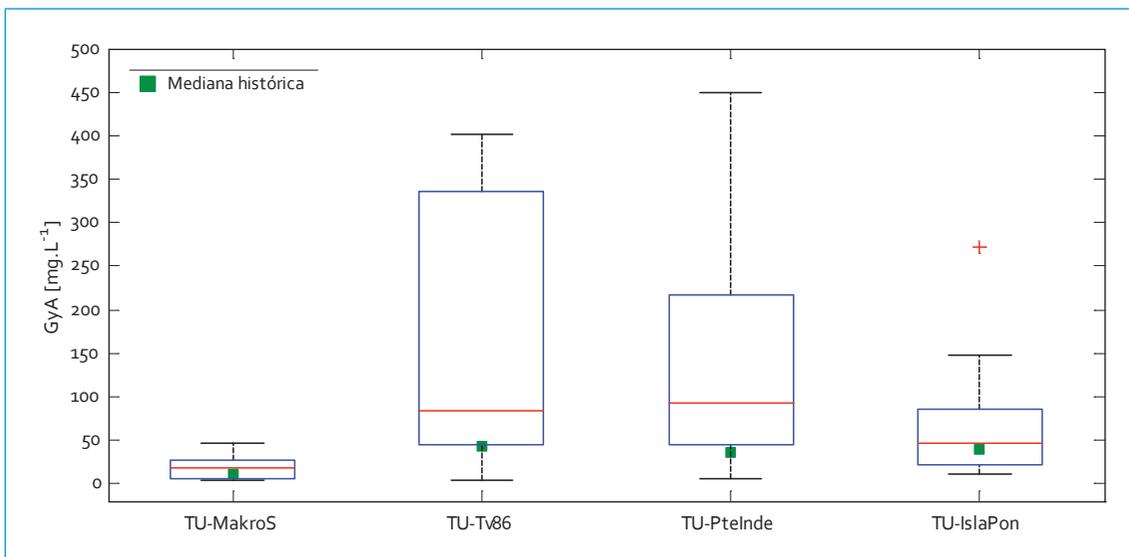


FIGURA 5.19. Perfil 2 de grasas y aceites: río Tunjuelo

GyA y muchos valores fueron inferiores al límite de detección, el cual varía según la campaña ( $LD_{\text{datos actuales}} = 3,6 \text{ mg/L}$  vs.  $LD_{\text{datos históricos}} = 10 \text{ mg/L}$ ). Para el resto de puntos de monitoreo se encontró que las medianas históricas tienden a ser inferiores que las de la campaña 2009-2010. Ello muestra un aumento en el tiempo, y así Puente Independencia fue el punto que mostró el incremento más significativo.

#### 5.1.1.13. SAAM

A partir de los valores registrados para sustancias activas al azul de metileno (SAAM), al igual que para la gran mayoría de parámetros, se pudo identificar un comportamiento ascendente a lo largo del río (figura 5.20). Es evidente el fuerte impacto causado por las descargas de agua residual a lo largo del río Tunjuelo, ya que

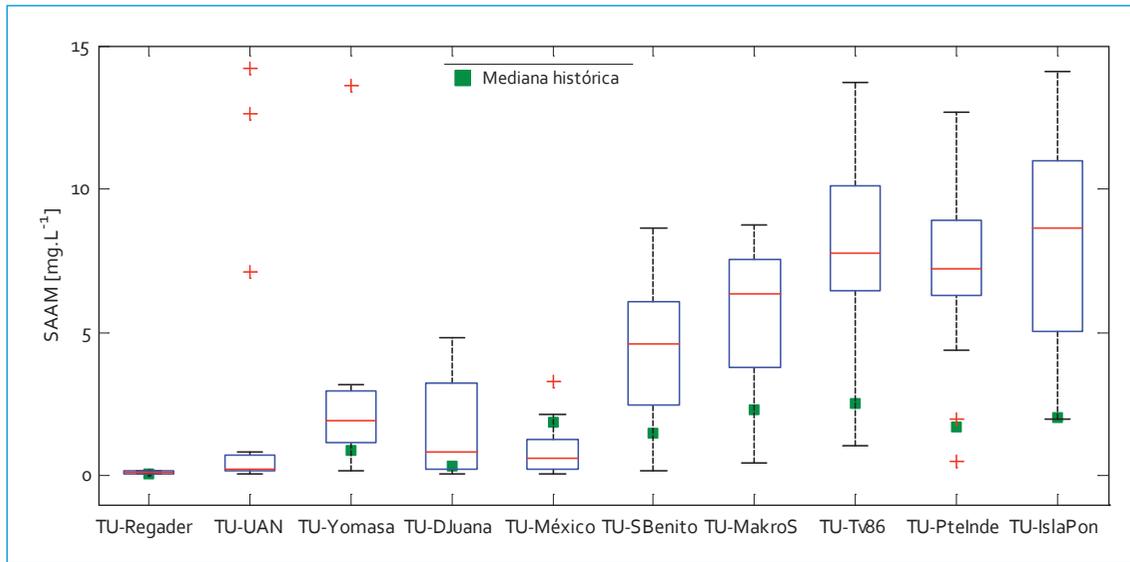


FIGURA 5.20. Perfil SAAM: río Tunjuelo

para la mayoría de puntos la mediana 2009-2010 superó la histórica, especialmente en los puntos que conforman el tramo 4 del río Tunjuelo. Esto significa que hay mayor presencia de tensoactivos en el río.

Para el punto La Regadera, las concentraciones de SAAM continúan siendo muy bajas. La mediana 2009-2010 fue 0,1 mg/L, concentración que no difiere mucho de la mediana histórica (0,07 mg/L). Se observó un incremento en la concentración de SAAM a partir del punto de monitoreo UAN, donde la mediana de la campaña tuvo un valor de 0,24 mg/L. En el punto TU-Yomasa se encontró mayor presencia de estos compuestos: las concentraciones para estos períodos de monitoreo superaron el rango histórico (0,025-2,4 mg/L). Se obtuvieron valores de hasta 3,2 mg/L. En Doña Juana el rango de variación aumentó y, al igual que en Yomasa, los datos reportados para 2009-2010 superaron los datos históricos. Para el caso de Barrio México, el rango de concentraciones no ha sufrido cambios importantes respecto a los históricos. A pesar de esto, la concentración

no estuvo muy alejada del máximo histórico (2,7 mg/L).

A partir del punto San Benito, las concentraciones de SAAM aumentaron considerablemente y siguieron un comportamiento constante hasta Isla Pontón San José. Además, se observaron incrementos de más del 50% para la mediana de la campaña en los puntos San Benito, Makro AutoSur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón San José, frente a los registros históricos.

#### 5.1.1.14. Coliformes fecales

A partir del punto UAN, las medianas de concentración estuvieron por el orden de  $10^4$  NMP/100 mL, y llegaron a concentraciones de  $10^7$  NMP/100mL en TU-IslaPon (figura 5.21). En La Regadera el comportamiento se ha mantenido constante a lo largo del tiempo, pues las medianas 2009-2010 y la histórica fueron similares. En UAN la concentración mediana aumentó de 150 NMP/100 mL en La Regadera, a  $4 \times 10^4$  NMP/100 mL, lo cual refleja el impacto

que tiene sobre el río la entrada al perímetro urbano. En Yomasa el comportamiento fue similar que al determinado en UAN: se encontró una leve disminución (de  $10^5$  a  $10^4$  NMP/100 mL) de la mediana 2009-2010 respecto a los valores históricos. En el punto Doña Juana se tuvo un comportamiento poco variable, ya que la mediana de la campaña e histórica resultaron cercanas; mientras que en Barrio México se observó una disminución de la mediana 2009-2010 ( $1,7 \times 10^4$  NMP/100 mL) en relación con la histórica ( $5 \times 10^5$  NMP/100 mL), la cual pudo deberse al posible efecto depurador que tienen las minas inundadas, que no sólo logra disminuir cargas orgánicas, sino también de otros parámetros.

En San Benito vuelven a subir las concentraciones de coliformes gracias a la descarga de la quebrada Chiguaza. Tanto la mediana 2009-2010 como la histórica son muy similares; sin embargo, el máximo valor para este monitoreo ( $4,6 \times 10^7$  NMP/100 mL) superó levemente la concentración máxima histórica ( $1,2 \times 10^7$  NMP/100 mL). Esta situación pudo deberse por la quebrada Chiguaza, que vierte

unos metros aguas arriba de San Benito, por lo que se puede monitorear picos de concentración provenientes de la quebrada.

Para Makro AutoSur, el comportamiento de coliformes fecales fue poco variable respecto a San Benito, además que la mediana de la campaña e histórica arrojaron valores similares. Por su parte, en Tv 86 la mediana de concentración ascendió hasta  $9,3 \times 10^7$  NMP/100 mL, debido al vertimiento del interceptor Tunjuelo Medio. En TU-Ptelnde el comportamiento no sufrió cambios temporales importantes: las medianas fueron muy cercanas. A pesar de esto, los valores obtenidos para 2009-2010 superaron el máximo histórico ( $3 \times 10^7$  NMP/100 mL), que evidenció una mayor presencia de coliformes en el río. Finalmente, en TU-IslaPon la mediana 2009-2010 fue constante respecto al punto de monitoreo anterior; pero se reportaron dos concentraciones atípicas muy altas ( $1,6 \times 10^9$  y  $6,4 \times 10^{10}$  NMP/100 mL) que superaron ampliamente el máximo histórico ( $3 \times 10^7$  NMP/100 mL). Estas concentraciones se obtuvieron en monitoreos de la madrugada y de la mañana.

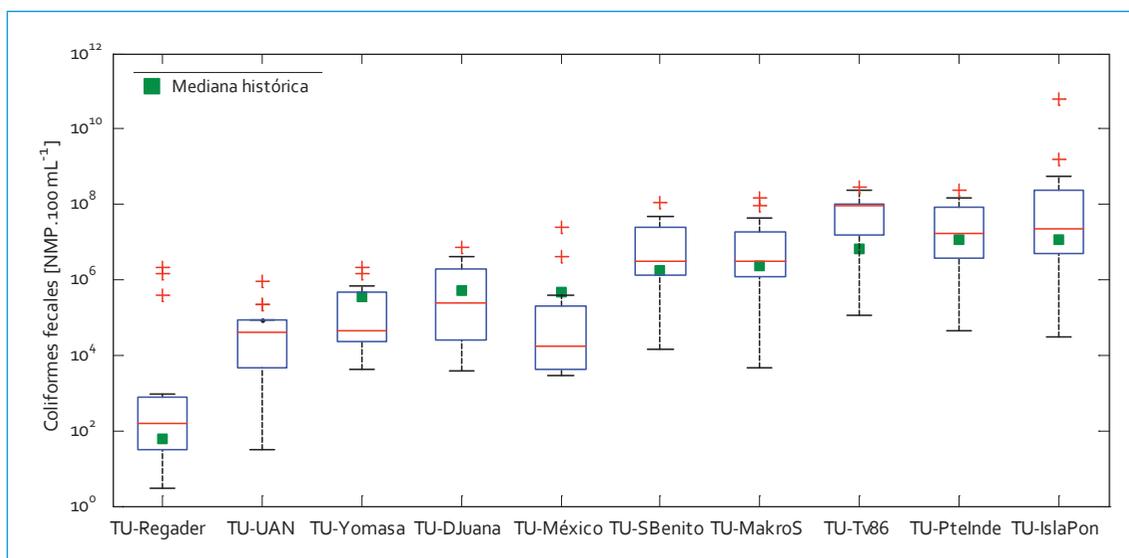


FIGURA 5.21. Perfil coliformes fecales: río Tunjuelo

### 5.1.1.15. Coliformes totales

Las medianas de concentración se encontraron por el orden de  $10^5$  NMP/100 mL y ascendieron hasta concentraciones de  $10^7$  NMP/100 mL en TU-IslaPon (figura 5.22). En La Regadera se evidenció un leve descenso en coliformes totales, ya que la mediana 2009-2010 (300 NMP/100 mL) fue menor que la histórica (1246 NMP/100 mL). En UAN la concentración media aumentó de 300 NMP/100 mL a  $10^5$  NMP/100 mL y ello refleja el impacto negativo generado sobre el río a su entrada al perímetro urbano, mientras que en Yomasa se tuvo un valor de mediana de campaña casi igual a la de UAN, en paralelo a una leve disminución (de  $10^6$  a  $10^4$  NMP/100 mL) de la mediana 2009-2010 respecto a la histórica. En el punto Doña Juana se encontró que la mediana actual es un poco menor al registro histórico, mientras que en San Benito vuelven a subir la concentración de coliformes gracias a la descarga de la quebrada Chiguaza. Tanto la mediana de la campaña como la histórica fueron muy cercanas; sin embargo, el máximo valor para este monitoreo ( $4,6 \times 10^7$

NMP/100 mL) ligeramente superó la concentración máxima histórica ( $8,6 \times 10^7$  NMP/100 mL). Como se mencionó en el análisis de coliformes fecales, la descarga de la quebrada Chiguaza puede influenciar en los monitoreos, ya que se puede tomar las muestras en picos de concentración. Para Makro AutoSur el comportamiento de coliformes totales fue poco variable en relación con San Benito, con valores cercanos entre medianas, contrario a lo medido en Tv 86, donde la mediana de concentración ascendió a  $1,1 \times 10^8$  NMP/100 mL, debido al vertimiento del interceptor Tunjuelo Medio. En TU-PteInde los coliformes totales no sufrieron cambios importantes, además que la mediana 2009-2010 fue similar a la histórica. Finalmente, en TU-IslaPon, la mediana de la campaña fue constante respecto al punto de monitoreo anterior; no obstante, se reportaron dos concentraciones atípicas ( $1,1 \times 10^9$  y  $1,6 \times 10^{10}$  NMP/100 mL) que superan ampliamente el máximo histórico ( $2,6 \times 10^8$  NMP/100 mL). Estas concentraciones también se obtuvieron en monitoreos de la madrugada y de la mañana.

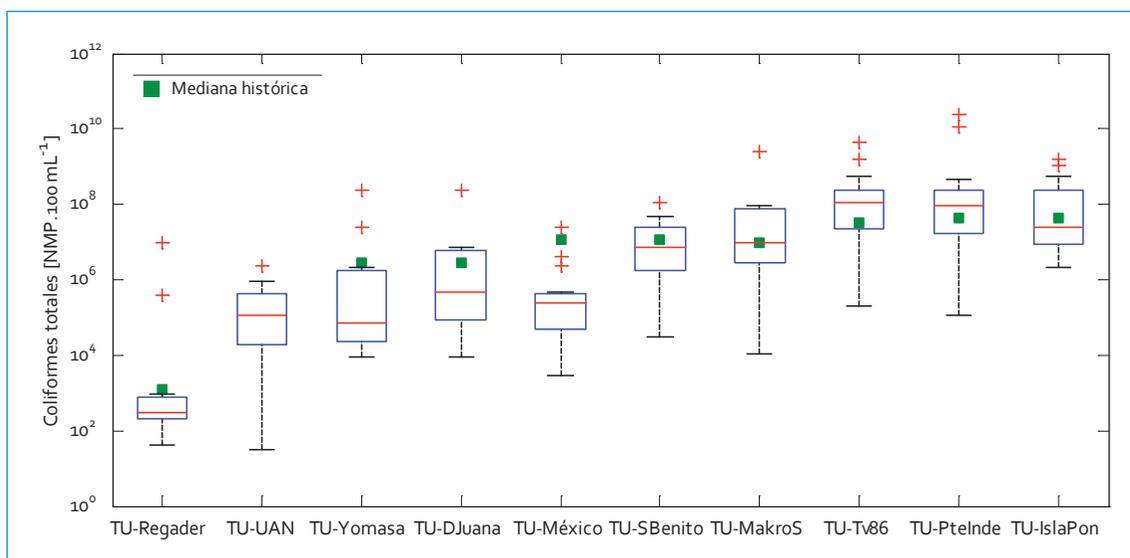


FIGURA 5.22. Perfil coliformes totales: río Tunjuelo

#### 5.1.1.16. Cianuro

Las mayores concentraciones de cianuros se encontraron a partir del punto Makro AutoSur hasta Puente Independencia. Desde La Regadera hasta San Benito todos los registros para este período de monitoreo arrojaron valores no detectables ( $<0,5$  mg/L), lo cual es esperado en La Regadera, dada la buena calidad de agua en este punto. En Makro AutoSur todas las concentraciones reportadas fueron no detectables ( $<0,5$  mg/L), excepto un valor anormal ( $0,75$  mg/L) medido el mismo día que se presentó una concentración alta en SAAM ( $66,5$  mg/L). Estas concentraciones pueden estar relacionadas con un evento particular entre las 13:00 y las 15:00, ventana horaria cuando se hizo el monitoreo. Para el punto Tv 86 el cambio en las concentraciones es importante, pues se detectó un rango de variabilidad mucho mayor que en los demás puntos de monitoreo ( $0,5$  y  $1,1$  mg/L). Esto evidencia la presencia de algún tipo de actividad industrial entre Makro AutoSur y Tv 86. Finalmente, en TU-PteInde el rango de variación disminuyó y la mayoría de datos fueron menores al límite de detección ( $<0,5$  mg/L): se identificó un valor atípico ( $0,95$  mg/L) que no estuvo muy alejado del resto de datos reportados, mientras que en el punto TU-IslaPon todos los datos reportados para estos períodos de monitoreo fueron no detectables ( $<0,5$  mg/L).

#### 5.1.1.17. Fenoles

En la figura 5.23 se representa el perfil longitudinal de las concentraciones de fenoles en el río Tunjuelo, determinado a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010. En los primeros cinco primeros puntos aguas arriba las concentraciones fueron bajas; todas las

medianas estuvieron cercanas al límite de detección ( $0,02$  mg/L).

Los fenoles pueden ocurrir naturalmente en ambientes acuáticos por la descomposición de la vegetación acuática, razón por la cual se observaron dos datos por encima del límite de detección en La Regadera ( $0,1$  mg/L). Estos dos datos se presentaron los mismos días en que la DBO tuvo valores altos. Sin embargo, las concentraciones de fenoles siguen siendo bajas y la calidad del agua no se ve afectada en este punto del río. En UAN, las concentraciones también fueron bajas, y aunque el valor máximo estuvo por encima de lo que se presentó en La Regadera, se presume que el aporte que puedan tener las descargas de aguas residuales de Usme es mínimo. Este comportamiento se presentó igualmente en Yomasa, Doña Juana y Barrio México, pues en la mayoría de casos las concentraciones estuvieron cerca del límite de detección y esporádicamente (sin importar la hora del monitoreo) las concentraciones variaron entre  $0,02$  y  $0,24$  mg/L.

Es posible que estos cambios se deban a vertimientos no constantes cargados con sustancias fenólicas, las cuales pueden estar en productos como desinfectantes y antisépticos. Igualmente, es importante resaltar que las medianas históricas para estos primeros puntos de monitoreo fueron superiores a las medianas 2009-2010 (excepto UAN, que no cuenta con datos históricos), lo cual muestra una aparente disminución en las concentraciones de fenoles a lo largo del tiempo. Sin embargo, históricamente las concentraciones de fenoles también han sido inferiores al límite de detección, lo cual denota que estas disminuciones a lo largo del tiempo se dan principalmente por la diferencia entre el límite de detección de los datos históricos ( $0,05$  mg/L) y de los datos de la campaña 2009-2010 ( $0,02$  mg/L).

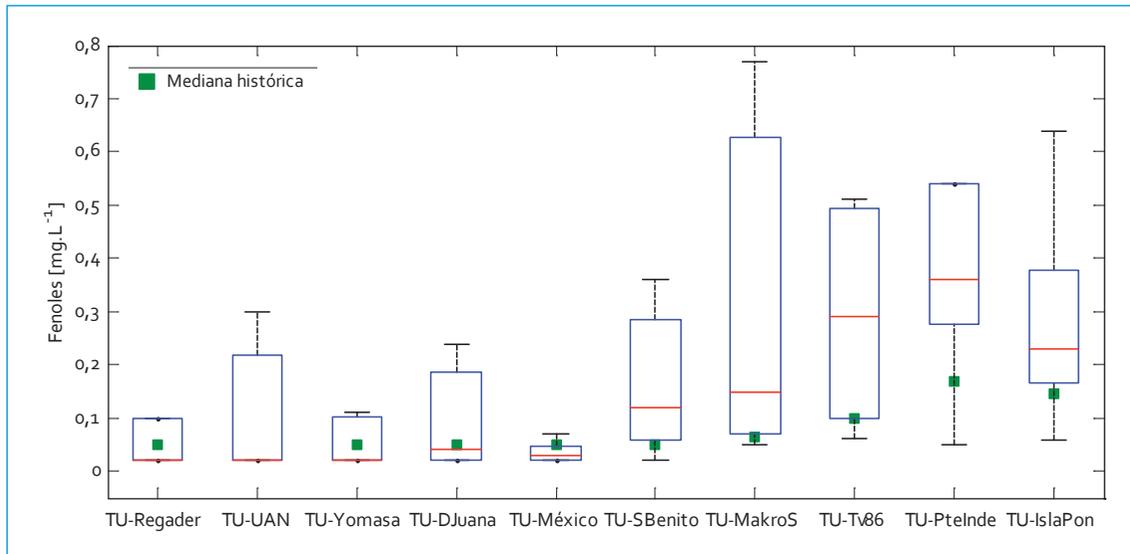


FIGURA 5.23. Perfil fenoles: río Tunjuelo

A partir de San Benito las concentraciones de fenoles aumentaron en el río y mostraron gran variabilidad en los datos, especialmente en Makro AutoSur. En el punto San Benito, después de la descarga de la quebrada Chiguaza, la mediana aumentó más de cuatro veces, al pasar de 0,03 mg/L en Barrio México a 0,12 mg/L en San Benito. Así como para otros parámetros (como materia orgánica, grasas y aceites y SAAM), el cambio más drástico de concentraciones se dio entre estos dos puntos, Barrio México y San Benito, que evidenció una vez más el impacto negativo de la quebrada Chiguaza en la calidad del agua del río Tunjuelo. En Makro AutoSur se dieron altas concentraciones (0,58 y 0,77 mg/L), aún más elevadas que el máximo histórico (0,17 mg/L). Ello refleja un aumento significativo de las concentraciones de fenoles a lo largo del tiempo. Aunque existen varios vertimientos en este sector que pueden aportar altas concentraciones de fenoles, no es viable identificar la fuente específica de este aumento. Por último, el siguiente aumento importante, aunque en menores proporciones, se observó en Tv 86

como consecuencia del aporte del interceptor Tunjuelo Medio. Aunque las medianas fueron diferentes entre Tv 86 e Isla Pontón San José, los rangos de las concentraciones se mantuvieron, lo cual muestra que en este sector del río las concentraciones de fenoles permanecen constantes. Con referencia a los datos históricos, desde el punto San Benito hacia aguas abajo, las medianas 2009-2010 fueron más elevadas, y ello evidenció aumentos en las concentraciones. La diferencia más marcada se dio en Tv 86, donde la mediana 2009-2010 estuvo casi tres veces por encima de la histórica: de cinco datos obtenidos, cuatro superaron la mediana histórica (0,1 mg/L).

#### 5.1.1.18. Metales

A continuación se muestran los perfiles longitudinales de las concentraciones de bario, cadmio, cinc, cobre, cromo, manganeso, níquel y plomo en el río Tunjuelo, generados a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010. En varios diagramas se evidenció un aumento importante de las concentraciones de metales en Doña

Juana, producto de la descarga de lixiviación tratados y sin tratar desde el relleno sanitario Doña Juana hacia el río Tunjuelito.

#### 5.1.1.18.1. Bario

Las concentraciones de bario en el río Tunjuelo no presentaron variaciones importantes, excepto en el punto de monitoreo Doña Juana (figura 5.24). Aun cuando las concentraciones no son altas, se debe tener en cuenta que el efecto es importante, puesto que la mediana de concentraciones pasó de 0,09 a 0,55 mg/L. Ello muestra que los lixiviados vertidos desde Doña Juana aún tienen muy altas concentraciones de esta sustancia, la cual muy seguramente se está acumulando aguas abajo. Se presume que en Doña Juana el cambio drástico de concentraciones sean consecuencia de descargas de lixiviados, puesto que a lo largo del río, aun con vertimientos más grandes de aguas residuales, el cambio en las concentraciones de bario no es importante. En Doña Juana, históricamente se han presentado valores más elevados que los actuales, por lo que este

comportamiento se viene presentando desde años atrás. Igualmente, se puede ver en la figura que la mediana de las concentraciones 2009-2010 fue muy cercana a la histórica, al evidenciar un comportamiento relativamente constante en el tiempo.

Los valores de bario, excluyendo Doña Juana (figura 5.25), estuvieron entre 0,03 y 0,13 mg/L. Las concentraciones aumentan según la descarga de aguas residuales vertida en el río. Como se mencionó, las principales descargas (quebrada Yomasa, quebrada Chiguaza e interceptor Tunjuelo Medio) impactan de manera negativa en la calidad del agua, no sólo en términos de materia orgánica, sólidos y nutrientes, sino en las concentraciones de bario en el río. Es importante resaltar que después de las descargas viene una aparente reducción de las concentraciones de bario, muy seguramente se debe a que el bario forma compuestos con los sulfatos y carbonatos presentes en el agua, los cuales no se disuelven bien en agua, y pueden permanecer mucho tiempo acumulados en el lecho del río.

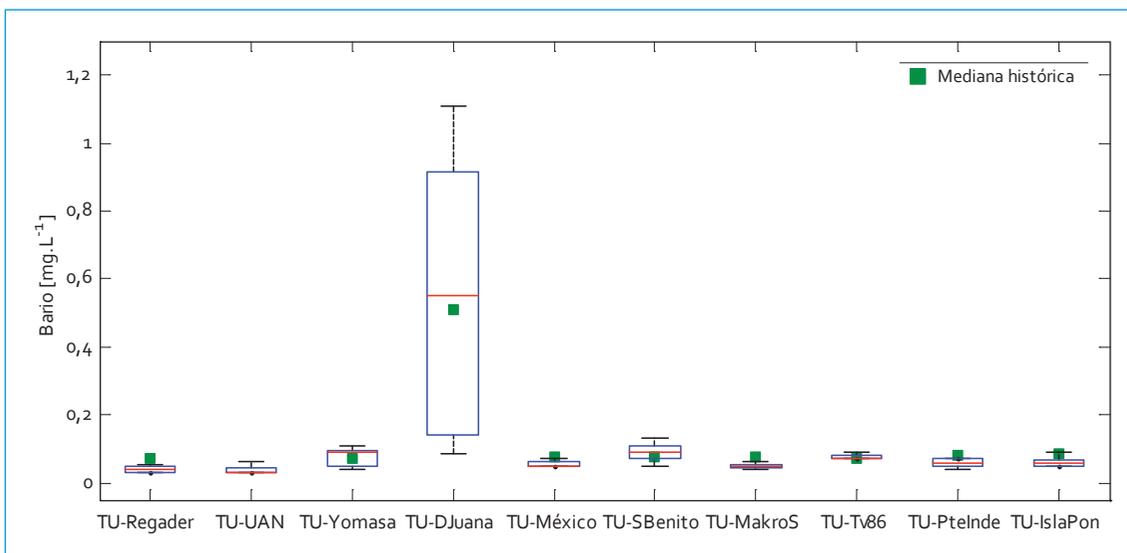


FIGURA 5.24. Perfil bario: río Tunjuelo

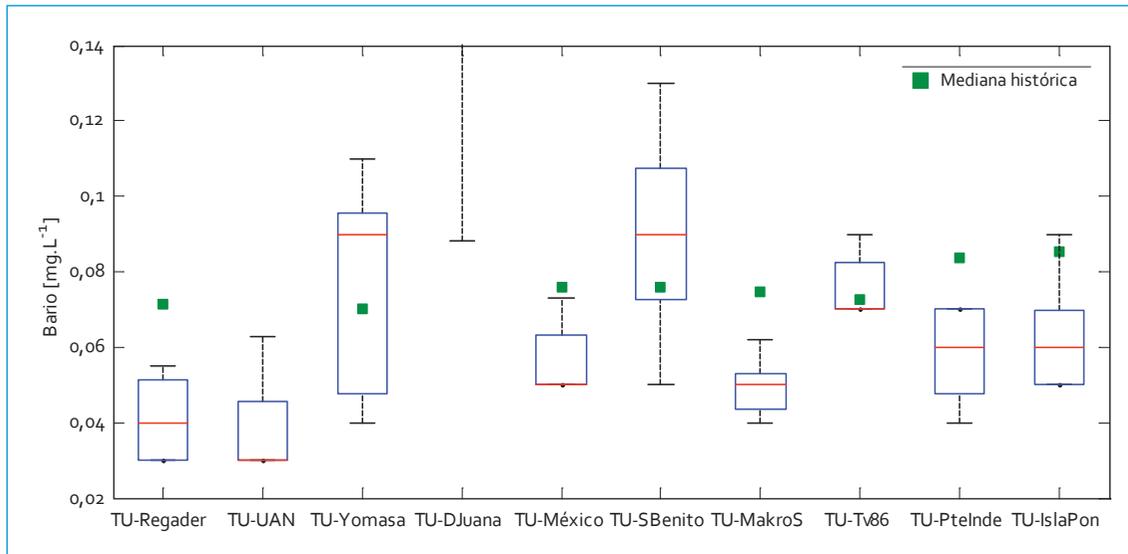


FIGURA 5.25. Perfil bario: río Tunjuelo (sin Doña Juana)

Por otro lado, las medianas de las concentraciones 2009-2010 evidenciaron que en la mayoría de puntos de monitoreo se redujo el bario en el río a lo largo del tiempo. En Yomasa, Doña Juana y San Benito las medianas se mostraron levemente superiores a las históricas; sin embargo, como las diferencias no son importantes se puede decir que se mantuvieron constantes en el tiempo.

#### 5.1.1.18.2. Cadmio

El perfil longitudinal de las concentraciones de cadmio en el río Tunjuelo se representa en la figura 5.26. Al igual que el bario, los valores de cadmio no presentaron variaciones importantes, sin contar el punto de monitoreo Doña Juana, donde el rango de concentraciones es muy amplio y seguramente está ligado al vertimiento de lixiviados en este sector. La mediana de concentraciones pasó de 0,001 mg/L en Yomasa a 0,014 mg/L en Doña Juana. Ello muestra que el vertimiento de lixiviados genera un cambio importante en las concentraciones del río. Se debe resaltar que dentro

de los valores actuales en Doña Juana se dio la mayor concentración de cadmio en los últimos años, puesto que el máximo histórico es de 0,02 mg/L y en la campaña 2009-2010 se encontró un máximo es de 0,03 mg/L. Dado que las concentraciones en Doña Juana fueron tan elevadas en comparación con los demás puntos de monitoreo, en la figura 5.27 se presenta el perfil de cadmio en el río Tunjuelo sin incorporar los valores medidos en el punto de Doña Juana. Como se puede ver, los valores históricos se encuentran muy por debajo de los rangos actuales de concentraciones, lo cual es consecuencia del muy bajo límite de detección empleado para los monitoreos históricos.

Al igual que los datos históricos, las concentraciones 2009-2010 de cadmio en el río Tunjuelo tendieron hacia el límite de detección; sin embargo, en los puntos donde se reciben descargas de aguas residuales se evidenciaron leves aumentos en los rangos, como fue el caso de San Benito y Tv 86. Es importante resaltar que las concentraciones más altas se dieron en Yomasa (0,003 mg/L) y San Benito (0,004 mg/L), puntos aguas abajo de las des-

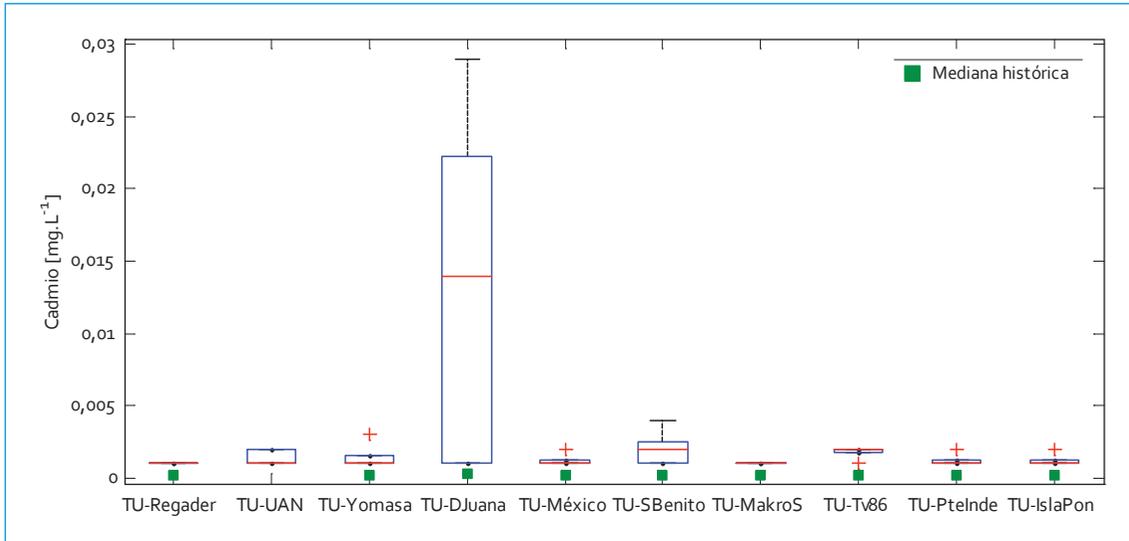


FIGURA 5.26. Perfil cadmio: río Tunjuelo

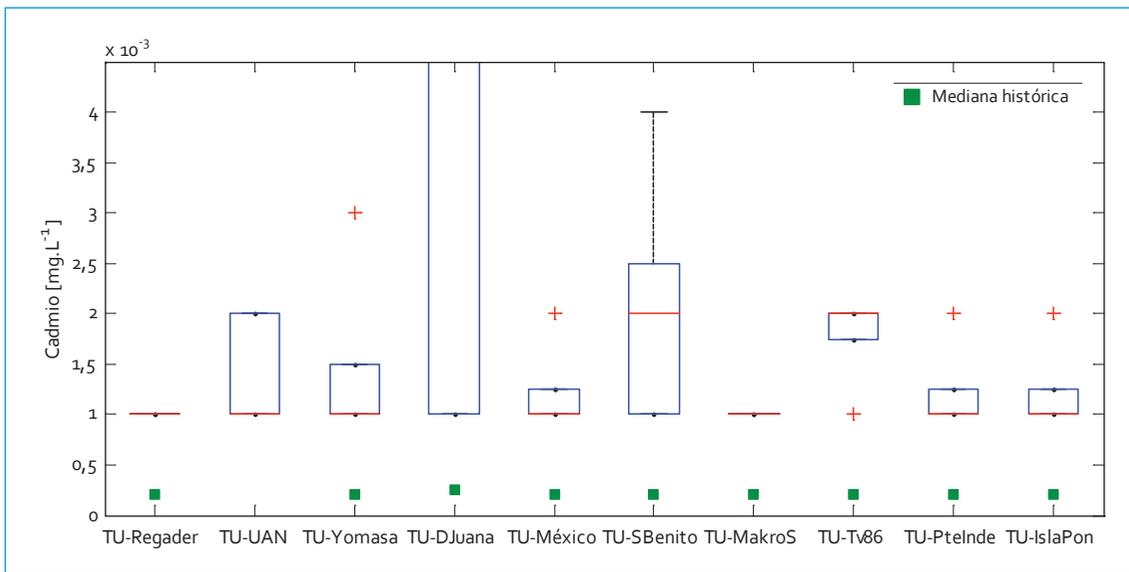


FIGURA 5.27. Perfil cadmio: río Tunjuelo (sin Doña Juana)

cargas de las quebradas Yomasa y Chiguaza, respectivamente.

### 5.1.1.18.3. Cinc

A diferencia del bario y el cadmio, el punto Doña Juana no fue donde se presentaron las mayores concentraciones de cinc en el río, fue en Transversal 86, punto aguas abajo de

la descarga del interceptor Tunjuelo Medio (figura 5.28). Las concentraciones aumentaron acorde con la descarga de aguas residuales vertida en el río: quebrada Yomasa, lixiviados del relleno sanitario, quebrada Chiguaza e interceptor Tunjuelo Medio. La diferencia más significativa entre las medianas se presentó entre UAN y Yomasa, seguida por la diferencia entre Makro AutoSur y Tv 86. Los datos

de Transversal 86 mostraron que las mayores concentraciones, cercanas 0,3 mg/L, se dieron en los monitoreos de la tarde entre las 13:00 y las 15:00, mientras que en los monitoreos de la noche (entre 20:00 y 22:00) se dieron la más bajas (0,05 mg/L). En relación con los datos históricos, se notó una disminución de todas las medianas de la campaña frente a los registros históricos (Doña Juana y Barrio México fueron los puntos donde la disminución fue más importante). Se debe resaltar que las diferencias no son significativas y en Doña Juana se ha notado gran variabilidad del comportamiento de los contaminantes, por lo que se puede esperar que existan variaciones en el tiempo.

#### 5.1.1.18.4. Cobre

En el perfil longitudinal de las concentraciones de cobre en el río Tunjuelo (figura 5.29) no se muestra un valor atípico en Doña Juana de 0,54 mg/L obtenido a mediados de diciembre del 2009. Aunque este valor sea viable considerando las concentraciones que puede llegar a

tener un lixiviado, es importante resaltar que este valor fue muy elevado, incluso al compararlo con los históricos (máximo histórico = 0,096 mg/L). Así como el bario y el cambio, aunque en menor proporción, en Doña Juana se presentaron las mayores concentraciones de cobre en el río. Los tres primeros puntos de monitoreo donde se registraron concentraciones mínimas de 0,002 mg/L mostraron una muy buena calidad del agua en referencia al cobre. Algunas directivas internacionales de protección de ecosistemas acuáticos recomiendan concentraciones entre 0,0014 mg/L y 0,0025 mg/L de cobre en un cuerpo de agua (con dureza de 30 mg/L) para alcanzar índices de protección de especies del 95% y del 80%, respectivamente.

En Doña Juana las concentraciones subieron hasta 0,08 mg/L, aun cuando la mediana de éstas fue muy similar a la de los puntos aguas abajo. En relación con los históricos, todas las medianas 2009-2010 fueron superiores; sin embargo, las diferencias fueron muy pequeñas en la mayoría de los puntos, por lo que se puede asumir un comportamiento constante

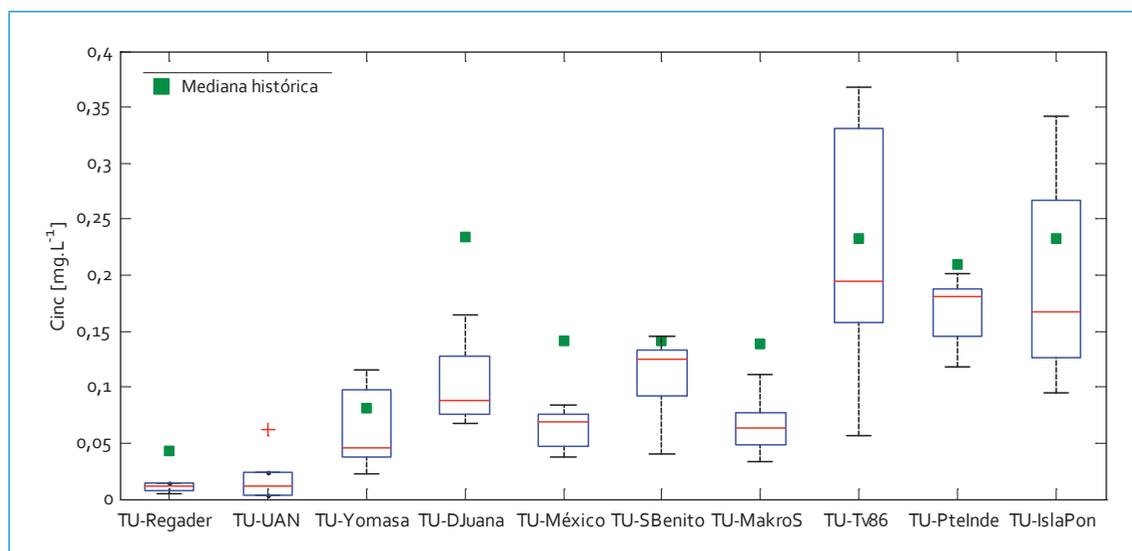


FIGURA 5.28. Perfil zinc: río Tunjuelo

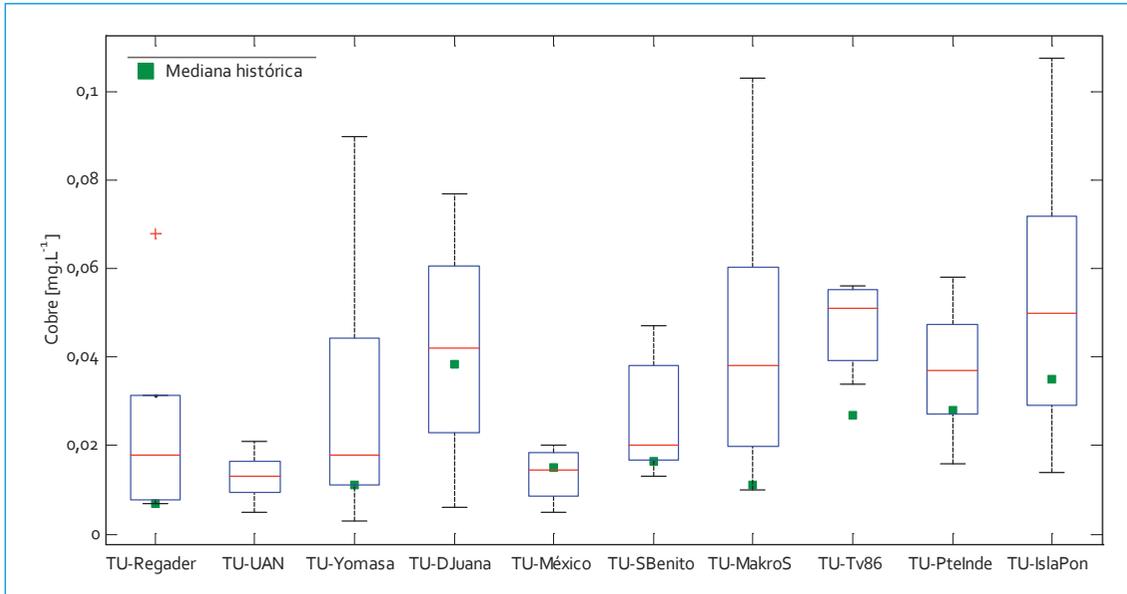


FIGURA 5.29. Perfil cobre: río Tunjuelo

en el tiempo. En Makro AutoSur la diferencia entre las medianas fue más notoria: la mayoría de los datos (cuatro de cinco) estuvieron por encima del registro histórico (0,01 mg/L). Ello mostró que, en la actualidad, puede existir algún vertimiento que esté haciendo un aporte considerable de cobre en este sector. Además, fue el único metal que evidenció un aumento entre San Benito y Makro AutoSur.

#### 5.1.1.18.5. Cromo total

Las concentraciones de cromo medidas en la campaña de monitoreo 2009-2010 a lo largo del río Tunjuelo se presentan en la figura 5.30. La figura está dividida en dos partes: en la primera se encuentran los primeros siete puntos de monitoreo, donde los datos oscilaron entre 0,006 y 0,1 mg/L; en la segunda parte se encuentran los tres últimos puntos, con una variación entre 0,04 y 1,2 mg/L. Fue necesario partir el perfil en dos escalas diferentes, porque las concentraciones de los puntos aguas arriba y aguas abajo de Makro AutoSur fueron muy

diferentes. La mediana en Tv 86 supera en más de cien veces la mediana de Makro.

En los dos primeros puntos de monitoreo no se cuantificó presencia de cromo en el río. La mediana histórica estuvo por debajo de la mediana 2009-2010, pero esto es debido a la diferencia entre los límites de detección ( $LD_{\text{valores históricos}} = 0,001 \text{ mg/L}$  vs.  $LD_{2009-2010} = 0,006 \text{ mg/L}$ ). Entre UAN y Yomasa se notó un leve aumento posiblemente por el cromo que pueden tener las aguas residuales contenidas en la quebrada Yomasa. Como en el caso del bario y el cadmio, el cromo tiene un aumento importante en Doña Juana, al mostrar valores hasta de 0,1 mg/L, y aunque la mediana 2009-2010 estuvo por debajo de la histórica, aún se nota el impacto de los lixiviados en la calidad del agua. En Barrio México, como ocurre para la gran mayoría de contaminantes, las concentraciones de cromo disminuyen y se acercan al límite de detección. Ello muestra que los metales dejan de estar en su forma disuelta en este punto y muy seguramente están precipitados o adsorbidos a los sedimentos en las zonas

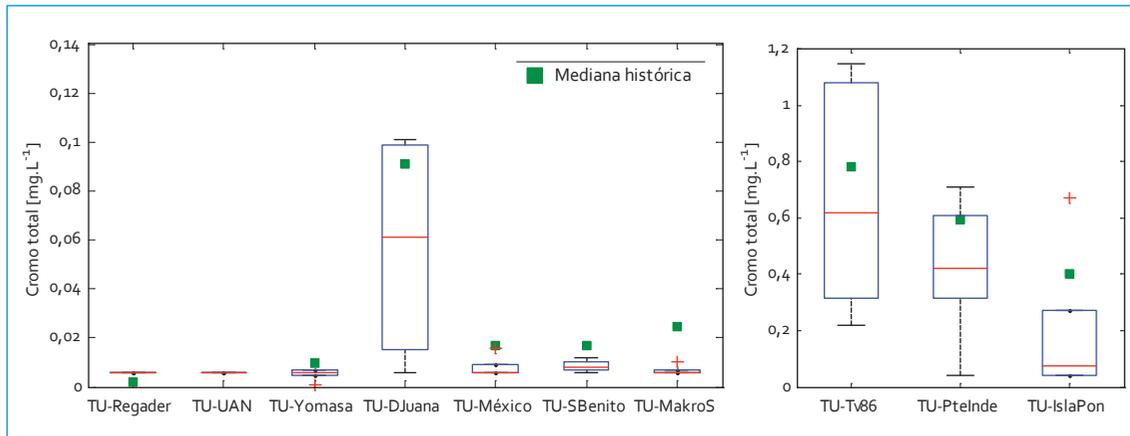


FIGURA 5.30. Perfil cromo total: río Tunjuelo

inundadas. Una vez descarga el interceptor Tunjuelo Medio en el río Tunjuelo, las concentraciones de cromo se elevan drásticamente. En Tv 86 se registraron concentraciones hasta de 1,15 mg/L, y ello evidencia que el impacto de las aguas residuales transportadas en dicho interceptor es muy significativo. El interceptor Tunjuelo Medio recolecta las aguas residuales industriales del sector de San Benito, donde se encuentra la industria de curtiembres de la ciudad. Es evidente que las aguas residuales vertidas por las curtiembres no están siendo debidamente tratadas y el vertimiento de las aguas residuales industriales afecta notoriamente la calidad del agua en este punto del río. Dado que el cromo tiene a acumularse en los sólidos, se notó una disminución entre Tv 86 e Isla Pontón San José. Las medianas históricas en todos los puntos, a excepción de La Regadera, estuvieron por encima de las medianas 2009-2010. Ello muestra que el comportamiento del cromo a lo largo del tiempo se mantuvo constante y, en algunos casos, como en Makro AutoSur e Isla Pontón San José, tendió a disminuir.

#### 5.1.1.18.6. Manganeseo

El perfil mostró que en la parte baja del río las concentraciones tienden a mantenerse constantes aunque exista variabilidad en los datos. Entre tanto, las medianas históricas fueron muy similares a las medianas de la campaña (figura 5.31), por lo que se puede asegurar un comportamiento constante en el tiempo. Al contrario, en la cuenca alta y media se notaron variaciones entre los puntos de monitoreo, especialmente entre Doña Juana y Barrio México, donde históricamente no se había registrado aumento en la mediana. Esto pudo haber sido un evento particular, por lo que es necesario contar con una mayor cantidad de datos para analizar este comportamiento.

#### 5.1.1.18.7. Níquel

Las concentraciones de níquel en el río Tunjuelo medidas durante 2009-2010 se representan en la figura 5.32. Las concentraciones en todo el río variaron entre 0,001 y 0,015 mg/L, sin contar la concentración atípica de Makro AutoSur y tres valores en Doña Juana. Ello muestra que

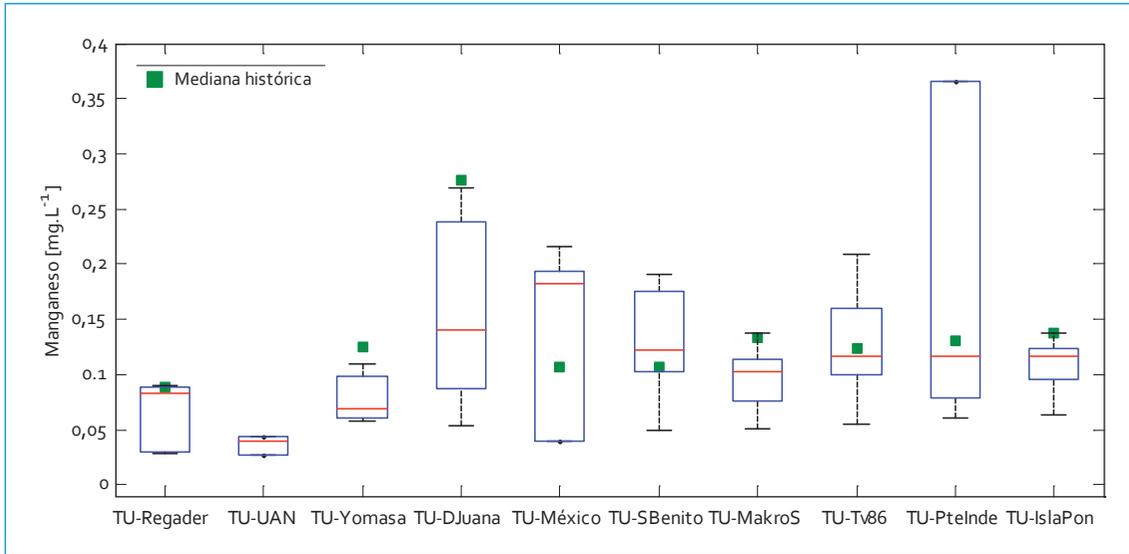


FIGURA 5.31. Perfil manganeso: río Tunjuelo

el río no tiene tan alto impacto negativo por níquel. Según guías internacionales de protección de ecosistemas acuáticos, se recomiendan concentraciones entre 0,011 y 0,013 mg/L de níquel en un cuerpo de agua (con dureza de 30 mg/L) para alcanzar índices de protección de especies del 95% y del 90% respectivamente.

En referencia a los datos históricos, las concentraciones permanecieron relativamente

constantes en el tiempo; solamente en Doña Juana se apreció una disminución de casi la mitad en las medianas ( $mediana_{actual} = 0,016$  mg/L vs.  $mediana_{histórica} = 0,03$  mg/L).

#### 5.1.1.18.8. Plomo

Las concentraciones de plomo en el río Tunjuelo mostraron un comportamiento similar

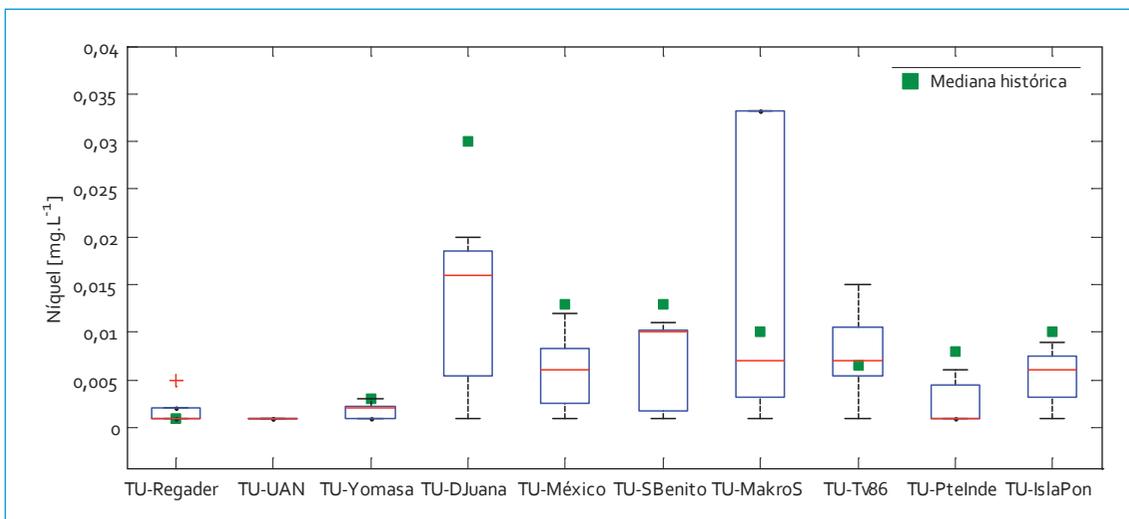


FIGURA 5.32. Perfil níquel: río Tunjuelo

a las de bario y cadmio; aquí Doña Juana fue el punto donde se registraron los valores más altos en el río (figuras 5.33 y 5.34). Sin tener en cuenta los datos de Doña Juana, no se presentaron variaciones importantes de plomo en el río, pues el rango estuvo entre 0,003 y 0,023 mg/L. Aunque las concentraciones en Doña Juana no fueron muy altas, se debe tener en cuenta que el efecto es importante, puesto que la mediana de concentraciones pasó de 0,009 a 0,191 mg/L. Ello mostró que muy seguramente los lixiviados no reciben el debido tratamiento para no afectar la calidad del cuerpo del agua. En Doña Juana, históricamente, se han presentado valores más elevados que los actuales, por lo que este comportamiento se viene presentando desde años atrás. A pesar de esto se puede ver en la figura que la mediana de las concentraciones 2009-2010 estuvo por encima de los registros históricos y que mostró un aumento de las concentraciones en el tiempo. El plomo aumenta según la descarga de aguas residuales vertida al río; los cambios, aunque son leves, se dieron después de las des-

cargas de las quebradas Yomasa y Chiguaza y el interceptor Tunjuelo Medio.

Es importante resaltar que, después de las descargas, se observaron aparentes reducciones de las concentraciones de plomo, muy seguramente asociadas al cambio de fases del metal o a su acomplejamiento con materia orgánica, pues el plomo es absorbido fuertemente en materiales en suspensión como las sustancias húmicas. Según los estándares internacionales para protección de ecosistemas acuáticos, se recomiendan concentraciones entre 0,0034 y 0,0056 mg/L de plomo en un cuerpo de agua (con dureza de 30 mg/L) para alcanzar índices de protección de especies del 95% y del 90%, respectivamente; por lo tanto, solamente en Yomasa y UAN se dan las condiciones para una protección de la vida acuática en referencia con el plomo.

Las medianas de las concentraciones 2009-2010 evidenciaron en todos los puntos de monitoreo, a excepción de La Regadera, un aumento de las cantidades de plomo en el río a lo largo del tiempo. Las medianas actuales

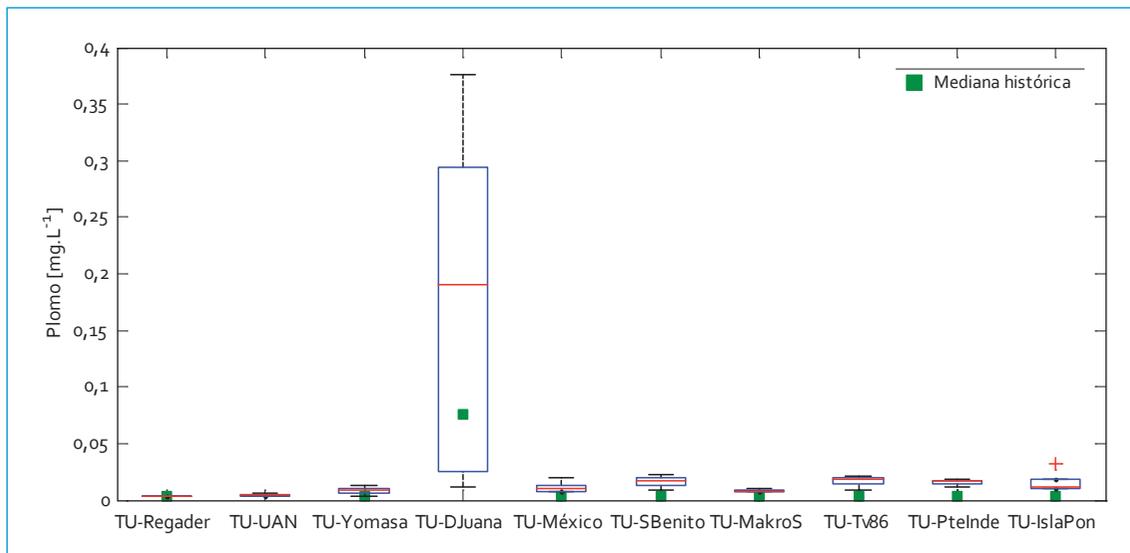


FIGURA 5.33. Perfil plomo: río Tunjuelo

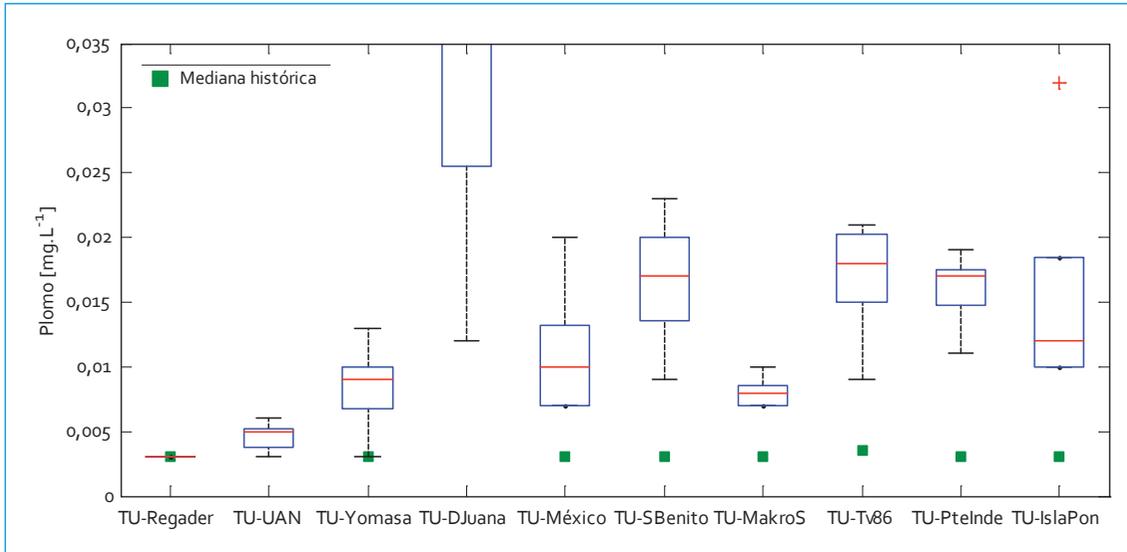


FIGURA 5.34. Perfil plomo: río Tunjuelo (sin Doña Juana)

superaron en más de 2,5 veces las medianas históricas. Ello mostró que en la actualidad se presentan mayores aportes de plomo en el agua.

### 5.1.2. Cargas contaminantes

#### 5.1.2.1. DBO

La tabla 5.1 muestra el promedio de cargas de  $DBO_5$  para los diferentes tramos del río Tunjuelo calculadas a partir de la campaña de monitoreo 2009-2010. Como se puede ver en la figura 5.35, la mayoría de los datos del tramo 1 estuvieron por debajo de la meta de reducción del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) y cercanos a los datos históricos. Los datos muestran que mientras en el río no se presenten cambios bruscos de caudal por la apertura de compuertas en el embalse, la meta de reducción se puede cumplir sin mayores inconvenientes.

TABLA 5.1. Carga promedio transportada  $DBO_5$ : río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$DBO_5$	20	1104	2106	38496

Para el tramo 2 se observó una mayor variabilidad en las cargas estimadas, al igual que fue evidente la reducción de las cargas 2009-2010 respecto a las cargas históricas (figura 5.35). En cuanto a la meta de reducción (resolución 4328 del 2010), los resultados mostraron que sería de gran impacto sobre la carga de  $DBO_5$  transportada en esta parte del río. En el tramo 3 también se apreció una reducción de las cargas 2009-2010 respecto a las cargas históricas; sin embargo, tanto la meta de reducción de la resolución 4328 del 2010 como la del PSMV aún están por debajo de la mayoría de las cargas medidas en la campaña.

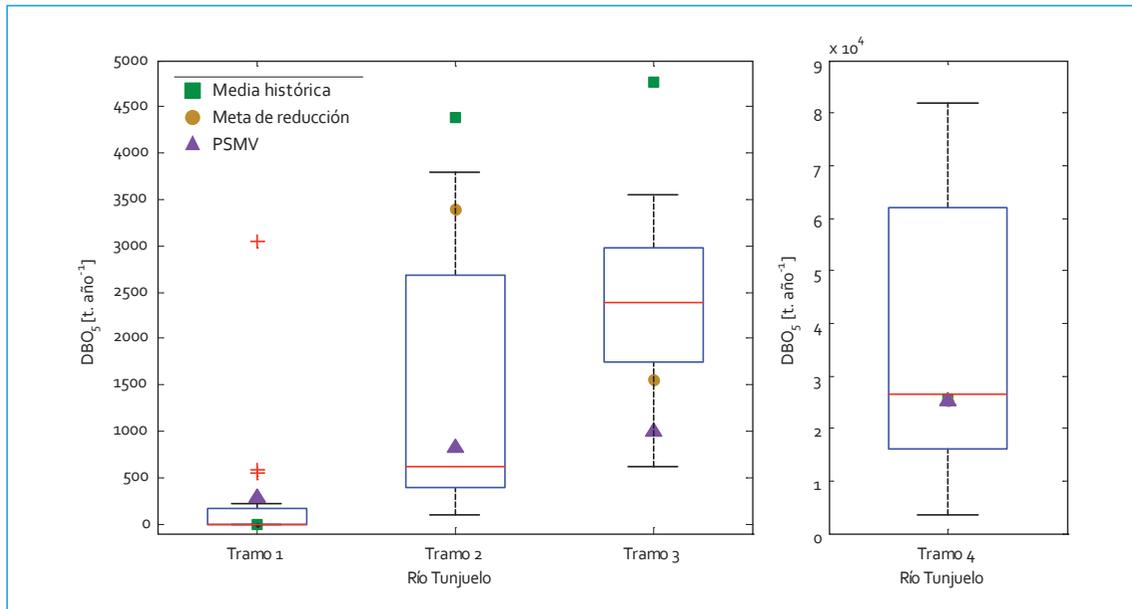


FIGURA 5.35. Perfil cargas DBO<sub>5</sub>: río Tunjuelo

El tramo 4 presentó la carga promedio más alta de DBO<sub>5</sub> en el río Tunjuelo, lo cual es de esperarse por todas las descargas recibidas aguas arriba. Adicionalmente, se observó una gran variabilidad en los datos. No obstante, la mediana 2009-2010 estuvo dentro del rango de cargas estimadas históricamente, lo cual indica que las cargas han permanecido relativamente constantes en el tiempo.

5.1.1.2.2. DQO

La tabla 5.2 contiene la carga promedio transportada de DQO para los cuatro tramos del río Tunjuelo en el período 2009-2010. En la figura 5.36 se observa con mayor claridad el comportamiento del perfil de cargas para los tramos del río. En el tramo 1 se notó que las cargas de la campaña permanecieron constantes respecto a las cargas históricas.

TABLA 5.2. Carga promedio transportada DQO: río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
DQO	574	3797	7340	87742

El tramo 2 mostró una reducción de las cargas 2009-2010 en relación con el promedio histórico. En el tramo 3 también hubo una reducción de las cargas medidas respecto al promedio histórico. El tramo 4, como es característico, presenta las mayores cargas y variabilidad en los datos. La figura 5.36 muestra que las cargas medidas en la campaña han permanecido prácticamente constantes respecto a la carga promedio histórica. El comportamiento de las cargas durante las diferentes ventanas de monitoreo para el tramo 4 mostraron que las mayores cargas y concentraciones de DQO

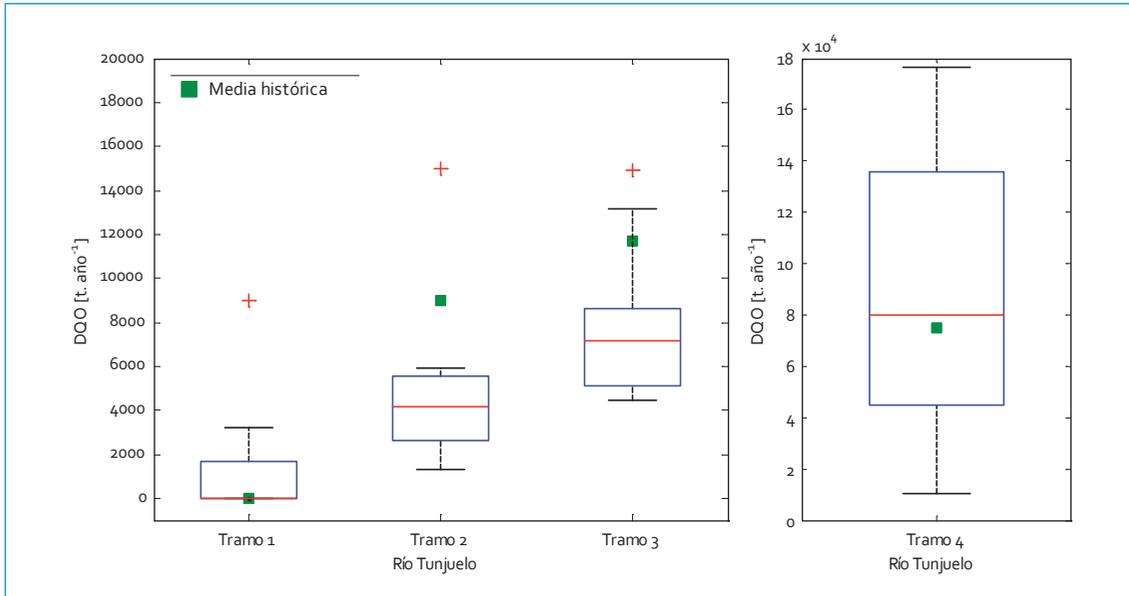


FIGURA 5.36. Perfil cargas DQO: río Tunjuelo

se presentaron a la media noche y en la ventana de las 13:00-15:00.

### 5.1.2.3. SST

En la tabla 5.3 se observa que el tramo 2 presentó la mayor carga de SST como consecuencia de la actividad minera en el sector. Posteriormente, la carga de SST disminuyó de manera importante (doce veces) en el tramo 3, debido al efecto de sedimentación que generan las zonas inundadas; sin embargo, en el tramo 4 la carga nuevamente se incrementó a valores cercanos a los hallados en el tramo 2, por la descarga sobre el río de las aguas residuales transportadas por el interceptor Tunjuelo Medio. El perfil de cargas (figura 5.37) muestra que para tramo 1 las cargas han permanecido constantes; sin embargo, como se ha venido resaltando, la calidad del agua en este tramo se ve seriamente afectada cuando se presentan cambios bruscos de caudal por la apertura de las compuertas en el embalse La Regadera.

TABLA 5.3. Carga promedio transportada SST: río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
SST	1034	44681	3732	38428

En el perfil de cargas se pudo apreciar claramente la reducción de carga de SST entre los tramos 2 y 3. Para el tramo 3 se observó que las medianas 2009-2010 estuvieron dentro del rango de cargas históricas, pero cercanas a los valores máximos. En cuanto a la meta de reducción, aún es baja en comparación con las cargas medidas en la campaña. En el tramo 4 nuevamente sube la carga de SST, debido a todas las descargas industriales y domésticas que recibe el río en este sector. El perfil de cargas para el tramo 4 mostró que éstas han permanecido prácticamente constantes, ya que la mediana 2009-2010 estuvo dentro del rango de valores históricos. Para este tramo se observó que la meta propuesta en el PSMV (23770 t) posiblemente no es suficiente, ya

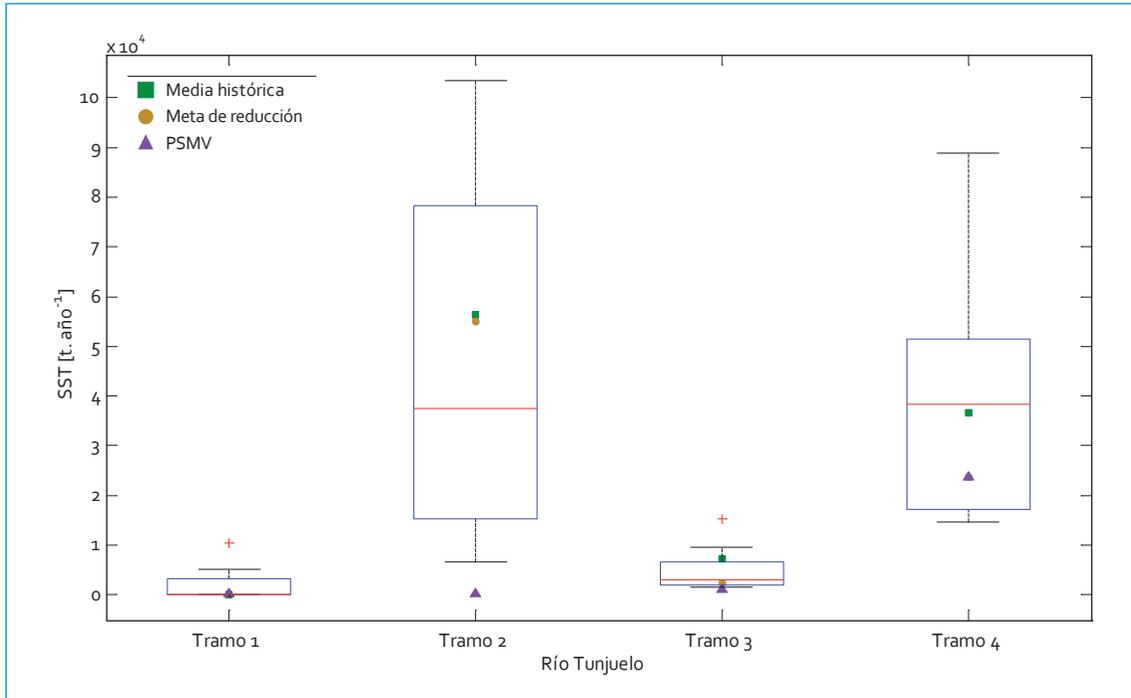


FIGURA 5.37. Perfil cargas SST: río Tunjuelo

que las cargas en este tramo pueden alcanzar valores de 88 000 t/año, casi cuatro veces más que lo propuesto.

5.1.2.4. Nitrógeno total

En los tramos 1 y 2 las cargas han permanecido constantes en el tiempo (figura 5.38). La carga de  $N_{total}$  aumentó ligeramente en el tramo 3 respecto al tramo 2 (tabla 5.4), aun cuando la mediana 2009-2010 estuvo dentro del rango histórico. En el tramo 4 el promedio de carga de  $N_{total}$  subió 8,6 veces en relación con el promedio de carga en el tramo 3, que muestra el impacto que tienen las grandes descargas de aguas residuales aguas abajo del tramo 3. La mediana histórica (7883 t/año) fue muy cercana a las cargas medidas durante 2009-2010

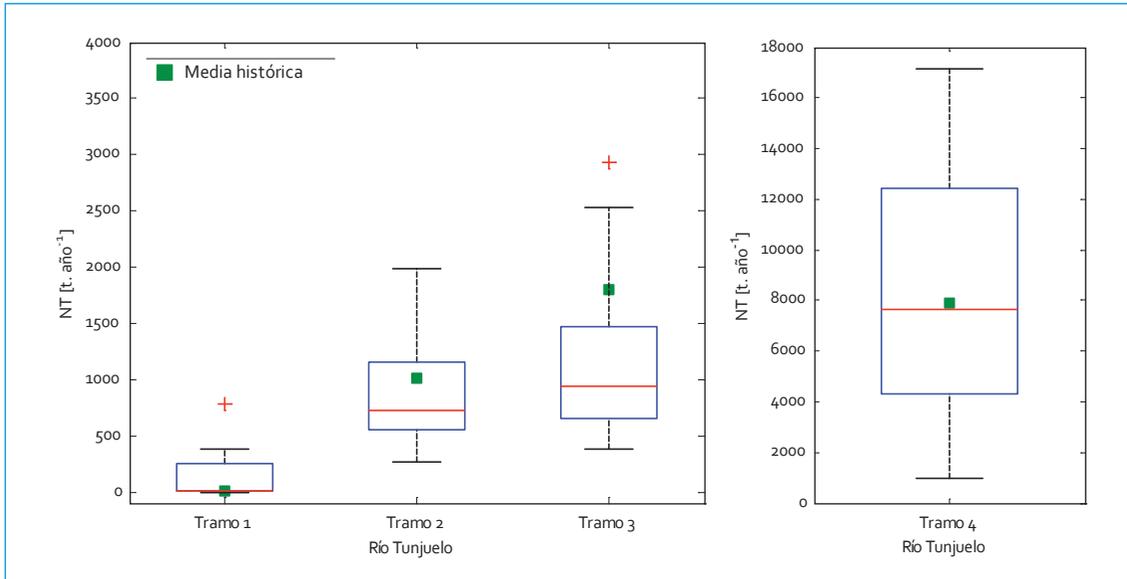
(8874 t/año), lo que sugiere que estas cargas contaminantes han permanecido constantes.

TABLA 5.4. Carga promedio transportada  $N_{total}$ : río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$N_{total}$	78	898	984	8474

5.1.2.5. Fósforo total

En la tabla 5.5 se presenta la carga promedio de fósforo total para los cuatro tramos del río Tunjuelo, calculada a partir de los datos de la campaña de monitoreo 2009-2010. La figura 5.39 presenta el perfil de cargas para cada tramo.

FIGURA 5.38. Perfil cargas  $N_{total}$ : río TunjueloTABLA 5.5. Carga promedio transportada  $F_{total}$ : río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T1	T2	T3	T4
$F_{total}$	0,7	441	122	1002

El perfil de cargas para el tramo 1 muestra que las cargas han permanecido constantes respecto al promedio histórico; sin embargo, debido a picos de caudal presentados, especialmente en el segundo trimestre del 2010, se han generado incrementos en las cargas de fósforo desde 0,7 a 66 t/año, lo cual es noventa veces mayor a las cargas normalmente transportadas en este tramo. En el tramo 2 la carga de fósforo aumenta aproximadamente 600 veces respecto al tramo 1, pues los lixiviados tratados y sin tratar procedentes del relleno sanitario Doña Juana son grandes aportantes de este elemento. En el perfil de cargas para este tramo se aprecia que se redujeron en comparación con el promedio histórico. En

el tramo 3 la carga de  $F_{total}$  disminuye respecto al tramo 2, muy posiblemente debido a su tránsito a través de las zonas inundadas, las cuales actúan como sedimentadores.

Al comparar los registros históricos con el rango de cargas 2009-2010 en el tramo 3, se aprecia su reducción. Así, al finalizar el tramo 4, nuevamente la carga de  $F_{total}$  se incrementa hasta alcanzar las cargas más altas transportadas en el río. Las cargas actuales en este tramo han permanecido prácticamente constantes respecto al promedio histórico.

#### 5.1.2.6. Grasas y aceites

De manera general se observó que las cargas de GyA entre el tramo 1 y el 2 no varían. Este es el único parámetro que prácticamente mantuvo las mismas características que se presentan en el tramo 1 (tabla 5.6). En el tramo 3 la carga comienza a subir, para finalmente aumentar de manera drástica en el tramo 4. Esto indica que los esfuerzos para disminuir las cargas de GyA en el río se deben centrar principalmente

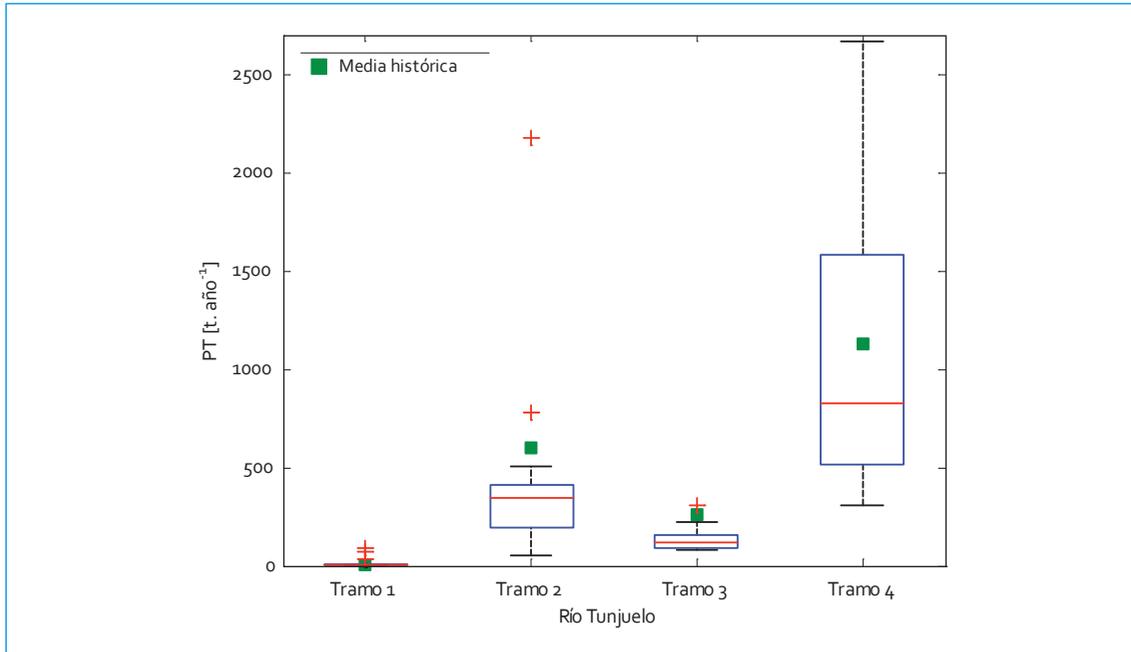


FIGURA 5.39. Perfil cargas  $F_{total}$ : río Tunjuelo

en el tramo 4. Los perfiles de cargas mostraron que para el tramo 1 las cargas actuales han permanecido constantes respecto al promedio histórico (figura 5.40). Para el tramo 2 se observó una disminución en las cargas 2009-

2010 frente a las cargas históricas; mientras que en los tramos 3 y 4 las cargas han permanecido prácticamente constantes en el tiempo (figura 5.40).

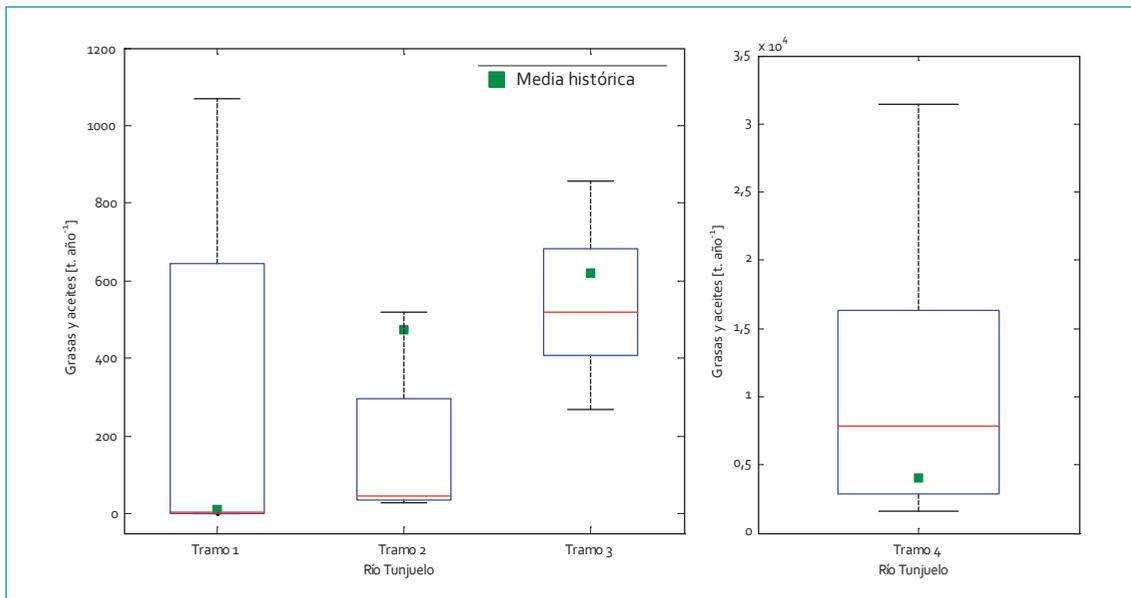


FIGURA 5.40. Perfil cargas GyA: río Tunjuelo

TABLA 5.6. Carga promedio transportada GyA: río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
GyA	151	153	520	10428

#### 5.1.2.7. SAAM

La tabla 5.7 presenta la carga promedio transportada de SAAM para los cuatro tramos del río Tunjuelo durante el período de monitoreo 2009-2010. La figura 5.41 muestra el perfil de cargas para los cuatro tramos. El perfil de cargas para los tramos 1 y 2 muestra que éstas han permanecido constantes respecto a las cargas históricas en cada tramo correspondiente. El perfil de cargas para el tramo 3 muestra que la mediana 2009-2010 está dentro del rango de cargas históricas; sin embargo, tendió a ubicarse cerca a los valores mínimos y ello indica un aumento en las cargas actuales

respecto a las históricas. En el perfil de cargas del tramo 4 se observó un ligero aumento de las cargas actuales en relación con el promedio histórico.

TABLA 5.7. Carga promedio transportada SAAM: río Tunjuelo

Parámetro	río Tunjuelo (t/año)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
SAAM	5,6	20	154	1542

## 5.2. Calidad del agua (woi)

Para el punto de monitoreo del tramo 1, correspondiente a La Regadera, se obtuvieron 180 datos (2009-2010), de los cuales 12 (6,6%) excedieron los objetivos de calidad, lo que permitió que la calidad del agua para este primer tramo fuera buena. Como se puede observar en la tabla 5.8, el parámetro que más veces excedió los objetivos de calidad del agua fueron

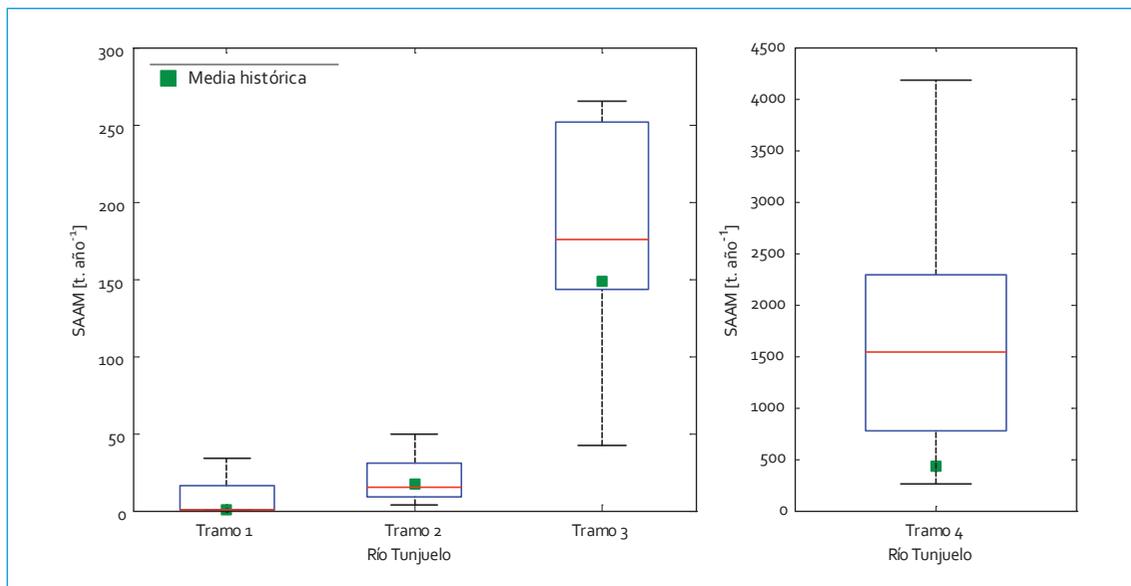


FIGURA 5.41. Perfil cargas SAAM: río Tunjuelo

los SST, seguido de  $F_{total}$  y oxígeno disuelto. El resto de parámetros satisfizo plenamente con los objetivos de calidad.

TABLA 5.8. WQI río Tunjuelo: tramo 1

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	1	F1	30
DBO	0	F2	6,20
DQO	0	NSE	0,05
$N_{total}$	0	F3	4,55
$F_{total}$	5	WQI	82,12
SST	6		
Grasas y aceites	0		
Coliformes fecales	0		
pH	0		
SAAM	0		

Al comparar el WQI obtenido en el lapso 2009-2010 con el WQI 2008-2009, se aprecia que la calidad del agua se ha mantenido constante, pues el WQI previo también fue bueno, con un valor de 82,30. Para el 2008-2009 la cantidad de datos utilizados para calcular el WQI fue menor (84), y el número de éstos que excedieron los objetivos de calidad fueron cuatro, de los cuales uno correspondió a DBO, dos a  $F_{total}$  y otro a SAAM. El único parámetro que se excedió en los dos años 2008-2009 y 2009-2010 fue el  $F_{total}$ . Al revisar los días de monitoreo, cuando se presentaron los datos fuera de los objetivos de calidad, especialmente para los SST, se encontró que la gran mayoría se obtuvo

cuando hubo lluvia y el río transitaba un caudal superior al normal, lo cual explica el aumento de este parámetro. En lo referente al  $F_{total}$ , algunos de estos datos también se presentaron cuando hubo lluvia durante el monitoreo.

En el tramo 2 el río tiene dos puntos de monitoreo (Yomasa y Doña Juana). Sobre los caudales se generaron 416 datos de calidad de la fase líquida, de los cuales 108 no satisficieron los objetivos de calidad. En este tramo la calidad del río se clasificó como pobre. En la tabla 5.9 se observa que todos los parámetros excedieron, al menos una vez, los objetivos de calidad. El pH, SST y  $F_{total}$  fueron los parámetros que más veces estuvieron fuera, mientras que GyA, DBO y SAAM, los que menos. La mayor cantidad de datos fuera de los objetivos de calidad estuvieron presentes en la estación Doña Juana a diferentes horas del día.

TABLA 5.9. WQI río Tunjuelo: tramo 2

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	7	F1	100
DBO	4	F2	26
DQO	11	NSE	1,16
$N_{total}$	11	F3	53,74
$F_{total}$	16	WQI	32,76
SST	18		
Grasas y aceites	1		
Coliformes fecales	8		
pH	26		
SAAM	6		

Al comparar el WQI del lapso 2008-2009 con el del 2009-2010, se observa a pesar de que el tramo sigue clasificándose como pobre, la calidad del agua ha desmejorado levemente, ya que el WQI del período 2008-2009 (34,48) fue mayor que el WQI del año 2009-2010. En 2008-2009, todos los parámetros también excedieron, al menos una vez, los objetivos de calidad; para este año, al igual que para el 2009-2010, los parámetros más críticos fueron SST,  $F_{\text{total}}$  y pH; sin embargo, este último ya no fue el que más veces excedió los objetivos de calidad. Debido a la actividad minera de la zona, el tramo 2 se caracterizó por presentar altas concentraciones de SST. Por otra parte, el pH en este tramo puede llegar a valores por encima de diez unidades, lo cual, en algunos momentos, le da características alcalinas al río en este tramo. Este último fenómeno puede atribuirse a que los sólidos vertidos al río como consecuencia de la actividad minera pueden presentar altas concentraciones de material alcalino y a los vertimientos procedentes de la planta de tratamiento de lixiviados de Doña Juana. Por otra parte, las altas concentraciones de  $N_{\text{total}}$  y coliformes fecales —parámetros importantes de calidad de agua y que también presentaron datos que no cumplían con los objetivos de calidad— pueden atribuirse de nuevo a los vertimientos desde el relleno sanitario y a que el río, en este sector, recibe altas cantidades de estiércol por escorrentía, debido a la actividad ganadera. Claramente el vertimiento de lixiviados contribuye de forma muy importante en la alteración de la calidad del agua en este tramo.

Para el tramo 3, con cuatro puntos de monitoreo (Doña Juana, Barrio México, San Benito y Makro AutoSur), se tomaron un total de 831 datos, de los cuales 254 (30%) no alcanzaron los objetivos de calidad. A partir de esto la cali-

dad del agua para este tramo se clasificó como pobre. En la tabla 5.10 se aprecia que todos los parámetros excedieron en alguna medida los objetivos de calidad. El oxígeno disuelto y el  $N_{\text{total}}$  fueron los que tuvieron la mayor cantidad de datos por encima de los objetivos, con 33 y 32 datos respectivamente; mientras que GyA y DBO, con 14 y 17, respectivamente, fueron los parámetros con menor cantidad de datos fuera de los objetivos de calidad.

TABLA 5.10. WQI río Tunjuelo: tramo 3

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variabes	Valor
Oxígeno disuelto	34	F1	100
DBO	17	F2	34
DQO	32	NSE	0,80
$N_{\text{total}}$	33	F3	44,59
$F_{\text{total}}$	22	WQI	33,90
SST	26		
Grasas y aceites	14		
Coliformes fecales	28		
pH	22		
SAAM	26		

Al comparar los tramos 2 y 3, se observó una muy leve mejoría en el WQI, al pasar de 32,76 (tramo 2) a 33,9 (tramo 3). Esto se debe a que varios parámetros como DBO, DQO,  $N_{\text{total}}$ ,  $F_{\text{total}}$  y SST mejoran cuando el río pasa por las zonas inundadas entre las estaciones Doña Juana y Barrio México. Sin embargo, nuevamente en la estación San Benito el río

pierde la poca calidad que había recuperado y se deteriora aún más en la estación de Makro AutoSur, debido a las descargas domésticas e industriales que recibe. Al comparar el WQI del año 2008-2009 (35,40) con el WQI del año 2009-2010 (33,90), se observa que la calidad del agua se mantuvo clasificada como pobre y, además, no tiende a mejorar. Al igual que para el año 2009-2010, en el año 2008-2009, el oxígeno disuelto y  $N_{total}$  fueron los parámetros más críticos, lo cual demuestra que prácticamente se siguen manteniendo los mismos patrones de contaminación y deterioro de la calidad del agua en este tramo.

Finalmente, en el tramo 4 (Makro AutoSur, Transversal 86, Puente Independencia e Isla Pontón San José) se utilizaron 822 datos para el cálculo del WQI, de los cuales 266 no alcanzaron los objetivos de calidad. La calidad del

agua para este tramo se clasificó como pobre. En la tabla 5.11 se observa que SAAM con 52 datos y oxígeno disuelto con 46 datos fueron los parámetros que más veces excedieron los objetivos de calidad; mientras que el pH con ningún dato y SST con siete datos fueron los parámetros menos críticos. En todos los puntos de monitoreo el porcentaje de datos que excedió los objetivos de calidad estuvo entre un 34% (Isla Pontón San José) y 40% (Tv 86).

Entre los tramos 3 y 4 el WQI aumentó: pasó de 33,90 a 40,75, lo cual no necesariamente muestra una mejoría en la calidad del agua, pues los objetivos de calidad para cada tramo son diferentes. Al comparar el WQI del año 2008-2009 (35,30) con el WQI del año 2009-2010, se aprecia que la clasificación de la calidad del agua se mantiene en pobre, con una ligera mejoría. Para los dos años se encontró que el oxígeno disuelto y SAAM fueron los parámetros que más veces excedieron los objetivos de calidad; no obstante, en el año 2009-2010 dichos parámetros estuvieron menos alejados y de ahí el aumento del WQI para este año respecto al 2008-2009. En la figura 5.42 se presenta el mapa de calidad para el río Tunjuelo, generado a partir de los monitoreos del período 2009-2010.

TABLA 5.11. WQI río Tunjuelo: tramo 4

Parámetro	Núm. datos que no cumplen	Variables	Valor
Oxígeno disuelto	46	F1	90
DBO	21	F2	36,10
DQO	30	NSE	0,51
$N_{total}$	33	F3	33,59
$F_{total}$	10	WQI	40,75
SST	7		
Grasas y aceites	25		
Coliformes fecales	42		
pH	0		
SAAM	52		

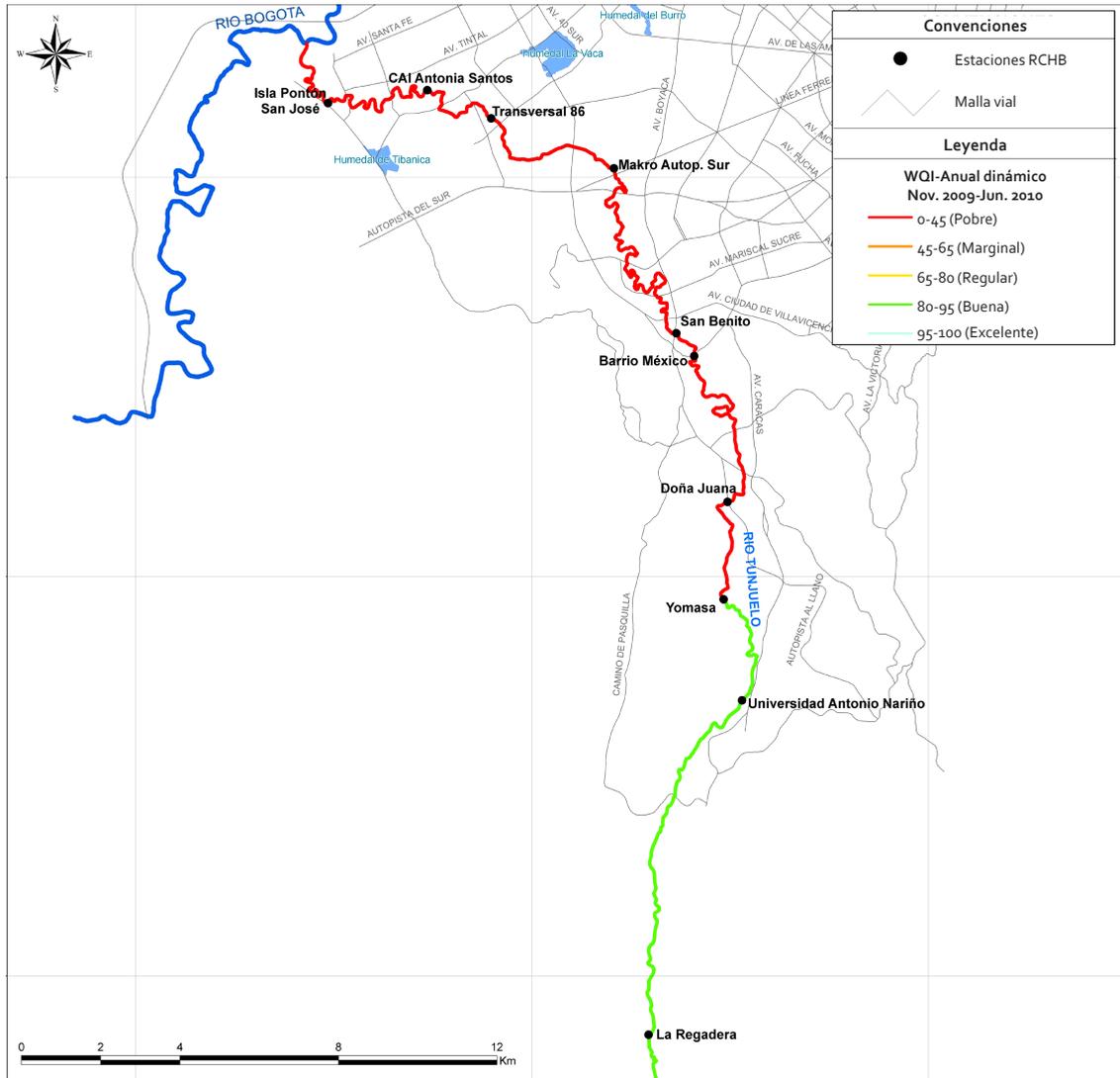


FIGURA 5.42. Mapa de calidad: río Tunjuelo



## 6. ESTADO DE LOS RÍOS EN BOGOTÁ

### 6.1. Río Torca

El caudal del río Torca mostró un aumento muy importante a lo largo de su recorrido por la ciudad, pues entre la carrera 7ª y la calle 183 recibe varias descargas puntuales, provenientes de la red pública de alcantarillado. En los primeros puntos de monitoreo los mayores caudales se presentaron en horas de la mañana, por la afectación de las descargas de agua residual doméstica. En el último punto no hubo gran variación de los caudales en las diferentes horas del día, y ello mostró un amortiguamiento de caudales asociado al remanso hidráulico del río Bogotá sobre el río Torca. En comparación con los datos históricos, Canal El Cedro tuvo menores caudales durante ese período; mientras que los caudales en Makro y Guaymaral han seguido relativamente constantes.

Las concentraciones y cargas contaminantes en el río Torca mostraron un aumento a lo largo del río frente a los registros históricos. El cambio más importante se dio entre el canal El Cedro y Makro, como efecto de los vertimientos de aguas residuales. Para algunos contaminantes, como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), grasas y aceites y sustancias activas al azul de metileno (SAAM), se pudo observar un

decrecimiento en las concentraciones y cargas a partir de Makro, lo cual puede deberse a fenómenos de dilución, posible depuración por el humedal o por el buchón. Al igual que el caudal, en los dos primeros puntos de monitoreo, las variaciones diarias de las concentraciones mostraron que para algunos contaminantes como materia orgánica, sólidos, SAAM y coliformes, las concentraciones en la mañana o en la tarde fueron superiores a la noche.

En Canal El Cedro se observó, para las campañas de monitoreo 2009-2010, que las medianas de las concentraciones de materia orgánica, sólidos, nitrógeno y SAAM se incrementaron respecto a las medianas históricas, lo cual pudo estar asociado a arrastre de sedimentos por los altos caudales ocurridos en este lapso. Al comparar las cargas promedio actuales con las históricas, se puede afirmar que para la mayoría de parámetros las cargas del período 2009-2010 fueron más elevadas que las históricas; sin embargo, si no se tuvieran en cuenta los datos del 2009, la carga promedio de la campaña sería inferior a la histórica. En Makro y Club Guaymaral se notaron tendencias de aumento de las concentraciones y cargas en el tiempo. Las concentraciones de metales pesados en el río Torca fueron homogéneas, por lo que se podría pensar que los metales

encontrados son de origen natural y no presentan alguna afectación a la calidad del agua.

En cuanto a la calidad del agua evaluada WQI, se determinó que en el tramo 1 fue **buena**. Los parámetros que estuvieron debajo de los objetivos de calidad fueron  $N_{total}$ , seguido de SAAM y coliformes fecales. En comparación con los resultados obtenidos (2008-2009), el  $N_{total}$  sigue siendo el parámetro que más supera los objetivos de calidad. Para el tramo 2 (Makro 193 y Club Guaymaral) el WQI fue **regular**, y en este caso los parámetros que más estuvieron alejados de los objetivos fueron oxígeno disuelto, SAAM y coliformes fecales. Ello evidencia que el deterioro de la calidad del agua en este tramo se da principalmente por las descargas de aguas residuales domésticas.

## 6.2. Río Salitre

El caudal del río Salitre mostró un aumento a lo largo de su recorrido por la ciudad y, en general, los datos de caudales para la mayoría de los puntos se encontraron dentro de los rangos históricos con similitudes entre las medianas históricas y las de esta campaña 2009-2010.

Las concentraciones y cargas de los contaminantes en el río Salitre tuvieron un comportamiento creciente hacia aguas abajo, con un incremento importante a partir del punto Calle 53 (tramo 2), y una variación de acuerdo con el grado de deterioro de la calidad. En Parque Nacional las condiciones óptimas del agua hacen de éste un referente de calidad que se podría presentar a lo largo del río. En Calle 53 y Carrefour Avenida 68 la mayoría de parámetros (alcalinidad, pH, materia orgánica, sólidos, nutrientes, coliformes) presentaron los valores más altos de concentración, asociados principalmente a los aportes de las aguas resi-

duales domésticas provenientes de alivios que operan mal y de colectores que drenan directamente desde el sistema de alcantarillado de la ciudad.

En Transversal 91 y Salitre Alameda, las concentraciones de la mayoría de los parámetros tendieron a disminuir respecto al punto anterior, lo cual puede relacionarse con el efecto de remanso en los tramos bajos y poco pendientes del río, que favorece los procesos de sedimentación, las condiciones hidráulicas de estos puntos del río que sirven como mecanismo de amortiguamiento de las descargas y fenómenos de dilución asociados a la descarga desde el humedal Córdoba y clubes en esta zona. En varios puntos, especialmente Calle 53 y Carrefour Avenida 68, los valores mínimos de concentración y de carga correspondieron a monitoreos realizados en la madrugada y los mayores fueron las reportadas en la mañana y en la tarde, lo cual está ligado a la intermitencia de los alivios que desembocan aguas arriba.

En general, las medianas de las concentraciones en los puntos de monitoreo fueron muy cercanas a las históricas, lo que indica que los valores 2009-2010 estuvieron dentro de los rangos históricos y que el comportamiento de los contaminantes en el tiempo es poco variable. Se debe mencionar que en algunos puntos del río se presentaron variaciones importantes en el tiempo, principalmente para las concentraciones de DBO, sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites y SAAM. Las cargas de materia orgánica y fósforo tendieron a disminuir en comparación con los datos históricos; mientras que las cargas de sólidos, nitrógeno, grasas y aceites y SAAM tendieron a aumentar. Es importante resaltar que el hecho de no encontrar altas concentraciones de metales pesados en la fase líquida del río Salitre

no es garantía de que dichos elementos no se encuentren precipitados en los sedimentos del cauce.

A partir del cálculo del wqi se observó que la calidad del agua en el tramo 1 del río Salitre es **buena**. En el tramo 2 se presentó una calidad **marginal**, en la cual los parámetros que mayor efecto tuvieron sobre la variación de la calidad fueron los SST y los coliformes fecales. Para el caso del tramo 3 ocurre un deterioro en la calidad del río, pues pasó a **pobre**; en este tramo todos los parámetros excedieron, al menos una vez los objetivos de calidad y con mayor frecuencia incumplieron SAAM, grasas y aceites y coliformes fecales. Finalmente, en el tramo 4 la calidad del río fue **pobre**. El efecto de las descargas desde la red de alcantarillado a lo largo del río refleja un aumento en los datos que exceden los objetivos, sobre todo si se tiene en cuenta que a partir del tercer tramo del río el wqi muestra una clasificación pobre.

### 6.3. Río Fucha

El comportamiento del caudal para el río Fucha presentó un incremento constante causado por las numerosas descargas vertidas a lo largo de su curso. El incremento más fuerte en el caudal del río se presentó entre el punto Av. Boyacá y Visión Colombia, donde se descargan cerca 4000 L/s de aguas residuales provenientes de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur.

Las concentraciones contaminantes en el río Fucha ascienden a medida que llega a su desembocadura. En el punto Carrera 7ª, las concentraciones de contaminantes aumentaron considerablemente, lo cual está relacionado con las primeras descargas de aguas residuales. A partir de Carrera 7ª se observó un incremento en las concentraciones de contaminantes hasta el punto Visión Colombia,

donde se presentaron altos incrementos de las concentraciones (materia orgánica, sólidos y nutrientes), debido a la descarga de los interceptores Fucha, Boyacá y del Sur, que se encuentran aguas arriba. En Av. Boyacá, la contaminación del río Fucha es crítica, porque aumentan las concentraciones de la mayoría de parámetros contaminantes, causada por las descargas a interceptores afluentes al río de industrias aledañas a este punto de monitoreo.

La presencia de bajas concentraciones de cianuro en el río, a partir del punto Av. Boyacá hasta Fucha Alameda, indica contaminación de origen industrial (tratamiento de superficies y química). El comportamiento de cianuro en el punto Visión Colombia es importante, ya que se detectó un rango de variabilidad mucho mayor que en los demás puntos de monitoreo. Ello indica actividad industrial, dada la presencia de metales como el cobre. A partir de punto Visión Colombia se apreció la afectación de descargas de aguas residuales industriales, evidenciado por las altas cantidades de cadmio, cromo total, níquel y plomo en el agua.

En general, las concentraciones se mantuvieron constantes en el tiempo o con una leve tendencia de disminución, exceptuando el punto Carrera 7ª, donde las concentraciones 2009-2010 (materia orgánica, sólidos, nutrientes, SAAM y coliformes) aumentaron respecto a los valores históricos, lo cual resalta la afectación de este punto en la actualidad. En todos los puntos de monitoreo del río Fucha, a excepción de El Delirio, las concentraciones de SAAM obtenidas para 2009-2010 exceden los máximos históricos. Las cargas contaminantes mostraron un comportamiento ascendente a lo largo del río, y a partir del tramo 2 se observó un incremento importante. En el tramo 4 la variabilidad de las cargas registradas para todo el período de monitoreo (2009-2010) fue

mayor que para los demás tramos, debido a las descargas previamente mencionadas.

En cuanto al WQI, en el tramo 1 del río Fucha la calidad del agua fue buena. El parámetro que tuvo menor cercanía a los objetivos de calidad fue el oxígeno disuelto, pero la mayoría de los datos estuvieron muy cerca, por lo que el WQI no se afectó de gran manera. En el tramo 2 la calidad de agua fue pobre; todos los parámetros fueron inferiores a los objetivos de calidad de este tramo, aunque los más críticos fueron el oxígeno disuelto, la materia orgánica, los coliformes fecales y los SST. En el tramo 3 la calidad de agua fue marginal, pues los parámetros que más lejanos estuvieron de los objetivos fueron el oxígeno disuelto, SAAM, DQO,  $N_{total}$ , coliformes fecales y grasas y aceites. En el tramo 4, la calidad fue pobre: todos los parámetros estuvieron alejados de los objetivos, siendo los más críticos SAAM y oxígeno disuelto (95% de los datos), seguidos por la DQO,  $N_{total}$  y coliformes fecales.

#### 6.4. Río Tunjuelo

La variabilidad de los caudales en el río Tunjuelo, especialmente en los primeros puntos de monitoreo, se debe a la apertura de las compuertas del embalse La Regadera por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Esta variación de caudal va disminuyendo aguas abajo. En San Benito y Makro Autosur se midieron caudales elevados, obtenidos en los meses en los cuales se presentó la apertura de las compuertas de La Regadera. Ello mostró que incluso en estos puntos del río se siente el efecto de la operación de la compuerta del embalse, aun teniendo el proceso de embalsamiento de aguas en la zona inundada.

En el punto Transversal 86 se apreció un incremento importante del caudal, el cual es debido a la descarga del interceptor Tunjuelo Medio y otros vertimientos. En Puente Independencia, el caudal del río permaneció relativamente constante respecto al punto de monitoreo anterior, pues el río no recibe ninguna descarga significativa. Finalmente, en Isla Pontón, el caudal del río aumenta por la descarga de la estación de bombeo de la EAAB (Gran Colombiano), la cual vierte las aguas residuales recolectadas después de la descarga del interceptor Tunjuelo Medio.

El río Tunjuelo mostró una dinámica en los perfiles de concentraciones muy diferente a los demás ríos: en la cuenca alta, las concentraciones de los contaminantes aumentaron hasta el punto de monitoreo de Doña Juana, punto donde se presentaron las mayores cantidades de SST, nitritos, nitratos, fósforo, bario, cadmio, níquel y plomo del río. Posteriormente, en Barrio México las concentraciones bajaron, debido al tránsito del río por las zonas inundadas, donde muy probablemente se dan procesos de sedimentación y oxidación de la materia orgánica. Sin embargo, las descargas de aguas residuales en la cuenca media y baja del río son tan significativas que afectan de manera notable la calidad. Es importante resaltar que los cambios más importantes de concentraciones sobre el río se dieron entre La Regadera y Universidad Antonio Nariño (UAN), UAN y Yomasa, Barrio México y San Benito, y Makro Autosur y Tv 86.

Las medianas de las concentraciones aumentaron en algunos parámetros más del doble de un punto al otro y evidenció que las descargas de Usme, quebrada Yomasa, quebrada Chiguaza e interceptor Tunjuelo Medio son las que impactan de manera más significativa la calidad del agua del río en términos de materia

orgánica, nutrientes, grasas y aceites, coliformes, cinc, cobre, cromo y plomo. Las mayores concentraciones de cianuros y fenoles se encontraron a partir del punto Makro Autosur hasta Puente Independencia. En términos de nutrientes y metales pesados, la descarga del relleno sanitario Doña Juana es la que más grado de afectación puntual genera sobre el río.

Las medianas 2009-2010, en la mayoría de los puntos, estuvieron dentro del rango histórico de concentraciones; sin embargo, se notó una tendencia de disminución de las concentraciones en la cuenca alta y media del río, desde La Regadera hasta San Benito. Por el contrario, en Makro Autosur, Tv 86 e Isla Pontón San José las medianas de las concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y SAAM y coliformes aumentaron en el tiempo. En la mayoría de parámetros se notó un comportamiento ascendente de las cargas contaminantes a lo largo del río Tunjuelo, a excepción de los SST, los cuales se presentaron en mayor cantidad en el tramo 2 como consecuencia de la actividad minera de la zona.

El WQI del tramo 1 del río Tunjuelo mostró que la calidad del agua fue **buena**. El parámetro que más veces excedió el objetivo de calidad fue SST, seguido de  $F_{\text{total}}$  y oxígeno disuelto. En los tramos 2, 3 y 4, la calidad del río se clasificó como **pobre**, pues se observó que todos los parámetros excedieron, al menos una vez, los objetivos de calidad. De ellos, oxígeno disuelto, pH,  $N_{\text{total}}$  y SAAM fueron los parámetros más críticos.

## 6.5. Conclusiones

En general, los resultados de esta campaña 2009-2010 mostraron que la calidad del agua de los ríos se ha mantenido relativamente constante o en la misma categoría respecto

a los resultados de la campaña 2008-2009. También se observó que en algunos tramos la calidad ha tendido a mejorar, como es el caso de los dos tramos del río Torca, o que se ha deteriorado, como es el caso del tramo 3 del río Salitre (tabla 6.1). Han sido más los kilómetros de río que han pasado a una categoría superior y que han mostrado una tendencia de mejora en la calidad del recurso hídrico.

TABLA 6.1. WQI

WQI 2008-2009				
Torca	71	63		
	K4+727	K13+844		
Salitre	88	46	47	36
	K0+920	K3+545	K9+171	K17+746
Fucha	88	35	58	42
	K4+365	K11+578	K14+435	K18+638
Tunjuelo	82	34	35	35
	K6+794	K20+266	K29+551	K41+294
WQI 2009-2010				
Torca	82	65		
	K4+727	K13+844		
Salitre	88	45	37	38
	K0+920	K3+545	K9+171	K17+746
Fucha	88	31	46	35
	K4+365	K11+578	K14+435	K18+638
Tunjuelo	82	33	34	41
	K6+794	K20+266	K29+551	K41+294



## 7. INTRODUCCIÓN A LA RECUPERACIÓN DE RÍOS

### 7.1. Introducción

A través de la historia, los ríos han ocupado un importante papel en el desarrollo de las sociedades, porque son símbolo de fertilidad. La localización de las grandes culturas de la antigüedad no es arbitraria, sino que se guía por la cercanía a sus ríos y, por ende, a la facilidad de acceso a los servicios que éstos ofrecen. Por ejemplo, los ríos Tigris y Éufrates permitieron el desarrollo económico de Mesopotamia, por medio de la agricultura, la pesca, la ganadería y el transporte fluvial para comercializar sus productos; así mismo, el río Nilo, que, sin duda, fue el gran inspirador de concepciones religiosas, por los contrastes del paisaje de su cuenca (Arroyo de la Fuente, 2002).

Parte de los usos que el hombre les ha dado a los ríos a través de la historia implica que el desarrollo de los procesos naturales del río se vean limitados (Patt, 2007). Los ríos han sido modificados para diversos propósitos. En Europa, la manipulación de los ríos comenzó, al menos, hace seis mil años, inicialmente para la protección de inundaciones. En Estados Unidos, la revolución industrial a finales del siglo XIX permitió el incremento de fuertes proyectos en ingeniería, incluida la construcción de presas y diques. Actualmente, algunos países

en desarrollo han empezado a manipular los ríos, mediante grandes proyectos como en el caso de The Three Gorges Dam, en el río Yangtze, en China (Laub y Palmer, 2009).

El crecimiento técnico y económico de los países, junto con el proceso de urbanización, representa actualmente una amenaza para los ecosistemas de los ríos (Paul y Meyer, 2001). Algunas de las áreas urbanas los han sellado con concreto o reciben descargas domésticas e incluso industriales, lo que trae como consecuencia la pérdida de los ecosistemas presentes y la interrupción de procesos hidromorfológicos (Binder, 2008), como es el caso en Estados Unidos, donde más de 130 000 km de quebradas y ríos están afectados por la urbanización, o en Europa, donde se han tenido efectos devastadores similares sobre la calidad de los ríos, o en varios tramos de los cuatro principales ríos de Bogotá.

Apenas después de la Segunda Guerra Mundial hubo avances en cuanto al tratamiento de aguas residuales para el mejoramiento de la calidad del agua. El éxito de estas técnicas fue la base para proyectos de restauración y, por lo tanto, fue una condición para el descubrimiento de los ríos urbanos como lugares para la recreación. Así, desde principios de la década de los ochenta, se ha expandido el

conocimiento sobre la morfología y ecología de los ríos, lo cual ha despertado el interés del público por ríos más naturales (Binder, 2008).

Actualmente se tiene una amplia visión sobre la recuperación de los ríos urbanos; por ello se han registrado muchos proyectos de esta naturaleza alrededor del mundo con un solo objetivo en común: mejorar la integridad de los ríos para optimizar la calidad de vida de los habitantes. En el contexto colombiano, el uso de los ríos urbanos se ha limitado al drenaje de los desechos de la urbanización, situación que se ve claramente reflejada en los ríos de la ciudad más grande del país. A pesar de la degradación generalizada de los ríos urbanos de la capital, el río Tunjuelo merece especial atención, debido a la variedad de factores que causan su eminente degeneración: variaciones abruptas del caudal por su regulación aguas arriba, descargas de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana, desviaciones de su cauce como consecuencia de las actividades de explotación de materiales en su lecho, inundaciones en la zona de canteras, descargas industriales de las curtiembres, frigoríficos, entre otros. Hoy en día es el único cuerpo de agua urbano que se encuentra en su cauce natural, a diferencia de los demás ríos urbanos de la ciudad, que se encuentran canalizados en su mayor parte. Y esta característica es un aliciente para su recuperación.

Por lo anterior, el objetivo principal de este capítulo es delinear una estrategia a mediano y largo plazo para la restauración del río Tunjuelo. Dicha estrategia contemplará la identificación y la valoración de los bienes y servicios que ofrece un ecosistema tan complejo como lo es la cuenca del río Tunjuelo. A partir de la comprensión de la historia y cronología de este río, se podrá identificar la importancia que ha tenido este cuerpo de agua para el desarrollo

de la ciudad de Bogotá y su transformación. La valoración económica es una herramienta importante para interpretar las necesidades de la ciudad en torno a los beneficios que obtiene de este río y será un elemento relevante dentro de los lineamientos del plan de restauración del Tunjuelo.

Este capítulo está dividido en tres partes. La primera sección incluye una síntesis histórica y evolución de la cuenca del río Tunjuelo como parte del proceso de desarrollo de la ciudad de Bogotá. Para el desarrollo de esta cronología se tuvo en cuenta la investigación realizada por Osorio (2007), en la que se describen los antecedentes históricos y se presenta una visión de la sociedad como parte de los procesos de cambio que se llevan a cabo en la naturaleza. Así mismo, se incluye una breve descripción del río Tunjuelo y sus características principales.

En la segunda parte se presentan los servicios de los ecosistemas que conforman el río Tunjuelo, con el objeto de allanar el camino hacia un ejercicio de valoración económica de los bienes y servicios prestados por este cuerpo de agua. A partir de las funciones básicas de los ecosistemas, será posible identificar los servicios que presta y las metodologías de valoración que se pueden utilizar en cada caso, de acuerdo con los valores de uso directo, indirecto y de opción. Lo anterior servirá como una herramienta de asignación de valor que le permite al evaluador identificar y asignar los tipos de costos asociados a la pérdida de estos beneficios y su necesidad de recuperarlos.

En la tercera parte se describen los conceptos básicos de restauración, mediante una revisión bibliográfica en la que se mencionan los diferentes factores que causan la degradación de los ríos. Además, se muestran las bases teóricas para una adecuada planeación,

implementación y monitoreo del proyecto de restauración, donde se mencionan experiencias de este tipo de proyectos en otros países. Finalmente, se desarrollan las etapas de planeación aplicadas al río Tunjuelo, en las que se definen los objetivos y las líneas de acción para su restauración.

## 7.2. Historia y cronología

El río Tunjuelo ha tenido una relación muy importante con la ciudad de Bogotá. A principios del siglo xx este río se consideró la solución al problema de abastecimiento de agua potable y zona agrícola para el beneficio de la ciudad. También era considerado un lugar agradable con cierto atractivo turístico, en el que la clase alta de Bogotá organizaba cabalgatas o paseos en esas tierras. La pesca del pez capitán se realizaba en la cuenca alta de este río. En sus humedales habitaba una gran variedad de especies y era, además, un lugar de descanso de aves migratorias que iban al piedemonte o las selvas colombianas. El río era navegable entre La Picota y Soacha, donde desemboca en el río Bogotá y contaba con algunos puertos —de los cuales el más conocido fue el que quedaba cerca de la desembocadura de la quebrada de Chiguaza— (Zambrano, 2004). Sin embargo, a medida que la ciudad tenía un mayor contacto con el río, sus características fueron cambiando hasta transformarse en el receptor de agua residual industrial y doméstica de los importantes asentamientos humanos e industrias presentes a lo largo y ancho de la cuenca, en las riberas y en las zonas de humedales del Tunjuelo.

Durante la época colonial, era considerado una zona marginal, debido a su lejanía de la ciudad de Bogotá. Sus primeros pobladores quizá fueron los muiscas. A finales del siglo xix,

los problemas de abastecimiento de agua para Bogotá eran latentes. Los ríos Arzobispo y San Francisco eran las fuentes principales de abastecimiento de agua y se encontraban degradados, contaminados, aparte de que representaban una amenaza a la salud de los bogotanos, pues las muertes y epidemias estaban asociadas con la mala calidad del agua.

Con más de 600 muertes al año, debido a los problemas de salud pública por la contaminación de las fuentes de agua que alimentaban a la ciudad en el siglo xix, era necesario buscar soluciones a esta situación (Carreira, 2007). Por otra parte, las necesidades alimentarias de la ciudad llevaron a la expropiación de la hacienda El Hato para convertirla en la principal productora de papa de la capital, con una producción de 22 000 cargas al año, en el 55% del área total de la estancia (12 550 ha). Ello implicó la destrucción sistemática del 40% de la cobertura vegetal (Guhl, 1981).

En 1906, el gobierno nacional, mediante el decreto 431, otorgó a la Alcaldía de Bogotá jurisdicción sobre los ríos que solucionarían los problemas de abastecimiento de agua (Comisión Municipal de Aguas, 1932), entre los que se encontraba el río Tunjuelo (Osorio, 2007). Así es como la primera obra de intervención del cauce consistió en aprovechar el recurso hídrico mediante la construcción del embalse de La Regadera, que proveía el recurso hídrico a Vitelma, la primera planta de agua potable de la ciudad, localizada en el barrio San Cristóbal y construida en 1938.

Este sistema, Regadera-Vitelma, tenía una capacidad de almacenamiento de aproximadamente cuatro millones de metros cúbicos y provisión de un metro cúbico por segundo. Las intensas sequías que se presentaron en el período 1939-1940, relacionadas con el fenómeno de El Niño, implicaron el colapso de

este sistema. Ello llevó a la construcción del embalse de Chisacá, en 1947, con un almacenamiento similar al de La Regadera, para prevenir eventos similares a los que se presentaron en ese año (Osorio, 2007). El cambio en las condiciones hídricas y la situación climática que se presentó en esa época incrementaron los períodos de secamiento de los humedales y lagunas. Ello permitió el uso de estas áreas y de las riberas del río para la extracción minera y urbanización (Zambrano, 2004).

El crecimiento acelerado de la ciudad, a mediados del siglo xx, como consecuencia del desplazamiento forzado a raíz de los conflictos que se presentaban en el país y la gran disponibilidad de agua, abrieron paso a la ocupación ilícita y desorganizada de las zonas de humedales y riberas en la cuenca media. Estas ocupaciones estuvieron apoyadas en razones económicas y sociales, ya que sus pobladores pertenecían a estratos sociales carentes, y la extensa área prometía una oportunidad de vivienda (Osorio, 2008). Así mismo, el secamiento de estas áreas favoreció la explotación de materiales de construcción, gravilla, gredas y arena, cuya demanda se había incrementado por el crecimiento acelerado de Bogotá desde los años treinta (Zambrano, 2004).

La mecanización de la actividad minera a finales de la década de los sesenta, que inició como un oficio artesanal a cargo de los dueños de las haciendas a finales de los años cuarenta, incrementó el número de empresas dedicadas a esta labor, a tal punto que en Plan de Ordenamiento Territorial del 2002 se reconoce como el Parque Minero Industrial de Tunjuelo. La Fiscala y Yomasa fueron las primeras empresas que iniciaron la extracción de gravilla (Zambrano, 2004).

Lo anterior provocó, por un lado, alteraciones a la cuenca media del río por efectos

de erosión de los suelos, la acumulación de desechos sólidos y la disminución de la capacidad de amortiguación de posibles crecientes en el río; por el otro, inundaciones en los asentamientos humanos en épocas de lluvia, de las cuales el desbordamiento de 1959 fue la primera en afectar a la población ubicada en esa zona (Osorio, 2008). Así, las frecuentes inundaciones que se presentaron a partir de ese año obligaron a la ciudad a buscar soluciones que previnieran el desbordamiento del río Tunjuelo. Para esto se adelantaron obras de levantamiento de terrenos y de construcción de jarillones, que resultaron ser ineficientes, pues la remoción de la cobertura vegetal para el desarrollo de estas obras favoreció el aumento de la escorrentía y de las inundaciones (Osorio, 2008). Otra alternativa que se materializó en el 2007 fue la construcción de la presa seca Cantarrana, ya que su capacidad de amortiguamiento de crecientes prometía ser la opción más adecuada para controlar estos eventos influenciados en su mayoría por las épocas de lluvia (Perea, 1984).<sup>1</sup>

La ejecución del plan maestro de alcantarillado, en 1962, impactó aún más la calidad del río Tunjuelo, al concebirlo como el receptor del agua residual urbana del sistema de alcantarillado del sur de la ciudad. Los efectos de este planteamiento fueron más evidentes en la década de los ochenta, cuando se llevaron a cabo los primeros estudios de calidad del agua. El más importante corresponde al estudio de la cuenca baja realizado por Mazarra y Mazarra (1982), en el que se reporta la presencia de 213 industrias en la cuenca media del río y

1 Este es probablemente el único estudio que se ha realizado en torno al potencial energético que tiene el río Tunjuelo, ya que entre la bibliografía revisada no se reportan más documentos relacionados con este tema.

la predominancia del sector de curtiembres con 180 empresas. Entre las conclusiones de este estudio se evidencia el deterioro de este cuerpo de agua y su relación con las actividades antrópicas:

El río Tunjuelito se ha convertido en un canal receptor de aguas negras y lluvias [...] la presencia de residuos líquidos de las curtiembres están haciendo que todos los elementos químicos superen los niveles permisibles de la OMS para aguas de un mínimo contacto humano [...] los resultados de los análisis de las muestras de agua del Tunjuelito en cuanto a DBO, son críticos, no hay manifestación de vida acuática [...] el espacio ribereño está ocupado por habitantes de diferentes estratos socioeconómicos [...] presenta sedimentación, inundaciones, drenaje deficiente, consecuencia de las actividades antropogénicas que deterioran el medio físico (Mazarra y Mazarra, 1982, p. 75).

Adicionalmente, el proceso de urbanización y asentamientos ilegales fue alimentado por la reubicación de los damnificados de los barrios Bosa y Patio Bonito, por efectos de las inundaciones que se presentaron en 1972. La creación del barrio Ciudad Bolívar y los barrios en las subcuencas del Tunjuelo, así como el crecimiento de la industria, aumentaron los problemas ambientales en el río, la contaminación de las quebradas que vierten al río, la frecuencia de las inundaciones por la erosión del suelo y el incremento de la escorrentía, principalmente. Para 1990, el área de ocupación urbana abarcaba aproximadamente el 12% del área total de drenaje de la cuenca (Osorio, 2007).

Los desbordamientos del río Tunjuelo continuaron presentándose en épocas de lluvia; pero el evento del 2002 fue el más crítico (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] y Alcaldía de Bogotá, 2007), pues inundó las canteras de extracción de materiales para construcción ubicadas en la cuenca media y baja, que funcionan como amortiguadores de caudal y de retención de otros compuestos. Así mismo, los barrios de la zona fueron afectados, especialmente el barrio Tunjuelito, donde la lámina de agua alcanzó 2,5 metros de altura y un área de inundación de quince hectáreas aproximadamente (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias [Fopae], 2010); sin embargo con la construcción de Cantarrana, en el 2005, estos eventos han sido regulados. Hacia 1988, el relleno sanitario Doña Juana inició su operación en la cuenca media cercana al barrio Mochuelo, lo cual representó otro uso del Tunjuelo, esta vez como el receptor de los lixiviados tratados y no tratados procedentes de esta zona de disposición.

Como respuesta a los problemas de contaminación del río a comienzos del siglo XX, inició la construcción del interceptor Tunjuelo Medio, obra que buscaba aliviar los vertimientos de los barrios ubicados desde la quebrada Chiguaza hasta Bosa. Este interceptor puede considerarse una alternativa parcial a la contaminación en el río y una estrategia de los gobernantes de la ciudad para "incluir esta zona dentro de los proyectos de desarrollo urbano y desmarginar gran parte de los asentamientos ubicados en las riberas del río Tunjuelo" (Osorio, 2007, p. 89).

Es evidente la importancia que ha tenido, tiene y probablemente tendrá el río Tunjuelo para la ciudad. Si bien en un principio el uso de sus recursos hídricos incrementó tanto la disponibilidad de agua como la expectativa de

vida de los bogotanos y fue el escenario ideal para las actividades de esparcimiento y recreación hasta mediados del siglo xx, la regulación no racional del caudal, la degradación de sus suelos, la contaminación del cuerpo de agua y la alteración de sus ecosistemas naturales como resultado del desarrollo de esta metrópoli han limitado notablemente sus características de calidad. En la actualidad la degradación del río está dada principalmente por la descarga de lixiviados (Secretaría Distrital de Ambiente [SDA] y Uniandes, 2010) y la descarga de emisarios y estaciones bombeo que componen la red de alcantarillado del sector, que transportan contaminantes entregados en diferentes puntos al cuerpo de agua, la urbanización de su ribera y la modificación de su cauce por las actividades mineras que se desarrollan en el río (HMV Ingenieros, 2005). Esto tiene como consecuencia la alteración de las funciones del ecosistema y su impacto en el hombre.

Otros aspectos que han afectado notablemente la cuenca y el cuerpo de agua del río, que limitan la disponibilidad del ecosistema para proveer a corto, mediano y largo plazo los servicios que presta y que son necesarios para la sociedad están asociados con las obras de infraestructura desarrolladas en la cuenca del río, con los asentamientos en las áreas de inundación y rondas de los ríos, con las modificaciones en el cauce como consecuencia de la actividad minera y con la regulación del caudal en el embalse La Regadera:

El río Tunjuelo hizo de puente entre los ecosistemas de páramo y de sabana, y la vegetación ribereña tuvo como una de sus funciones ser un corredor de movilidad biológica. Cortar este camino significó interrumpir ciclos biológicos, la movilidad de especies animales

y vegetales, y el intercambio genético, entre otras consecuencias ambientales (Osorio, 2007, p. 65).

El río Tunjuelo nace en el páramo de Sumapaz, por encima de los 3700 metros sobre el nivel del mar (msnm), y está conformado por tres cauces principales que fluyen en dirección sur-norte: río Chisacá y río Mugroso, los cuales confluyen en el embalse del Chisacá. Después de éste continúa el río Chisacá para unirse con el Curubital, a la entrada del embalse de La Regadera, a partir del cual emerge el río Tunjuelo, con caudales medios de 2,9 m<sup>3</sup>/s (Secretaría de Planeación de Cundinamarca, 2000). Tiene una longitud de 73 km y atraviesa la ciudad de Bogotá en sentido sur-norte hasta Usme, y luego se dirige hacia el occidente, para desembocar en el río Bogotá por debajo de la cota de 2550 msnm (Corporación Autónoma Regional [CAR], 2010).

Su cuenca hidrográfica, de tercer orden, abarca una extensión de 41 534,6 ha. La precipitación varía entre 600 y 800 mm en la parte alta, de 500 a 600 mm en la zona media y de 400 a 500 mm en la cuenca baja (CAR, 2010). La escorrentía media es de aproximadamente 389 mm y el coeficiente de escorrentía es del 36% (Secretaría de Planeación de Cundinamarca, 2000). El río atraviesa las localidades de Sumapaz, Usme, San Cristóbal, Ciudad Bolívar, Tunjelito, Rafael Uribe Uribe, Kennedy, Bosa y Soacha. Según el Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca (POMCA-2010), ésta se divide en tres partes (CAR, 2010):

- Cuenca alta. Está conformada por la región del páramo de Sumapaz, donde se encuentran los ríos Chisacá, Mugroso, Curubital y los embalses de Chisacá y La Regadera, con una pendiente pronun-

ciada que oscila entre el 3% y el 15%, típica de los ríos de montaña (HMV Ingenieros, 2005).

- Cuenca media. Va desde el embalse de La Regadera hasta el embalse seco de Cantarrana, cercano a la quebrada Yomasa, con una pendiente del 3%, que garantiza un buen drenaje. Tiene una extensión de 10 865 ha y está conformado por diversas quebradas: por la margen izquierda se encuentran las quebradas Pasquilla, Paso Colorado y La Horqueta, y por la margen derecha, las quebradas Fucha y Yomasa, las cuales se encuentran moderadamente intervenidas (CAR, 2010).
- Cuenca baja. A partir del embalse seco de Cantarrana hasta la confluencia con el río Bogotá, se encuentra caracterizada por pendientes del orden del 0,05% de drenaje deficiente y altamente urbanizado (HMV Ingenieros, 2005).

La cuenca del río Tunjuelo hace parte integral de la gran cuenca del río Bogotá, localizada al suroriente del Distrito Capital y el municipio de Soacha. Es una cuenca con veinte subcuencas como afluentes que hacen parte de un sistema de drenaje de gran importancia para la capital, puesto que abastece de agua a sus habitantes en épocas de sequía (CAR, 2010).

### 7.3. Servicios de los ecosistemas y valoración económica

La naturaleza genera bienestar, resultado de las funciones de los ecosistemas. Éstas se definen como “los componentes y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que lo constituyen generan bienes

y servicios al ser humano de manera directa o indirecta” (Constanza y Farber, 2002, citado en de Groot, Wilson y Boumans, 2002, p. 394; Daily, 1997). Los bienes y servicios fueron la primera aproximación de las ciencias económicas para entender la importancia de la naturaleza para el ser humano; sin embargo, tal idea se ha reconceptualizado desde la ciencia de la sostenibilidad como los servicios de los ecosistemas en los cuales se incluyen todos aquellos beneficios que, aun cuando no tienen un precio asociado definido, inciden de manera directa o indirecta en las diferentes componentes del bienestar humano (Gómez-Baggethun y de Groot, 2007).

Por otra parte, es posible entender los servicios de los ecosistemas como aquellos atributos de las funciones ecológicas valiosos o importantes para los seres humanos, dependiendo de sus necesidades y preferencias (Hawkins, 2003). Desde el punto de vista del capital natural, los ecosistemas se consideran la fuente de todos los materiales y energía, procesados a lo largo del sistema productivo hasta su transformación en bienes o servicios de consumo.

Además, es el sumidero al que van a parar todos los residuos derivados del desarrollo socioeconómico, tanto en sus fases productivas como consuntivas (Gómez-Baggethun y de Groot, 2007). También puede entenderse como una conexión entre la ecología y la economía, al referirse a la capacidad ecológica de sustentar la actividad económica; es una herramienta conceptual clave para poder entender el papel que desempeñan los ecosistemas como sustento de las economías (Gómez-Baggethun y de Groot, 2007), y sus valores de uso definen los tipos de metodologías que se pueden aplicar para determinar su relevancia en la economía.

### 7.3.1. Servicios de los ecosistemas

Existen cuatro grupos principales en los que se clasifican los procesos y componentes de los ecosistemas, entendidos como las funciones de regulación, hábitat, producción y de información (de Groot, Wilson y Boumans, 2002). La función de sustrato mencionada en el estudio de Gómez-Baggethun y de Groot (2007) también hace parte de los servicios de los ecosistemas, y corresponden a aquellas que pueden usarse de una forma sostenible, es decir, que permitan mantener las funciones de los ecosistemas, sus procesos y estructuras asociadas.

Las funciones de regulación se definen como la capacidad de los ecosistemas naturales y seminaturales de mantener la estabilidad y el dinamismo de los ecosistemas y los sistemas de soporte vital, mediante los ciclos biogeoquímicos y las interacciones bióticas y abióticas que son importantes para los organismos vivos, porque mantienen la salud de la atmósfera y proveen servicios que benefician a los seres humanos de manera directa o indirecta; además, contribuyen a la formación del suelo y lo protegen de la erosión y son responsables de la formación del oxígeno atmosférico y de la regulación del clima (Hawkins, 2003; de Groot, Wilson y Boumans, 2002; Daily, 1997).

Así mismo, los ecosistemas naturales proporcionan hábitat para el refugio y reproducción de plantas y animales silvestres, porque mantienen la diversidad biológica y genética in situ junto con los procesos evolutivos (de Groot, Wilson y Boumans, 2002). Las funciones de producción están ligadas a los procesos que involucran las sustancias orgánicas e inorgánicas, mediante la producción primaria y secundaria de bienes que pueden ser utilizados por los seres humanos (Hawkins, 2003). Los procesos de fotosíntesis y la captura de nutrientes son realizados por los organismos autótrofos que transforman la energía, el dióxido de carbono, el agua y los nutrientes en carbohidratos que, a su vez, son transformados en biomasa por los organismos secundarios.

Estos compuestos se traducen en bienes de consumo desde alimento, materias primas hasta fuentes de energía y recursos genéticos (de Groot, Wilson y Boumans, 2002). Por otra parte, las funciones de información se refieren a las características de los ecosistemas que brindan al ser humano la posibilidad de reflexión, recreación, inspiración y contribuyan a la salud mental y espiritual del ser humano (Hawkins, 2003; de Groot, Wilson y Boumans, 2002). En la tabla 7.1 se presenta un listado de estas funciones.

TABLA 7.1. Funciones, bienes y servicios de los ecosistemas naturales y seminaturales

Función	Componentes y procesos de los ecosistemas	Ejemplos de servicios ecosistémicos
Funciones de regulación		
Regulación atmosférica	Mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos (equilibrio $\text{CO}_2/\text{O}_2$ , capa de ozono, etc.)	Protección de ozono frente a los rayos UVA y prevención de enfermedades asociadas con la piel
		Mantenimiento de la calidad del aire
		Secuestro de $\text{CO}_2$
		Influencia en el clima
Regulación climática	Influencia sobre el clima ejercida por coberturas de suelo y procesos biológicos (p. ej.: producción de dimetilsulfato)	Mantenimiento de un clima adecuado (temperatura, precipitación) para la salud, la agricultura, etc.
Amortiguación de perturbaciones	Influencia de las estructuras ecológicas en la amortiguación de perturbaciones naturales	Protección frente a tormentas o inundaciones (p. ej.: bosques y humedales)
Regulación hídrica	El papel de la cobertura vegetal en la regulación de la escorrentía que descarga al río	Recarga de acuíferos (aguas subterráneas y regulación freática)
Disponibilidad hídrica	Percolación, filtrado y retención de agua dulce (p. ej.: acuíferos)	Disponibilidad de agua para usos consuntivos (bebida, riego e industria)
Sujeción del suelo	Papel de las raíces de la vegetación y fauna edáfica en la retención del suelo	Mantenimiento de zonas arables
		Prevención de la erosión
		Control de balance sedimentario
Formación del suelo	Meteorización de la roca madre y acumulación de materia orgánica	Mantenimiento de la productividad de los cultivos
		Mantenimiento de la productividad natural de los suelos
Regulación de nutrientes	Papel de la biodiversidad en el almacenamiento y reciclado de nutrientes (p. ej.: N, P y S)	Mantenimiento de la salud del suelo y de los ecosistemas productivos
Tratamiento de residuos	Papel de la vegetación y la fauna en la eliminación y tratamiento de nutrientes y contaminantes orgánicos	Dilución de aguas residuales
		Filtrado de aerosoles (calidad del aire)
		Atenuación de contaminación acústica
		Purificación natural del agua
Polinización	Papel de la fauna en la dispersión de gametos florales	Polinización de especies silvestres
		Polinización de cultivos y plantaciones
Control biológico	Control de poblaciones mediante relaciones tróficas dinámicas	Control de pestes, plagas y enfermedades
		Reducción de la herbivoría (control de daños a cultivos)

Continúa

Función	Componentes y procesos de los ecosistemas	Ejemplos de servicios ecosistémicos
Funciones de hábitat		
Función de refugio	Provisión de espacios habitables a la fauna y flora silvestre	Mantenimiento de la biodiversidad (y, por tanto, de la base de la mayor parte de las funciones restantes)
		Mantenimiento de especies de explotación comercial
Criadero	Hábitat adecuado para la reproducción	Mantenimiento de especies de explotación comercial
Funciones de producción		
Alimento	Conversión de energía solar en animales y plantas comestibles	Caza, recolección y pesca
		Acuicultura y agricultura de subsistencia y pequeña escala
Materias primas	Conversión de energía solar en biomasa para construcción y otros usos	Materiales para construcciones y manufacturas
		Combustibles y energía
		Forraje y fertilizantes naturales
Recursos genéticos	Material genético y evolución en animales y plantas silvestres	Mejora de los cultivos frente a pestes y agentes patógenos
		Otras aplicaciones (p. ej.: salud)
Recursos medicinales	Sustancias biogeoquímicas	Medicinas y otras drogas
		Modelo y herramientas químicas
Elementos decorativos	Especies y ecosistemas con usos decorativos potenciales	Materiales para artesanía, joyería, adoración, decoración, pieles, etc.
Funciones de información		
Información estética	Oportunidades para desarrollo cognitivo, características estéticas de los paisajes	Disfrute paisajístico
Función recreativa	Variedad de paisajes con uso recreativo potencial	Ecoturismo (natación y paseos en bote)
Información artística y cultural	Variedad de características con valor artístico	Expresión de la naturaleza en libros, películas, cuadros, folclore y arquitectura
Información histórica	Variedad de características naturales con valor histórico y espiritual	Uso de la naturaleza con fines históricos o culturales (herencia cultural y memoria acumulada en los ecosistemas)
Ciencia y educación	Variedad de características naturales con valor científico y educativo	Naturaleza como lugar para la educación ambiental
		Usos con fines científicos

Continúa

Función	Componentes y procesos de los ecosistemas	Ejemplos de servicios ecosistémicos
Funciones de sustrato		
Vivienda	Provisión de un sustrato adecuado para el desarrollo de actividades e infraestructuras humanas	Protección de ozono frente a los rayos UVA y prevención de enfermedades asociadas con la piel
Agricultura		Comida y materias primas provenientes de agricultura y acuicultura
Conversión energética		Energías renovables (hidráulica)
Minería		Minerales, petróleo, metales preciosos
Vertedero	Dependiendo del uso específico del suelo, se requerirán distintas cualidades ambientales (p. ej.: estabilidad del suelo, fertilidad, clima, etc.)	Vertedero de residuos sólidos
Transporte		Transporte por agua y tierra
Facilidades turísticas		Actividades turísticas (turismo de playa, deportes al aire libre, etc.)

Fuente: Gómez-Baggethun y de Groot (2007)

La provisión de los servicios de los ecosistemas estará determinada por las relaciones entre los diferentes procesos y componentes de los ecosistemas. Así mismo, las funciones de regulación y de hábitat son las más importantes, ya que a partir de ellas las demás funciones se desarrollan. Por otra parte, la identificación de los servicios dependerá en mayor medida de la disponibilidad de información enfocada en conocer las características del ecosistema y el estado en el que éste se encuentra, de manera tal que sea posible identificar su capacidad de mantener el flujo de determinadas funciones (Water Science and Technology Board [WSTC], 2004).

De acuerdo con de Groot et ál. (2010), es necesario establecer indicadores de estado y de rendimiento que permitan describir la interacción entre los procesos ecológicos y los componentes del ecosistema y sus servicios. El primero determina cuáles procesos o componentes presta el ecosistema y en qué cantidad. El segundo define la proporción en la que un servicio puede usarse de manera sostenible.

Para esto es necesario tener una descripción detallada del ecosistema teniendo en cuenta sus recursos naturales y el estado en el que se encuentran. Para el caso del río Tunjuelo, la descripción de los diferentes ecosistemas presentes, por medio del plan de manejo y ordenamiento territorial de la cuenca, brinda al evaluador principalmente la caracterización físico-biótica (hidrología, geología, descripción de la vegetación, fauna y biodiversidad, entre otras), socioeconómica y la descripción de los ecosistemas (CAR, 2010). Dicha información es útil para definir los servicios ambientales más relevantes que presta y que deberían ser evaluados.

### 7.3.2. Valoración económica

La valoración económica de los servicios de los ecosistemas debe entenderse como una herramienta pragmática que pretende considerar la naturaleza y los costos asociados a su degradación dentro de la toma de decisiones (Gómez-Baggethun y de Groot, 2007). Existen

dos aproximaciones para su valoración: desde la teoría de mercado, donde los valores de los ecosistemas son incorporados en la contabilidad económica como *externalidades* para aquellos que requieren un mercado hipotético, y desde la percepción sociocultural y la deliberación grupal, que permiten orientar la toma de decisiones de acuerdo con el orden de las preferencias luego de un proceso de deliberación, ya sea grupal o individual (Gómez-Baggethun y de Groot, 2007).

De acuerdo con esto, la asignación de valores a los servicios de los ecosistemas está determinada por su valor de uso y de no uso. Los primeros corresponden a los beneficios que las personas obtienen de un producto adquirido en el presente y futuro; mientras que los valores de no uso son aquellos a los cuales las personas pueden asignar un valor monetario a los recursos naturales, independiente que estos se estén utilizando en el presente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT] y Universidad de los Andes, 2010)

Existen diversas metodologías de valoración con las cuales determinar el costo de los servicios que prestan los ecosistemas a partir de los tipos de uso mencionados. Las más utilizadas para este propósito están relacionadas

con las valoraciones directas e indirectas del mercado, la valoración contingente y la deliberación grupal (Hawkins, 2003). La tabla 7.2 resume los métodos más comunes de valoración económica que se pueden utilizar según las funciones ecológicas propuestas por de Groot, Wilson y Boumans (2002). Es importante señalar que la selección de un método adecuado dependerá del tipo de servicio que se va a evaluar y de los objetivos del estudio (Hawkins, 2003). En general, las metodologías más utilizadas para cuantificar las funciones de producción corresponden al costo prevenido y al valor de reposición, que en últimas se refieren a los valores de uso indirecto, y su afectación o ausencia implicaría para la sociedad incurrir en costos para su sustitución. Las funciones de hábitat se relacionan con los mercados directos, que pueden tener un valor, sea por su conservación o su compra. De igual manera, las funciones de producción también tienen mercados directos y factores de ingreso, ya que se obtienen bienes que pueden ser mercadeables. Por otra parte, la valoración contingente, los precios hedónicos y los precios de mercado son los más utilizados en las funciones de información (Hawkins, 2003).

TABLA 7.2. Los métodos de valoración y su relación con las funciones de los ecosistemas

Función	Valor	Métodos de valoración
Funciones de regulación		
Regulación atmosférica	Uso indirecto	Costoefectividad, costo prevenido, valor de reposición
Regulación climática	Uso indirecto	Costoefectividad, costo prevenido, valor de reposición
Amortiguación de perturbaciones	Uso indirecto	Costo prevenido, valoración contingente
Regulación hídrica	Uso indirecto	Costo prevenido, factor de ingreso, mercado directo
Disponibilidad hídrica	Uso indirecto	Mercado directo, valor de reposición, valoración contingente, factor de ingreso
Sujeción del suelo	Uso indirecto	Costo prevenido, valor de reposición
Formación del suelo	Uso indirecto	Costo prevenido, valor de reposición, valoración contingente
Regulación de nutrientes	Uso indirecto	Costo prevenido, valor de reposición, valoración contingente, deliberación grupal
Tratamiento de residuos	Uso indirecto	Valor de reposición, valoración contingente, costo prevenido
Polinización	Uso indirecto	Valor de reposición, valoración indirecta, mercado directo
Control biológico	Uso indirecto	Valor de reposición, factor de ingreso, mercado directo, costo prevenido, valoración contingente
Funciones de hábitat		
Función de refugio	Uso directo, valor de existencia	Mercado directo, valoración contingente, precios hedónicos
Criadero	Uso indirecto	Mercado directo, valor de reposición, precios hedónicos, valoración contingente
Funciones de producción		
Alimento	Valores de uso directo, valores de opción	Mercado directo, factor de ingreso, valoración contingente, valor de reposición
Materias primas	Valores de uso directo, valores de opción	Mercado directo, factor de ingreso, valoración contingente, valor de reposición
Recursos genéticos	Valores de uso directo, valores de opción	Mercado directo, factor de ingreso, valoración contingente, valor de reposición
Recursos medicinales	Valores de uso directo, valores de opción	Mercado directo, factor de ingreso, valor de reposición
Elementos decorativos	Valores de uso directo	Mercado directo, factor de ingreso, valor de reposición

Continúa

Función	Valor	Métodos de valoración
Funciones de información		
Información estética	Valores de no uso, valores de existencia	Precios hedónicos, costo de viaje, valoración contingente, valor de reposición
Función recreativa	Valores de no uso, valores de existencia	Mercado directo, valoración contingente, precios hedónicos, factor de ingreso, costo de viaje
Información artística y cultural	Valores de no uso	Valoración contingente, mercado directo, precios hedónicos, costo de viaje, deliberación grupal
Información histórica	Valores de no uso, valores de existencia	Valoración contingente, precios hedónicos
Ciencia y educación	Valores de no uso	Mercado directo, valoración contingente, deliberación grupal

Fuente: Adaptado de Hawkins (2003)

La valoración económica deberá tener en cuenta la resiliencia de los ecosistemas, que se define como la capacidad de reponerse ante las perturbaciones que enfrenta (MAVDT y Universidad de los Andes, 2010), de tal manera que el uso de los servicios que éste provee se utilicen de manera sostenible.

#### 7.4. Servicios que presta el río Tunjuelo y su aproximación a la valoración económica

Desde el punto de vista de un ecosistema, el río Tunjuelo tiene la capacidad de proveer bienes y servicios provechosos para el ser humano. Éstos se obtienen mediante los procesos que se desarrollan en el río y de las funciones de regulación, hábitat, producción, información y de sustrato, definidas anteriormente (véase tabla 7.1). De acuerdo con Daily (1997), los servicios que provee un río pueden clasificarse en tres grupos: 1) abastecimiento de agua, relacionados con la disponibilidad del recurso hídrico para diferentes usos; 2) provisión de bienes, como materias primas y alimento, y 3) bienes

no extractivos, como el control de inundaciones, transporte, recreación y esparcimiento, dilución de la contaminación, potencial hidroeléctrico, hábitat de especies, fertilización del suelo, valorización de la propiedad, disfrute paisajístico, uso con fines científicos y recarga de acuíferos.

Según este listado de servicios, a continuación se mencionan aquellos que actualmente presta el río Tunjuelo de acuerdo con el estado en el que se encuentra el ecosistema. Así mismo, se incluyen los que históricamente prestaba y los que potencialmente prestaría si se desarrollara una estrategia de recuperación de este ecosistema. Esta clasificación temporal permite asociar los cambios que se han presentado a lo largo del tiempo en el río con la disponibilidad de los servicios ecosistémicos.

##### 7.4.1. Abastecimiento de agua

En el río Tunjuelo, la disponibilidad hídrica permite que haya captaciones de agua en río, principalmente en la cuenca alta, donde se encuentra el sistema de abastecimiento sur,

conformado por la laguna Los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera, que alimentan la planta de tratamiento de agua potable El Dorado. Esta planta trata en promedio 1,4 m<sup>3</sup>/s y provee el servicio a la localidad de Usme y asentamientos aledaños (EAAB, 2011). Así mismo, se encuentran captaciones de agua a lo largo del río que equivalen a un promedio mensual de 89 L/s, principalmente para uso rural, doméstico e industrial (CAR, 2010).

#### 7.4.2. Provisión de bienes acuáticos

En la actualidad, este servicio no es prestado por el río Tunjuelo, ya que la regulación del caudal en la cuenca alta, por la operación del embalse La Regadera, limita la posibilidad de vida de especies en la ribera y en el agua. De igual manera, los vertimientos de agua residual urbana presentes en la zona media y baja del río contaminan el agua y modifican las condiciones de vida en el río (10 L/s a 8 m<sup>3</sup>/s). De acuerdo con Zambrano (2002), algunos registros afirman que a comienzos del siglo XIX el pez capitán era una de las especies que habitaba el río.

#### 7.4.3. Bienes no extractivos

- Control de inundaciones: en la cuenca media, la zona de minas inundadas (ZMI) tiene la capacidad de regular las crecientes que se presentan en el río durante las épocas de lluvia. Esta regulación es una consecuencia de la ocupación de las zonas de extracción de materiales de lecho por el desbordamiento del río Tunjuelo durante el período de lluvias que se presentó en el 2002.
- Transporte: según Zambrano, “el río era navegable entre La Picota y Soacha,

donde desembocaba en el río Bogotá y contaba con algunos puertos, siendo el más conocido el que quedaba cerca de la desembocadura de la quebrada de Chiguaza” (2002, p. 85). En la actualidad, este servicio no es prestado por el Tunjuelo, principalmente por las intervenciones de tipo morfológico e hidráulico que se han realizado en el río (entre ellas, estructuras de contención de crecientes<sup>2</sup>) y por la contaminación de sus aguas en los tramos bajos.

- Recreación y esparcimiento: la presencia de parques naturales en la zona<sup>3</sup> y la variedad paisajística en la parte alta del río Tunjuelo son áreas atractivas para el desarrollo de actividades de recreación, esparcimiento y programas de ecoturismo. Así mismo, según Zambrano, el río Tunjuelo “durante la primera mitad del siglo XIX, alcanzó a tener cierta atracción como sitio turístico para la clase alta de Bogotá, que siguiendo una tradición inglesa organizaba paseos y cabalgatas a estas tierras” (2002, p. 85).
- Dilución de la contaminación: la asimilación de las concentraciones se presenta en la cuenca baja del río, probablemente. En la cuenca media antes de la descarga de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad el río mantiene su

<sup>2</sup> Como solución inicial a las inundaciones periódicas que se presentaban en el río Tunjuelo, la EAAB intervino en el cauce del río con pequeñas estructuras de contención de agua. Éstas fueron descartadas y, en su lugar, se construyó la presa seca Cantarrana, en el 2005 (EAAB, 2010).

<sup>3</sup> Entre ellos se encuentra el Parque Nacional Natural del Sumapaz, con una extensión de 154 000 ha, y la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, que abarca 14 116 ha.

capacidad de autodepuración de contaminantes (SDA y Uniandes, 2010).

- Potencial hidroeléctrico: este bien y servicio es característico de los ríos de montaña; sin embargo, sólo existe un estudio realizado por Pérez (1975, citado en Rodríguez, 2011), en el que se destaca el potencial que tiene el río Tunjuelo en cuanto a la generación de energía hidroeléctrica.
- Hábitat de especies: en el río, la distribución y la abundancia de las especies de ribera depende principalmente de la conexión dinámica entre el río y su ribera, así como de los procesos físicos (por ejemplo, flujo de agua y sedimentos) y de otros componentes (por ejemplo, la calidad del agua, la temperatura y la presencia de nutrientes y otras especies principalmente) (Daily, 1997). En el caso del río Tunjuelo, la presencia del embalse La Regadera aguas arriba y su regulación del caudal disponible para el río tienen repercusiones sobre la disponibilidad del hábitat para especies. De acuerdo con Díez (2010) las variaciones súbitas del caudal, como las que se presentan en La Regadera, son mortales para muchos organismos que dependen de las condiciones máximas o mínimas para su desarrollo; favorecen la proliferación de especies generalistas resistentes que pueden desplazar a las especies nativas; ayudan al crecimiento de plantas en el lecho del río durante caudales bajos; rompen el ciclo vital de algunas especies, y modifican la estructura del sustrato, que resulta en la reducción de la diversidad y la abundancia de especies nativas. De igual manera, la variación de la calidad del agua limita las condiciones

adecuadas para el desarrollo de las especies que habitan en río, principalmente por los cambios en la temperatura y la disponibilidad de oxígeno disuelto y nutrientes (Daily, 1997).

- Disfrute paisajístico: las actividades de senderismo son muy frecuentes en la parte alta del río Tunjuelo, especialmente en los parques naturales y zonas de reserva forestal.
- Recarga de acuíferos: en las zonas donde se sitúa el parque minero industrial, las actividades de extracción y explotación continua de materiales, realizada durante más de cincuenta años, han ejercido una fuerte presión sobre los acuíferos, hasta el punto de generarse una desconexión del río y de éstos, lo cual limita de manera definitiva el servicio de recarga de los acuíferos (HMV Ingenieros, 2005). De acuerdo con diferentes estudios hidrogeológicos que se han llevado a cabo en el sector, se ha establecido que el índice freático ha sido abatido de quince a veinte metros.

#### 7.4.4. Valoración de los servicios ambientales que presta el río Tunjuelo

De acuerdo con Pérez (1999), el agua puede considerarse un bien intermedio, relacionado con el uso directo o el uso futuro del agua para riego, consumo industrial o fines energéticos. Así mismo, puede definirse como un bien de consumo privado para uso actual o futuro (ya sea urbano o industrial) y uso indirecto (como emisor de desechos urbanos e industriales); como proveedor de beneficios públicos (por ejemplo, servicios de turismo, recreación y esparcimiento, funciones históricas y culturales);

ser adecuado para la provisión de hábitat para peces, especies salvajes, endémicas y en peligro de extinción, o para conservar la biodiversidad.

En el caso del río Tunjuelo, la estimación de la oferta de agua para riego, consumo doméstico, industrial, entre otros, se establece por métodos de valoración directa, como el costo de oportunidad o la voluntad de pago de los consumidores, que permitan identificar su importancia económica en el mercado. Por otra parte, los métodos de evaluación indirecta (como el costo de viaje) definen el valor de los recursos naturales y ambientales que estarían dispuestos a pagar los visitantes de este recurso,<sup>4</sup> mediante las tarifas de ingreso a los parques naturales o reservas forestales, aplicables al caso del río Tunjuelo. De igual manera, el método de los precios hedónicos define el valor de un bien producido a partir de la definición de características más relevantes del ecosistema estudiado (Arias, 2010).

Por ejemplo, la calidad del agua o la fertilidad del suelo influyen en la productividad de los alimentos que se producen en la cuenca alta del río Tunjuelo. Si el suelo es poco fértil, el productor debe incurrir en mayores gastos que garanticen la producción de sus cultivos como el uso de fertilizantes. Entre tanto, este valor debería incluirse dentro de los costos de producción y en la estimación de los precios del producto final. Otra metodología utilizada con frecuencia es la valoración contingente, cuyo objetivo consiste en valorar el recurso natural por medio de encuestas en las que se identifique la disposición a pagar por este recurso.

Es importante tener en cuenta que la valoración de los servicios ambientales puede llegar a verse como un mecanismo para prio-

rizar los esfuerzos hacia el aprovechamiento de los recursos naturales y la obtención del servicio que, en términos económicos, parezca el más rentable (Rodríguez, 2011). Sin embargo, la priorización de los servicios ambientales podría limitar la disponibilidad de los demás servicios que presta el ecosistema y que, en cierta proporción, son relevantes no sólo para el hombre, sino para su mantenimiento.

## 7.5. Restauración de ríos

### 7.5.1. Marco conceptual de la restauración de ríos

La restauración de ríos puede ser ampliamente definida como “el mejoramiento, asistido por el hombre, de la integridad del río a través de la restauración de la hidrología, geomorfología natural y procesos ecológicos” (Laub y Palmer, 2009, p. 332). Actualmente, la restauración de ríos ofrece una relación de ganancia tanto para la sociedad como para el mismo río: mejora el control de inundaciones, fortalece la función ecológica, recupera el espacio para permitir sus procesos naturales, se incrementa su valor recreacional y se generan más actores interesados (residentes, autoridades, entre otros), para que los proyectos de restauración, por medio de la información y participación, permitan finalmente elevar la calidad de vida en áreas urbanas (Binder, 2008).

“La guía para todo proyecto de restauración de ríos es la función ecológica del río” (Binder, 2008, p. 96). La restauración ecológica es una ciencia multidisciplinaria, ya que combina la hidrología, la geomorfología y la ecología para entender los efectos de los patrones de flujo y la dinámica de sedimentos en la biota del río. Esto permite remediar los impactos de las actividades antropogénicas, de manera que el

4 Definición del método de valoración por costos de viaje, propuesta por Arias (2001).

desarrollo e implementación de la restauración de ríos sea ecológicamente efectiva (Laub y Palmer, 2009). En la restauración ecológica, el objetivo es recobrar los procesos naturales del río y su autosostenibilidad teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por la sociedad.

La restauración es sólo una opción cuando una parte de la sociedad decide que la degradación ambiental causada por algún sistema humano pesa más que los beneficios que se derivan de la restauración. Es decir, la motivación de restaurar finalmente es un juicio en el cual los valores dados a los ecosistemas del río pesan más que otros valores derivados de las razones por las cuales se está degradando (Laub y Palmer, 2009).

## 7.5.2. Causas de la degradación de ríos

### 7.5.2.1. Presas

Las presas y sus reservorios impactan al río y los organismos acuáticos de dos maneras: primero, fragmentan la conexión de los ecosistemas del río. La ecología aguas arriba de la presa comienza a ser muy distinta a la existente aguas abajo, debido a que las presas pueden bloquear la migración de peces y otros organismos acuáticos. Además, el estancamiento del agua puede ser no apto para organismos que viven en hábitats de agua de flujo permanente. Aguas abajo de la presa se presenta erosión del hábitat y cambios en el régimen térmico, debido a que el agua liberada de algunas presas es mucho más fría y contiene menos sedimentos que el agua que llega a la presa, lo cual puede afectar severamente los organismos que habitan en esta zona. Segundo, las presas son "las grandes variaciones del caudal natural al cual los organismos están adaptados". La combinación de estos impactos pueden hacer que

el río sea inhospitable para especies nativas aguas abajo de la presa (Laub y Palmer, 2009).

### 7.5.2.2. Agricultura

La agricultura impacta al río por la adición de nutrientes y sedimentos. Los nutrientes (como nitratos y fosfatos) pueden incrementar el proceso de eutroficación, al disminuir las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua y, así, afectar especies sensibles. Por otra parte, el ingreso de sedimentos puede ser perjudicial para los organismos acuáticos, como es el caso de los peces, cuyos huevos se entierran. Otro impacto está en el hecho de que para el desarrollo de la agricultura, generalmente, se requiere deforestación, lo cual disminuye la capacidad de los bosques para filtrar nutrientes e impurezas del agua subterránea antes de que llegue al río, de manera que se degrada la calidad del agua, antes de ingresar a la zona urbana (Laub y Palmer, 2009).

### 7.5.2.3. Urbanización

La degradación de los ríos causada por la urbanización no es un simple problema con una única solución o un conjunto de problemas establecidos con soluciones definidas. La urbanización es multidimensional y debe tener en cuenta el desarrollo industrial, comercial, doméstico y social: "Es así como la urbanización no está definida por un simple cambio en las condiciones del río, sino por los profundos efectos acumulativos sobre el río y su biota, debido a la variedad de actividades humanas en la cuenca urbana" (Booth et ál., 2004, p. 1352). Debido a la complejidad de los efectos de la urbanización en los ríos, éstos serán divididos en tres aspectos: los efectos físicos, que involucran consecuencias en la hidrología

y geomorfología del río; los efectos biológicos y ecológicos, relacionados con microbios, algas, macrófitas, invertebrados y peces, y, por último, los efectos químicos.

#### 7.5.2.3.1. Efectos físicos

**Hidrología.** Una función dominante de la urbanización es el reemplazo de la vegetación natural por superficies impermeables, lo cual altera sustancialmente la hidrología de la cuenca. Esto se debe a que el detrimento de la permeabilidad de la cuenca a la precipitación conduce a la disminución de la infiltración y al aumento de la escorrentía superficial (Laub y Palmer, 2009).

Para analizar los efectos de la urbanización se usan los porcentajes de incremento en el área urbana impermeabilizada (*Impervious Surface Cover* [ISC]). En la figura 7.1 se muestran los cambios en los flujos hidrológicos de la cuenca urbana en función de los porcentajes de aumento del ISC. Por ejemplo, con un aumento entre el 10% y el 20% del ISC, los flujos de escorrentía resultan ser el doble de lo que eran cuando la cuenca no estaba urbanizada. Con un aumento del ISC, entre el 35% y el 50% la escorrentía se triplica, y para un incremento del ISC del 75-100%, la escorrentía es cinco veces mayor a comparación de una cuenca forestada (Paul y Meyer, 2001).

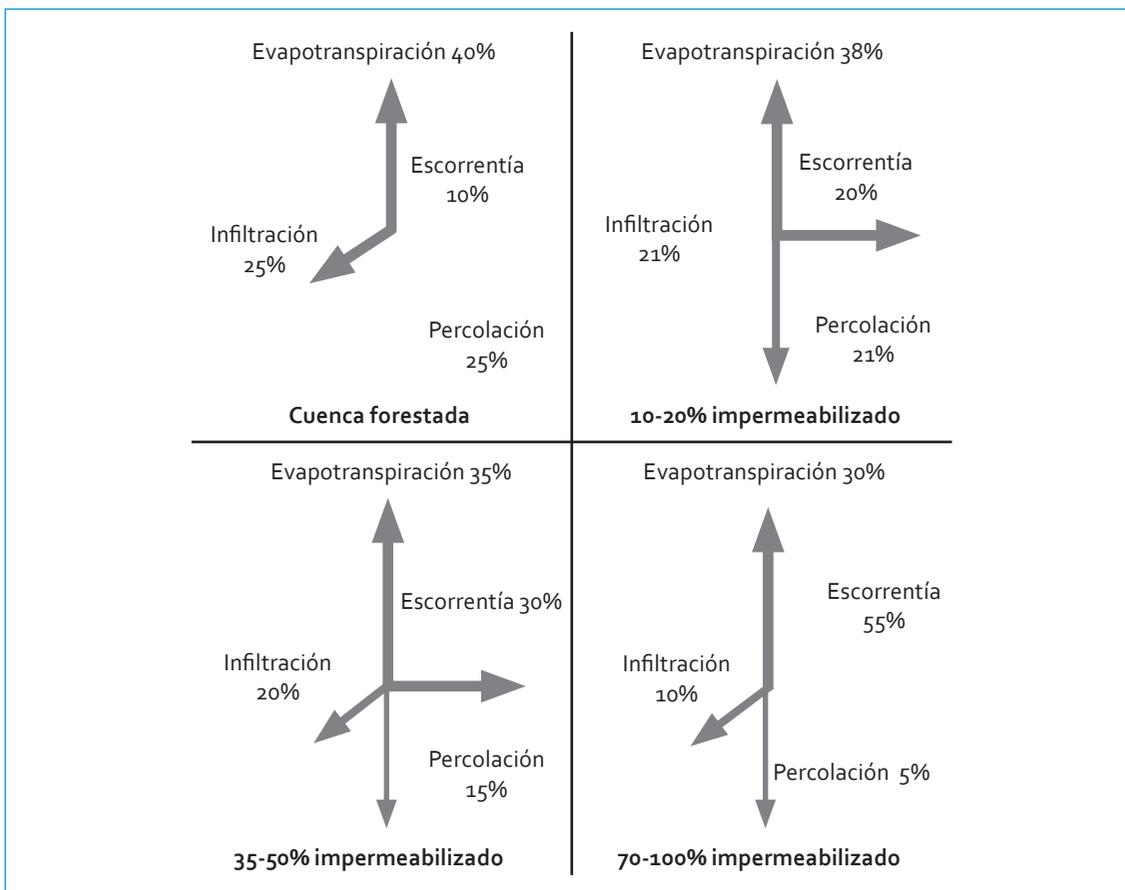


FIGURA 7.1. Cambios en los flujos hidrológicos con el incremento del ISC

Fuente: Paul y Meyer (2001)

**Geomorfología.** En el proceso de construcción de las urbanizaciones aledañas del río, la remoción extensa de la vegetación afecta el flujo de sedimentos que llegan a éste. La captación de sedimentos podría llegar a aumentar en un factor de 100 (Laub y Palmer, 2009) e incluso en un factor de  $10^4$  (Paul y Meyer, 2001), que afectaría la geomorfología del canal del río (figura 7.2).

El incremento del suministro de sedimentos conduce a una fase de agradación o de acumulación de sedimentos en el lecho del canal. Ello reduce su profundidad y disminuye la capacidad del canal, lo cual permite inundaciones que, a su vez, deposita sedimentos en la región de desbordamiento. Irónicamente, la inundación asociada a la acumulación de sedimentos ayuda a atenuar temporalmente el

aumento de flujo debido a la misma urbanización. Sin embargo, después de la fase de agradación, se inicia la fase de erosión. El canal aumenta su capacidad para poder soportar las grandes descargas de la urbanización. Como evidencia de ello, se tiene que el incremento del ISC aumenta la frecuencia de inundaciones en el canal o se ve un aumento en sus dimensiones, casos de esto se muestran en la tabla 7.3 (Paul y Meyer, 2001). Adicionalmente, la urbanización puede alterar la textura de los sedimentos. En los canales urbanos se han observado menos sedimentos finos, aumento de fracciones gruesas de arena, disminución de clases de gravas, como consecuencia de los cambios en la velocidad del flujo y las alteraciones en el aporte de sedimentos (Paul y Meyer, 2001).

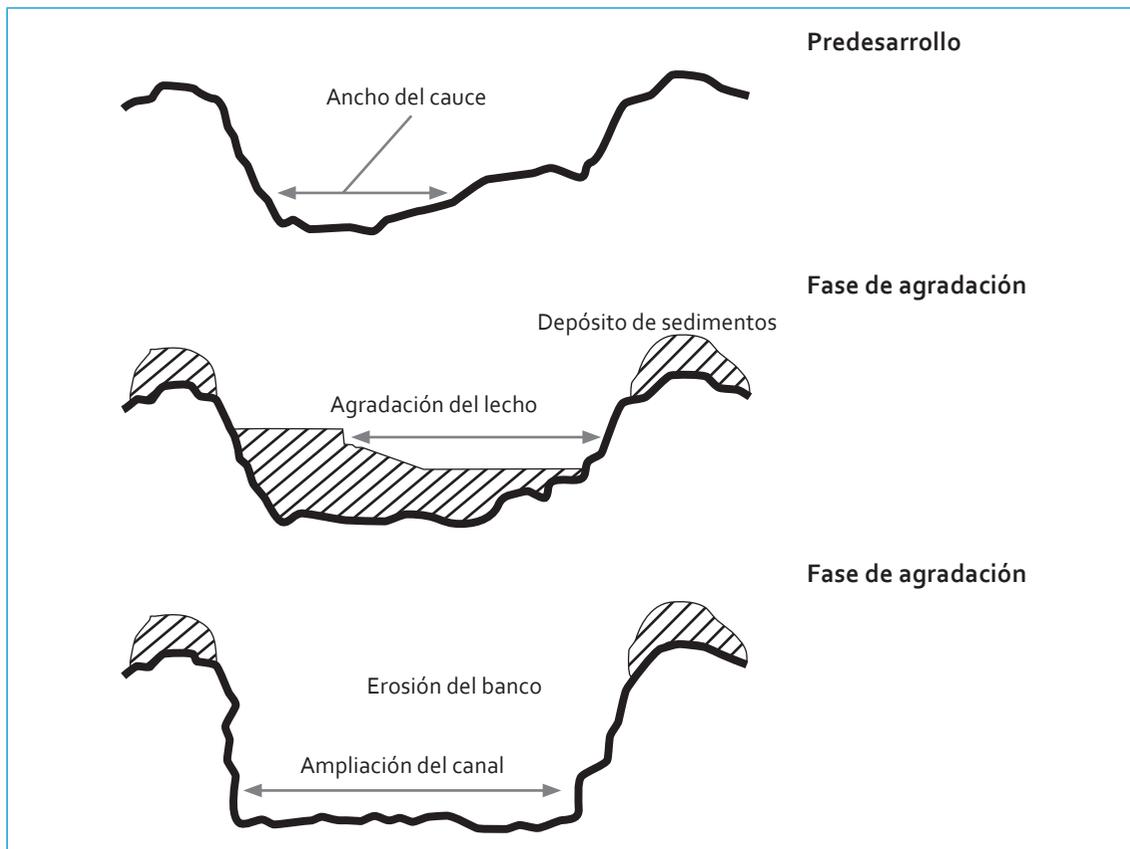


FIGURA 7.2. Cambios del canal asociados al incremento de sedimentos

Fuente: Paul y Meyer (2001)

TABLA 7.3. Efectos del ISC en variables físicas y biológicas de los ríos urbanos

Caso de estudio	Resultados
Hidrología	
Arroyos en Texas	Incremento del caudal máximo y disminución de su duración
Arroyos en Pensilvania	Incremento de descargas de cauce lleno y disminución del tiempo de duración
Arroyos en Washington	Incremento de descargas de cauce lleno con el incremento del ISC
Geomorfología	
Arroyos en Pensilvania	Ampliación del canal con el incremento del ISC
Arroyos en Nueva York	La ampliación del canal comienza a un ISC del 2%
Arroyos e Nuevo México	Cambios dramáticos en las dimensiones del canal a un ISC del 4%
Arroyos en Washington	Los canales se empezaron a ampliar a un ISC del 6%; canales inestables para ISC >10%
Temperatura	
Arroyos en Washington	Incremento de temperaturas del arroyo con el incremento del ISC
Peces	
Arroyos en Maryland	Disminución drástica de la diversidad de peces cuando el ISC es mayor al 12%-15% y ausencia de peces cuando el ISC es mayor al 30%-50%.
Arroyos en Ontario, Canadá	Decrecimiento abrupto del índice IBI para peces, para ISC >10%, pero los arroyos con abundante cobertura vegetal ribereña fueron menos afectados
Arroyos en Nueva York	Disminución de la densidad de larvas y huevos de peces residentes y anádro-mos* para un 10% del uso de la tierra para área urbana. Posteriormente hubo ausencia de éstos
Arroyos en Maryland	Disminución drástica de la diversidad de peces para un ISC mayor a 10%-12%
Arroyos en Wisconsin	Rápida disminución del índice IBI para peces en un ISC del 10%
Arroyos en Ohio	Rápida disminución del índice IBI de peces, para porcentajes entre 8% y 33% del uso de la tierra para área urbana
Invertebrados	
Arroyos en Maryland	Decrecimiento abrupto de la diversidad de invertebrados para ISC desde 1% hasta 17%
Arroyos en Virginia del Norte	Disminución en la diversidad de insectos para ISC entre 15% y 25%
Arroyos en Washington	Rápida disminución del índice IBI de insectos para ISC entre 1% y 6%, excepto en las zonas ribereñas intactas del arroyo
Arroyos en Ohio	Disminución de la diversidad de insectos y de la integridad biótica para ISC entre 8% y 33%

\* Anádro-mos: viven principalmente en agua salada y se aparean en agua dulce.

IBI: Index of Biotic Integrity.

#### 7.5.2.3.2. Efectos biológicos

*Microorganismos.* La densidad microbial de los ríos urbanos es usualmente alta, especialmente después de las tormentas; muchas de éstas se atribuyen a coliformes, sobre todo por las descargas de aguas domésticas y el drenaje pluvial. En algunas poblaciones bacterianas se ha encontrado el incremento de la resistencia a muchos antibióticos, incluidos tetraciclina, betalactama y cotrimoxazol. Esta resistencia se ha relacionado con la toxicidad de metales. Por ejemplo, "se ha encontrado la correlación positiva entre la resistencia a la estreptomycin y la kanamicina con concentraciones de mercurio en los sedimentos debido a las descargas industriales" (Paul y Meyer, 2001, p. 347).

Por otra parte, los microorganismos nitrificantes, responsables de la óxido-reducción del nitrógeno, también son influenciados por la urbanización. Los afluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representan una fuente significativa de estas bacterias, ya que se usan para la oxidación del amonio durante el tratamiento. "En algunos ríos se han encontrado tasas de nitrificación 6 veces mayores en los efluentes de las PTAR a comparación de las tasas aguas arriba" (Paul y Meyer, 2001, p. 348).

*Algas.* El uso de las algas como indicador de la calidad del agua en Europa y en Estados Unidos tiene una amplia trayectoria. Como resultado, existe información sobre la respuesta de estas especies y comunidades ante la contaminación orgánica. El incremento de la urbanización reduce la diversidad de las algas, lo cual se atribuye a los cambios en los sedimentos y a la química del agua. En los ríos urbanos, las algas no están limitadas por la falta de nutrientes, sino por la naturaleza cambiante de los sedimentos del lecho del río y la alta

turbidez. Adicionalmente, muchas especies de algas son sensibles a los metales presentes tanto en el agua como en los sedimentos, lo que reduce su población (Paul y Meyer, 2001).

*Macrófitas.* Según Paul y Meyer (2001), "se ha escrito muy poco sobre el efecto de la urbanización sobre las macrófitas". La mayoría de las investigaciones se han realizado en Nueva Zelanda y Australia, en las cuales se ha encontrado que los cambios en los sedimentos del lecho, el enriquecimiento de nutrientes, la turbidez y la introducción de especies exóticas han contribuido a reducir la densidad de las macrófitas en los ríos.

*Invertebrados.* Todos los aspectos del hábitat acuático de los invertebrados son alterados por la urbanización. Se ha encontrado que la diversidad de invertebrados se reduce con la presencia de toxinas, cambios de temperatura, deforestación ribereña, sedimentación y nutrientes orgánicos. Todos los decrementos de diversidad y abundancia en la literatura están relacionados con el aumento de la urbanización, correlacionado con el ISC, la densidad de viviendas, la densidad de población humana y el número total de descargas al río. Por ejemplo, las mediciones de invertebrados muestran su máxima degradación hasta un ISC del 17% (Paul y Meyer, 2001).

*Peces.* A pesar de que se tiene menor información sobre los efectos de la urbanización sobre los peces, en comparación con las investigaciones acerca de los invertebrados, la agencia de protección ambiental de Ohio posee una gran base de datos que relaciona el uso de la tierra y la abundancia de peces, en la que se sugieren tres tipos generales de la respuesta de los peces frente a la urbanización: desde 0% a 5% del uso urbano de la tierra se pierden las especies sensibles; de un 5% al 15% hay una degradación del hábitat y

se pierden los grupos funcionales de alimentación para los peces (por ejemplo: bentos o comunidades que habitan en el fondo de los ecosistemas acuáticos), y para porcentajes mayores al 15%, el enriquecimiento orgánico y la toxicidad causan una grave degradación de la fauna de los peces (Paul y Meyer, 2001).

#### 7.5.2.3.3. Efectos químicos

“Los efectos químicos dependen en gran medida del tipo de urbanización alrededor del río, ya sea residencial, industrial o comercial, la presencia de PTAR o de descargas combinadas” (Paul y Meyer, 2001, p. 341). Sin embargo, en general se presentan incrementos en la demanda de oxígeno, conductividad, sólidos suspendidos, nutrientes, hidrocarburos y metales en los ríos urbanos. Las contribuciones de contaminantes al río pueden deberse a las descargas de aguas combinadas, el arrastre de metales, aceites y otros contaminantes por el agua de escorrentía, además de las descargas ilícitas del comercio e industrias.

*Metales.* Es común encontrar metales como el plomo, cinc, cromo, manganeso, níquel y cadmio en los ríos urbanos, incluso se han hallado concentraciones de mercurio y partículas de metilmercurio durante las tormentas. Dentro de la evaluación del contenido de metales en los ríos urbanos es fundamental analizar los sedimentos, dado que los metales se acumulan en ellos. Según Paul y Meyer (2001), se han encontrado metales como arsénico, hierro, boro, cobalto, plata, estroncio, rubidio, antimonio, escandio, molibdeno, litio y estaño en los sedimentos de los ríos urbanos.

*Pesticidas.* Frecuentemente, en los ríos urbanos se detectan pesticidas en concentraciones que exceden los límites para la protección de la biota acuática. Éstos incluyen insecti-

cidas, herbicidas y fungicidas. Hay muchas fuentes de pesticidas en las cuencas urbanas, por lo general aplicados alrededor de las casas (entre el 70% y el 97% de los hogares en Estados Unidos usan pesticidas), en los edificios comerciales e industriales y el mantenimiento del césped. Incluso, “la aplicación en las áreas urbanas excede frecuentemente la aplicación en la agricultura por cerca de un orden de magnitud” (Paul y Meyer, 2001, p. 345).

*Otros contaminantes orgánicos.* Toda una serie de contaminantes orgánicos son detectados frecuentemente en los ríos urbanos, entre éstos bifenilos policlorados (PCB), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) e hidrocarburos alifáticos. Al igual que los metales, los PCB son las principales partículas asociadas con la escorrentía del agua lluvia, en el caso en el que no hayan descargas industriales, y para el caso de los PAH siempre están asociados con descargas industriales o algún derrame accidental (Paul y Meyer, 2001).

#### 7.5.3. Generalidades del plan maestro de restauración

En sistemas urbanos, el proceso de restauración de ríos debe involucrar, como mínimo, tres etapas: planeación en el contexto geográfico y limitantes, implementación y monitoreo para determinar si la restauración es exitosa. Se debe involucrar al público en cada etapa del proyecto de restauración, pues esto le permite a la gente aprender sobre los problemas que contribuyen a la degradación del río, y cómo ésta hace que se pierdan procesos naturales del río y las funciones de los ecosistemas. También pueden ver cómo recuperar estos procesos, las limitaciones que conlleva y las razones por las cuales un proyecto de restauración es exitoso o no. Así es posible lograr que la población

adquiera un sentido de valoración del río y, por lo tanto, adopte sentido de responsabilidad que sustente la restauración ecológica en el futuro (Laub y Palmer, 2009).

“Cambiar la percepción sobre el valor de los ecosistemas de los ríos requiere de la educación de la ciudadanía sobre los sistemas de los ríos, los servicios que éstos proveen y el proceso de restauración ecológica del río”

(Laub y Palmer, 2009, p. 334). En suma, se debe considerar la integración de la ingeniería con la arquitectura del paisaje, lo cual permitirá integrar a la población con el río. La restauración de ríos no es completa si, a pesar de que la restauración ecológica haya sido exitosa, la población no cuenta con pasajes que permitan el acceso al río (figura 7.3).

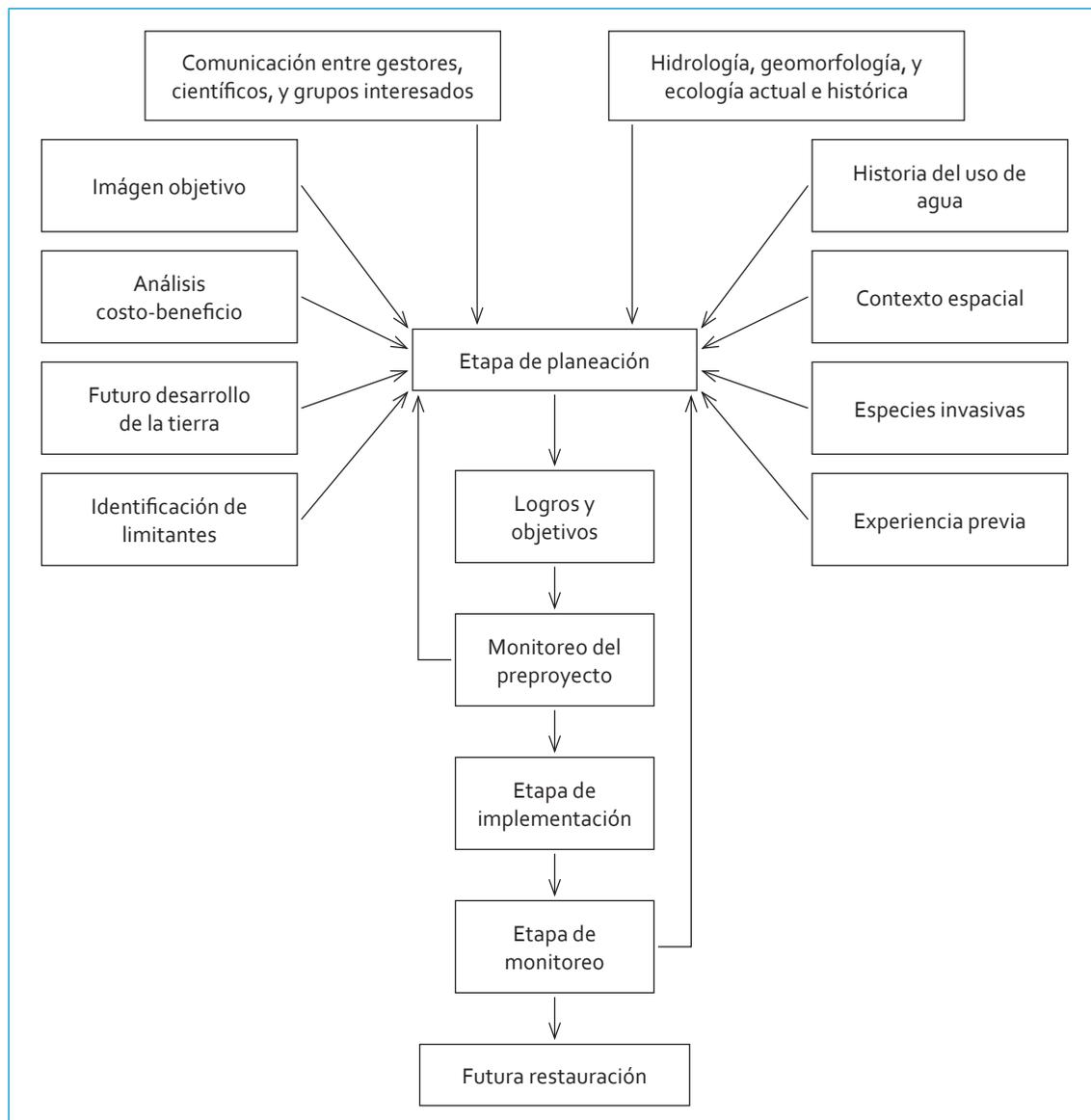


FIGURA 7.3. Principales etapas en la restauración de ríos y ejemplos de consideraciones para la planeación

Fuente: Laub y Palmer (2009: 336)

### 7.5.3.1. Planeación

Es la etapa más importante de la restauración de ríos, ya que en ésta se establecen los logros y objetivos del proyecto de restauración. Los logros son derivados de una visión orientadora sobre la imagen que se quiere proyectar y de lo que podría ser potencialmente restaurado. La planeación sobre cómo cumplir los objetivos dentro de los límites establecidos requiere múltiples grupos, incluidos científicos, directivos del río, población que vive cerca al río, comercios e industrias que necesitan recursos del río y gente que usa el río para la recreación y propósitos culturales (Laub y Palmer, 2009).

Como resultado del proceso de planeación, se establece un documento llamado *Plan Maestro de Restauración* (PMR), concebido como una guía flexible para implementar la restauración. Como guía para el desarrollo del PMR del río Tunjuelo, se podría tomar el caso de la restauración del río Magdalena en México. El PMR de este río se plantea la siguiente estructura (Gobierno del Distrito Federal, 2008):

- Desarrollo del estado de referencia para la restauración.
- Antecedentes del río, diagnóstico de las condiciones actuales del río y delimitación del área de planeación.

- Objetivos de la restauración, según la zonificación.
- Estrategias y líneas de acción para los siguientes aspectos: zonificación territorial para el rescate del río, manejo del desarrollo local sostenible y ecosistémico, gestión integral del río y su cuenca hidrológica, revaluación del paisaje del río y nueva políticas para ayudar a implementar y monitorear la restauración del río.
- Plan de acción inmediato.

El principal objetivo de realizar el plan maestro de restauración de un río es obtener una matriz (tabla 7.4) que contenga el diagnóstico, los objetivos y las líneas de acción, en la cual, por cada línea de acción, se proponen proyectos para lograr dichos objetivos con la respectiva cronología. Cabe resaltar que la cronología para la restauración de ríos no es lineal, es decir, las actividades en cada sector tienen que realizarse de manera conjunta. Esto se debe a que “un esfuerzo localizado dentro de una extensa cuenca dominada por los impactos de las actividades humanas, tendrá bajos costos pero obtendrá mínimos efectos sobre la restauración” (Laub y Palmer, 2009, p. 338).

TABLA 7.4. Ejemplo de los componentes de la matriz para la restauración del río Magdalena, México

Diagnóstico	Objetivos	Líneas de acción
El río se ha convertido en la alcantarilla de la zona urbana	Limpiar el río	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plantas de tratamiento</li> <li>Uso de colectores e interceptores</li> <li>Control en las políticas de vertimientos</li> </ul>
Devaluación del río como elemento de cohesión en el espacio urbano	Dar valor al río y convertirlo en un elemento de cohesión en el espacio urbano	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adaptar al río los servicios de recolección de basura y limpieza de la calle</li> <li>Mejorar las condiciones de accesibilidad</li> <li>Adaptar y reorientar las estructuras viales</li> <li>Campañas educativas a la población</li> </ul>
Un río amenazado por la invasión de las zonas urbanas	Detener la urbanización ilegal en las tierras de conservación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manejo y control de los asentamientos ilegales</li> <li>Asentamientos ilegales en zonas de riesgo</li> <li>Propuesta de ordenamiento urbano</li> <li>Expropiación, regulación y compra de tierras para el uso público</li> </ul>

Fuente: Gobierno del Distrito Federal (2008)

### 7.5.3.2. Implementación

En la etapa de implementación se lleva a cabo el proyecto de restauración usando las técnicas decididas durante la etapa de planeación. En

la tabla 7.5 se listan algunos objetivos comunes usados en proyectos de restauración en Estados Unidos con sus técnicas y limitaciones asociadas.

TABLA 7.5. Lista de los objetivos comunes en la restauración de ríos urbanos, con sus respectivas técnicas y posibles limitantes asociados

Objetivo	Número de proyectos*	Técnicas comunes	Ejemplo de limitaciones
Gestión de calidad de agua	11981	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plantar vegetación ribereña</li> <li>Prácticas de conservación del suelo</li> <li>Control de contaminación en la fuente</li> </ul>	Políticas/financieras: deficiencia de leyes para la protección de la calidad del agua Las industrias deben estar dispuestas a pagar por la remediación a la contaminación o modificar las actividades de producción
Gestión de vegetación ribereña	11835	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exclusión de ganado</li> <li>Plantar vegetación ribereña</li> </ul>	Natural: la erosión de bancos empeora por represamiento debido a desechos naturales
Mejora del hábitat	5750	<ul style="list-style-type: none"> <li>Construcción de estanques y rápidos, adición de rocas</li> </ul>	Científica: desconocimiento del tipo de hábitat objetivo para las especies
Paso de peces	4881	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escalones para peces</li> <li>Rediseño del vertedero</li> </ul>	Natural: aun con los pasajes construidos, se mantiene una población baja
Estabilización de bancos	3163	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plantar vegetación ribereña</li> <li>Taludes en roca, estratificación de bancos</li> </ul>	Financiera/natural: técnicas disruptivas, costosas que pueden afectar comunidades bióticas

Objetivo	Número de proyectos*	Técnicas comunes	Ejemplo de limitaciones
Modificaciones en el flujo	1343	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de flujo por represas</li> <li>Comprar derechos del agua</li> <li>Educación para la conservación del agua</li> </ul>	Política: existe una política que prioriza el uso del agua para el municipio, la industria o la agricultura
Educación estética/recreación	1116	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remoción de basuras</li> <li>Construcción de senderos</li> <li>Colocación de señales</li> </ul>	Social: si la restauración no se percibe como exitosa, los ciudadanos no apoyarán la restauración en un futuro
Reconfiguración del canal	1045	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realineación del canal</li> <li>Iluminación artificial</li> <li>Estratificación de bancos</li> </ul>	Científicas: se requieren datos sobre la cantidad de sedimentos y las variaciones de caudal para el diseño del canal
Adaptación/remoción de presas	764	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rompimiento de la presa</li> <li>Remoción de sedimentos y revegetación, después de la remoción de la presa</li> </ul>	Financiera: la remoción y adaptación de presas es costoso
Gestión del agua lluvia	544	<ul style="list-style-type: none"> <li>Construcción de estanques y humedales</li> <li>Tubería solo de agua lluvia</li> </ul>	Política/financiera: si se carece de leyes, los desarrolladores no pagarán por estructuras para el agua lluvia
Reconexión de llanuras de inundación	535	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estratificación de bancos</li> <li>Modificar el lecho del canal (elevaciones)</li> </ul>	Social: se podría ampliar las llanuras de inundación
Gestión de especies en el río	358	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controlar especies exóticas</li> </ul>	Social: especies exóticas, como peces de pesca deportiva, serán preferidos

\*Base de datos de proyectos de restauración realizados en Estados Unidos desde julio del 2004.

Fuente: Laub y Palmer (2009)

### 7.5.3.3. Monitoreo

El monitoreo consiste en el continuo seguimiento y evaluación de los cambios que experimenta el ecosistema, bajo los diferentes tratamientos de restauración aplicados (Díaz-Martín, 2007). Durante el monitoreo los datos son recolectados y analizados para determinar si la restauración ha logrado los objetivos planeados. La dificultad del monitoreo radica en que no se conoce o no se ha llegado a un acuerdo sobre los mejores métodos para evaluar los procesos. Sin embargo, se recomienda que para evaluar el éxito de la restauración se comparen las condiciones pre y posrestauración en el mismo punto en que se aplicó un determinado proyecto de restauración (Laub

y Palmer, 2009). He aquí la importancia de los monitoreos que se han venido realizando sobre el río Tunjuelo, lo que permitirá, además de diagnosticar la problemática del río, verificar los resultados obtenidos de su restauración.

Otra dificultad en la evaluación de la restauración de ríos es que, en teoría, la restauración debería ser evaluada idealmente en la escala de la cuenca. La atención debería centrarse en si el proyecto individual contribuye a la mejora general de las condiciones ecológicas locales y aguas abajo. Un proyecto de restauración individual debe parecer inicialmente un error; pero si el proyecto es acompañado con los proyectos de restauración en otros sitios del río y se mejoran las condiciones en el paisaje circundante, el proyecto individual

puede contribuir a la restauración ecológica exitosa. La recuperación a escala de cuenca toma muchos años e incluso décadas.

Cuando la restauración es considerada necesaria, las actividades de restauración se pueden enfocar en las causas fundamentales de la degradación y no se limitará a un tramo específico del río, de manera que cuando la gestión es adoptada a la escala de la cuenca, la restauración será más efectiva. Así, se requiere el trabajo de equipo multidisciplinario (incluidos científicos, autoridades, habitantes de la zona y otros grupos interesados) para planear adecuadamente el proyecto de restauración. Además, se debe tener en cuenta que estos proyectos muestran resultados de mejoramiento visibles en décadas de constante aplicación de medidas correctivas y acciones de educación, que permita una estrecha relación de ganancia mutua entre los habitantes y el río (Laub y Palmer, 2009).

#### 7.5.4. Bases del plan de restauración del río Tunjuelo

Para la cuenca del río Tunjuelo se han realizado distintos estudios relacionados con su caracterización y planes de manejo de sus diversas problemáticas. Por ejemplo, desde mediados del 2002 se ha avanzado en cuanto a planes de restitución del cauce, dada la problemática de la desviación del río por las inundaciones en la zona de las canteras. Éstos incluyen el planteamiento de obras de emergencia a corto plazo, para la mitigación de las inundaciones aguas abajo en el sector de canteras (HMV Ingenieros, 2005).

Por otra parte, desde el 2005 se vienen desarrollando “investigaciones básicas y aplicadas orientadas a validar técnicas para la restauración o recuperación de áreas degra-

das en el Distrito Capital” (Montoya, 2009), desarrolladas por entidades del Distrito Capital, como la EAAB, el Jardín Botánico José Celestino Mutis y la SDA, y centros de educación superior. Así se han generado publicaciones relacionadas con el río Tunjuelo, como la *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*, en la que se desarrolla un estudio de caso en los alrededores del embalse Chisacá (UNAL, et ál., 2007), o los “estudios, formulación, diseños detallados y desarrollo del plan de manejo ambiental de los predios asociados al sistema de abastecimiento sur y de la cuenca alta del río Tunjuelo”, donde se realiza la caracterización y diagnóstico de fauna silvestre, sistemas de producción agrícola, cobertura y usos de suelo, entre otros (EAAB y Ponce de León Asociados, 2005).

A pesar de los distintos estudios llevados a cabo, las investigaciones desarrolladas sobre la cuenca del río Tunjuelo están desarticuladas y aisladas, de manera que hay suficiente información sobre la cuenca alta del río Tunjuelo, pero se desconocen las condiciones de la cuenca media y baja.

La restauración del río Tunjuelo se ha concebido en zonas aisladas, cuyos objetivos no se relacionan. No existe una guía completa que tenga en cuenta de manera integral los aspectos ecológicos, geomorfológicos, hidrológicos, sociales y paisajísticos de la cuenca del río Tunjuelo, entendida como un sistema funcional complejo. A continuación se proponen las etapas para la adecuada planeación del plan maestro de restauración del río Tunjuelo, según la teoría de restauración, teniendo en cuenta que un proyecto individual contribuye a la restauración exitosa sólo si es acompañado y articulado con otros proyectos cuyo objetivo sea común.

Según las etapas de planeación para la restauración del río Tunjuelo (mencionadas en la sección 7.4.2), se delimita el área de planeación según el diagnóstico de las condiciones actuales del río, con sus respectivos objetivos de restauración. La delimitación consiste en zonificar la cuenca en sectores cuyas condiciones hidrogeológicas, climáticas, ecológicas y urbanísticas son similares, además de considerar las fuentes puntuales de deterioro del río. Para esto se compararon mapas con información de ciertos parámetros que son índices del efecto de la urbanización, como la temperatura, precipitación, evaporación,

rendimiento hídrico y cobertura del suelo. Además, se tienen en cuenta las variaciones en cuanto a las pendientes del cauce, el deterioro ecológico y las problemáticas específicas que requieren especial atención.

Como resultado de la delimitación para la restauración, se clasificó la cuenca en cinco zonas: Zona 1: Cuenca Alta-Quebrada Chiguacita; Zona 2: Quebrada Chiguacita-RSDJ; Zona 3: RSDJ-Canteras; Zona 4: Canteras, y Zona 5: Canteras-Desembocadura río Bogotá. En la tabla 7.6 se muestran las características generales de las zonas, y en la figura 7.4, la ubicación del área de planeación.

TABLA 7.6. Características de las zonas guías para el desarrollo del plan maestro de restauración del río Tunjuelo

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Precipitación	800-1000	600-800	500-600	500-600	400-500
Temperatura (°C)	11-13	13-14	13-15	13-16	13-14
Evaporación (mm)	850-900	900-950	950-975	950-975	950-975
Pendiente (mm)	50%-75%	25%-50%	7%-12%	3%-7%	0%-3%
Rendimiento hídrico	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Ecología	Óptimo	Marginal	Pobre	Pobre	Pobre
Dens. urbanización	Baja	Medio	Alta	Alta	Alta
Problema específico	Usos del suelo Caudal ecológico	Presa y descargas de Yomasa	Lixiviados	Desviación del cauce	Descargas industriales

Zona 1: Cuenca Alta-Q. Chiguacita; Zona 2: Q. Chiguacita-RSDJ; Zona 3: RSDJ-Canteras; Zona 4: Canteras; Zona 5: Canteras-desembocadura río Bogotá.

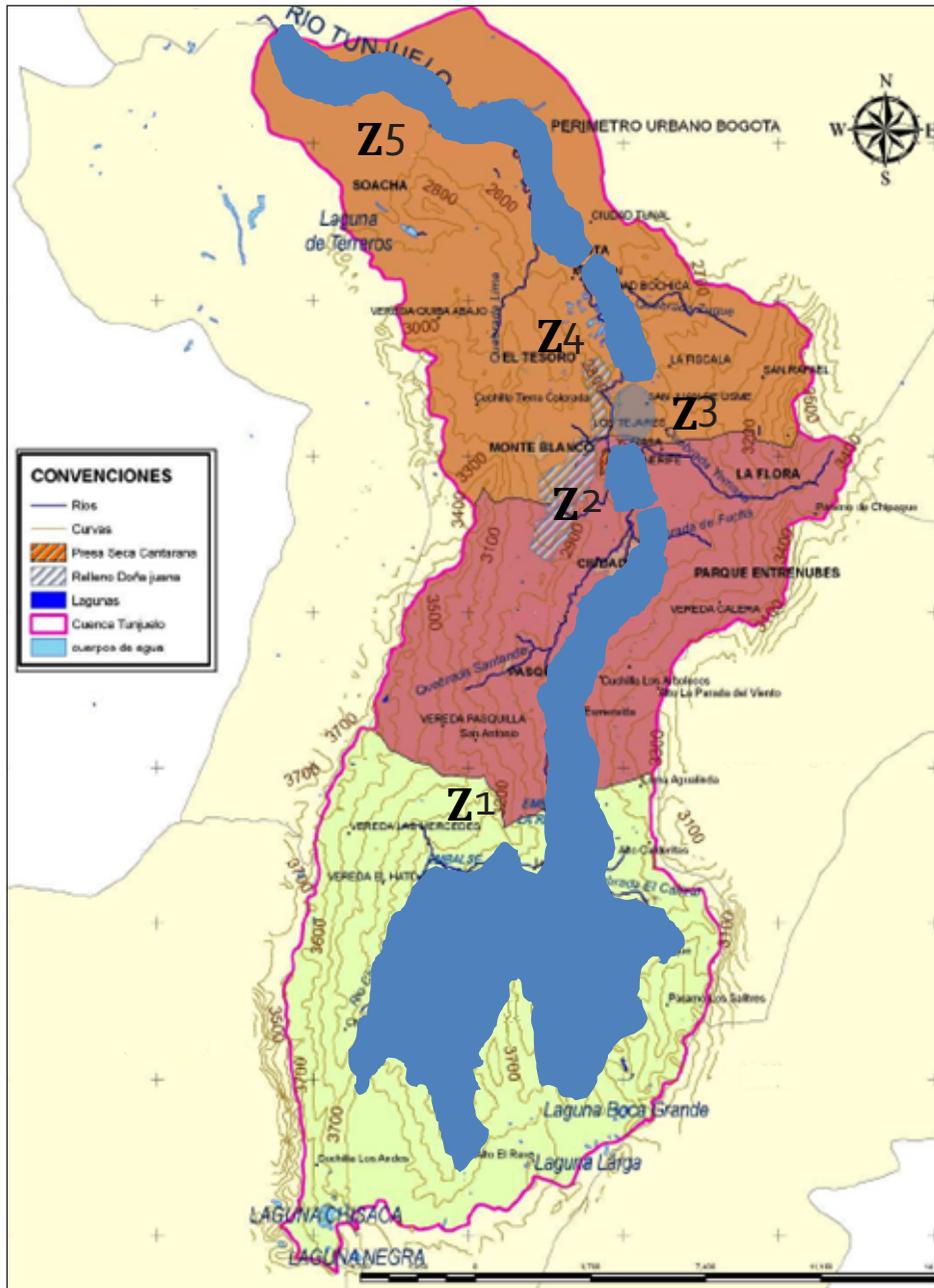


FIGURA 7.4. Mapa de localización de las zonas de la cuenca del río Tunjuelo

Fuente: CAR, 2010

Antes de proponer los objetivos específicos para cada zona, se deben identificar los objetivos generales del plan de restauración del río Tunjuelo, de manera que sean los encargados de orientar todas las labores relacionadas con el proyecto.

#### 7.5.4.1. Objetivos generales

- Construir una guía flexible de implementación de los procesos para cada zona, usando la coordinación interinstitucional y la participación social.

- Restaurar la ecología del río Tunjuelo: lograr la conservación de zonas naturales, mediante los trabajos de limpieza del río, los cuales deben empezar desde el principio de la ejecución del proyecto y en cada zona se pueden hacer labores simultáneamente, con algunas excepciones que se mostrarán más adelante, trabajos de mejora en la geomorfología, que impidan la fragmentación del río.
- Dar valor al río y transformarlo en un elemento de cohesión en el espacio urbano: crear espacios públicos para la recreación, la cultura y el deporte, clasificando las zonas adecuadas a estos usos; políticas de seguridad pública; recolección de basuras, y mejorar las condiciones de accesibilidad al río.
- Retroalimentar experiencias y aprendizaje para otros proyectos de restauración.

Basándose en los objetivos generales y la descripción de la zona que se va a tratar, se establecen los objetivos de restauración específicos con las líneas de acción.

#### 7.5.4.1.1. Zona 1: Cuenca Alta-Quebrada Chiguacita

La zona 1 se refiere a la cuenca alta del río Tunjuelo, comprendida desde las microcuencas de los ríos Chisacá, Mugroso y Curubital, pasando por el embalse La Regadera, hasta el punto de descarga de la quebrada Chiguacita. Esta zona se caracteriza por ser rural (figura 7.5), de forma que no se presentan fuertes efectos de la urbanización. Sin embargo, se presentan diversos problemas que repercu-

ten en los bienes y servicios que prestan los ecosistemas. Por ejemplo, cerca del 18% del área de las microcuencas Curubital, Mugroso y Chisacá están dedicadas a la agricultura, de los cuales el 84% de los agricultores no reciben asistencia técnica y generan problemas relacionados con el uso intensivo de agroquímicos, pesticidas y maquinaria. Además, en algunas zonas (como los predios anexos al embalse Chisacá) se presentan problemas relacionados con las plantaciones de especies exóticas implementadas en proyectos anteriores de reforestación.



FIGURA 7.5. Río Tunjuelo aguas arriba de los predios de la Universidad Antonio Nariño

Para el caso del embalse La Regadera hay una fuerte afectación en los ecosistemas y la calidad del agua, relacionados con los cambios abruptos de caudal y los efectos propios de los embalses mencionados en la sección 7.4.1. Actualmente se han registrado caudales en la descarga de fondo (figura 7.6), que van desde los 0,02 m<sup>3</sup>/s hasta los 7 m<sup>3</sup>/s; de manera que la operación del embalse interrumpe el caudal hacia aguas abajo durante períodos de estiaje.



FIGURA 7.6. Descarga de fondo del embalse La Regadera en período de estiaje

Para la zona 1 se proponen los objetivos de restauración que se muestran a continuación:

- Preservar el área natural en buenas condiciones:
  - Detener el crecimiento del área de suelo destinada a las actividades agrícolas. Para esto se requiere definir áreas protegidas, áreas destinadas a ecoturismo y áreas productivas, además de la comunicación pertinente a la comunidad, sumado al control y revisión de las autoridades.
  - Desarrollo de prácticas sostenibles de producción agrícola: capacitación técnica con personal profesional del área agrícola y social y control de las autoridades competentes.
  - Detener los procesos de urbanización en esta zona. Manejo de asentamientos ilegales, expropiación, regulación y compra de suelo.

- Trabajos de manejo sostenible de flora y fauna de la zona, el cual involucra proyectos de restauración según el tipo de ecosistema y manejo sostenible de bosques.
- Garantizar el sostenimiento de los ecosistemas aguas abajo del embalse y la capacidad hídrica requerida para el abastecimiento de agua potable:
  - Proyecto de adecuación del embalse La Regadera, el cual provea el caudal óptimo requerido aguas abajo del embalse y permita el intercambio de especies.
  - Líneas de acción para la preservación del área natural aguas abajo del embalse.

#### 7.5.4.1.2. Zona 2: Quebrada Chiguacita-Relleno Sanitario Doña Juana

La zona 2 comprende desde la desembocadura de la quebrada Chiguacita al río Tunjuelo hasta los predios en los que inicia el relleno sanitario Doña Juana. Esta zona es la primera en sentir los fuertes efectos de la urbanización. Inicialmente, el río se ve afectado por vertimientos domésticos, debido a las descargas de algunas quebradas como La Taza, Corinto, Riquilina, Fucha, El Piojo y Chuniza. Después el río es impactado por los efectos del embalse seco de Cantarrana, en el que se presenta fragmentación de los regímenes ecológico, hidrológico y geomorfológico (figura 7.7). En esta presa se presenta una notable disminución de caudales durante enero, febrero y marzo, época en la que se hace más evidente la regulación del caudal del embalse de La Regadera (CAR, 2010). Aguas abajo del embalse de Cantarrana el río recibe basuras y vertimientos agrícolas y domésticos provenientes de la quebrada Yo-

masa (figura 7.8). Finalmente, en esta zona se presentan las primeras afectaciones del sector minero. Estos múltiples factores hacen que el río muera ecológicamente en algún punto dentro de la cuenca media (CAR, 2010).



FIGURA 7.7. Descarga de fondo del embalse seco de Cantarrana

*Nota.* Véase la fragmentación del régimen ecológico, hidráulico y geomorfológico del río.



FIGURA 7.8. Desembocadura de la quebrada Yomasa al río Tunjuelo

*Nota.* Se evidencian dos franjas dadas por la diferencia en la calidad del agua: la franja superior pertenece al río Tunjuelo, y la franja inferior, a la quebrada Yomasa.

Para la zona 2 se proponen los objetivos de restauración que se muestran a continuación, con sus respectivas líneas de acción:

- Mejorar la calidad hídrica del río:
  - Detener el crecimiento urbano en la zona inundable del río, esto es, control de asentamientos ilegales, expropiación, regulación y compra de suelo.
  - Limpiar el río mediante la restauración de la vegetación de la zona riparia y por medio del uso de colectores e interceptores.
  - Gestionar el plan de limpieza de las quebradas que desembocan en esta zona: planes de educación a la comunidad y control de vertimientos.
- Proveer mantenimiento y modernización en proyectos que regulen el manejo del río: plan de prevención y protección de inundaciones.
- Controlar las actividades ligadas al sector minero: detener las actividades ilegales de minería.

#### 7.5.4.1.3. Zona 3: Relleno Sanitario Doña Juana-Canteras

Esta zona corresponde al trayecto del río que colinda con los predios del relleno sanitario Doña Juana hasta el ingreso del río a la zona inundada (figura 7.9). En este sector se requiere un plan de acción diferente y específico, debido a la problemática relacionada con la contaminación química del río, causada por los vertimientos de aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento de lixiviados, junto con el afluente intermitente de los excesos de lixiviados no tratados. Los objetivos para esta

zona son de vital importancia para la restauración de las zonas 4 y 5:

- Mejorar la calidad del ambiente: calidad del agua, paisaje y olores asociados al río. Así mismo, detener los vertimientos provenientes de la planta de tratamiento de lixiviados.
- Manejar sustancias tóxicas: este objetivo se debe implementar una vez se cumpla con el anterior objetivo: evaluar y diagnosticar la calidad de sedimentos para establecer su plan de manejo, así como la contaminación para la vegetación riparia, estableciendo el plan de manejo.



FIGURA 7.9. Río Tunjuelo aguas abajo del relleno sanitario

#### 7.5.4.1.4. Zona 4: Canteras

La zona 4 requiere un plan de acción específico, dado que el problema relacionado con la des-

viación del cauce del río Tunjuelo en la zona de las canteras no sólo representa riesgos para la población, asociados a la inestabilidad de terrenos y sedimentación de contaminantes que el río arrastra debido a los distintos vertimientos que ha recibido, sino por el componente político y económico, debido a la ilegalidad de ciertas explotaciones mineras de la zona, que no cumplen con los planes de manejo que minimicen los impactos a la cuenca y sus habitantes (CAR, 2010). Los objetivos de restauración para la zona 4 son:

- Restituir el cauce: construir el cauce para el río Tunjuelo en esta zona, teniendo en cuenta el régimen geomorfológico natural del río, la flora nativa de la región y la prevención y protección de inundaciones.
- Clausura de canteras: diagnosticar sedimentos presentes en las cárcavas inundadas y desarrollar su plan de manejo, aplicar políticas de cumplimiento a las empresas causantes del daño (como sanciones, multas e indemnizaciones) y desarrollar y aplicar el plan de clausura de las cárcavas. Esto se lleva a cabo sólo si ya se ha restituido el cauce del río Tunjuelo.
- Controlar las actividades ligadas al sector minero: detener las actividades ilegales de minería, implementando políticas de control y gestión ambiental de proyectos generados por el sector.

#### 7.5.4.1.5. Zona 5: Canteras-Desembocadura al río Bogotá

El tramo del río Tunjuelo comprendido desde la zona de canteras hasta su desembocadura al río Bogotá es impactado fundamentalmente

por la contaminación química de los vertimientos industriales. Están relacionados con las actividades industriales de las curtiembres (ubicadas principalmente en sector de Tunjuelito), comercio de combustibles, industrias cárnicas, entre otros. Además, en esta zona se reciben descargas importantes de aguas servidas, debidas a la desembocadura de la quebrada Chiguaza y la confluencia del río con el interceptor Tunjuelo Medio (figura 7.10).



FIGURA 7.10. Punto de descarga del interceptor Tunjuelo Medio en el río Tunjuelo

Los objetivos de restauración para la zona 5 son:

- Limpiar el río: para ello es de vital importancia cumplir con los objetivos establecidos para las zonas 3 y 4: controlar vertimientos industriales, finalizar obras del interceptor Tunjuelo Medio y diagnosticar la calidad de sedimentos y contaminación de la fauna riparia.
- Proveer mantenimiento y modernización en proyectos de protección que regulen el río: plan de prevención y protección de inundaciones, así como implementación de técnicas alternativas para la construcción de jarillones y otras estructuras de contención.

#### 7.5.4.2. Síntesis

Existen buenos argumentos para la restauración de los ríos en áreas urbanas: el mejoramiento del control de inundaciones, el fortalecimiento de la función ecológica del río, el ofrecer un valor recreacional a la población, el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, entre otros. Además, se cuenta con muchas experiencias y conocimientos sobre la restauración de ríos de otros países, a partir de los cuales se puede aprender para establecer planes de restauración apropiados en el contexto de los ríos urbanos en Bogotá.

La urbanización es la principal causa del desequilibrio en el río Tunjuelo. Este fenómeno conlleva cambios físicos, como los efectos sobre la hidrología y geomorfología natural, lo cual a su vez repercute en las comunidades bióticas contenidas en éste. Los cambios en la química del agua también afectan los procesos ecológicos naturales y, por ende, generan consecuencias negativas en seres vivos como algas, invertebrados y peces.

Para la adecuada planeación de la restauración del río Tunjuelo es importante zonificar, a fin de realizar diagnósticos de la zona y establecer los planes de acción específicos, relacionados entre sí. Se debe considerar la demanda de recurso humano y económico a la hora de implementar la restauración; por ello es de vital importancia la coordinación interinstitucional y el apoyo fundamental del Distrito.

Esta propuesta es una primera aproximación enfocada en la planeación de la restauración del río Tunjuelo, de modo que se requerirán estudios específicos para las zonas mencionadas, en la medida en que se avance en el proceso de diseño detallado de la restauración. Además, se debe tener presente que este tipo de proyectos muestra resultados de

mejoramiento visibles tras décadas de constante aplicación de medidas correctivas y acciones de educación que permitan una estrecha relación de ganancia mutua entre los habitantes y el río.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDREU, E. & CAMACHO, A. (2002). *Recomendaciones para la toma de muestras de agua, biota y sedimentos en humedales Ramsar*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Secretaría General del Medio Ambiente.
- ARIAS, C. (2001). Estimación del valor del regadío a partir del precio de la tierra. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 1 (1), 115-123.
- ARROYO DE LA FUENTE, M. P. (2002). *Introducción al arte egipcio*. Recuperado el 10 de marzo de 2011, de <http://www.liceus.com/cgi-bin/aco/ar/02/021111.asp>.
- AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND ENVIRONMENT AND CONSERVATION COUNCIL AND THE AGRICULTURE AND RESOURCE MANAGEMENT COUNCIL OF AUSTRALIA AND NEW ZEALAND (2000). *Australian and New Zealand water quality guidelines for fresh and marine water quality*. Canberra. Recuperado de [http://www.mincos.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0014/316121/contents.pdf](http://www.mincos.gov.au/__data/assets/pdf_file/0014/316121/contents.pdf).
- BARBOUR, M.; GERRITSEN, J.; SNYDER, B. & STRIBLING, J. (1999). *Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish* (2nd ed.). Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.
- BINDER, W. (2008). *River restoration: an European overview in rivers in urban areas*. Documento procedente del 4th ECRR Conference on River Restoration, Venecia, Isla S. Servolo, 95-99.
- BOOTH, D. B.; KARR, J. R.; SCHAUMAN, S.; KONRAD, C. P.; MORLEY, S. A.; LARSON, M. G. & BURGESS, S. J. (2004). Reviving urban streams: land use, hidrology, biology, and human behavior. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 1351-1364.
- BRINKHURST, R. & MARCHESE, M. (1993). *Guía para la identificación de oligoquetos acuáticos continentales de Sud y Centro América* (2a ed.). Santa Fe (Arg): Asociación de Ciencias Naturales del Litoral.
- BROWN, L. & BARNWELL, T. (1987). *Enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentación y manual del usuario*. s. l.: Environmental Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency.
- CAMACHO, L. & LEES, M. (1999). Multilinear discrete lag-cascade for channel routing. *Journal of Hidrology*, 30-47.
- CARREIRA, A. M. (2007). De las perturbadoras y conflictivas relaciones de los bogotanos con sus aguas. *Tabula Rasa* (6), 263-285.

- CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. & TAO, H. (2006). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality V2.04: Documentation and users manual*. Medford (USA): Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University.
- COMISIÓN MUNICIPAL DE AGUAS (1932). *Estudio de los proyectos de río Blanco, río Tunjuelo, río Teusacá: para el abastecimiento de agua para la ciudad*. Bogotá: Ediciones del Concejo.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA (CAR), (2010). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Tunjuelo*. Bogotá.
- COSTE, M. (1976). Contribution a l'écologie des diatomées benthiques et periphytiques de la Seine: distribution longitudinales et influence des pollutions. *Soc Hidrotechnique d'Frunce XIV Journ de l'Hydraulique*, 3 (9), 1-7.
- COVICH, A. (2006). Protección de la biodiversidad del bentos para asegurar procesamiento de materia orgánica y servicios del ecosistema: importancia de los invertebrados fragmentadores en las redes de drenaje. *Ecotropicos*, 19 (2), 109-127.
- DAILY, G. C. (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington: Island Press.
- DE GROOT, R. S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L. & WILLEMEN, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7 (3), 260-272.
- ; WILSON, M. A. & BOUMANS, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41 (3), 393-408.
- DÍEZ, J. M. (2010). *Curso-taller Determinación de Caudales Ecológicos: Metodología IFIM-PHABSIM*. Cali: Universidad de Valladolid y Grupo de Gestión y Apoyo a la Ingeniería Agrícola de Colombia.
- DOMÍNGUEZ, E.; ELVEBAKK, A.; MARTICORENA, C. & PAUCHARD, A. (2006). Plantas introducidas en el Parque Nacional Torres del Paine, Chile. *Gayana Bot*, 63 (2), 131-141.
- EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ (EAAB) & Ponce de León y Asociados S. A. (2005). *Estudios, formulación, diseños detallados y desarrollo del plan de manejo ambiental de los predios asociados al sistema de abastecimiento sur y de la cuenca alta del río Tunjuelo*. Bogotá.
- , (2011, mayo). *Conversaciones sobre el sistema de abastecimiento sur de la ciudad de Bogotá y el río Tunjuelo*. Bogotá.
- FERNÁNDEZ, H. & DOMÍNGUEZ, E. (2001). Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos sudamericanos: Entomotropica antes/ formerly. *Boletín de Entomología Venezolana*, 16 (3), 219.
- FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS (Fopae), (2010). *Información de la localidad de Tunjuelito: riesgo por inundaciones y eventos asociados*. Recuperado el 8 de febrero del 2011, de [http://svrdpae8.sire.gov.co/portal/page/portal/fopae/localidades/tunjuelito/tunjuelito\\_info](http://svrdpae8.sire.gov.co/portal/page/portal/fopae/localidades/tunjuelito/tunjuelito_info).
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL DE MÉXICO (2008). *The Mexico City Magdalena River Basin Comprehensive Management and Sustainable Usage Master Plan*. Ciudad de México.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E. & DE GROOT, R. (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Ecosistemas*, 16 (23), 4-14.
- GUHL, E. (1981). *La sabana de Bogotá y sus alrededores vegetativos*. Bogotá: Jardín Botánico José Celestino Mutis.

- HAWKINS, K. (2003). *Economic valuation of ecosystem services*. Minnesota: University of Minnesota. Recuperado de: [http://www.frc.state.mn.us/documents/council/landscape/SE%20Landscape/MFRC\\_Economic\\_Valuation\\_EcosystemServices\\_SE\\_2003-10-01\\_Report.pdf](http://www.frc.state.mn.us/documents/council/landscape/SE%20Landscape/MFRC_Economic_Valuation_EcosystemServices_SE_2003-10-01_Report.pdf).
- HMV INGENIEROS CONSULTORES (2005). *Estudio a nivel de factibilidad y diseño básico de las obras necesarias para la restitución del cauce del río Tunjuelo sector canteras*. Bogotá: Acueducto de Bogotá.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (Ideam), (1999). *Mediciones hidrométricas*. Bogotá: Subdirección de Hidrología.
- y Alcaldía Mayor de Bogotá (2007). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*. Bogotá.
- KARZULOVIC, D. (2008, 17 de febrero). *La recuperación del río Cheonggyecheon: una excusa perfecta para hacer ciudad*. Recuperado el 6 de marzo de 2011, de <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2008/02/17/la-recuperacion-del-rio-cheonggyecheon-una-excusa-perfecta-para-hacer-ciudad/>.
- KOBAYASHI, H. & MAYAMA, S. (1982). Most pollution-tolerant diatoms of severely polluted rivers in vicinity of Tokyo. *Japanese Journal of Phycology*, 30, 188-196.
- LANGE-BERTALOT, H. (1979). Pollution and tolerance of diatoms as a criterion of water quality estimation. *Nova Hedwigia*, 285-304.
- LAUB, B. & PALMER, M. (2009). Restoration ecology of rivers. En: G. E. Likens, *Encyclopedia of inland waters* (pp. 332-340). Nueva York: Elsevier.
- MARGALEF, R. (1999). *Los organismos como indicadores en la limnología*. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias.
- MAZARRA, G. J. & MAZARRA, A. (1982). *Contaminación de la parte baja del río Tunjuelo*. Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- MCCAFFERTY, W. (1981). *Aquatic entomology*. Boston: Science Books International.
- MERRITT, R. & CUMMINS, K. (1988). *An introduction to the aquatic insects of North America* (2a ed.). s. l.: Kendall/Hunt.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA (MAVDT) y Universidad de los Andes (2010). *Evaluación Económica de Impactos Ambientales en Proyectos, Manual Técnico*. Bogotá.
- OSORIO, J. (2007). *El río Tunjuelo en la historia de Bogotá 1900-1990*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Cultura, Recreación y Deporte.
- (2008). La historia del agua en Bogotá: una exploración bibliográfica sobre la cuenca del río Tunjuelo. *Memoria y Sociedad*, 12 (25), 107-116.
- PATRICK, R. (1973). Use of algae, especially Diatoms, in the assessment of water quality. *Biological Methods for the Assessment of Water Quality, ASTM*, 528, 76-95.
- PATT, H. (2007). *Review of the Development of Urban Rivers in Germany*. Documento procedente del II Seminario Internacional, Restauración de Ríos, Madrid, España.
- PAUL, M. J. & MEYER, J. L. (2001). Streams in the Urban Landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32, 333-365.
- PEDREGAL, D.; TAYLOR, C. & YOUNG, P. (2004). *System identification, time series analysis and forecasting, the captain toolbox handbook*. Lancaster: Centre for Research on Environmental Systems and Statistics, Lancaster University.

- PENNAK, R. (1989). Coelenterata. En: *Freshwater invertebrates of the United States: Protozoa to Mollusca* (3rd ed, pp. 110-127). New York: John Wiley and Sons.
- PEREA, A. (1984). *Control de inundaciones y posibilidades energéticas del río Tunjuelito*. Tesis para obtener máster en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- RISS, W.; OSPINA, R. & GUTIÉRREZ, J. (2002). Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la sabana de Bogotá. *Caldasia*, 24 (1), 135-156.
- RODRÍGUEZ, L. (2011). *Los servicios ambientales que provee el río Tunjuelo y la identificación de mecanismos para su valoración económica como insumo para la estructuración de una metodología de recuperación*. Bogotá: s. e.
- RUEDA-DELGADO, G. (2002). Método para estudio de comunidades bénticas fluviales. En: G. Rueda-Delgado, *Manual de métodos en limnología* (pp. 47-58). Bogotá: Asociación Colombiana de Limnología.
- SABATER, S.; SABATER, F. & ARMENGOL, J. (1988). Relationships between Diatom Assemblages and Physico-chemical variables in the River Ter (N. E. España). *Internationale Revue Gesamten Hydrobiologie*, 73, 171-179.
- SANABRIA, M.; CALVO, A. & RUEDA, G. (2002). *Protocolo para la ejecución de estudios hidrobiológicos en zonas de explotación forestal del Chocó*. Bogotá: s. e.
- SCHMELL, R. (2006). *Munich "Isar Plan"*. Munich: European Centre for River Restoration.
- SECRETARÍA DE PLANEACIÓN DE CUNDINAMARCA (2000). *Formulación del esquema de ordenamiento territorial municipio de Tabio, Cundinamarca*. Recuperado el 24 de noviembre de 2009, de: [http://www.planeacion.cundinamarca.gov.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/sig\\_doc\\_2000%20tabio%20Eot.pdf](http://www.planeacion.cundinamarca.gov.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/sig_doc_2000%20tabio%20Eot.pdf).
- SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE Y EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. (2008). *Calidad de sistema hídrico de Bogotá*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- SULLIVAN, M. (1999). Applied diatom studies in estuaries and shallow coastal environments. En: E. F. Stoermer & J. P. S. Smol (eds.), *The Diatoms: applications for the environmental and earth sciences* (pp. 334-351). Cambridge: Cambridge University Press.
- THATCHER, V. (2006). *Amazon fish parasites* (2nd ed.). Sofia-Moscow: Pensoft Publishers.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (2007). *Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá*. Bogotá.
- Y SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (2010). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2008-2009)*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL) y Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (2007). *Aquatic ecosystems. En: Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del canal del Dique: modelación matemática, hidráulica y de la calidad del agua del canal del Dique*. Bogotá.
- , Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y Jardín Botánico José Celestino Mutis (2007a). *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. Bogotá.
- , Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), (2009). *Modelación dinámica*

*de la calidad del agua del río Bogotá.* Bogotá. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY BOARD (WSTC), (2004). Valuing ecosystem services: Toward better environmental decision-making. Washington: National Academies Press.

ZAMBRANO, F. (2004). *Historia de la localidad de Tunjuelito: el poblamiento del valle medio del río Tunjuelo.* Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá, Localidad de Tunjuelito y Universidad Nacional de Colombia.

