



DESARROLLAR UN SISTEMA DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS RÍOS DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DEL ACUEDUCTO DE BOGOTÁ USANDO LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS.

CONTRATO No. 1 - 2 - 26200 - 0568 - 2021

PRODUCTO 3.

PERIODO: 24 FEBRERO AL 23 DE AGOSTO DE 2022



PROFESIONALES PARTICIPANTES

CPA INGENIERIA S.A.S	Director	Yasmin Plata Díaz
	Experto en biología-Categoría 5	Yasmín Plata Díaz
	Biólogo-Categoría 8	Laura Leandra Garzón Salamanca
	Biólogo-Categoría 7	María Isabel Ospina
	Ingeniero ambiental-Categoría 7	Diana del Pilar Roa Angarita
	Biólogo-Categoría 5	Paola Mora Cabezas Catalina Rodríguez Flórez
	Profesional ingeniería Categoría 5	Yisell Viviana Herrera Charry
	Profesional logístico y administrativo-Categoría 7	Julián Héctor López
	Director HSEQ	Víctor Moreno Reina
EAAB-ESP	Supervisor	Nubia Irley León López
	Asesor	Ángela María Zapata Anzola
	Asesor	Carlos Alberto Rivera Rondón
	Equipo de Aguas y Saneamiento Básico (DIE)	Ing. William Villamil Barahona Diana Carolina V. Pasito Lina Fernanda Mora

TABLA DE CONTENIDO

PRODUCTO 3.....	14
1. INTRODUCCIÓN: LAS DIATOMEAS Y LA BIOINDICACIÓN	14
2. ALCANCES.....	17
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1 BASE DE DATOS BIOLÓGICA.....	19
3.1.1 Preparación de las muestras.....	20
3.1.2 Oxidación de la muestra.....	20
3.1.3 Lavados	20
3.1.4 Preparación láminas	20
3.1.5 Montajes para Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	21
3.2 DETERMINACIÓN TAXONÓMICA Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN .	21
3.2.1 Análisis y conteos de las muestras.....	22
3.2.2 Análisis de la información Físicoquímica	23
4. RESULTADOS.....	25
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO.....	25
4.1.1 Sistema Norte	26
4.1.1.1 Sistema Chuza	26
4.1.1.2 Sistema Río Blanco	29
4.1.1.3 Sistema San Rafael.....	32
4.1.1.4 Sistema Tibitoc.....	35
4.1.2 Sistema Sur	38
4.1.2.1 Sistema Chisacá.....	38
4.1.2.2 Sistema Regadera.....	41
4.1.2.3 Sistema Yomasa	44
4.1.2.4 Sistema El Delirio	47
4.2 COMPOSICIÓN DE LAS COMUNIDADES DE DIATOMEAS EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DEL ACUEDUCTO	50
4.2.1 Sistema Norte	50
4.2.1.1 Sistema Chuza	50
4.2.1.2 Sistema Río Blanco	58
4.2.1.3 Quebrada Plumaraña	63
4.2.1.4 Sistema San Rafael.....	69
4.2.1.5 Sistema Tibitoc.....	78
4.2.2 Sistema Sur	83

4.2.2.1	Sistema Chisacá.....	83
4.2.2.2	Sistema Regadera.....	87
4.2.2.3	Sistema Yomasa	91
4.2.2.4	Sistema El Delirio	95
4.3	ANÁLISIS DEL PATRÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO	98
5.	DESARROLLO DEL MODELO DE BIOINDICACIÓN	101
5.1	METODOLOGÍA ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA – ice	101
6.	CORRELACIÓN DE LAS ESPECIES CON LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS-MODELO ACC	102
6.1	SISTEMA NORTE.....	103
6.2	SISTEMA SUR.....	106
6.3	SISTEMA TIBITOC-SAN RAFAEL	108
7.	CUANTIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA.....	110
7.1	VALORES ÓPTIMOS Y DE TOLERANCIA DE LAS ESPECIES.....	111
7.1.1	Óptimos y Tolerancias de las especies del Sistema Norte	111
7.1.2	Óptimos y Tolerancias de las especies del Sistema Sur	114
7.1.3	Óptimos y tolerancias de las especies del sistema San Rafael-Tibitoc.....	117
7.2	Índice de Calidad Ecológica	121
7.2.1	Sistema Norte	121
7.2.2	Sistema Sur-El Delirio	125
7.2.3	Sistema San Rafael-Tibitoc.....	127
7.2.4	Validación del Índice de Calidad Ecológica	130
7.2.4.1	Validación Índices Sistema Norte	130
7.2.4.2	Validación Índices Sistema Sur-El Delirio	131
7.2.4.3	Validación Índices Sistema San Rafael-Tibitoc.....	134
8.	PROCEDIMIENTO DEL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA	135
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO	139
10.	BIBLIOGRAFÍA	142
11.	PROTOCOLO DE MONITOREO, IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DIATOMEAS	148

12. CATÁLOGO DE DIATOMEAS	148
13. RIESGOS AMBIENTALES Y SST	148
13.1 SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO.....	148
13.1.1 Política de seguridad y salud en el trabajo	148
13.1.1.1 Objetivos y metas de seguridad y salud en el trabajo.....	148
13.1.2 Afiliaciones a seguridad social y riesgos laborales	149
13.1.3 Inducción y capacitación	149
13.1.3.1 Emergencias	150
13.1.3.2 Bioseguridad	150
13.1.3.3 Riesgo biomecanico.....	150
13.1.3.4 Copasst.....	150
13.1.4 Control de los riesgos.....	150
13.1.4.1 Osteomuscular y visual	150
13.1.4.2 Riesgo químico	150
13.1.4.3 Locativo	151
13.1.4.4 Promoción y prevención.....	151
13.1.4.5 Emergencias.....	152
13.1.4.6 Biológicos	152
13.2 BIOSEGURIDAD	153
13.2.1 Covid-19.....	153
13.2.2 Auto reportes de salud	153
13.2.2.1 Objetivo.....	153
13.2.2.2 Alcance	153
13.2.2.3 Metodología	153
13.3 GESTIÓN AMBIENTAL	156
13.4 MATRIZ DE RIESGOS	157
14. LECCIONES APRENDIDAS.....	161
ANEXOS	163

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LISTADO DE VARIABLES INCLUIDAS EN EL ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA INFORMACIÓN JUNTO CON LOS RESPECTIVOS ACRÓNIMOS USADOS EN LOS DISTINTOS GRÁFICOS.....	23
TABLA 2. IMÁGENES DE LAS ESPECIES MÁS REPRESENTATIVAS DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS DEL SISTEMA CHUZA.....	57
TABLA 3. IMÁGENES DE LAS ESPECIES DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS MÁS REPRESENTATIVAS DE SISTEMA RÍO BLANCO	68
TABLA 4. IMÁGENES DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS MÁS REPRESENTATIVAS DEL SISTEMA SAN RAFAEL	77
TABLA 5. IMÁGENES DE LAS ESPECIES MÁS REPRESENTATIVAS DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS ENREGISTRADAS EN SISTEMA TIBITOC.....	82
TABLA 6. IMÁGENES DE LAS ESPECIES MÁS REPRESENTATIVAS DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS DE SISTEMA CHISACÁ	86
TABLA 7. IMÁGENES DE LAS ESPECIES DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS MÁS REPRESENTATIVAS EN SISTEMA REGADERA	90
TABLA 8. IMÁGENES DE LAS ESPECIES MÁS REPRESENTATIVAS DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS DE SISTEMA YOMASA.....	94
TABLA 9. IMÁGENES DE LAS ESPECIES MÁS REPRESENTATIVAS DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS DEL SISTEMA EL DELIRIO.	98
TABLA 10. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA DISTENDIDO (DCA), RESUMEN DEL MODELO	98
TABLA 11. ESPECIES SIGNIFICATIVAS EN EL MODELO DCA CON SUS RESPECTIVOS ACRÓNIMOS (SP_ID). SIG: P=0 (***) , P= 0.001 (**), P= 0.01 (*), P= 0.05 (.).....	100
TABLA 12. ESPECIES SIGNIFICATIVAS EN EL MODELO ACC PARA EL SISTEMA NORTE. SIG: 0 ****' 0.001 ***' 0.01 **' 0.05 .' 0.1	105
TABLA 13. ESPECIES SIGNIFICATIVAS EN EL MODELO ACC PARA EL SISTEMA SUR. SIG: 0 ****' 0.001 ***' 0.01 *' 0.05 .' 0.1.....	107
TABLA 14. ESPECIES SIGNIFICATIVAS EN EL MODELO ACC PARA EL SISTEMA SAN RAFAEL-TIBITOC. SIG : 0 ****' 0.001 ***' 0.01 *' 0.05 .' 0.1	109
TABLA 15. GRADIENTES AMBIENTALES DEFINIDOS EN EL MODELO ACC PARA EL SISTEMA NORTE. SE RESALTAN LAS VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN CADA EJE.	111
TABLA 16. ÓPTIMOS Y TOLERANCIAS DE LAS ESPECIES CALCULADOS PARA CADA UNO DE LOS GRADIENTES AMBIENTALES ESTABLECIDOS EN EL MODELO ACC (TABLA 6) DEL SISTEMA NORTE.	111
TABLA 17. GRADIENTES AMBIENTALES DEFINIDOS EN EL MODELO ACC PARA EL SISTEMA SUR. SE RESALTAN LAS VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN CADA EJE	114
TABLA 18. ÓPTIMOS Y TOLERANCIAS DE LAS ESPECIES CALCULADOS PARA CADA UNO DE LOS GRADIENTES AMBIENTALES ESTABLECIDOS EN EL MODELO ACC (TABLA 8) DEL SISTEMA SUR	115
TABLA 19. GRADIENTE AMBIENTAL DEFINIDO EN EL MODELO ACC ESTABLECIDO PARA EL SISTEMA SAN RAFAEL TIBITOC TENIENDO EN CUENTA TODOS LOS SISTEMAS EVALUADOS. SE RESALTAN LAS VARIABLES CON MAYOR CORRELACIÓN EN EL PRIMER EJE.....	117
TABLA 20. ÓPTIMOS Y TOLERANCIAS DE LAS ESPECIES CALCULADOS PARA CADA UNO DE LOS GRADIENTES AMBIENTALES ESTABLECIDOS EN EL MODELO ACC () DEL SISTEMA SAN RAFAEL-TIBITOC	117
TABLA 21. LÍMITES DE CALIDAD ESTABLECIDOS PARA CADA UNO DE LOS ICE SEGÚN SEGNINI (2003) Y COLORES ASIGNADOS DE ACUERDO CON UNION EUROPEAN (2005). .	121
TABLA 22. RANGOS DE CALIDAD PARA CADA UNO DE LOS ÍNDICES DEL SISTEMA NORTE.	123
TABLA 23. RANGOS DE CALIDAD PARA CADA UNO DE LOS ÍNDICES DEL SISTEMA SUR. .	126

TABLA 24. RANGOS DE CALIDAD DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA-ICE PARA EL SISTEMA SAN RAFAEL - TIBITOC.....	128
TABLA 24. MATRIZ DE RIESGOS	160

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. (A.) ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) GENERAL PARA LAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ.	25
FIGURA 2. (B.) ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) GENERAL PARA LAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ.	26
FIGURA 3. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA NORTE – ZONA CHUZA	27
FIGURA 4. VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA NORTE -ZONA CHUZA	28
FIGURA 5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISCOQUÍMICAS DEL TODOS LOS RÍOS DEL SISTEMA NORTE- ZONA CHUZA	29
FIGURA 6. VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA NORTE -ZONA RIO BLANCO	30
FIGURA 7. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA NORTE – ZONA RÍO BLANCO	31
FIGURA 8. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISCOQUÍMICAS DEL TODOS LOS RÍOS DEL SISTEMA NORTE – ZONA RÍO BLANCO.....	32
FIGURA 9. VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA NORTE -ZONA SAN RAFAEL	33
FIGURA 10. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA NORTE – ZONA SAN RAFAEL	34
FIGURA 11. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISCOQUÍMICAS DE LOS RÍOS DEL SISTEMA NORTE – ZONA SAN RAFAEL	35
FIGURA 12. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA TIBITOC	36
FIGURA 13. VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA TIBITOC	37
FIGURA 14. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISCOQUÍMICAS DE LOS RÍOS DEL SISTEMA TIBITOC	38
FIGURA 15. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA SUR – ZONA CHISACÁ.....	39
FIGURA 16 VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA SUR – ZONA CHISACÁ.....	40
FIGURA 17. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISCOQUÍMICAS DEL SISTEMA SUR - ZONA CHISACÁ.....	41
FIGURA 18. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA SUR – ZONA REGADERA	42
FIGURA 19. VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA SUR – ZONA REGADERA	43
FIGURA 20. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISCOQUÍMICAS DEL SISTEMA SUR - ZONA REGADERA.	44
FIGURA 21. VARIABLES FISCOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA SUR – ZONA YOMASA.	45
FIGURA 22. VARIABLES FISCOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA SUR – ZONA YOMASA.	46

FIGURA 23. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS DEL SISTEMA SUR - ZONA YOMASA	46
FIGURA 24. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS DE TODOS LOS RÍOS DEL SISTEMA SUR	47
FIGURA 25. VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA EL DELIRIO	48
FIGURA 26. VARIABLES FISICOQUÍMICAS RELACIONADAS CON MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES EN LAS ESTACIONES DEL SISTEMA EL DELIRIO.....	49
FIGURA 27. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS DEL SISTEMA EL DELIRIO	49
FIGURA 28. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNEROS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE LA ZONA CHUZA-SISTEMA NORTE.	51
FIGURA 29. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE LA QUEBRADA BABILONIA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	52
FIGURA 30. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO CHUZA- SECTOR PUENTE. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	53
FIGURA 31. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO GUATÍQUÍA AGUAS ARRIBA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	54
FIGURA 32. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO GUATÍQUÍA – AGUAS ABAJO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	55
FIGURA 33. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA LETICIA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	56
FIGURA 34. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE DESCARGA DE FONDO- EMBALSE DE CHUZA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	56
FIGURA 35. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNEROS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO BLANCO-SISTEMA NORTE.....	58
FIGURA 36. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA BLANCA-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	59
FIGURA 37. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA EL MANGÓN-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	60
FIGURA 38. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA COLORADA I Y COLORADA II-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	60
FIGURA 39. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA PIEDRAS GORDAS-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	61
FIGURA 40. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA LA HORQUETA I-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	62
FIGURA 41. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA CALOSTROS -SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	62
FIGURA 42. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA CORTADERA -SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	63

FIGURA 43. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA PLUMARAÑA-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	64
FIGURA 44. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA PEÑAS BLANCAS-SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	64
FIGURA 45. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA CARRASCALES -SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	65
FIGURA 46. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA SIBERIA I -SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	66
FIGURA 47. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA CHOCOLATAL -SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	66
FIGURA 48. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA BUITRAGO -SISTEMA RÍO BLANCO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	67
FIGURA 49. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNEROS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE SISTEMA NORTE-SAN RAFAEL.	70
FIGURA 50. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE NACIMIENTO RÍO TEUSACÁ -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	71
FIGURA 51. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE PUENTE ADOBES -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	72
FIGURA 52. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE PUENTE LA VIOLETA -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	72
FIGURA 53. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE LA CABAÑA -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	73
FIGURA 54. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE ENTRADA LA CALERA -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	74
FIGURA 55. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE PUENTE SOPÓ -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	74
FIGURA 56. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE LA CABAÑA -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	75
FIGURA 57. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE PUENTE FRANCIS -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	76
FIGURA 58. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE DESCARGA DE FONDO -SISTEMA SAN RAFAEL. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	76
FIGURA 59. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNEROS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE SISTEMA TIBITOC-SISTEMA NORTE.....	79
FIGURA 60. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO BOGOTÁ-ANTES DEL SISGA-SISTEMA TIBITOC. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	80

FIGURA 61. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO BOGOTÁ-ANTES DEL SISGA-SISTEMA TIBITOC. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	80
FIGURA 62. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO BOGOTÁ-ANTES DEL SISGA-SISTEMA TIBITOC. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	81
FIGURA 63. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNERO PRESENTE EN LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS REGISTRADA EN EL SISTEMA CHISACÁ.	83
FIGURA 64. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO MUGROSO-SISTEMA CHISACÁ. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%	84
<i>FIGURA 65. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO CHISACÁ-SISTEMA CHISACÁ. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%</i>	<i>85</i>
FIGURA 66. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNERO PRESENTE EN LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS REGISTRADA EN EL SISTEMA LA REGADERA.....	87
FIGURA 67. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO CURUBITAL-SISTEMA REGADERA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	88
FIGURA 68. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO CHISACÁ-REGADERA, SISTEMA REGADERA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	89
FIGURA 69. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE RÍO TUNJUELO- SISTEMA REGADERA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	90
FIGURA 70. NÚMERO DE ESPECIES POR GÉNERO REGISTRADOS EN LA QUEBRADA YOMASA EN EL SISTEMA YOMASA.	92
FIGURA 71. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA YOMASA AGUAS ARRIBA-SISTEMA YOMASA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	93
FIGURA 72. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA YOMASA AGUAS ABAJO-SISTEMA YOMASA. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	93
FIGURA 73. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE SISTEMA EL DELIRIO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	95
FIGURA 74. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE DECANTADORES SAN CRISTÓBAL-SISTEMA EL DELIRIO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	96
FIGURA 75. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE INTERSECCIÓN QUEBRADA LA UPATA Y QUEBRADA PALO BLANCO-SISTEMA EL DELIRIO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	97
FIGURA 76. ABUNDANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES DE DIATOMEAS REGISTRADAS EN LAS MUESTRAS DE QUEBRADA LA OSA-SISTEMA EL DELIRIO. ESPECIES CON ABUNDANCIAS MAYORES O IGUALES AL 5%.	97
FIGURA 77. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA DISTENDIDO (DCA) PARA LAS ESPECIES DE DIATOMEAS DE TODA EL ÁREA DE ESTUDIO. VER ACRÓNIMOS EN LA TABLA 2.	99
FIGURA 78 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA PARA LAS MUESTRAS DEL SISTEMA NORTE.	104
FIGURA 79. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA PARA LAS MUESTRAS DEL SISTEMA SUR Y EL DELIRIO.....	106
FIGURA 80 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA PARA LAS MUESTRAS DEL SISTEMA SAN RAFAEL Y TIBITOC.	109

FIGURA 81 ESQUEMA DE LA SECUENCIA DE ANÁLISIS Y CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA.....	110
FIGURA 82. VARIACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD ECOLÓGICA ESTABLECIDOS PARA CADA GRADIENTE AMBIENTAL DEL SISTEMA NORTE.	123
FIGURA 83. RELACIÓN DEL ÍNDICE CON LOS SCORES AMBIENTALES DEL SISTEMA NORTE	124
FIGURA 84. CORRELACIÓN DE LOS ÍNDICES CON LAS VARIABLES AMBIENTALES Y EL ÍNDICE ICA PARA EL SISTEMA NORTE. ICE-MI: ÍNDICE DE MINERALIZACIÓN, ICE-FE: ÍNDICE HIERRO, ICE-NU: ÍNDICE DE NUTRIENTES, SCOR.M: SCORES MINERALIZACIÓN, SCOR.FE: SCORES HIERRO, SCOR.NU: SCORES NUTRIENTES.	124
FIGURA 85. VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA PARA CADA GRADIENTE AMBIENTAL DEL SISTEMA SUR-EL DELIRIO	126
FIGURA 86. RELACIÓN DEL ÍNDICE CON LOS SCORES AMBIENTALES DEL SISTEMA NORTE	127
FIGURA 87. CORRELACIÓN DE LOS ÍNDICES CON LAS VARIABLES AMBIENTALES Y EL ÍNDICE ICA PARA EL SISTEMA NORTE. ICE-MIN: ÍNDICE DE MINERALIZACIÓN, ICE-FE: ÍNDICE HIERRO, ICE-NU: ÍNDICE DE NUTRIENTES, SCORM: SCORES MINERALIZACIÓN, SCORFE: SCORES HIERRO, SCORNU: SCORES NUTRIENTES.	127
FIGURA 88. VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA-ICE PARA EL SISTEMA SAN RAFAEL -TIBITOC TOMANDO EN CUENTA EL GRADIENTE AMBIENTAL DE TODOS LOS SISTEMAS EVALUADOS.	128
FIGURA 89. RELACIÓN DEL ÍNDICE CON LOS SCORES AMBIENTALES PARA EL SISTEMA SAN RAFAEL-TIBITOC, TENIENDO EN CUENTA EL GRADIENTE AMBIENTAL DE TODOS LOS SISTEMAS EVALUADOS (ICE-TODOS).....	129
FIGURA 90. CORRELACIÓN DEL ICE CON LAS VARIABLES AMBIENTALES Y EL ÍNDICE ICA PARA EL SISTEMA SAN RAFAEL-TIBITOC. SCORT: SCORES DEL PRIMER EJE AMBIENTAL TENIENDO EN CUENTA TODOS LOS SISTEMAS EVALUADOS.	129
FIGURA 91. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELO DE BIOINDICACIÓN PARA EL SISTEMA NORTE POR MEDIO DEL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES PONDERADOS WAPLS.....	131
FIGURA 92. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELO DE BIOINDICACIÓN PARA EL SISTEMA SUR Y EL DELIRIO POR MEDIO DEL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES PONDERADOS-WAPLS.....	132
FIGURA 93. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CALIDAD OBTENIDOS MEDIANTE EL ICE-MINERALIZACIÓN ENTRE LAS MUESTRAS DEL MODELO Y EL CONJUNTO DE MUESTRAS PARA VALIDACIÓN DEL SISTEMA SUR.	133
FIGURA 94. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CALIDAD OBTENIDOS MEDIANTE EL ICE-FE ENTRE LAS MUESTRAS DEL MODELO Y EL CONJUNTO DE MUESTRAS PARA VALIDACIÓN DEL SISTEMA SUR.	133
FIGURA 95. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CALIDAD OBTENIDOS MEDIANTE EL ICE-NU ENTRE LAS MUESTRAS DEL MODELO Y EL CONJUNTO DE MUESTRAS PARA VALIDACIÓN DEL SISTEMA SUR.	134
FIGURA 96. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELO DE BIOINDICACIÓN PARA EL SISTEMA SUR Y EL DELIRIO POR MEDIO DEL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES PONDERADOS-WAPLS.....	134
FIGURA 97. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CALIDAD OBTENIDOS MEDIANTE EL ICE ENTRE LAS MUESTRAS DEL MODELO Y EL CONJUNTO DE MUESTRAS PARA VALIDACIÓN DEL SISTEMA SAN RAFAEL-TIBITOC.....	135
FIGURA 98. ORGANIZACIÓN DE LA MATRIZ DE CONTEOS JUNTOS CON LOS ÓPTIMOS Y TOLERANCIAS DE LAS ESPECIES PARA EL CÁLCULO DEL ICE. LAS ESPECIES DE LOS CONTEOS DEBEN ESTAR ORDENADAS DE LA MISMA MANERA QUE EL LISTADO DE ESPECIES CON LOS ÓPTIMOS Y TOLERANCIAS.....	136
FIGURA 99. CÁLCULO DEL PROMEDIO PONDERADO DE LAS ESPECIES EN LA EXPRESIÓN DEL NUMERADOR.....	137

FIGURA 100. SUMATORIA DEL PROMEDIO PONDERADO DE LAS ESPECIES EN EL NUMERADOR..... 137

FIGURA 101. CÁLCULO DEL PROMEDIO PONDERADO DE LAS ESPECIES EN LA EXPRESIÓN DEL DENOMINADOR. 138

FIGURA 102. SUMATORIA DEL PROMEDIO PONDERADO DE LAS ESPECIES EN LA EXPRESIÓN DEL DENOMINADOR. 138

FIGURA 103. CÁLCULO FINAL DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA 139

FIGURA 104. PERSONAL DIATOMEAS 153

FIGURA 105. SÍNTOMAS PRESENTADOS..... 154

FIGURA 106. CONTACTO CON PERSONAS POSITIVAS 154

FIGURA 107. MODALIDAD DE TRABAJO..... 155

FIGURA 108. CONDICIONES DE SALUD 156

FIGURA 107. GESTIÓN AMBIENTAL 157

FIGURA 110. MATERIALIZACIÓN RIESGOS..... 158

FIGURA 110. NIVEL DE RIESGOS 158

FIGURA 110.SEGUIMIENTO MATERIALIZACIÓN..... 159

INFORME EJECUTIVO PRODUCTO 3

OBJETO DEL CONTRATO	DESARROLLAR UN SISTEMA DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS RÍOS DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DEL ACUEDUCTO DE BOGOTÁ USANDO LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS.
NÚMERO DEL CONTRATO	1 - 2 - 26200 - 0568 - 2021
CONTRATISTA	COMPAÑÍA DE PROYECTOS AMBIENTALES E INGENIERÍA S.A.S - CPA INGENIERÍA S.A.S
PLAZO DE EJECUCIÓN	DOCE (12) MESES y DOS MESES DE PRÓRROGA

PRODUCTO 3.

1. INTRODUCCIÓN: LAS DIATOMEAS Y LA BIOINDICACIÓN

Las diatomeas son microalgas fototróficas unicelulares o coloniales, cuyo rasgo característico es la presencia de una pared celular de sílice denominada frústulo, la cual está compuesta por dos piezas llamadas valvas. Constituyen uno de los grupos más diversos dentro del perifiton representando en conjunto un eslabón fundamental en las redes tróficas y ciclos biogeoquímicos en los ecosistemas acuáticos (Lamberti, 1996).

Dentro del perifiton, las diatomeas se les reconoce como un excelente grupo indicador de contaminación en razón a varias características ecológicas, como cortos tiempos de generación y responder de manera directa y rápida a la mayoría de cambios químicos y biológicos (Stevenson *et al.*, 1999). Por ser fisiológicamente sensibles a los cambios en las condiciones del hábitat y a las variaciones físicas y químicas del agua, su composición, abundancia relativa y biomasa pueden ser asociadas a una variable en particular (Stevenson *et al.*, 1999), razón por la que son ampliamente usadas en bioindicación.

La bioindicación es una herramienta ampliamente utilizada en el mundo, principalmente en agencias gubernamentales europeas - desde hace más de veinte años- para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos, mediante la implementación de índices bióticos. Dichos índices parten de la cuantificación de la sensibilidad de las especies al disturbio antrópico como eutroficación, contaminación orgánica, acidificación, sedimentación, entre otros.

Si bien la química del agua ha sido ampliamente utilizada como indicador de calidad, dicha métrica aporta información puntual de las condiciones del cuerpo del agua, mientras que los organismos, proporcionan un registro continuo de la calidad del medio ambiente integrando todos los parámetros tanto bióticos y abióticos de su hábitat en el tiempo. Es por esto que en los sistemas de bioindicación, la vida es el principal monitor de la calidad del medio ambiente.

El eje central de la valoración de la calidad del agua en la bioindicación se basa en la cuantificación de los óptimos y tolerancias de las especies a lo largo del gradiente ambiental estudiado. Un gradiente ambiental hace referencia al rango de valores que alcanza una variable (o conjunto de variables) en un determinado ecosistema o cuenca. Por lo general, las especies pueden colonizar un rango de condiciones ambientales, sin embargo, en la mayoría de los casos solo ocupan de manera preferente una parte del espectro ambiental disponible. Como resultado de sus adaptaciones fisiológicas pueden ser más (o menos) competitivas en determinados hábitats, observándose así diferentes patrones o curvas de respuesta. En un sistema lótico, por ejemplo, con determinada concentración de fósforo disuelto, el taxón más abundante en ese punto tendrá su óptimo en dicha concentración.

Diferentes especies poseen óptimos diferentes a lo largo de un mismo gradiente e incluso una especie puede tener una tolerancia estrecha para el gradiente de una variable o una tolerancia amplia para el gradiente de otra variable (Guisan *et al.*, 2017). Aquellas especies con tolerancia amplia suelen ser consideradas poco sensibles a los cambios del hábitat.

Por lo tanto, la evaluación de los óptimos de las especies requiere de muestreos en un rango de valores que van desde aguas muy limpias a aguas muy contaminadas.

El uso de comunidades del perifiton como indicadores del estado de arroyos comenzó hacia finales de la década de 1980, teniendo como base los estudios realizados por Kolkwitz & Marsson (1902) que introdujeron términos específicos para organismos que habitan aguas contaminadas (Saprobio) y para organismos que habitan aguas limpias (Katarobio). En dicho sistema se usó el término Saprobiedad (aguas contaminadas por aguas residuales domésticas), para hacer referencia a aguas poluídas y para el cual realizaron el primer gran listado de especies indicadoras para cada nivel de polución. En dicho sistema la sola presencia de ciertas especies determinaba el grado de contaminación del agua, naciendo así el primer concepto de organismo indicador.

Los índices diatómicos desarrollados en la década de 1980 incorporaron la valoración cuantitativa de la tolerancia y el valor indicador de las especies a la polución, redefiniendo así el concepto de especie indicadora, dado que una especie puede encontrarse en diferentes niveles de calidad. Ejemplo de ellos son los índices de Leclercq & Manquet (1987), Kobayasi & Mayama (1989), Descy & Coste (1991), así como el Índice de Polusensibilidad específica (IPS) (Cemagref, 1982), uno de los más usados en Europa. En los años 1990 se dio un mayor auge de los índices diatómicos como el EPI-D Eutrophication/Pollution Index (Descy & Coste, 1990), el TDI- Trophic Diatom Index (Kelly & Whitton, 1995) y el IBD- Biological Diatom Index (Lenoir & Coste 1996), todos de amplio uso actualmente en Europa y Asia.

Los estudios de diatomeas en Colombia se centran en aspectos taxonómicos y ecológicos. A nivel taxonómico aunque ya se ha avanzado en el conocimiento de las especies (Blanco, Muñoz-López, & Rivera-Rondón, 2020; Medina-Tombé, Vouilloud, & Sala, 2019; S. Sala, Vouilloud, Plata-Díaz, Pedraza, & Pimienta, 2014; Silvia E Sala, Duque, Núñez-Avellaneda, & Lamaro, 2002; Silvia E Sala, Ramírez, & Plata, 2008; Silvia Estela Sala, Duque, Nuñez-Avellaneda, & Lamaro, 1999; Silvia Estela Sala, Duque, Núñez-avellaneda, & Lamaro, 2002; Simonato, Kociolek, Sala, Díaz, & Núñez-Avellaneda, 2020; Vouilloud, Amelia A. Sala, Avellaneda, & Duque, 2010; Vouilloud, Amelia A.Sala, Núñez-Avellaneda, Montoya-Moreno, & Duque, 2014; Amelia Alejandra Vouilloud et al., 2016), se cree que aún existe un alto número de especies aún no descritas para la ciencia. A nivel ecológico los estudios que evalúan los cambios en composición a lo largo del gradiente ambiental se centran en ríos de alta montaña y de páramo (Díaz-Quirós & Rivera-Rondón, 2004; Ramírez & Plata-Díaz, 2008). De los estudios en ríos de alta montaña varios de ellos se centran en cambios temporales en la biomasa y la diversidad con la variabilidad en el flujo y el periodo hidroclimático (Rivera & Donato, 2008; Zapata & Donato, 2008), otros se centran en aspectos sobre sucesión (Martínez & Donato, 2003), y un mayor número de estudios sobre composición y estructura (Hernández-Atilano et al., 2005; Pedraza-Garzón & Donato-Rondon, 2011) a nivel espacial y/o temporal.

El desarrollo de índices bióticos con diatomeas en el país es incipiente. El índice desarrollado por Castro-Roa & Pinilla-Agudelo (2014), quienes propusieron un índice de diatomeas para humedales urbanos teniendo como base valores de calidad química registrados. Otro trabajo más reciente, es el Índice de Calidad Ecológica (ICE), desarrollado por Forero et al (2014) para macroinvertebrados e implementado posteriormente para el perifiton por Hernández et al (2020), el cual integra toda la comunidad perifítica

estableciendo óptimos y tolerancias de las especies en respuesta al grado de correlación de las abundancias de las especies con el gradiente ambiental. Dicho índice ha sido adoptado por el Ministerio del Medio Ambiente (MADS, 2018) como método para el desarrollo de sistemas de calidad biológicos basado en cualquier comunidad hidrobiológica.

El desarrollo de índices en el mundo ha sido posible gracias a la consolidación de bases de datos regionales creadas como resultado del seguimiento y monitoreo de los ecosistemas que hacen las agencias del agua en cada país. En Colombia, el establecimiento de sistemas de monitoreo hace parte de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) y uno de los instrumentos en la Política Nacional del Recurso Hídrico (PNRH) es la implementación de metodologías que conlleven a cuantificar de manera práctica la calidad del agua. La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá viene desarrollando el monitoreo de seguimiento limnológico de sus fuentes abastecedoras desde el año 2004 y con ello ha construido una nutrida base de datos de monitoreo fisicoquímico y biológico en sus 31 corrientes, varias de las cuales alimentan los embalses Chuza, Chisacá, San Rafael y La Regadera, o son captadas para potabilización, consolidando una base de información apropiada para la implementación de índices bióticos.

Por tanto, surge la necesidad de proponer un índice que involucre a las especies de diatomeas registradas en las fuentes de abastecimiento del Acueducto de Bogotá como referente nacional en ríos de alta montaña.

2. ALCANCES

El presente proyecto tiene como objetivo general, desarrollar un sistema de indicadores de la calidad del agua de los ríos del sistema de Abastecimiento del Acueducto de Bogotá a partir de la comunidad de diatomeas, ampliando la batería de indicadores de la calidad del agua, de tal forma que permita detectar los cambios en la variabilidad climática y de la calidad a través de la composición (taxonomía) y la densidad de sus organismos.

Se realizó a través de una consultoría con la Compañía de Proyectos Ambientales e Ingeniería S.A.S “CPA INGENIERÍA S.A.S” CPA dentro del Contrato N° 1-2-26200-0568-2021 cuyo objeto es “Desarrollar un sistema de indicadores de la calidad de agua de los ríos del sistema de Abastecimiento del Acueducto de Bogotá usando la comunidad de diatomeas ampliando la batería de indicadores de la calidad del agua, de tal forma que permita detectar cambios en la variabilidad climática y de la calidad a través de la composición (taxonomía) y densidad de este grupo” en un plazo de 12 meses con prórroga de 2 meses: del 24 de junio al 23 de agosto.

Como objetivos específicos se propusieron:

- Establecer patrones en la estructura de las comunidades de diatomeas en ríos del Sistema de Abastecimiento del Acueducto de Bogotá.
- Relacionar la estructura de las comunidades de diatomeas con algunas características físicas, químicas e hidrológicas en los ríos estudiados.
- Desarrollar un sistema de indicadores propio para el Acueducto de Bogotá.

Esto con el fin de identificar riesgos en la calidad del agua de las fuentes de suministro, por posible afectación de nutrientes y materia orgánica reflejados en la composición y densidad de las diatomeas, además, obtener información técnica para requerimientos ambientales y normativos y cumplir con el Requerimiento No. 44 del ANLA: “Presentar un análisis detallado del seguimiento de los cambios en la composición de la comunidad perfitica algal y su relación con el incremento de nutrientes en la quebrada Babilonia para el período de septiembre de 2015 en cumplimiento con el Numeral 32 del Artículo Primero del Auto 1093 de 31 de marzo de 2017”

El desarrollo del proyecto se ejecutó mediante la generación de tres (3) productos:

Producto	Resultados entregados
Producto 1	<ul style="list-style-type: none"> • Se elaboró el estado del arte del conocimiento de las diatomeas a nivel nacional e internacional en sistemas de alta montaña. • Se revisaron de manera preliminar de muestras históricas (conteo de valvas): preparación de muestras – lavado, preparacion de muestras – micropreparados. Se llevó a cabo la revisión, conteo, fotografías, medición, detalles de caracteres diagnósticos, Listas de especies y morfotipos. Se realizó el Análisis de información del seguimiento limnológico de la EAAB-ESP.
	<ul style="list-style-type: none"> • Se llevó a cabo la construcción de la base de datos en donde se relacione la clasificación taxonómica de la base de datos de los morfotipos (diatomeas) hallados en sus caracteres diagnósticos

Producto	Resultados entregados
<p>Producto 2</p>	<p>(catálogo) así como el registro fotográfico de todos los morfotipos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se elaboró la base de datos en donde se relacionó la lista de especies de diatomeas (composición de la comunidad) con la abundancia relativa en los diferentes puntos y fechas de muestreo revisadas a la fecha. • Se realizó el resumen estadístico de todas las variables fisicoquímicas y se corrió el análisis de Componentes Principales con los parámetros físicos y químicos por zonas de muestreo de los ríos de abastecimiento de la EAAB-ESP.
<p>Producto 3</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizó la correlación de las especies con el gradiente ambiental mediante un Análisis de Correspondencia Canónica • Se realizó la formulación del indicador propio para la EAAB-ESP basado en las diatomeas identificadas en las fuentes superficiales de suministro de la EAAB-ESP. • Se realizó la validación o correlación del indicador con los datos de parámetros físicoquímicos de las fuentes superficiales de suministro de la EAAB-ESP. • Se elaboró el protocolo para el monitoreo de las comunidades de diatomeas como indicadores en las fuentes de abastecimiento de la EAAB-ESP. • Se diseñó un catálogo iconográfico de las diatomeas presentes en las fuentes superficiales de abastecimiento de la EAAB-ESP. • Se concertó la presentación final con el objetivo de revisar y hacer los ajustes en el mes doce, cumpliendo con las actividades y productos en el plazo de ejecución. • Se realizó el informe ejecutivo. • Se establecieron las lecciones aprendidas. • Se realizó el intercambio de conocimiento para todas las áreas competentes en el Tema de la Empresa. Todos los productos cumplirán con lo estipulado en las Normas del SISTEC: NS-013; NS-048; NS-172.

3. METODOLOGÍA

3.1 BASE DE DATOS BIOLÓGICA

Las muestras utilizadas para el desarrollo del proyecto fueron obtenidas de los monitoreos limnológicos que ha realizado el Acueducto de Bogotá por un período de 13 años durante el desarrollo del proyecto “Seguimiento limnológico de las fuentes de agua que sirven de suministro a la ciudad de Bogotá – EAAB-ESP” motivo por el cual no fue necesario hacer monitoreo para este proyecto. Estas muestras se encuentran en custodia en la Colección Limnológica de la Pontificia Universidad Javeriana y con la información de allí sustraída se consolidó la base de datos.

Fueron entregadas el día viernes 16 de julio/21 mediante oficio S.2610001-2021-208104 411 muestras de perifiton y 32 de fitoplancton de las fuentes lóxicas y lénticas que hacen parte del suministro de la EAAB-ESP, siendo CPA INGENIERÍA SAS un laboratorio acreditado ante IDEAM, se realizó la recepción de las muestras según lo estipulado en la Norma 17025 de 2017. La recepción y verificación de las muestras fue realizada los días 19, 21 y 22 de julio de 2021 registrando los datos de las muestras en el formato LF49 CADENA DE CUSTODIA Y VIGILANCIA MATRIZ AGUA V01 (**Anexo 1**).

Con el total de las muestras recibidas, se siguieron criterios técnicos de selección, para establecer si eran aptas para realizar los montajes requeridos para la realización de micro preparados y la posterior determinación taxonómica. Dichos criterios fueron: volumen y principalmente representatividad. La representatividad se estableció teniendo en cuenta el porcentaje de valvas vivas en la muestra mediante un microscopio Leica DM300. En caso de observarse más del 50 % de frústulos vacíos, baja densidad y sin posibilidad de concentrar la muestra, no se utilizaba la muestra. Todos los protocolos de calidad fueron orientados por la directora del proyecto para definir si podían ser utilizadas.

A cada una de las muestras entregadas se les asignó un código llamado Sample ID compuesto por el año de muestreo y el número consecutivo suministrado por el Acueducto de Bogotá. Este código fue utilizado en todas las etapas del proyecto para asegurar la trazabilidad de la información.

Toda la información relacionada con el preconteo, montajes permanentes y envíos de los preparados para su conteo por parte de la Bióloga Categoría 8, fueron registrados en el archivo “Formato_Preparados.xls” (**Anexo 2**).

Una vez escogidas las muestras aptas se procedió a realizar en laboratorio el siguiente procedimiento con cada muestra:

3.1.1 Preparación de las muestras

Se tomaron 5 ml de la muestra y 7 ml en el caso de muestras con baja densidad de diatomeas. Con el objetivo de evitar contaminación cruzada, cada pipeta, frasco o tubo estuvo marcado con el código asignado a cada muestra. Luego, se retiró la solución fijadora realizando lavados sucesivos, y centrifugando a 1000 revoluciones por minuto durante 15 min, para finalmente remover el sobrenadante.

3.1.2 Oxidación de la muestra

Para el proceso de digestión se utilizó peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% en un horno a una temperatura de 80°C. Una vez eliminado el reactivo fijador, se agregaron 1-3 gotas de HCl 1N, para acelerar la reacción y 10 ml de peróxido El volumen total usado de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), tiempo y temperatura requeridos para la digestión dependió de la cantidad de materia orgánica presente en la muestra. En muestras con gran cantidad de materia orgánica la reacción se llevó a cabo en horno, agregando un volumen de H_2O_2 a un volumen de muestra en proporción 1:1 y se observó. IDEAM (2017) sugiere que, cuando la muestra dejaba de reaccionar con el peróxido se debía sustituir el H_2O_2 hasta completar 5 volúmenes de la muestra inicial. Luego, el tubo Falcon se llevó al horno a una temperatura de 80°C y la oxidación tardó entre 24 horas a varios días, dependiendo de la cantidad de materia orgánica.

Se verificó la pausa de la reacción, se centrifugó y se dispuso en el horno, cuando se observó pellet de color Blanco se retiró del horno. Luego de centrifugar a 1000 rpm por 15 minutos se tomó una alícuota de la muestra para verificar si persistía la materia orgánica. Al finalizar la digestión se adicionaron 13 gotas de HCl 2N para eliminar el carbonato de calcio en caliente para abrir las valvas (IDEAM 2017).

3.1.3 Lavados

Los productos químicos residuales fueron eliminados por medio de sucesivos lavados con agua destilada, hasta alcanzar un pH cercano a 7, el cual fue verificado con tiras de papel indicador de pH. Es importante aclarar que se realizaron los lavados necesarios, generalmente 5 lavados, hasta alcanzar el pH deseado.

3.1.4 Preparación láminas

Se observó una preparación al microscopio y si se presentó alta densidad de diatomeas, se diluyó agregando más agua; si la preparación tenía baja densidad de diatomeas, se centrifugó y se re-suspendió en un volumen menor al que se tenía inicialmente. Con esta muestra se procedió a realizar la preparación de láminas. Sobre una lámina cubreobjetos se dispuso 1-2 ml de muestra con una pipeta Pasteur y se distribuyó de manera homogénea (IDEAM, 2021).

La evaporación de la muestra se aceleró en una plancha de calentamiento a 5°C por encima de la temperatura ambiente. Se verificó que la distribución de las valvas en la lámina cubreobjetos permitiera su conteo en un campo de 400X, es decir, que las valvas no

estuvieran superpuestas y se pudieran observar con claridad las características morfológicas.

Las láminas portaobjetos marcadas con el código de la muestra y se colocaron sobre la placa de calentamiento (máximo 130°C) depositando sobre ellas 1-3 gotas del medio de montaje. Cuando se observó la formación de burbujas en el medio de montaje Naphrax®, se colocó la lámina cubreobjetos de tal forma que la cara que contenía la muestra quedara inmersa en el medio de montaje. Se retiró la lámina del calor y se esperó que la resina se distribuyera de manera homogénea sobre toda la lámina cubreobjetos; si permanecían burbujas, se eliminaban con presión suave. Se prepararon como mínimo dos láminas por muestra.

La gestión de los residuos y de sustancias que se generaron durante el desarrollo del contrato 1 - 2 - 26200-0568-2021 lo realizó CPA Ingeniería SAS cumpliendo con los protocolos de la empresa CPA Ingeniería SAS y la normatividad vigente que aplica (**Anexo 3**).

Al finalizar el proyecto, todas las muestras al igual que las láminas permanentes preparadas y el excedente de material procesado serán regresadas a la Colección de la Pontificia Universidad Javeriana debidamente rotuladas y preservadas.

3.1.5 Montajes para Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Para realizar estos montajes se necesitaron: Láminas, Láminas cortadas 9x9mm, Cinta doble faz. Se colocó la cinta doble faz sobre la lámina y sobre esta se dispusieron dos láminas de 9x9mm. Encima de las láminas se agregó media gota del pellet proveniente del proceso de oxidación. La muestra se secó y se guardó en las cajas para láminas portaobjetos, cubiertas previamente con papel de arroz.

3.2 DETERMINACIÓN TAXONÓMICA Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

El sistema de clasificación de diatomeas considerado para categorías supra específicas es el Catalogue of Diatom Names (www.diatombase.org) (Kociolek et al. 2022). Para la determinación taxonómica se tuvo en cuenta literatura especializada, específicamente los trabajos de la flora de diatomeas de Suramérica (Metzeltin & Lange-Bertalot, 1998, 2007; Rumrich et al., 2000; Wetzel, 2011), así como revisiones importantes de los géneros *Navicula*, *Eunotia* y *Luticola* (Lange-Bertalot, 2001; Lange-Bertalot et al., 2011; Levkov et al., 2013) y floras específicas de diferentes condiciones de trofia nivel mundial (Lange-Bertalot & Metzeltin, 1996; Lange-Bertalot et al., 2017) y floras pantropicales (Taylor et al., 2007).

Asimismo, se tuvieron en cuenta varios trabajos publicados en el país con floras regionales (Sala et al., 2008, 2014, 2015; Vouilloud et al., 2014, 2016; Blanco et al., 2020; Simonato et al., 2020). Diversos recursos electrónicos para consulta taxonómica también fueron tenidos en cuenta, como <https://diatoms.org/> (Spaulding et al., 2021) y <http://symbiont.ansp.org/dntf/index.php> (Potapova et al., 2022)

Durante varias sesiones de trabajo de intercambio de conocimiento con el asesor del proyecto, se revisaron y confirmaron varias de las especies determinadas por la experta del equipo de CPA Ingeniería S.A.S. Este intercambio permitió delimitar de manera más consistente algunos de los taxones identificados en los conteos y ayudó a definir las especies a ser incluidas tanto en el modelo como en el catálogo de especies.

El conteo de especies teratológicas se realizó tomándolo como un taxón distinto a la especie, con el fin de corroborar en la etapa de análisis estadístico si tiene alguna relación con la fisicoquímica. Sin embargo, para el registro del número de especies, no fueron tenidos en cuenta.

3.2.1 Análisis y conteos de las muestras

Las observaciones se realizaron con un microscopio de contraste de fases Nikon triocular eclipse CI. El sistema de medición se calibró previamente y se establecieron las reglas de conteo y nivel taxonómico de trabajo, durante esta actividad se tomaron microfotografías de los organismos procurando la vista total del organismo con escala de referencia, así como los detalles de los caracteres diagnósticos y mediciones.

La forma y regla de conteo fue la siguiente:

Se colocó el portaobjetos bajo el microscopio triocular Nikon Eclipse Ci y se observó a 40X. Una vez focalizado el primer campo, se agregó una gota de aceite de inmersión en el cubreobjetos y pasar a objetivo de 100X. Todos los conteos, mediciones y determinación taxonómica se realizaron a 1000x. La medición de los caracteres morfométricos como longitud total de la valva, ancho y densidad de estrías en 10 micras, entre otras, se realizaron con ocular micrométrico.

Antes de hacer el conteo, se seleccionaron campos aleatorios para identificar los individuos presentes (análisis cualitativo), para obtener un panorama del número de especies muestra.

La unidad de recuento fueron las valvas (un frústulo entero = 2 unidades de recuento). El conteo se realizó en un transecto lineal a lo largo del preparado hasta alcanzar 400 valvas en total, para asegurar un nivel de significancia del 95%. En caso de haber completado el transecto lineal y no haberse registrado 400 valvas, se comenzó un nuevo transecto lineal. Esta operación se repitió sucesivamente, tanto en el margen derecho como en el izquierdo, hasta registrar al menos 400 valvas.

En caso de revisar la totalidad de la muestra y no alcanzar 400 valvas en total, se procedió a revisar un duplicado de la muestra hasta alcanzar la densidad total de valvas (como mínimo 200). Aquellas muestras (50 en total) que presentaron densidades inferiores a 200 valvas se tuvieron en cuenta para la validación del modelo (**Anexo 4**).

El conteo propuesto constituye una modificación de la metodología de conteo propuesta por IDEAM 2017

- La unidad natural de conteo correspondió a una valva si se presenta en vista valvar.

- Se contaron 2 unidades si en vista valvar se estableció la presencia de un frústulo intacto (constituido por dos valvas).
- Se contaron 2 unidades si se observó un frústulo en vista pleural y se logró la determinación taxonómica a nivel de especie.
- Se contaron todas las valvas en el campo.
- Se realizó el conteo por transectos horizontales o verticales (lineales), considerando una debida separación entre ellos de tal forma que no se presentara superposición de las unidades que habían sido contadas.
- Se conservó siempre la misma dirección del conteo: – Se registraron las formas anormales de manera separada a la especie que se reporta, en el caso de que pueda ser determinada Eje: *Gomphonema lagenula* y *Gomphonema lagenula* teratológica.
- Los datos de los conteos y las mediciones de todos los especímenes se incluyeron en el archivo “Formato Morfometría Diatomeas.xls” (**Anexo 5**).

En este estudio particular, se buscó determinar los organismos hasta el nivel de especie, en caso de que no hubiera sido posible alcanzar el nivel de especie, se identificó nivel de género y dentro del género identificado se diferenciaron morfotipos.

Toda la información relacionada con la morfometría de todas las especies registradas en el estudio junto con el vínculo a las microfotografías se encuentra en el **Anexo 5**.

3.2.2 Análisis de la información Físicoquímica

A partir de la base de datos proporcionada por el Acueducto de Bogotá, se procedió a filtrar y seleccionar las muestras que fueron analizadas para la determinación y conteo de especies.

Este listado comprende 250 muestras con el acrónimo correspondiente, utilizadas para la construcción del modelo (**Anexo 6**). Sobre dichas muestras se presenta a continuación la estadística descriptiva y multivariada para cada Sistema y Zona de estudio.

En el **Anexo 7** se presentan las bases de datos por zonas con la información físicoquímica filtrada para las 250 muestras.

De la matriz original proporcionada, con 411 muestras y 64 variables evaluadas en las diferentes corrientes del sistema de abastecimiento del Acueducto, se descartaron todas las variables relacionadas con metales pesados, pesticidas, hidrocarburos (PCB's), grasas y aceites, fenoles y color, dejando un total de 29 variables, las cuales son listadas a continuación con sus respectivos acrónimos (**Tabla 1**).

Tabla 1. Listado de variables incluidas en el análisis descriptivo de la información junto con los respectivos acrónimos usados en los distintos gráficos.

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	ACRÓNIMO
Nutrientes	Fosforo Reactivo Soluble	PRS
	Fósforo Total	PT
	Nitrógeno Amoniacal	NH4
	Nitratos	NO3

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	ACRÓNIMO
	Nitritos	NO2
	Nitrógeno orgánico Total Kjeldahl	NKJ
	Sílice disuelto	SiO2
In situ	pH	pH
	Conductividad	Cond
	Oxígeno Disuelto	OD
	Temperatura	Temp
Sólidos	Sólidos disueltos Totales	SDT
	Sólidos suspendidos Totales	SST
	Sólidos Totales	ST
Turbidez	Turbidez	Turb
Iones	Calcio Total	CaT
	Sodio Total	NaT
	Cloruros	CL
	Sulfatos	SO4
Dureza	Dureza Total	Dur
Alcalinidad	Alcalinidad	Alca
Carbono	Carbono Inorgánico disuelto	CID
	Carbono Orgánico Total	COT
Materia Orgánica	Demanda química de Oxígeno	DQO
	Demanda biológica de Oxígeno	DBO5
Coliformes	Coliformes Totales	ColiT
	Coliformes Fecales	ColiF
	<i>Escherichia coli</i>	Ecoli
Caudal	Caudal	Q

El resumen estadístico de la información se realizó para cada Zona de monitoreo sin imputar datos, calculando los valores centrales y de dispersión de todas las variables. Asimismo, se realizaron gráficos de Boxplot para evidenciar la variación de cada variable entre los diferentes puntos de muestreo.

Atendiendo las recomendaciones de los profesionales de la DIE de la EAAB-ESP, los valores reportados como *No Cuantificables*, fueron reemplazados por la mitad del valor del límite de cuantificación registrado en la base datos.

Posteriormente, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para las variables físicas y químicas para cada Zona, como análisis exploratorio de la distribución y comparación de la variabilidad espacial y temporal de las muestras. Dado que las técnicas multivariadas requieren datos completos -sin vacíos de información-, se procedió a imputar los datos, tomando el promedio de la variable en los mismos puntos en el histórico proporcionado. Posterior a ello, se realizó el ACP en el conjunto de datos completos mediante la librería FactoExtra (Kassambara y Mundt, 2020).

Para conocer del patrón de distribución de la comunidad de diatomeas en las fuentes de abastecimiento se realizó un Análisis de Correspondencia Distendido (DCA). Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el Software R (R Core Team, 2021).

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

En los sistemas de abastecimiento del acueducto de Bogotá las variables que hicieron mayor contribución con la ordenación de las estaciones de muestreo según las variables fisicoquímicas fueron las relacionadas con la mineralización (alcalinidad, dureza y alcalinidad), sólidos (sólidos disueltos totales, sólidos totales) e iones (sodio y cloruros). Por el contrario, las que menor aporte hicieron fueron el Manganeseo, sílice y nitritos. Los aportes de los nutrientes (Amonio, Nitrato, Hierro, Fósforo reactivo soluble, Nitrógeno total Kjeldahl) no se destacaron de acuerdo con el Análisis de componentes principales (ACP) (**Figura 1 A y Figura 2**).

Ahora bien, respecto a la distribución de las muestras y al efecto que generan las variables fisicoquímicas se evidencia según el Análisis de Componentes Principales (ACP) que los cuerpos de agua pertenecientes al Sistema Norte (Río Blanco y Chuza) se asociaron con menores valores de nutrientes, mineralización e iones, por el contrario, San Rafael y Tibitoc estuvieron relacionados con mayores valores de nutrientes, sólidos y pH. En el sistema Sur, se registraron valores más altos de Turbiedad.

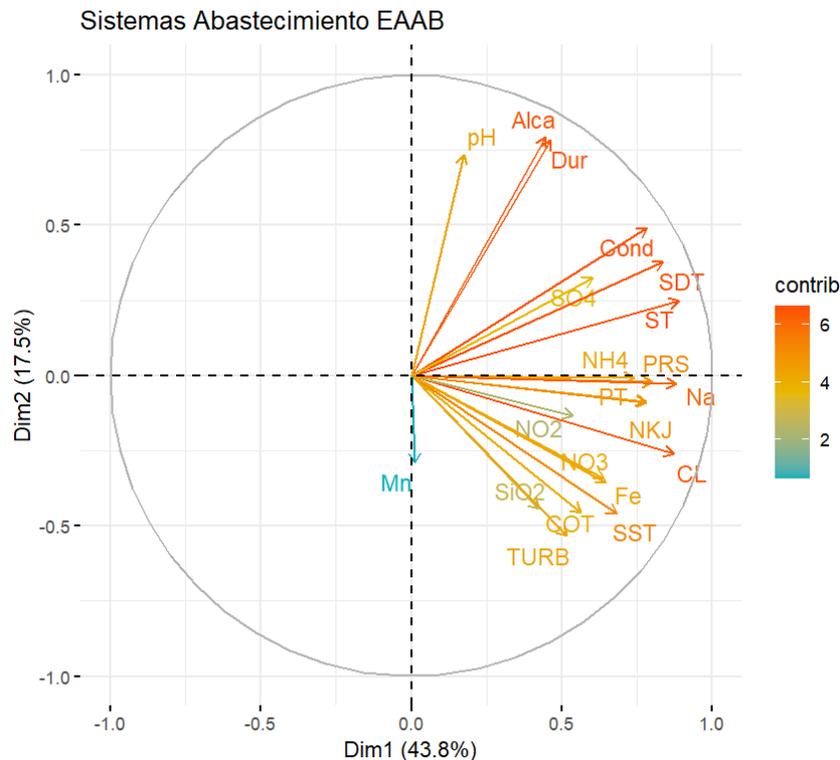


Figura 1. (A.) Análisis de Componentes Principales (ACP) general para las variables físico químicas de las fuentes de abastecimiento de la empresa de Acueducto de Bogotá.

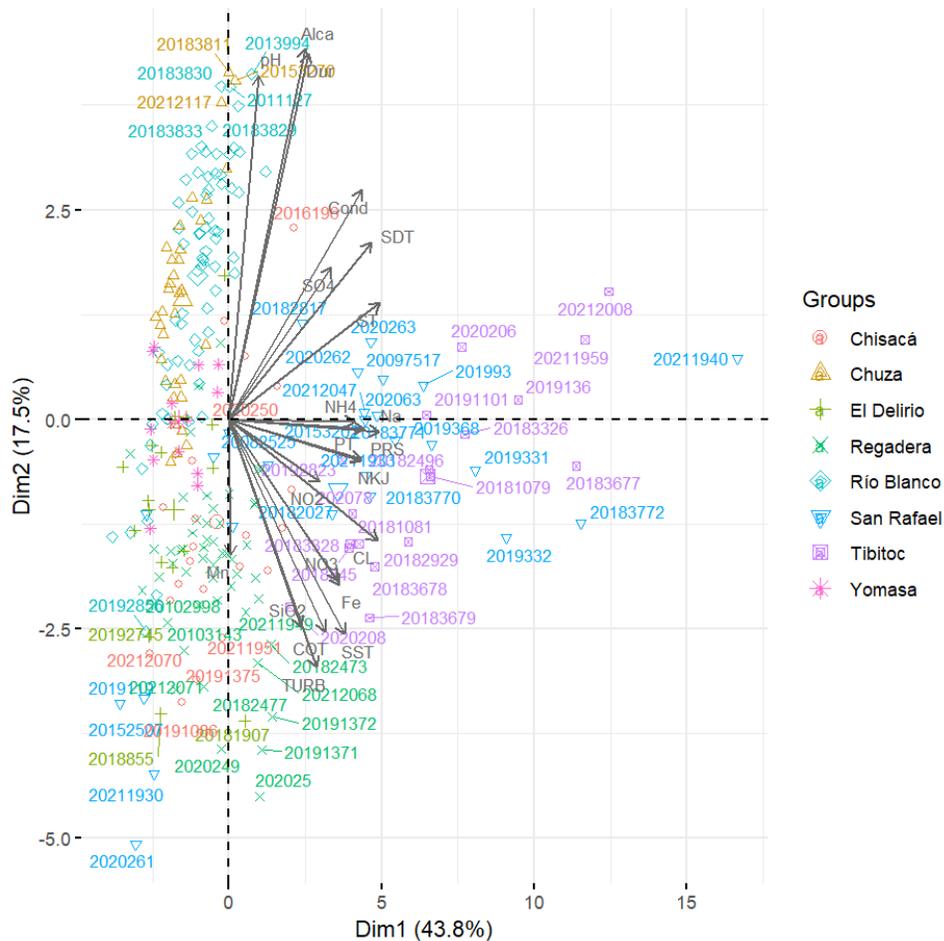


Figura 2. (B.) Análisis de Componentes Principales (ACP) general para las variables físico químicas de las fuentes de abastecimiento de la empresa de Acueducto de Bogotá.

4.1.1 Sistema Norte

4.1.1.1 Sistema Chuza

El conjunto de datos para la Zona Chuza corresponde a 34 muestras, la mayoría de las variables no poseen vacíos de información, excepto para el Carbono inorgánico, Carbono Orgánico Total y Caudal. En general las muestras de la zona Chuza presentaron caudales altos ($\bar{x} = 1012$ L/s), aguas transparentes con muy baja turbidez ($\bar{x} = 1.99$ mg/L) y bajo contenido de Sólidos y Fósforo total ($\bar{x} = 0.05$ mg/L). El rango de pH es amplio en esta zona (6.3 – 8.56 unidades pH), con tendencia alcalina (**Anexo 8**).

Al observar el comportamiento de cada variable entre las distintas estaciones se observó que la quebrada Babilonia (QBab) presentó los valores mayores de conductividad, CID, Dureza, Alcalinidad, Amonio, PRS y SDT. El pH es muy variable entre estaciones, registrándose valores débilmente ácidos en la Descarga de fondo del embalse Chuza, valores neutros en la quebrada Leticia-Qlet y medianamente alcalinos en la quebrada

Babilonia-Qbab, río Chuza-Puente-RChuP, y en las dos estaciones del río Guatiquía - Rguaba y Rguarr (**Figura 3**).

En general, en las quebradas del sistema las variables COT y NO_3 presentaron una baja variabilidad intra (temporal) e inter (espacial) quebradas. Al contrario, variables como pH, turbiedad y caudal mostraron una alta variabilidad entre las quebradas, observándose en esta última un patrón de aumento. En otros casos, se presentó una alta variación temporal en el OD, DurT, NH_4 y SDT. Los valores de materia orgánica (total y biodegradable) fueron bajos en todas las quebradas (**Figura 4**).

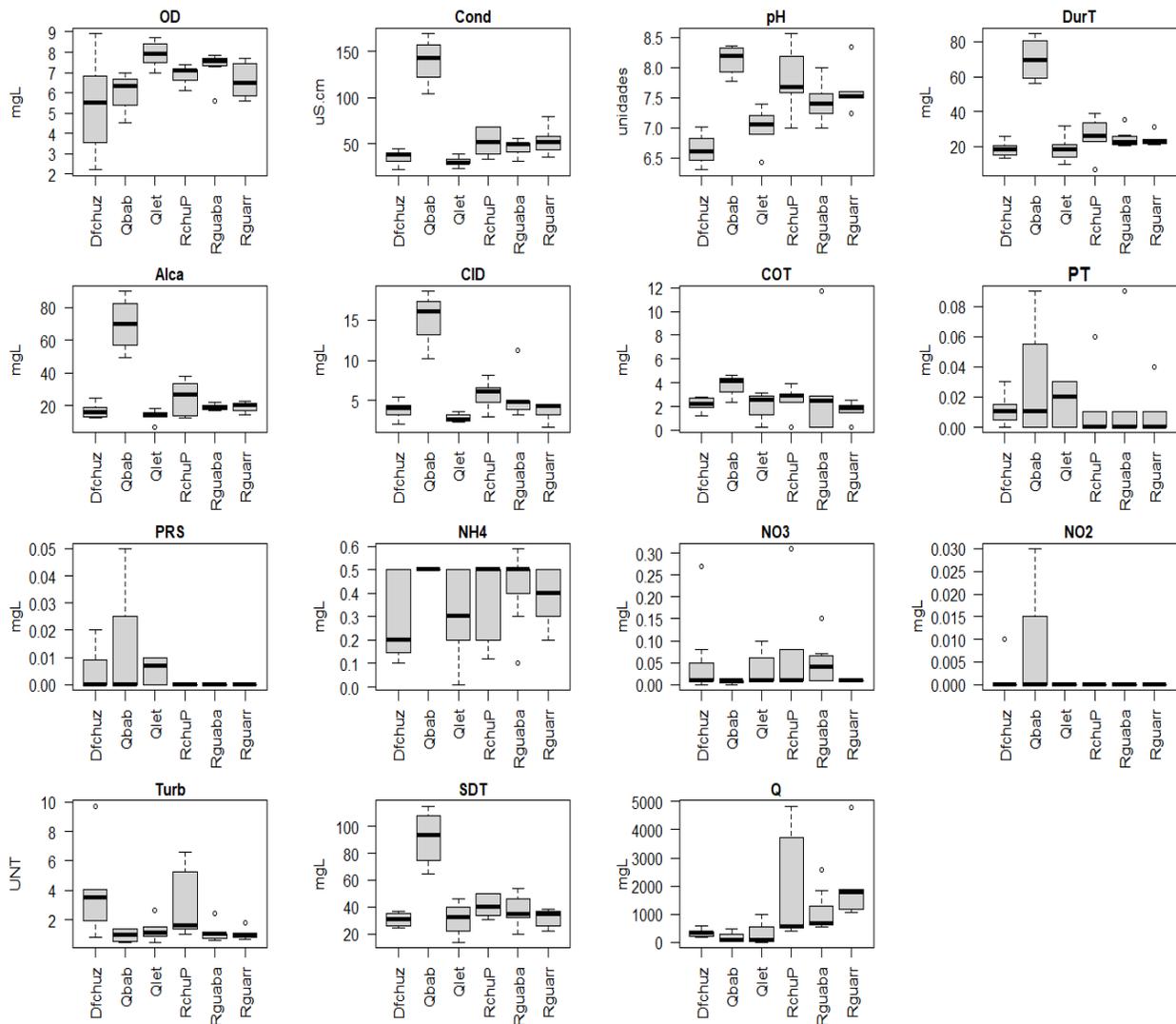


Figura 3. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Norte – zona Chuza

La carga bacteriológica en términos generales fue baja acorde con el menor impacto antrópico que se registra en estas áreas protegidas. Así mismo la carga orgánica presentó valores bajos (**Figura 4**).

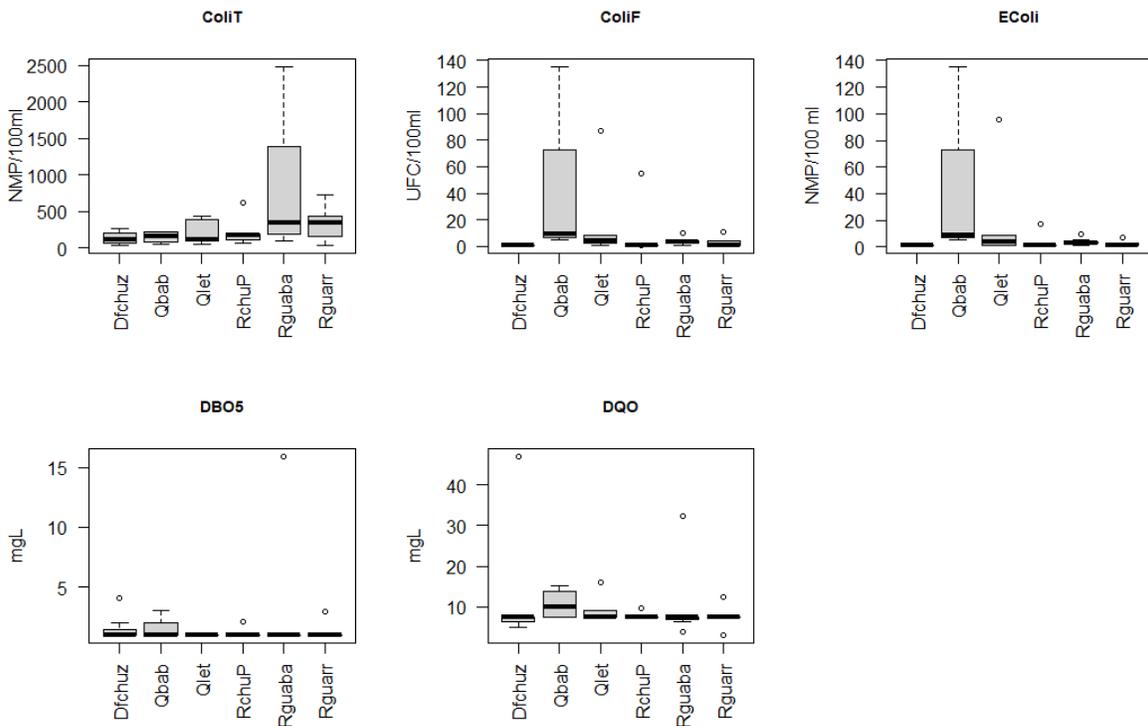


Figura 4. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Norte -zona Chuza

El Análisis de Componentes Principales (ACP) explicó el 51 % de la varianza de los datos en los tres primeros ejes de ordenación. El primer componente explicó el 29.53 % y se relacionó con la mineralización del agua (dureza, conductividad, alcalinidad, sólidos totales, sólidos disueltos totales) y pH estando los puntos de la Quebrada Babilonia asociado a valores altos de estas variables como característica principal del sistema, pues se evidencia diferenciación de esta quebrada.

El segundo componente explicó el 13.1 % relacionándose con NO₃, NO₂, NKJ, Na, sólidos suspendidos totales, turbiedad y el tercer componente explicó el 8.7 %.

La Descarga de fondo del embalse de Chuza presentó en contraste valores menores de estas variables y las muestras de este sector se distribuyeron en un gradiente de Materia orgánica y Fósforo total y como tendencia general valores mayores de Turbidez y Sólidos Suspendidos Totales (**Figura 5**).

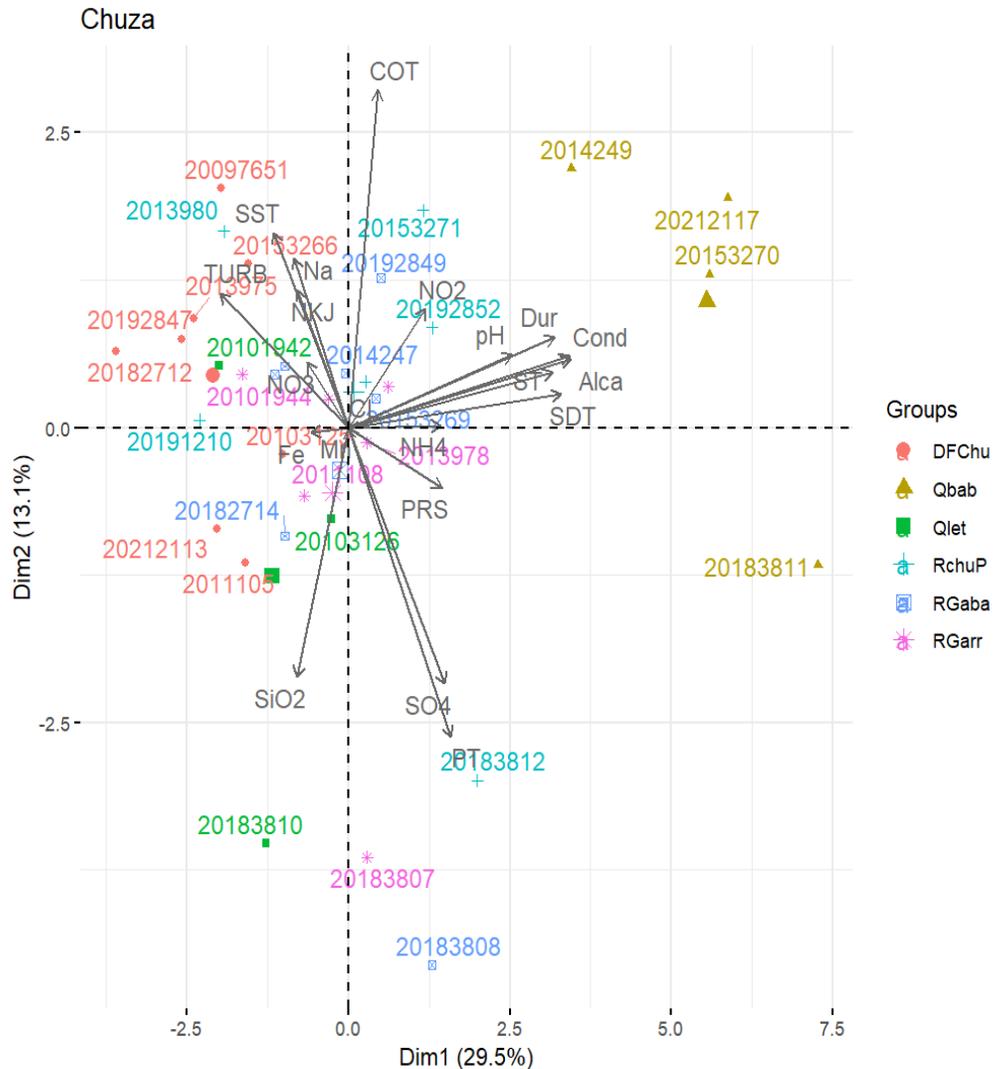


Figura 5. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas de todos los ríos del sistema Norte- zona Chuza

4.1.1.2 Sistema Río Blanco

De las 69 muestras que conforman el conjunto de datos de Río Blanco en un alto porcentaje poseen datos completos de todas las variables y particularmente las variables relacionadas con nutrientes y mineralización no presentaron vacíos de información. Sin embargo, tal como se evidenció en la mayoría de los sistemas, se observaron algunos vacíos de información en las variables CID, SDT y SO4 (**Figura 6**).

A nivel microbiológico todas las quebradas del sistema Río Blanco presentaron bajos valores de Coliformes, muy bajo contenido de materia orgánica total y biodegradable (**Figura 6**).

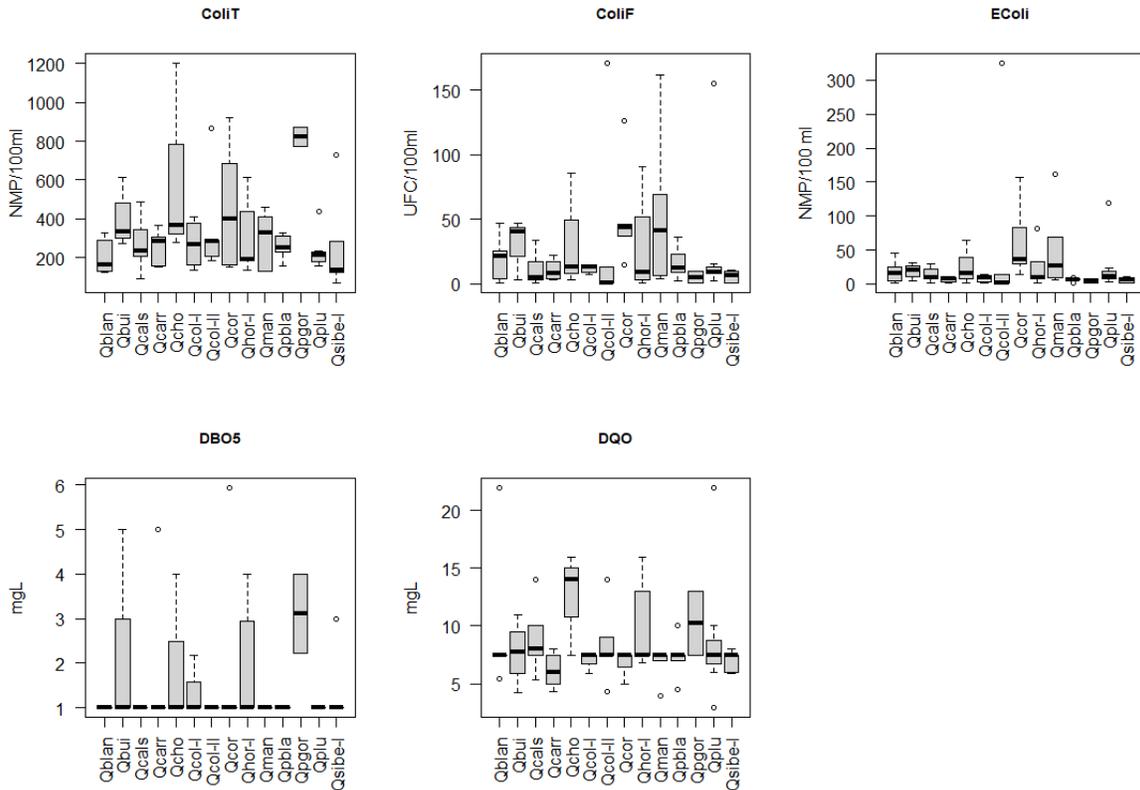


Figura 6. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Norte -zona rio Blanco

En general, las quebradas del sistema Rio Blanco son en promedio altamente oxigenadas, aunque en algunos puntos se observan datos atípicos de oxígeno en concentraciones inferiores 3mgL, particularmente en las quebradas Blanca y El Mangón.

Las quebradas Carrascales, Chokolatal, Horqueta I, Piedras Gordas presentaron aguas menos mineralizadas, con bajo contenido de Sólidos, Alcalinidad y bajas concentraciones de PRS, mientras que las quebradas Cortadera y Palo Blanco presentaron conductividades superiores a 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pH básicos y mayor contenido de PT (**Figura 7**). En la Q. Cortadera se evidenció un comportamiento particular de la Conductividad, pH, Dureza, Alcalinidad y Carbono Inorgánico Disuelto con valores superiores a los demás sistemas.

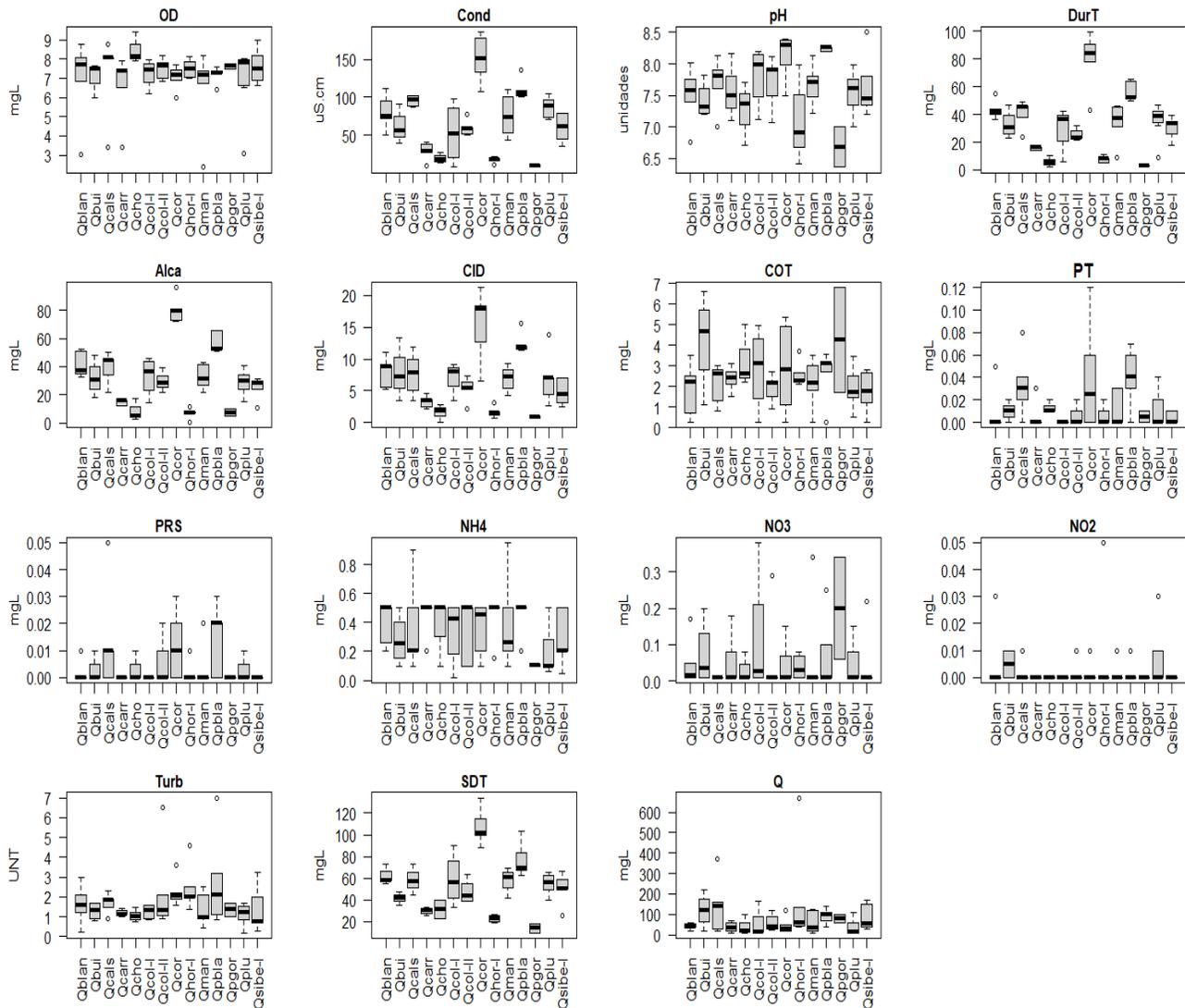


Figura 7. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Norte – zona río Blanco

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado para el sistema Río Blanco reunió el 49.62 % de la varianza total en los tres primeros ejes de ordenación. El primer eje explicó el 28.31 % relacionándose con las variables alcalinidad, conductividad, dureza, sólidos disueltos totales y sólidos totales explicados probablemente por la naturaleza geológica del sistema, presentando la Quebrada Cortadera (QCor) valores altos de estas variables (**Figura 8**).

El segundo eje explicó el 11.1 % y se relacionó con el Carbono Orgánico Total (COT) y Sólidos Suspendedos Totales (SST) explicado por el aporte orgánico alóctono o autóctono dentro del sistema.

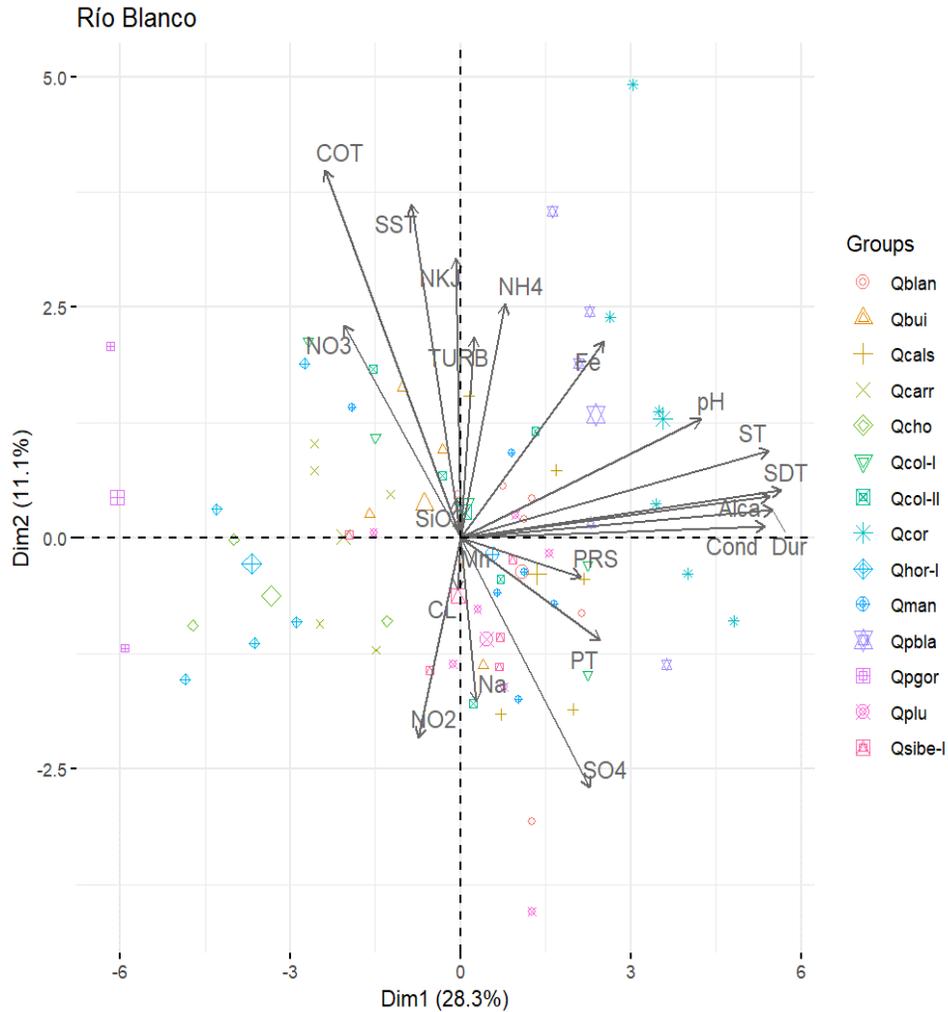


Figura 8. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas de todos los ríos del sistema Norte – zona río Blanco

4.1.1.3 Sistema San Rafael

El total de muestras evaluadas de esta zona fueron 26. Al revisar la base de datos fisicoquímica para dichas muestras se observaron algunos vacíos de información, particularmente de CID, COT, SO₄ y NaT. Las muestras de esta zona tienen en promedio conductividades altas (200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) en comparación con las muestras de la Zona Chuza y Río Blanco. Un comportamiento similar se observó en las concentraciones promedio de PT ($x = 0.21 \text{ mg/L}$) (**Anexo 10**).

A nivel microbiológico en la mayoría de las estaciones de San Rafael la concentración de Coliformes fue bajo, excepto en el punto río Teusacá Puente Sopó-RtePS. La misma tendencia se observó con el contenido de materia orgánica (total y biodegradable) (**Figura 9**).

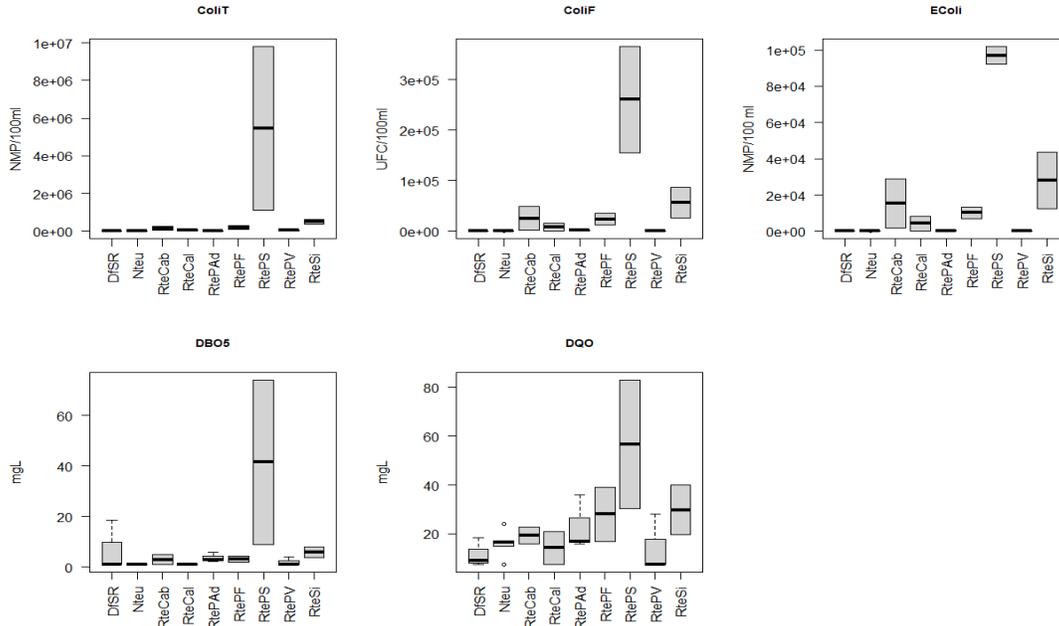


Figura 9. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Norte -zona San Rafael

Las corrientes analizadas de la Zona San Rafael presentan contrastes muy evidentes en los parámetros fisicoquímicos (**Figura 10**). En la mayoría de las estaciones las aguas estuvieron bien oxigenadas con bajo contenido de nitrógeno y PRS. El punto Nacimiento del río Teusacá-Nteu fue muy poco mineralizado y con pH levemente ácido. Se destacó el punto Puente Sopó por presentar los valores más altos de conductividad (max=1299 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y nutrientes, principalmente de PT (max=2.03 mg/L), NH_4 (max=14.58 mg/L), así como alta Dureza y SDT. Se destaca el punto Puente adobes-RtePAd por registrar los mayores valores de NO_3 (max=3.05 mg/L) y NO_2 (max=0.25 mg/L) en esta zona.

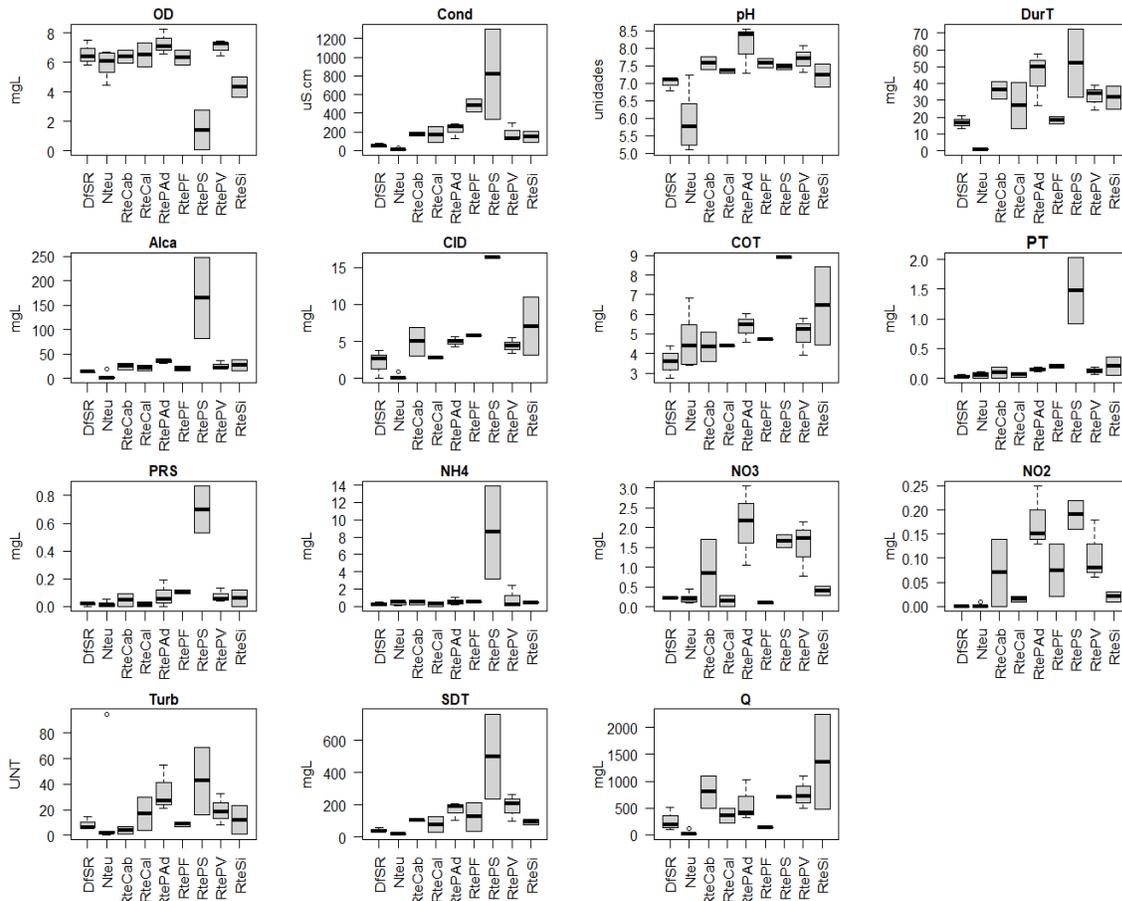


Figura 10. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Norte – zona San Rafael

El Análisis de Componentes Principales (ACP) explicó en los tres primeros ejes de ordenación el 77.78 % de la varianza de los datos. El primer eje explicó el 57.9 % y se relacionó con la alcalinidad, cloruros, conductividad, dureza, sólidos totales, sólidos disueltos totales, NKJ, sulfatos (SO₄) y Sodio (Na). El segundo eje explicó el 13.23 % asociándose las variables de carbono orgánico total (COT), amonio (NH₄) y fósforo total (Figura 11).

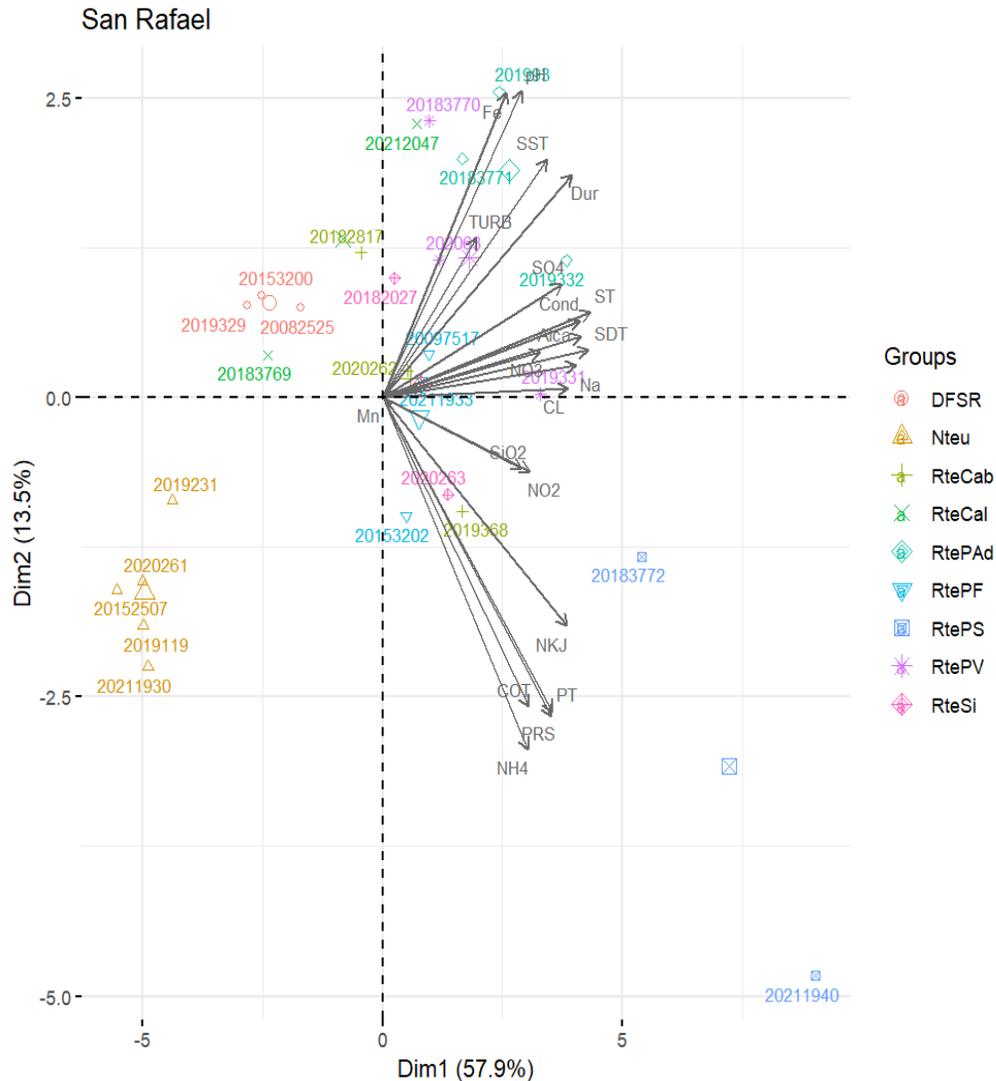


Figura 11. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas de los ríos del sistema Norte – zona San Rafael

4.1.1.4 Sistema Tibitoc

El conjunto de muestras de la zona Tibitoc está conformado por 18 muestras, dentro de las cuales se observaron vacíos de información importantes en la base de datos, con solo 3 datos válidos en las variables PRF, DurT y CaIT. El resumen estadístico mostró que las muestras del río Bogotá presentan en promedio bajos valores de OD ($x = 3.51 \text{ mg/L}$), alta Conductividad ($x = 223.7 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), registrando los valores altos de NKJ ($\text{max} = 24 \text{ mg/L}$) y de materia orgánica ($\text{max} = 129 \text{ mg/L}$) de todo el set de datos (**Anexo 11**).

En el punto Antes del Sisga-RbogAS se registraron valores de oxígeno disuelto por debajo del límite de cuantificación (0.1 mg/L), así como altos valores de Conductividad, NH_4 , fósforo (PRT y PRS) y Dureza en comparación con las otras dos estaciones de monitoreo (**Figura 12**). Los valores más altos de NO_3 son registrados en el punto Antes del Tominé, mientras

que en el punto Después del Sisga-RBDS registraron las mayores concentraciones de NO₂ y Turbidez (**Figura 12**).

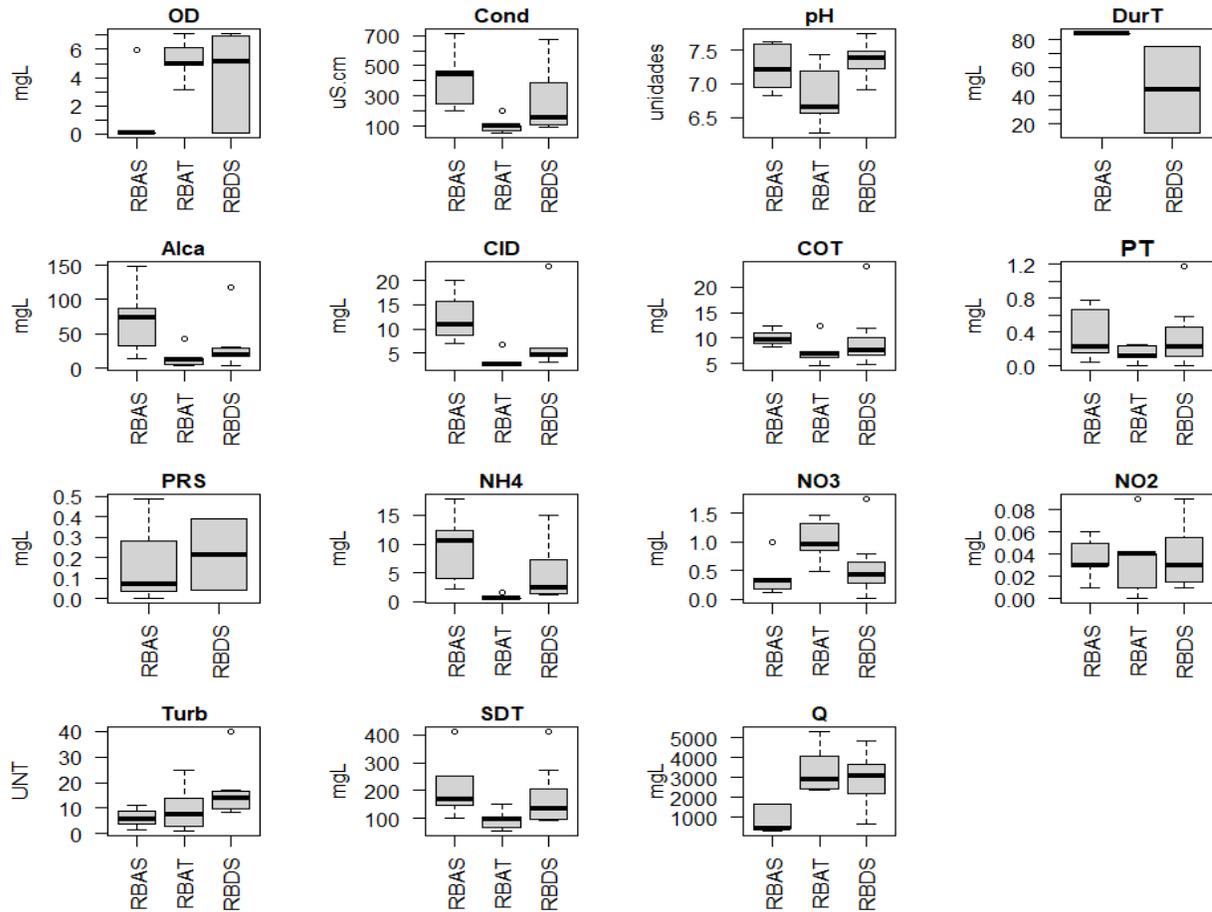


Figura 12. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Tibitoc

En el punto RBAS se observan los más altos valores de materia orgánica (total y biodegradable) de todo el estudio, mientras que la concentración de coliformes se observaron valores atípicamente altos en el RBAT (**Figura 13**). Tanto los ColiF como los ColiT en general fueron menores a lo registrado en las muestras del río Teusacá-Puente Sopó.

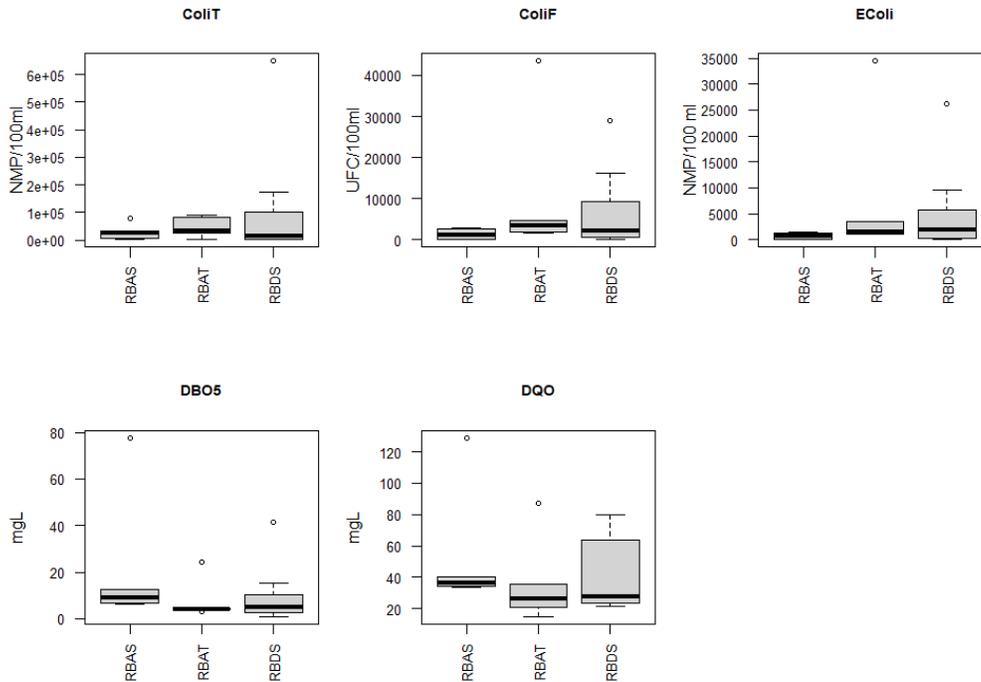


Figura 13. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Tibitoc

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado con las variables fisicoquímicas del sistema Tibitoc reunió el 71.3 % de la varianza en los tres primeros componentes). El primer componente reunió el 50.3 % de la varianza y estuvo asociado con la mineralización (alcalinidad, cloruros, conductividad y dureza) el fósforo (total y reactivo soluble), los sólidos (totales y disueltos totales) y sodio (Na). El segundo componente reunió el 12.6 % de la variación de los datos y estuvo asociado NO₂ y la calidad microbiológica, y de manera negativa con los NO₂ (**Figura 14**).

De acuerdo con el análisis de ordenación, se pudo observar que las muestras del río Bogotá antes del Sisga-RBAS presentaron un mayor contenido de iones y carga orgánica, en particular en el muestreo de marzo 2021(20212008), mientras que en el punto Antes del embalse Tominé-RBAT en el muestreo de mayo 2018 (20181081), presentó la más baja calidad microbiológica en comparación con los demás muestreos.

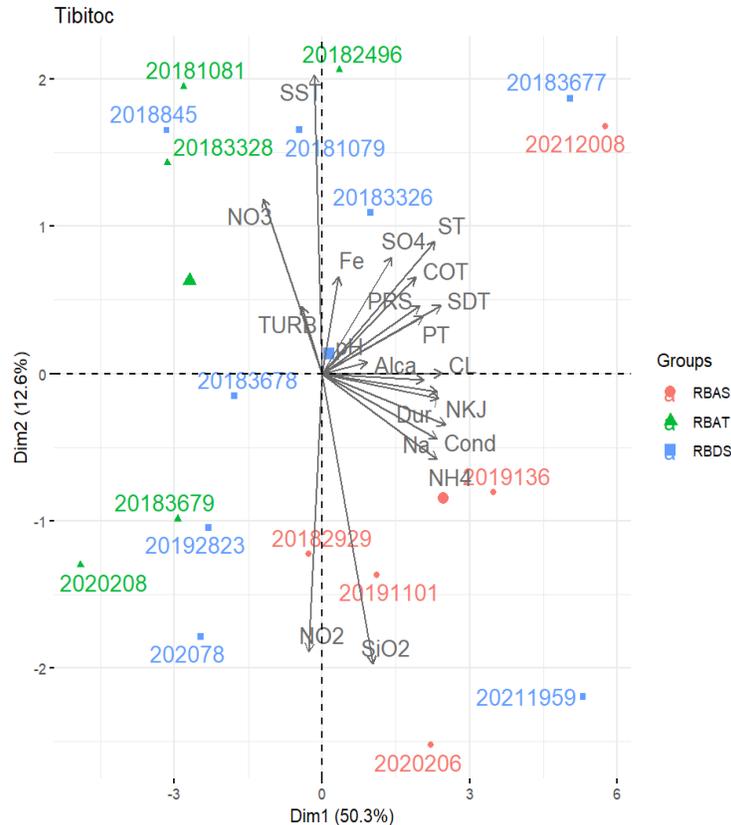


Figura 14. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas de los ríos del sistema Tibitoc

4.1.2 Sistema Sur

4.1.2.1 Sistema Chisacá

Para el análisis de datos del sistema Chisacá se contó con 22 muestras, registrándose valores faltantes de las variables CID, COT, Temp y Q., aguas con baja conductividad ($x = 50.1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y concentración de PT ($x = 0.05$) (**Anexo 12**).

Las muestras del río Mugroso-RMug presentaron aguas turbias con mayor mineralización hecho que ha sido evidenciado en el seguimiento limnológico, reflejándose en mayores valores de Cond, Dur, Alca, CID, pH, SDT, Turb en comparación con las muestras del RChis, así como mayor contenido de NH₄ y NO₃. Por su parte las muestras del RChis presentaron mayor caudal, aguas más oxigenadas, menos mineralizadas, pH neutro, con mayor contenido de PRS y PT en comparación con el RMug (**Figura 15**).

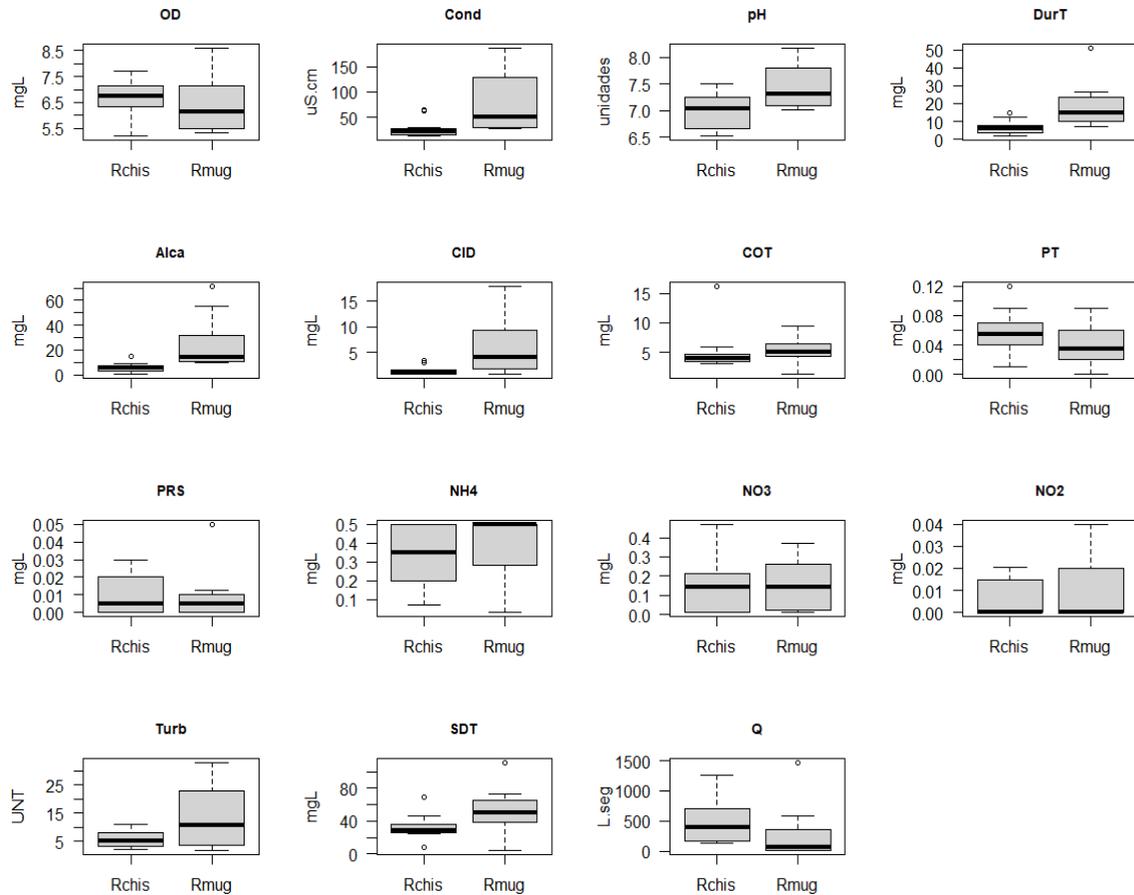


Figura 15. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Sur – zona Chisacá

En general, la materia orgánica biodegradable es baja tanto en RChis como en RMug, en el caso de la DQO, se evidenciaron valores atípicos en el RMug, superiores a los 80mgL. Se destaca que a nivel bacteriológico ambos ríos presentan valores de ColiT por encima de 10.000NMP/100 ml, mientras que los valores de EColi y ColiF se encuentran en niveles bajos, lo que sugiere buena calidad bacteriológica (**Figura 16**).

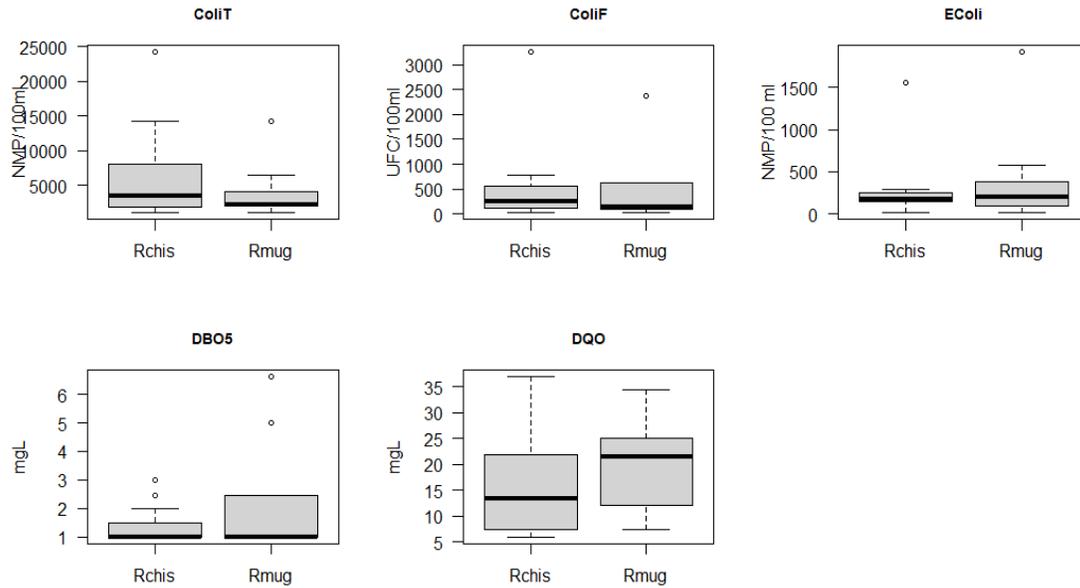


Figura 16 variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Sur – zona Chisacá

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado para los ríos Chisacá y Mugroso que componen el Sistema Chisacá explicó el 57.23 % de la varianza de los datos. El primer eje explicó el 30.2 % asociándose a este, variables como pH, conductividad, sólidos disueltos totales, sólidos totales, sulfatos (SO₄), cloruros (Cl) y estaciones del río Mugroso. El segundo eje explicó el 15.9% siendo turbiedad, hierro (Fe) y sólidos suspendidos totales las variables fisicoquímicas que se relacionaron principalmente en muestras del río Mugroso (**Figura 17**).

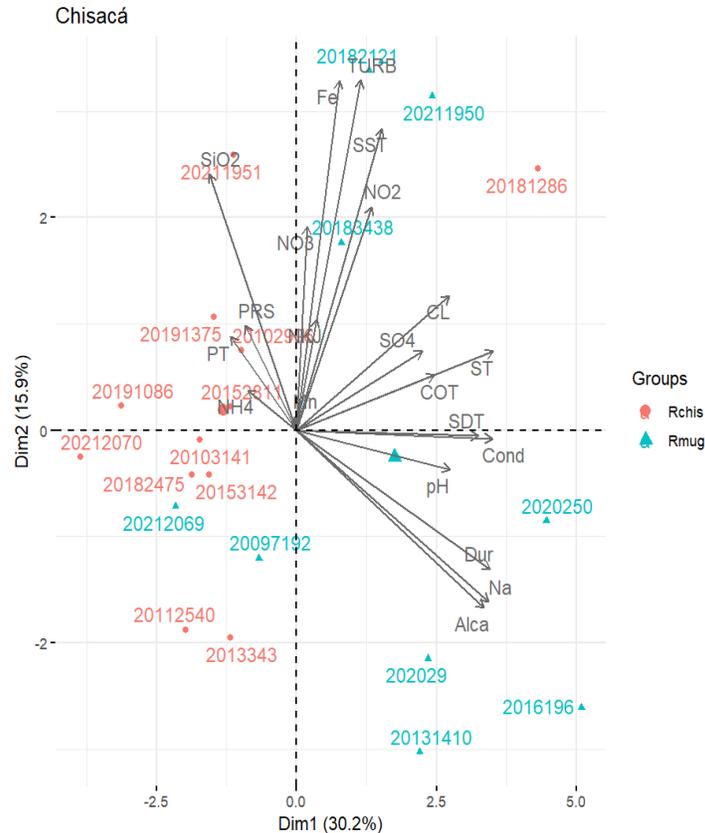


Figura 17. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del sistema Sur - zona Chisacá

4.1.2.2 Sistema Regadera

Las 50 muestras que conforman el conjunto de datos de la Zona Regadera también presentaron pocos vacíos de información, exceptuando el COT y CID, con ausencia de datos en 6 muestras. Se destaca que todas las variables relacionadas con nutrientes no presentan vacíos información en este set (**Anexo 13**).

En promedio los ríos de la zona Regadera presentaron un caudal promedio de 716 l/seg, poseen baja conductividad ($x = 33.6 \mu s.cm$), bajo contenido de sólidos (SDT, SST, ST), muy baja turbidez ($x = 9.4$ unt) y pH circumneutrales ($x = 6.94$ unidades).

En general todas las estaciones de la zona Regadera presentaron una baja mineralización y el comportamiento de las variables físico químicas no tiene una variación aguda. Cuando se compara la variabilidad de los datos entre las estaciones (**Figura 18**), se puede observar que el punto Río Chisacá-Regadera (RChiR) presenta, en general, valores mayores de conductividad, Alcalinidad, Dureza y pH. El punto Río Curubital (RCuru), en general presenta aguas menos mineralizadas en comparación con el resto de las estaciones. En relación con los nutrientes, si bien presenta concentraciones bajas, los valores de PRS y PT son levemente mayores en el RCuru. Los valores de NO_2 son bajos registrándose valores atípicos en el RCuru. La Turbidez es levemente mayor en el punto Descarga de fondo (DFReg).

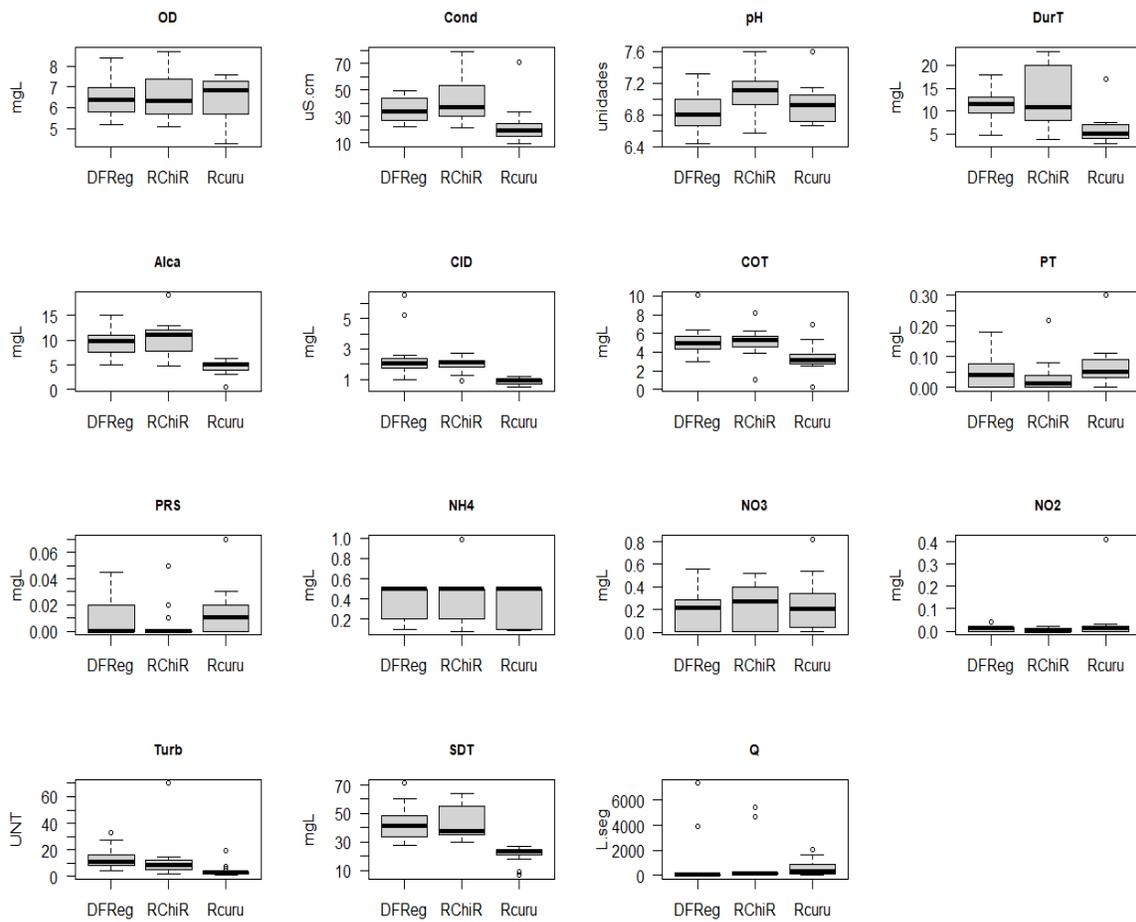


Figura 18. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Sur – zona Regadera

La materia orgánica biodegradable (DBO5) en las tres estaciones estuvo por debajo del límite de detección, con presencia de algunos datos atípicos, pero concentraciones bajas en términos de calidad. La materia orgánica total (DQO) es levemente mayor en el punto Descarga de Fondo (DFReg) aunque con valores máximos de 20mg/L y con valores atípicos superiores a 60mg/L en el Río Curubital (RCuru). Los ColiF son muy bajos en las tres estaciones y los ColiT aunque muestran mayor variabilidad, tienden a ser mayores en el Rcuru, sin embargo tanto los valores máximos como los valores atípicos se encuentran dentro del rango de buena calidad bacteriológica (**Figura 19**).

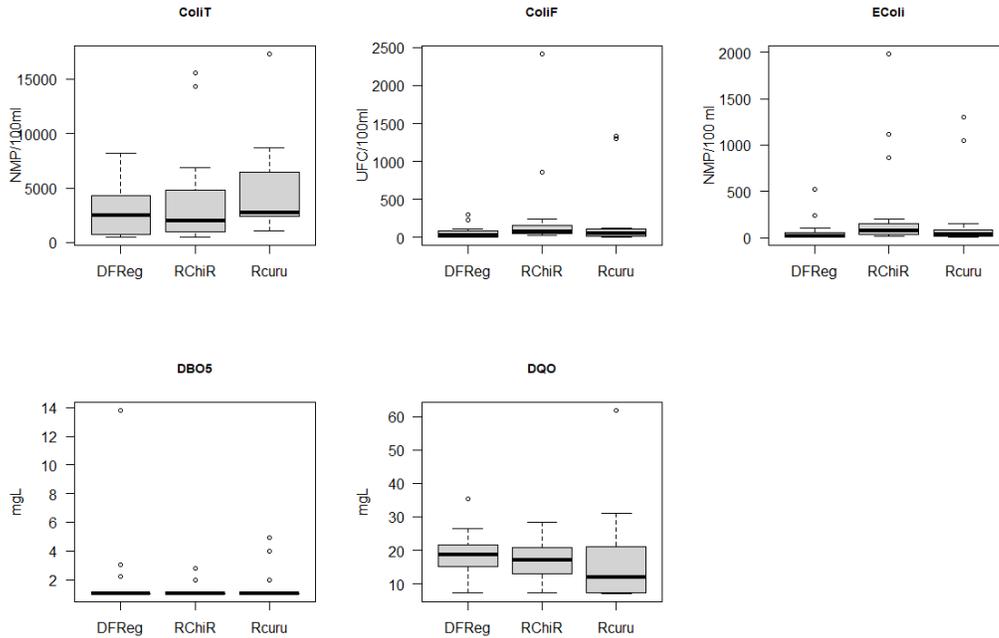


Figura 19. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Sur – zona Regadera

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado para el Sistema Regadera reunió el 50.3 % de la varianza en los tres primeros componentes. El primer eje explicó el 27.2 % de la varianza y estuvo asociado a cloruros, conductividad, dureza (mineralización) sulfatos (SO₄) y sodio (Na). El segundo eje abarcó el 13.7 % de la varianza y a este se asoció el Nitrato (NO₃), Sílice (SiO₂) y el pH (**Figura 20**).

Como característica general del sistema, las muestras registradas del Río Chisacá-Regadera se asocian a valores altos de mineralización y las muestras de Río Curubital se relacionaron con valores de altos de Nitrato (NO₃).

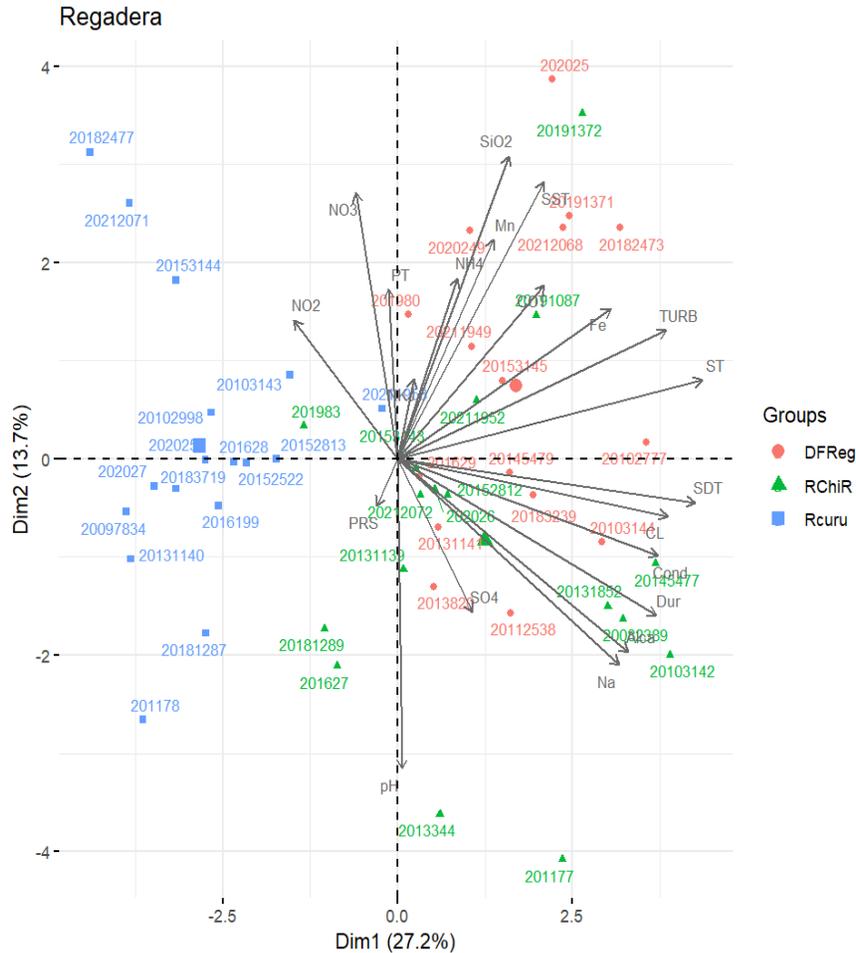


Figura 20. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del sistema Sur - zona Regadera.

4.1.2.3 Sistema Yomasa

De las 14 muestras analizadas de la quebrada Yomasa pocas poseen vacíos de información, particularmente en las variables CID, COT, ColiF, SO4 y Q. En general los valores promedio de conductividad son bajos ($x = 28.1 \mu S.cm^{-1}$), así como las concentraciones de iones y PRS ($x = 0.04 mgL$) (**Anexo 14**).

El punto aguas arriba de la quebrada Yomasa presenta valores de pH Turbidez, CID, COT levemente mayores, en comparación con el punto aguas abajo. A diferencia de esto, en el punto aguas abajo se evidenciaron mayores valores de Nitrógeno (NH_4 , NO_3 y NO_2). En relación con el NH_4 , se destacó en el punto aguas arriba por su baja variación y con rangos más estrechos en comparación con el punto aguas abajo (**Figura 21**).

A pesar de estas diferencias los valores de Conductividad, Alcalinidad y Dureza fueron similares. Si bien ambos puntos poseen concentraciones de OD similares, en el punto aguas abajo éste presenta un mayor rango de variación ($x = 5.0-8.0 mgL$).

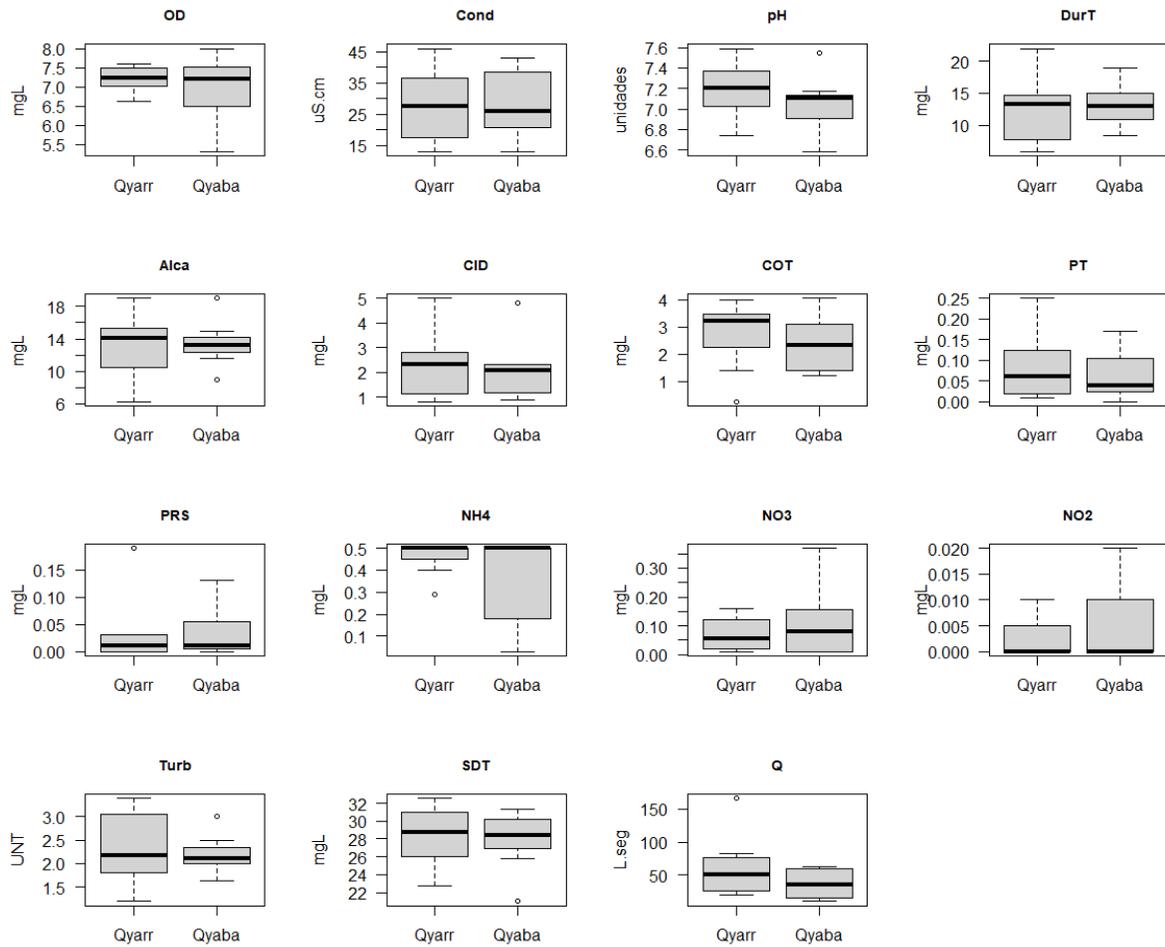


Figura 21. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema Sur – zona Yomasa.

La materia orgánica total fue altamente variable en ambas estaciones, aunque con valores máximos bajos y relacionados con ausencia de impacto. La materia orgánica biodegradable se encontró en valores no detectables y los valores de coliformes fueron bajos en ambas estaciones (**Figura 22**).

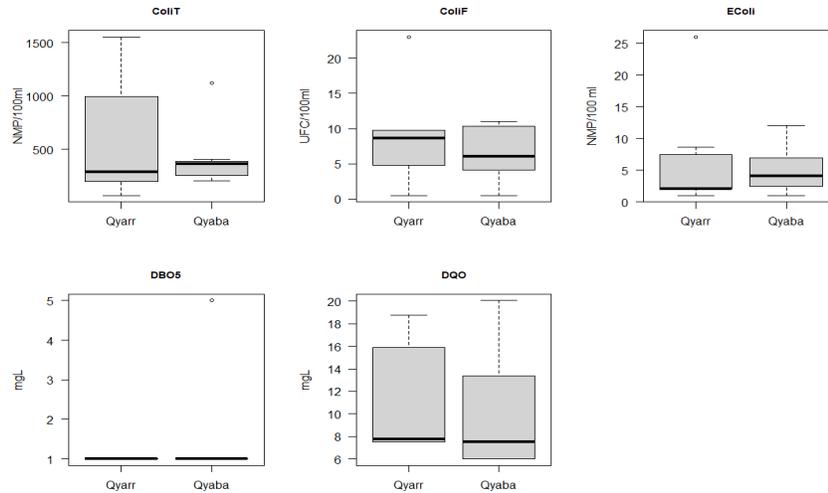


Figura 22. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema Sur – zona Yomasa.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) explicó el 63% de la varianza total de los datos. El primer eje reunió el 30.9 % y se asoció a la mineralización (alcalinidad, cloruros, conductividad, dureza) además con fósforo total, fósforo reactivo soluble, sólidos suspendidos totales y Sodio (Na). El segundo componente explicó el 20% (Figura 23).

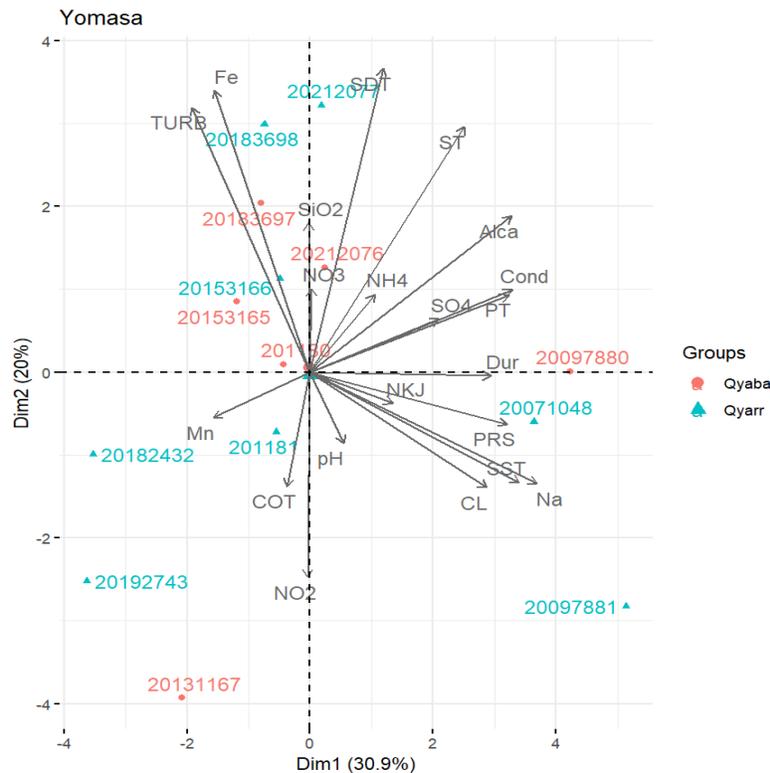


Figura 23. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del sistema Sur - zona Yomasa

Al comparar todas las estaciones del sistema Sur se observó una tendencia más clara (**Figura 24**). De manera general se pudo observar que la quebrada Yomasa presentó poca variación temporal, con aguas menos mineralizadas, más oxigenadas y con mayores valores de PRS en comparación con las demás zonas, mientras que las muestras de la zona Chisacá y Regadera presentan mayor mineralización y contenido de sólidos, y este comportamiento es temporalmente variable.

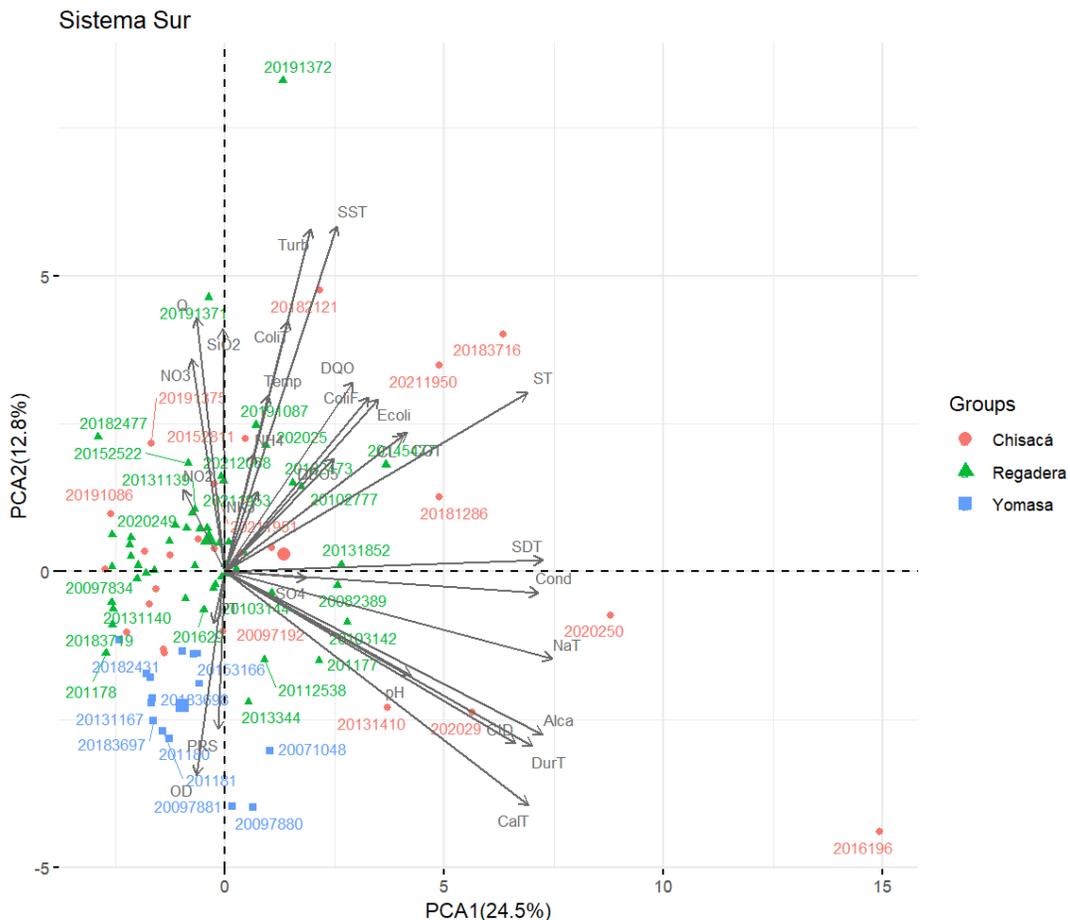


Figura 24. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas de todos los ríos del sistema Sur

4.1.2.4 Sistema El Delirio

Las 17 muestras que conforman el conjunto de datos del sistema El Delirio en su mayoría presentan datos completos para un gran número de variables, exceptuando CID, COT y Q, variables que poseen tres muestras con ausencia de datos, mientras que el PRS y el NaT solo dos muestras no poseen datos (**Anexo 15**).

De manera general se puede observar que las muestras del sistema El Delirio poseen muy aguas muy poco mineralizadas, reflejándose en bajos valores de conductividad ($x = 25.4 \mu\text{S.cm}$), Sólidos totales ($x = 37.5 \text{ mgL}$), aguas circumneutrales ($x = 6.8$ unidades pH), así como bajo contenido de nutrientes.

Cuando se compara la variabilidad de dichos parámetros entre las estaciones (**Figura 25** y **Figura 26**) se puede observar que en general el punto Intersección Upatá Palo Blanco-lupb presenta valores levemente mayores de COT, CID, Dur, Turb, Alca y SDT en comparación con los demás puntos, mientras que en el punto Decantadores San Cristóbal-DSan el PT y los NO₂ tienden a ser levemente mayores.

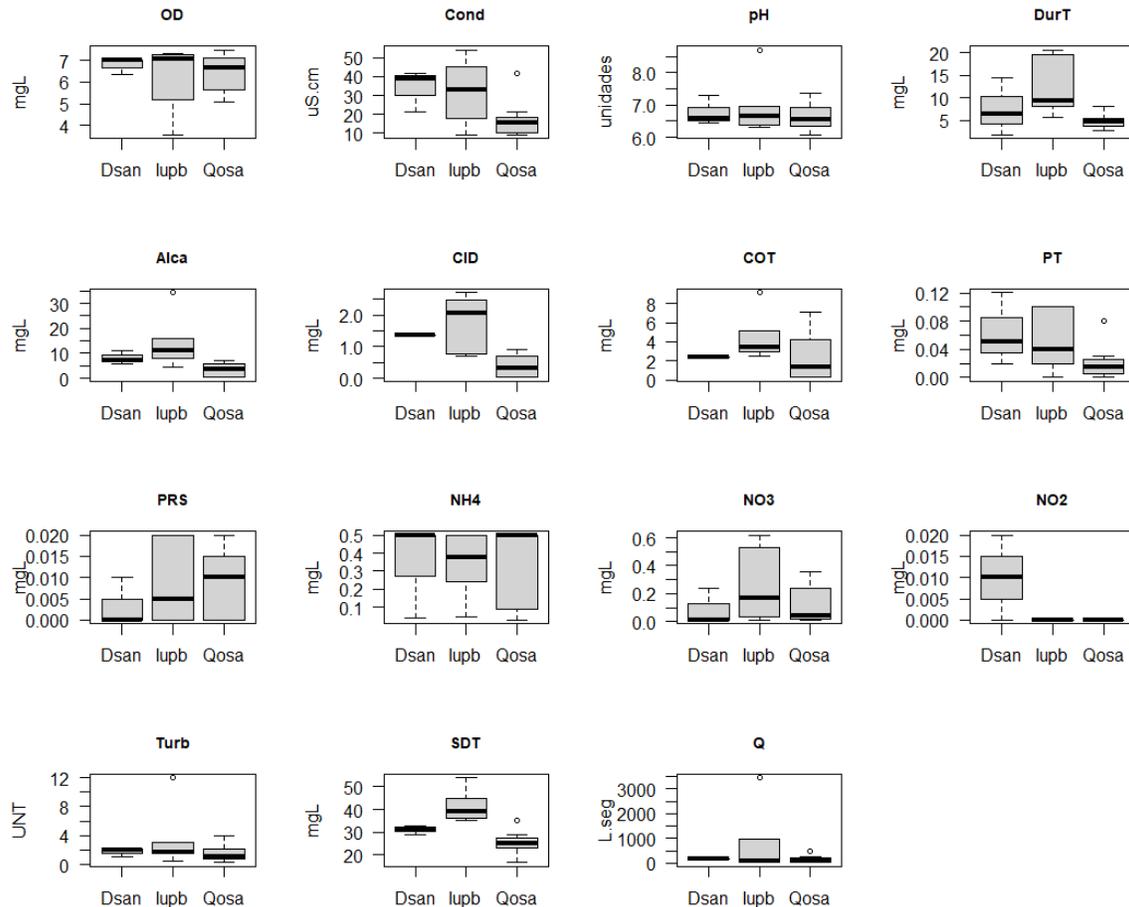


Figura 25. Variables fisicoquímicas en las estaciones del sistema El Delirio

Si bien los valores de Coliformes (Totales, Fecales, *E.coli*) se encontraron en muy baja concentración, demostrando una alta calidad bacteriológica, se observan valores levemente mayores de ColiF y *E.coli* en el punto lupb. En las muestras del sistema El Delirio la materia orgánica biodegradable (DBO₅) en la mayoría de las muestras está por debajo de los límites de cuantificación, presentándose muy pocos datos atípicos principalmente en los puntos lupb y Qosa. En el caso de la materia orgánica total (DQO), la QDO alcanza valores máximos de 35mg/L (**Figura 26**).

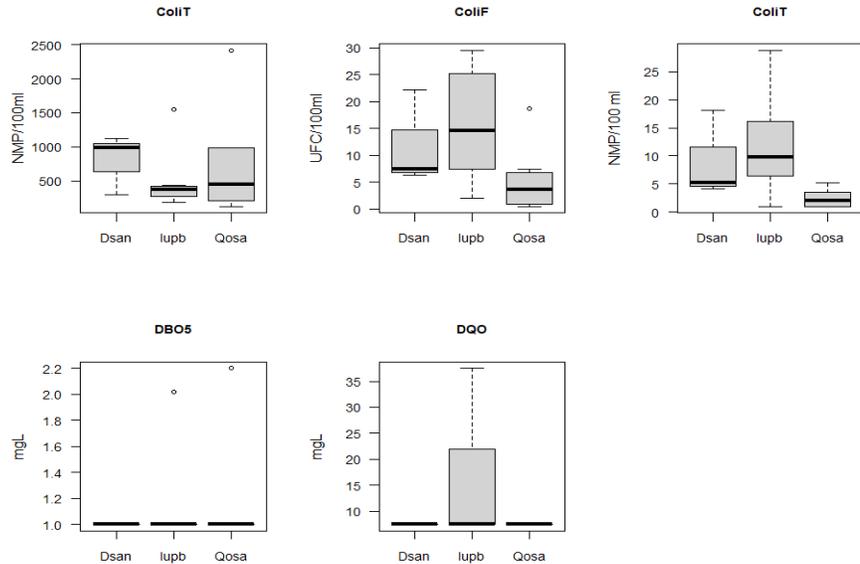


Figura 26. Variables fisicoquímicas relacionadas con materia orgánica y coliformes en las estaciones del sistema El Delirio

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado para el sistema El Delirio explicó el 62% de la varianza total de los datos. El primer componente reunió el 28.1 % de la varianza asociándose a este, variables como carbono orgánico total, Nitratos (NO₃), sólidos totales (ST), sulfatos (SO₄) y turbiedad. El segundo componente explicó el 21.3 % y estuvo relacionado con alcalinidad (Alca), conductividad (Cond), dureza (Dur), hierro (Fe) y fósforo total (PT). Se destaca la baja variabilidad temporal de las muestras de la Quebrada La Osa-Qosa y su ubicación dentro del extremo inferior del gradiente de mineralización (**Figura 27**).

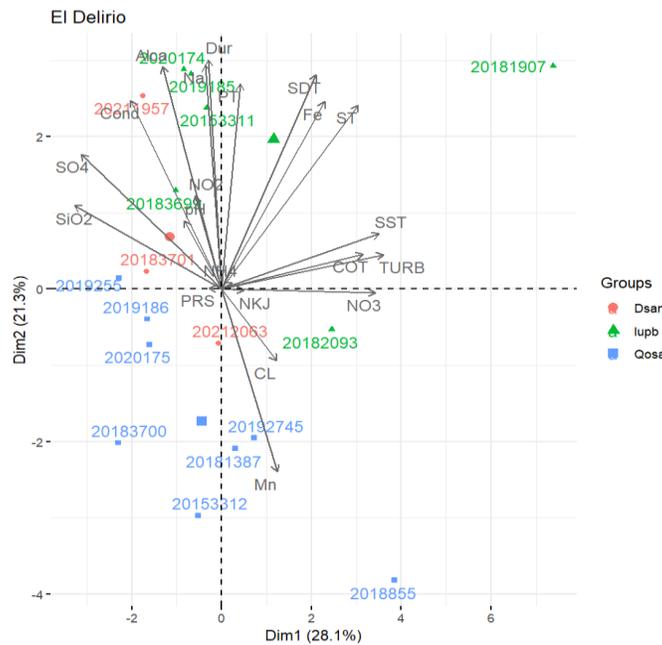


Figura 27. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del sistema El Delirio

4.2 COMPOSICIÓN DE LAS COMUNIDADES DE DIATOMEAS EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DEL ACUEDUCTO

En el **Anexo 16** se presenta la composición de la comunidad de diatomeas en todos los sistemas con sus respectivas abundancias, así como los acrónimos (Sp Id) utilizados en las figuras.

4.2.1 Sistema Norte

4.2.1.1 Sistema Chuza

El sistema de Chuza estuvo conformado por 38 especies, 16 morfo especies, 10 con forma, y 5 affines en total 30 géneros, 19 familias y 10 órdenes registradas en 34 muestras (**Anexo 17**). En la **Tabla 2** se presentan imágenes de las especies más representativas para el sistema.

De acuerdo con los conteos realizados de los 31 géneros registrados, el que presentó mayor número de morfo especies fue *Eunotia* (12 morfo especies) seguido por *Gomphonema* (9). De acuerdo con el nivel de determinación taxonómica, se identificaron 10 affines, 12 con forma, 38 especies, 2 de ellas teratológicas. En la **Figura 28** se presentan imágenes de las especies más representativas en la comunidad.

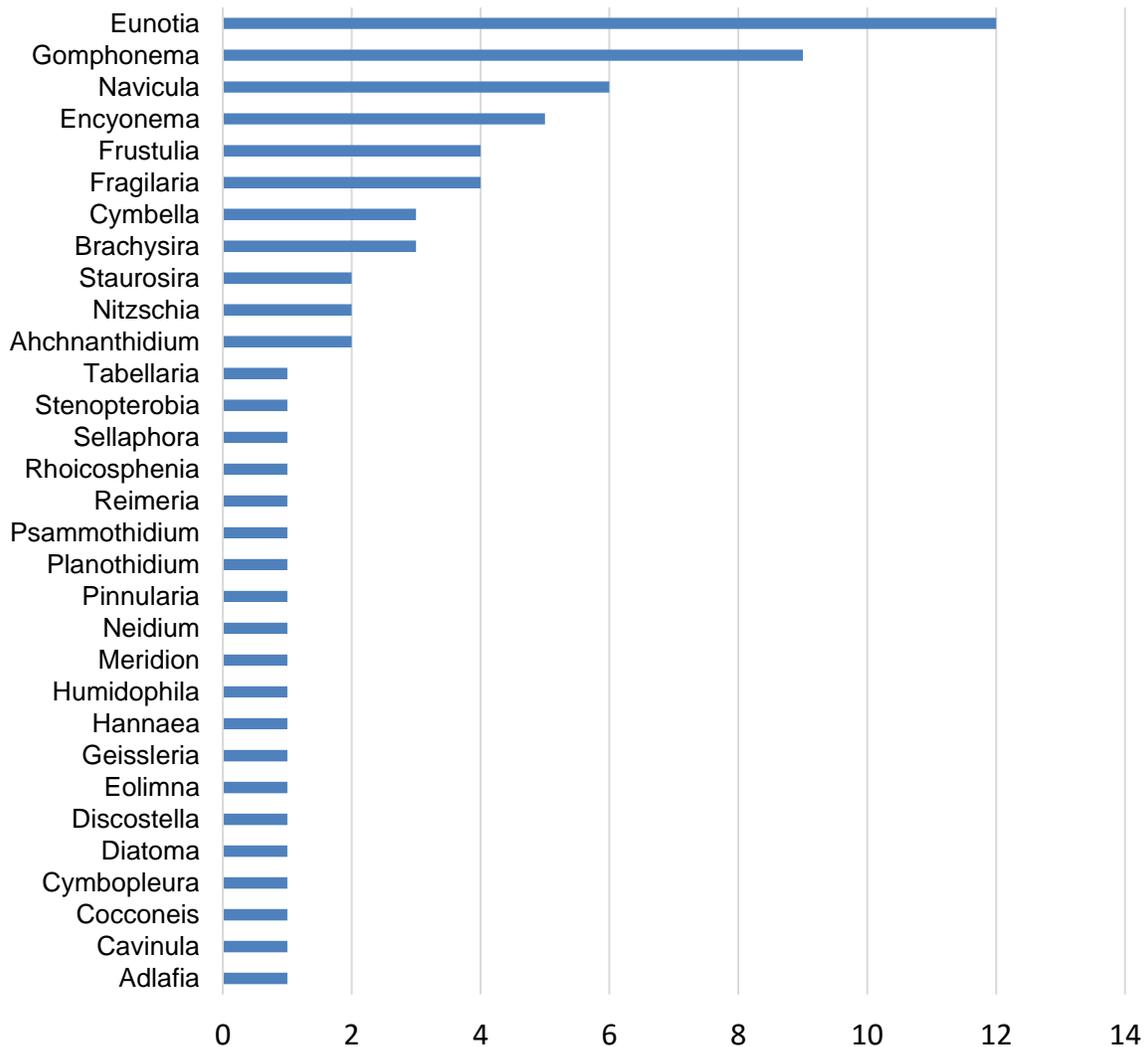


Figura 28. Número de especies por géneros registradas en las muestras de la zona Chuza-sistema Norte.

En términos generales la comunidad de diatomeas del Sistema Chuza estuvo representada por las especies *Achnantheidium minutissimum* *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* (Kützing) Lange-Bertalot (Fravau), *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing y), *Hannaea arcus* (Hanarc) (Ehrenberg) R.M. Patrick in Patrick & Reimer.

No obstante, fueron específicas para esta zona *Psammothidium helveticum*, que ha sido reportada en ambientes pobres en nutrientes y ácidos (Cuna *et al.* 2015). *Encyonema affines venezolanum* que según reporta la literatura ha sido registrado en ambientes ácidos (pH 5.5-6) (Vouilloud *et al.* 2010).

▪ Quebrada Babilonia

Con el fin de dar cumplimiento al Numeral 32 del Artículo Primero del Auto 1093 de 31 de marzo de 2017 se revisaron 5 muestras de la Quebrada Babilonia. Estuvo compuesta por 18 especies, 13 morfo especies, 9 con forma y 9 afines, distribuidas en 10 órdenes, 19 familias, 31 géneros. De esta composición, las especies que tuvieron una representatividad mayor al 5% fueron 4: *Achnantheidium minutissimum* (Kützing) Czarnecki, (Achmin), *Cymbella afines. turgidula* (Cymtur), *Fragilaria capucina var. vaucheriae* (Kützing) Lange-Bertalot (Fravau) y *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (Tabfloc).

En tres de las cuatro muestras *Achnantheidium minutissimum* fue la especie dominante (años 2015, 2018 y 2021), esta especie es reconocida por habitar aguas bien oxigenadas, con un amplio espectro de tolerancia que va desde ambientes con baja concentración de nutrientes hasta contaminados por exceso y desde ácidos hasta alcalinos (Taylor, 2007 & Potapova & Hamilton, 2007).

Por su parte, en el año 2014 *Tabellaria flocculosa* hizo el mayor aporte a la abundancia de la comunidad (**Figura 29**). Según la literatura, esta especie a nivel global tiene una distribución extensa, sin embargo, en estudios realizados en el país como el llevado a cabo por (Medina – Tombé *et al.* 2017) sugiere que esta especie responde a pequeños cambios físico químicos que podrían determinar su distribución aunque en términos de altitud esté reportada entre los 159 y 2793 msnm, en un rango de conductividad entre 5 y 134 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), con valores de ph entre 6 y 7.9 unidades de pH siendo características que demuestran el espectro que podrían ocupar en el país.

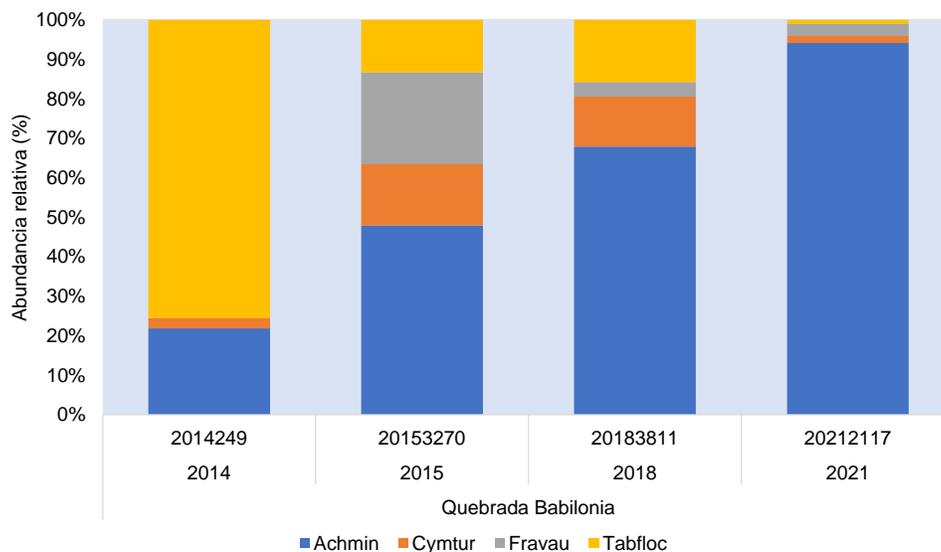


Figura 29. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de la quebrada Babilonia. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ Río Chuza-Puente

En el Río Chuza- Sector Puente la comunidad de diatomeas estuvo representada por 15 especies, 2 morfo especies, 2 con forma y 2 afines distribuidas en 11 órdenes, 19 familias, 31 géneros, de los cuales se destacaron Fragilariales, Achnanthes y Tabellariales. Las

especies más representativas fueron 5 (abundancia >5 %): *Achnantheidium minutissimum* (Achmin), *Fragilaria capucina* var. *rumpens* (Kützing) Lange-Bertalot ex Bukhtiyarova (Frarum), *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* (Fravau), *Hannaea arcus* (Hanarc) (Ehrenberg) R.M. Patrick in Patrick & Reimer y *Tabellaria flocculosa* (Tabfloc).

En las muestras de los años 2013 y 2018 *Tabellaria flocculosa* fue la especie que mayor aporte hizo, siendo representativa de ambientes oligotróficos y sensible a la contaminación (Oeding & Taffines s, 2015) en la muestra de 2015 se registró codominancia de *Achnantheidium minutissimum* y *Tabellaria flocculosa*. En la muestra de 2019 (2019210) *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* fue la más abundante y en la segunda muestra de 2019, destacándose por ser una especie que habita sistemas con concentraciones de oxígeno disuelto de 5 mg/L, ph de 6.6, conductividad alrededor de 60 µs/cm (Montoya-Moreno & Aguirre-Ramírez, 2013) y baja alcalinidad (Baattrup-Pedersen *et al.* 2022) y en la muestra de 2021 (20212118) *Achnantheidium minutissimum* se destacó (Figura 30).

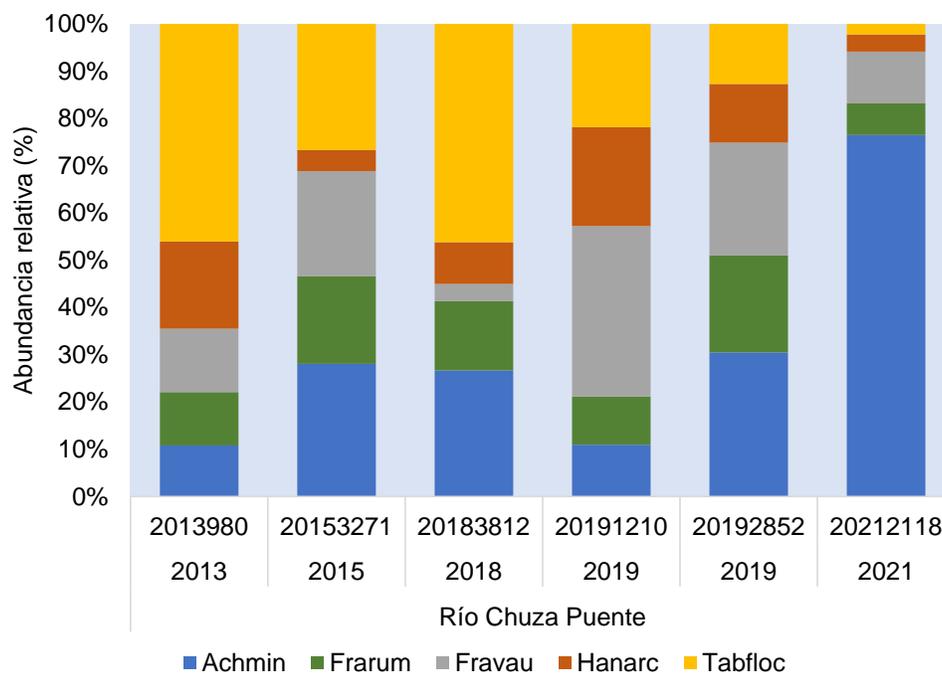


Figura 30. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Chuza- sector puente. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Río Guatiquia Aguas arriba**

En las 6 muestras del Río Guatiquia Aguas arriba se registraron 15 especies, 3 morfo especies, 1 con forma y 1 afines, pertenecientes a 7 familias en 6 órdenes. En las muestras registradas de 2010, 2013, 2014, 2015 y 2018 *Tabellaria flocculosa* se destacó en términos de abundancia relativa, codominando en el primer caso con *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*. Únicamente, en la muestra de 2011 la especie dominante fue *Hannaea arcus* (Figura 31).

Tabellaria flocculosa es reconocida por ser una especie común en ambientes pobres en nutrientes, circumneutrales o ligeramente ácidos y *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* es reportada por habitar un espectro más amplio (Taylor 2007).

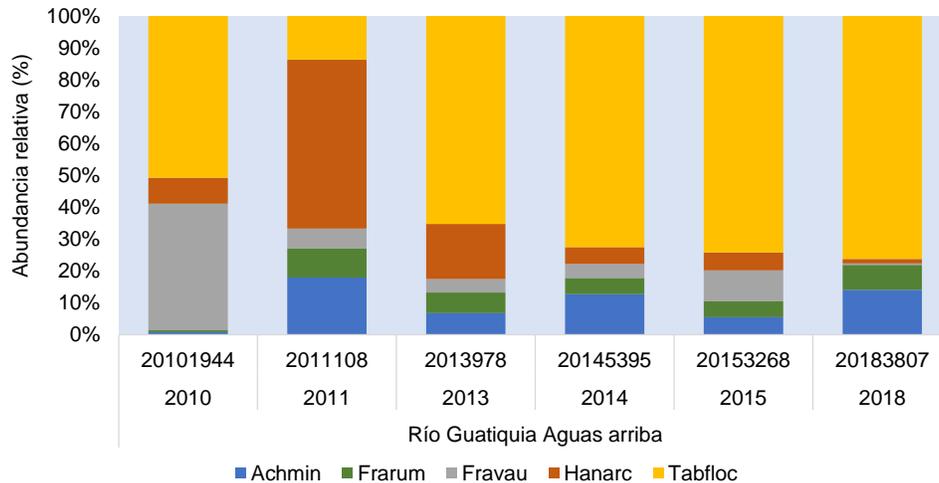


Figura 31. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Guatiquía aguas arriba. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ Río Guatiquía Aguas abajo

La comunidad de diatomeas del punto Río Guatiquía Aguas abajo estuvo compuesta por 26 especies, 3 morfo especies, 3 con forma y 2 afines distribuidas en 8 órdenes, 11 familias y 17 géneros, de las cuales 5 presentaron una abundancia mayor o igual al 5 %. Se destacó el aporte de *Tabellaria flocculosa* en 6 de las 7 muestras con abundancias superiores al 40% en cada caso, suele ser una especie recurrente en ambientes pobres en nutrientes, prefiriendo aguas ligeramente ácidas (Medina-Tombé *et al.* 2017).

La excepción a esta tendencia se observó en la muestra 20182714 en la cual *Hannaea arcus* fue la especie dominante que suele ser muy abundante en zonas de alta corriente (Ramírez & Plata-Díaz 2008) y en Estados Unidos se ha reportado en aguas frías de corrientes montañosas, son solitarias, no móviles y son consideradas como una especie altamente sensible acorde con el panel de expertos que evaluó el Gradiente de Condición biológica en un amplio set de especies (Kociolek 2010). No obstante, esto debe ser evaluado en ambientes tropicales (**Figura 32**).

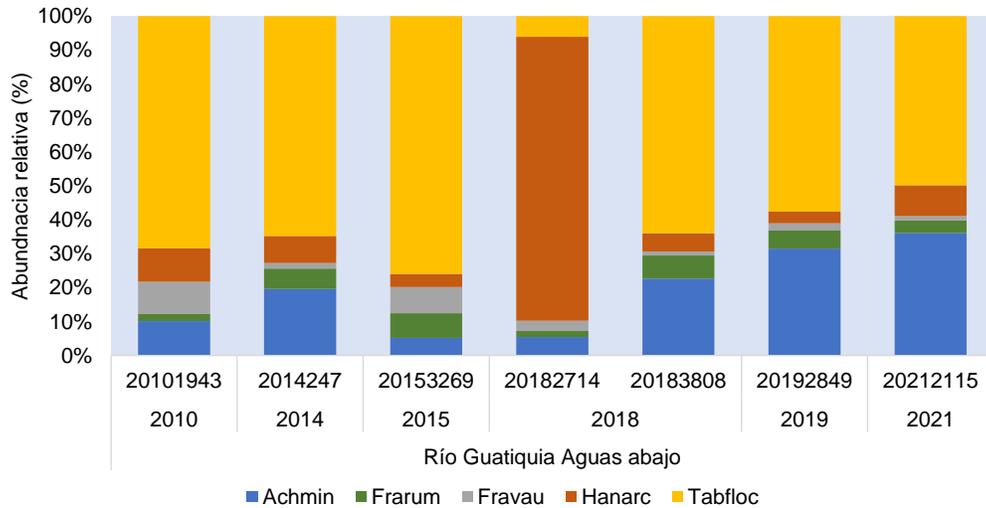


Figura 32. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Guatiquía – aguas abajo. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Leticia**

En las muestras de la Quebrada Leticia se registraron 34 especies, 7 morfo especies, 6 con forma y 4 afines, de las cuales presentaron abundancias iguales o superiores al 5 % solamente 5, en un total de 3 muestras (*Achnantheidium minutissimum*, *Fragilaria capucina* var. *rumpens*, *Tabellaria flocculosa*, *Eunotia muscicola* Krasske y *Eunotia* sp.2 Q. Leticia)). Tanto *Achnantheidium minutissimum* como *Fragilaria capucina* var. *rumpens* se destacaron por su mayor abundancia (**Figura 33**).

Si bien *Achnantheidium minutissimum* es considerada una especie registrada en condiciones ambientales muy variables desde zonas pobres en nutrientes hasta ambientes ricos en nutrientes, ácidos y alcalinos, esta misma característica de amplitud en la preferencia de hábitat está presente en *Fragilaria capucina* (Taylor 2007). Entonces el caudal podría tener significancia ecológica, representada en mayor abundancia de especies postradas que son formas resistentes a los cambios hidrológicos (Pedraza & Donato 2011).

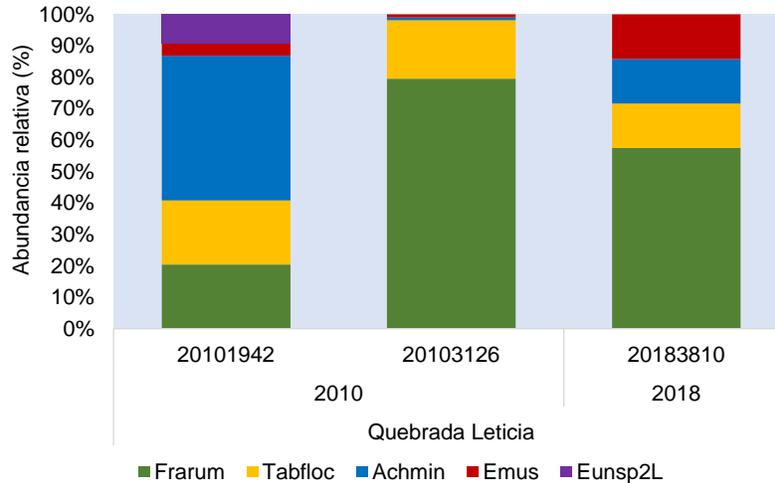


Figura 33. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Leticia. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Descarga de fondo**

En el punto Descarga de Fondo Embalse de Chuza se registraron 33 especies, 3 morfo especies, 5 con forma y 3 afines distribuidas en 14 familias y 8 órdenes. De estas, 7 presentaron abundancias superiores al 5 %. La especie de mayor representatividad fue *Achnantheidium minutissimum* seguida por *Fragilaria capucina var. rumpens* y *Sellaphora saugerresii* (Desmazières) C.E.Wetzel & D.G.Mann en las 8 muestras analizadas de los años 2009, 2010, 2011, 2013, 2015, 2018, 2019 y 2021.

Estas tres especies son reconocidas en un amplio espectro de ambientes que van desde la poca disposición de nutrientes hasta habitar zonas con altas cargas de nutrientes (Taylor *et al.* 2007).

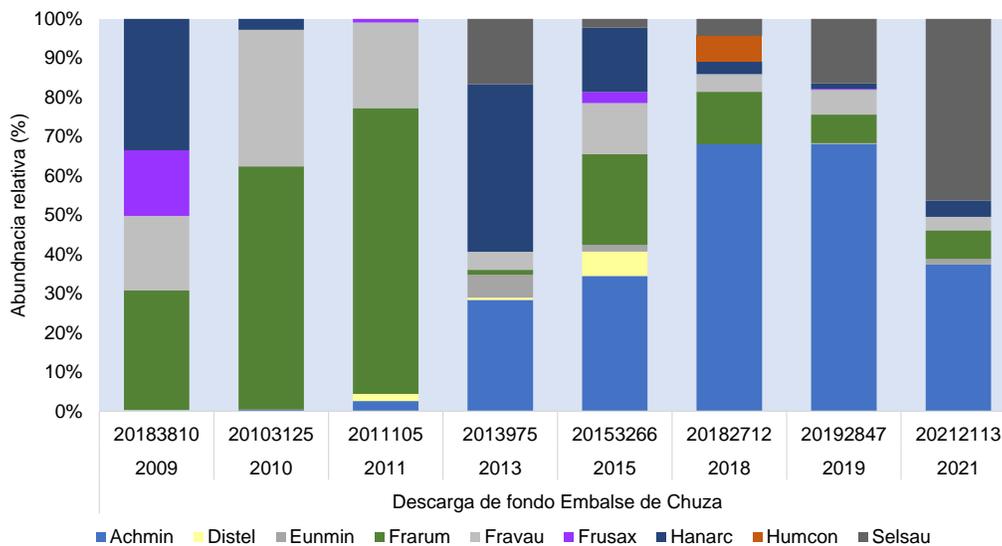
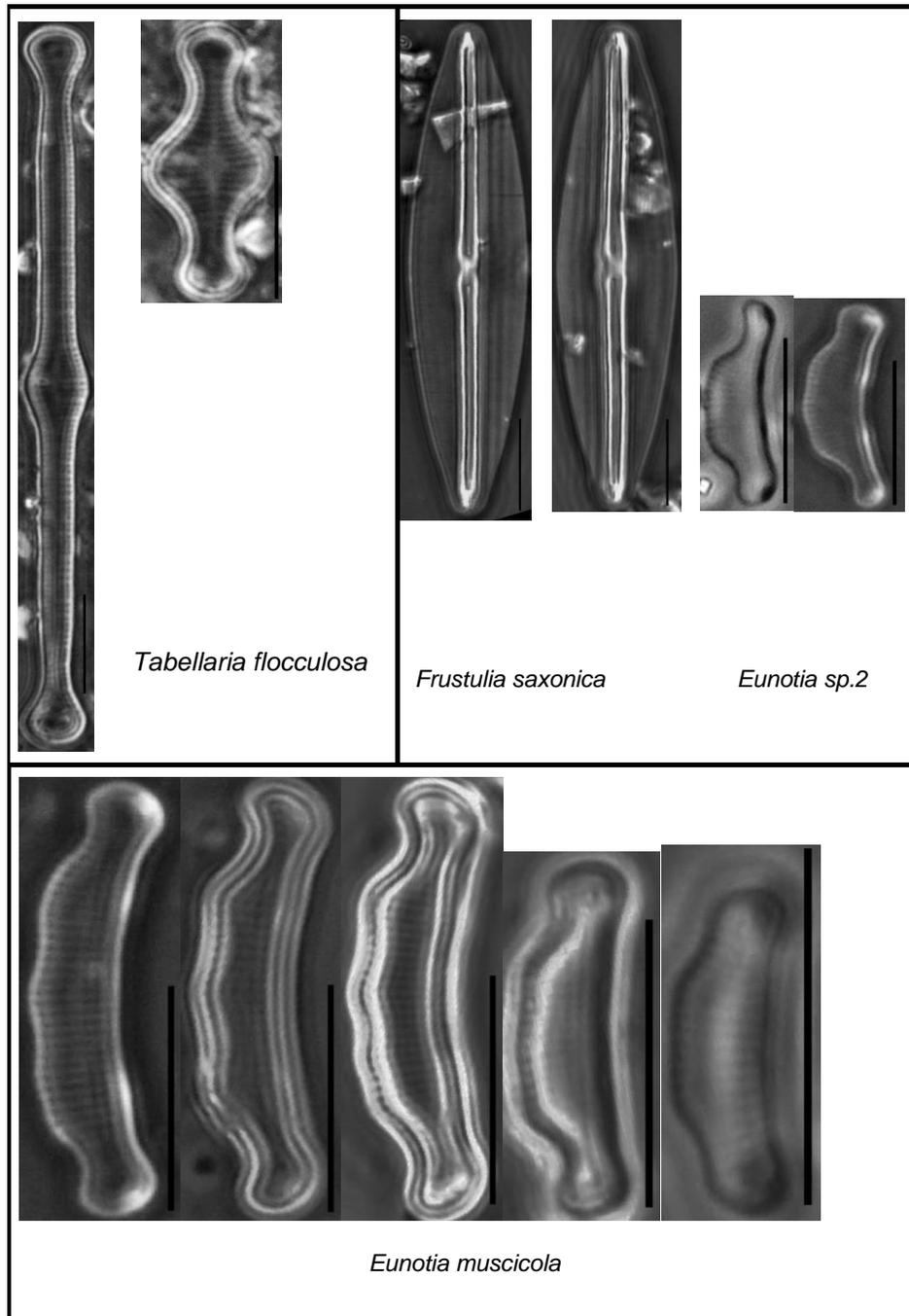


Figura 34. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de descarga de fondo- embalse de Chuza. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

Tabla 2. Imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas del Sistema Chuza.



4.2.1.2 Sistema Río Blanco

La comunidad de diatomeas del Sistema Río Blanco estuvo conformada por 20 familias, 35 géneros, 52 especies, 21 morfo especies, 14 con forma y 9 afines. Se analizaron 69 muestras entre los años 2007 y 2019. En la **Tabla 3** se presentan las imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas de Sistema Río Blanco.

De los 35 géneros presentes, se destacó *Navicula* y *Gomphonema* por presentar el mayor número de especies, por el contrario, fue mayor el número de géneros que solamente tuvieron una especie (morfo especie, afines o con forma.) los géneros *Achnantheidium*, *Adlafia*, *Nupela* hicieron parte de este grupo. En la **Figura 35** se presentan imágenes de las especies más representativas. En el **Anexo 9** se presenta el registro de abundancia en este sistema.

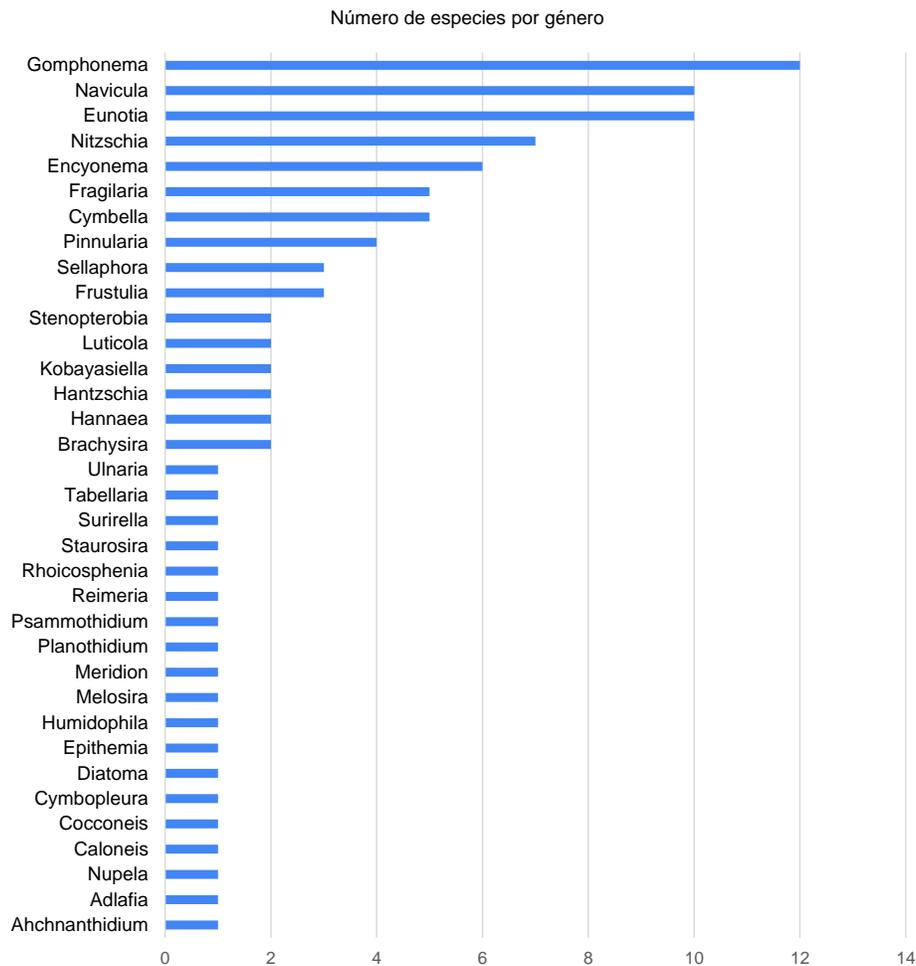


Figura 35. Número de especies por géneros registradas en las muestras de río Blanco-sistema Norte.

▪ **Quebrada Blanca**

En la Quebrada Blanca la comunidad de diatomeas se registraron 32 especies, 4 morfo especies, 5 con forma y 2 afines, en total 22 géneros y 15 familias de las cuales 9 hicieron aportes superiores al 5%. Entre estas se destacaron *Achnanthis minutissimum* es una especie recurrente en diferentes tipos de ambientes, en aguas bien oxigenadas abarcando desde sistemas pobres en nutrientes hasta sistemas con altas cargas (Potapova & Hamilton, 2007), *Hannaea arcus* y *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* es registrada en zonas de baja concentración de nitratos, pH ácido y bajas temperaturas (Donato-Rondón J & Abuhatab-Aragón Y. 2018). En el, 2009 y 2015 se destacó el aporte de *Fragilaria capucina* var. *rumpens*, en 2018 *Hannaea arcus* y *Fragilaria capucina* var. *rumpens* siendo esta especie más abundante en las muestras de 2019 (Figura 36).

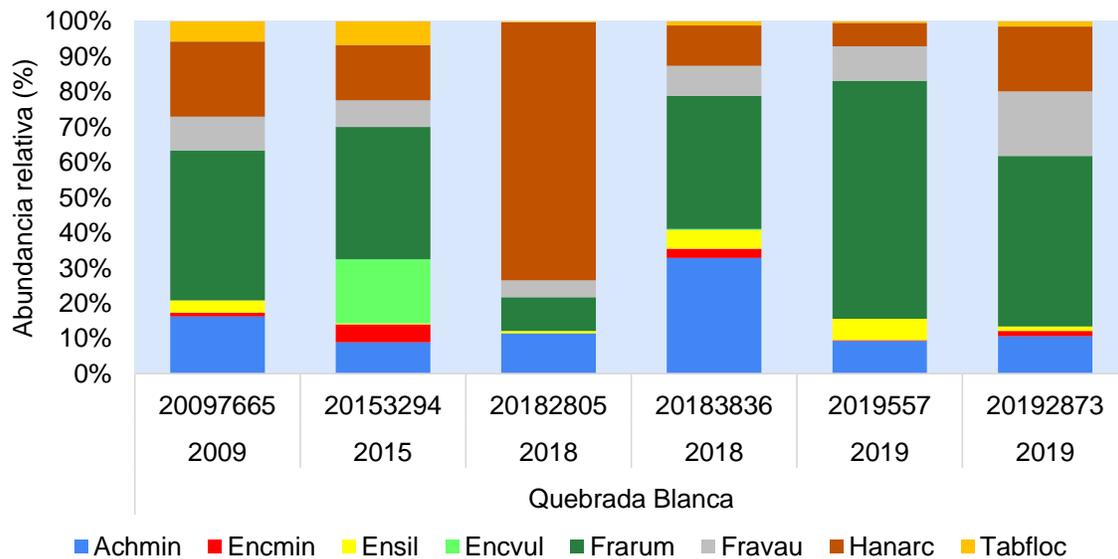


Figura 36. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Blanca-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada El Mangón**

La comunidad de diatomeas de la Quebrada El Mangón estuvo representada por 25 especies (3 de las cuales fueron determinadas como morfo especies, 2 con forma, 1 afín y 1 forma teratológica), distribuidas en 20 géneros y 12 familias (Figura 37).

De estas se destacaron: *Rhoicosphenia abbreviata* (C.Agardh) Lange-Bertalot en los años 2010 y 2013, siendo una especie colonizadora en estadios tempranos y muy adaptada a la corriente (Richards *et al.* 2020) además de ser tolerante a la contaminación (Taylor 2007). *Nitzschia* sp.4 en las muestras de 2015 y 2019, *Nitzschia recta* Cleve & Grunow fue codominante en la muestra de 2010 y 2018, especie que es conocida por ser indicadora de sistemas alcalinos (Baattrup-Pedersen *et al.* 2022).

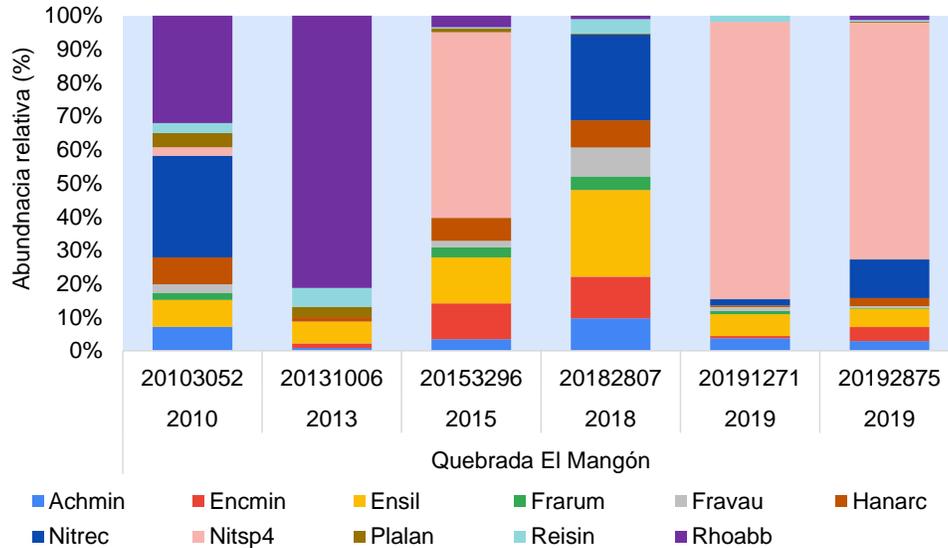


Figura 37. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada El Mangón-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Colorada I y II**

La comunidad de diatomeas de la Quebrada Colorada I y II estuvo representada por 29 especies, 1 de ellas teratológica, 3 morfo especies, 1 con forma y 1 afines distribuidas en 17 géneros y 11 familias. El género más representativo fue *Hannaea arcus* en 7 de las 8 muestras analizadas, siendo una especie registrada en aguas corrientes. En Quebrada Colorada I *Nitzschia recta* fue la especie más abundante, siendo registrada en ambientes con pH superior a 7 (Baattrup-Pedersen *et al.* 2022) (Figura 38).

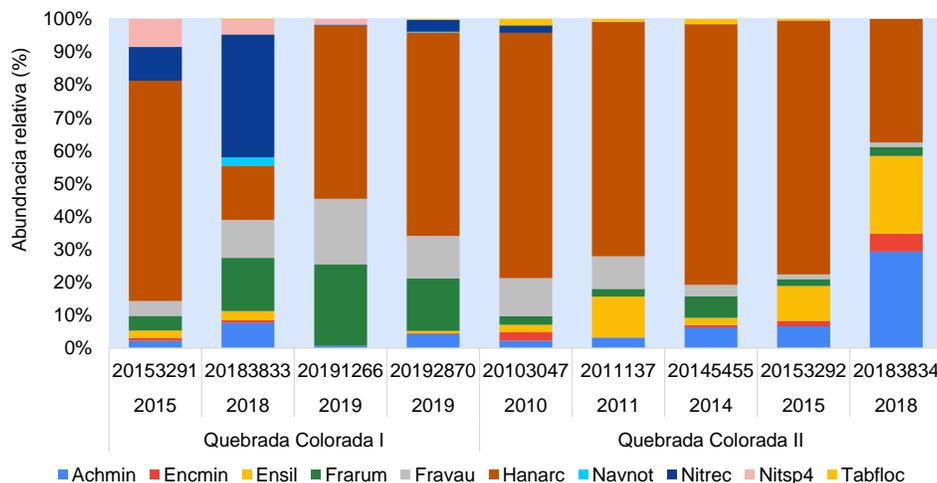


Figura 38. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Colorada I y Colorada II-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Piedras Gordas**

En Quebrada Piedras Gordas se registraron 20 especies, 2 se determinaron como morfo especies, 5 con forma, 5 como afines y una especie fue teratológica (*Fragilaria capucina var. rumpens* (teratológica) distribuidas en 20 géneros y 14 familias. En esta Quebrada se destacó por el mayor aporte *Fragilaria capucina var. rumpens* en las muestras del año 2009 y 2019, en este último fue también importante el aporte de *Tabellaria flocculosa* que suele ser muy representativa en ambientes con baja concentración de nutrientes además de ser sensibles a la contaminación (Taylor, 2007; Oeding & Taffines s, 2015) y *Meridion circulare var. constrictum* que ha sido indicador de alta concentración de nitratos en algunos estudios (Stenger-Kovács *et al.* 2020) (Figura 39).

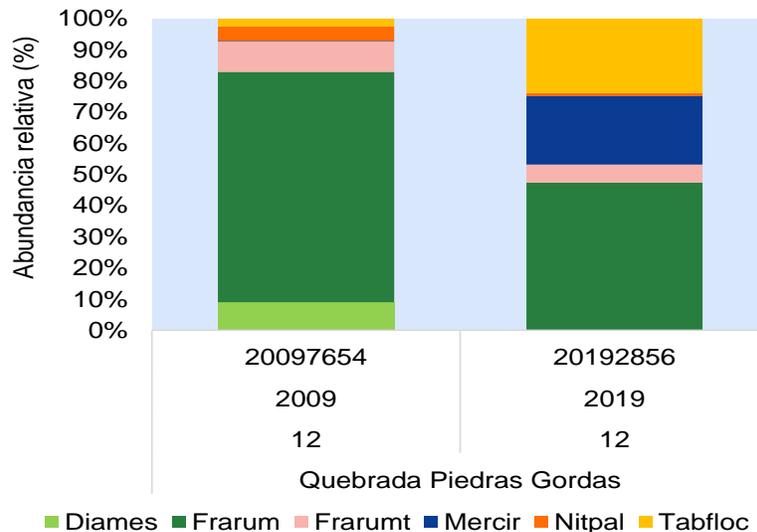


Figura 39. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Piedras Gordas-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada La Horqueta I**

La comunidad de diatomeas de Quebrada La Horqueta I estuvo conformada por 24 especies, 4 morfo especies, 3 con forma, y 4 afines distribuidas en 22 géneros y 16 familias. En esta Quebrada se destacó el aporte de *Psammothidium subatomoides* (Hustedt) L.Bukhtiyarova & Round que es reconocida en sistemas de Brasil ricos en nutrientes (Schneck *et al.* 2007) , *Fragilaria capucina var. rumpens* registrada en ambientes con baja concentración de nutrientes hasta concentraciones medias (Donato-Rondón J & Abuhatab-Aragón Y. 2018) y *Hannaea arcus* recurrente en sistemas de alta corriente (Ramírez *et al.* 2008) (Figura 40).

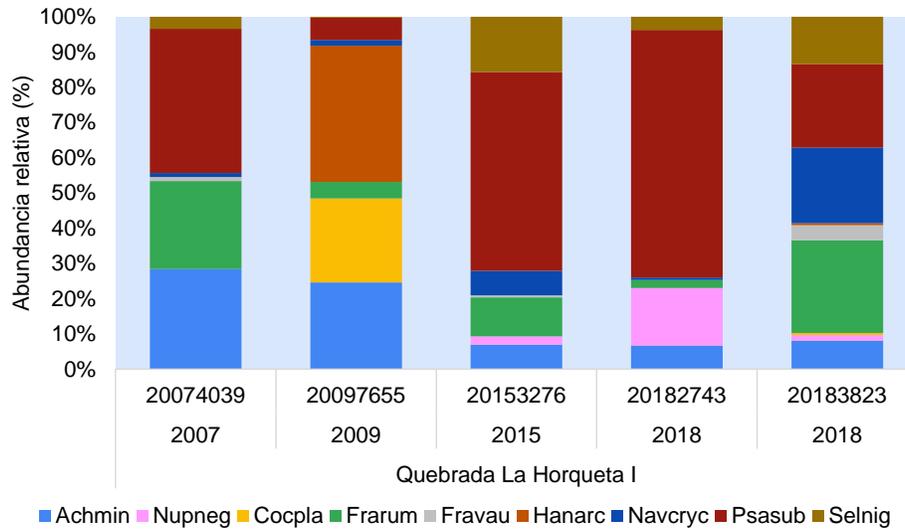


Figura 40. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada La Horqueta I-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Calostros**

En Quebrada Calostros se identificaron 27 especies, 3 se determinaron como morfo especie, 4 con forma y 1 afines, en total se registraron 13 familias y 23 géneros. En 3 de las 5 muestras revisadas fue más alto el aporte de *Hannaea arcus* como característica distintiva de las demás muestras, siendo esta especie registrada en ambientes de corriente y con posibilidad de habitar sistemas con altas concentraciones de nutrientes (Alvial *et al.* 2008) (Figura 41).

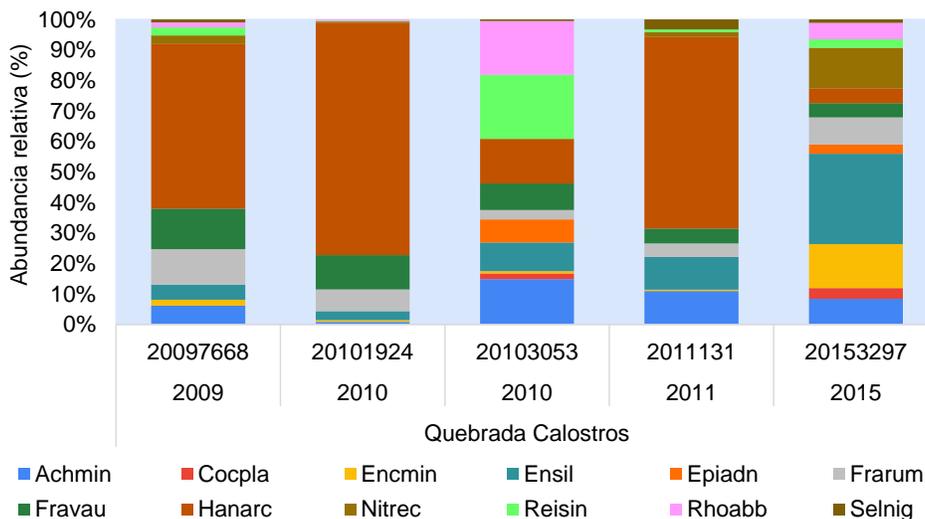


Figura 41. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Calostros -sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Cortadera**

La comunidad de diatomeas de Quebrada Cortadera estuvo conformada por 28 especies, 2 de ellas teratológicas, 2 morfo especie, 1 con forma y 2 afines distribuidas en 17 géneros y 11 familias. En 4 de las 6 muestras *Achnantheidium minutissimum* fue la especie que mayor aporte hizo a la comunidad con aportes entre 26 % y 71 %, seguido por la abundancia de *Cocconeis placentula* (Skvortzow) Skabichevskii que es una especie que se adhiere a rocas, de amplia distribución geográfica principalmente donde el pH tiene vales circumneutrales o alcalinos y es tolerante a la contaminación orgánica moderada (Gari & Corigliano 2007) y *Encyonema silesiacum* (Bleisch) D.G.Mann ha sido reportada en ambientes de buena calidad aunque es tolerante a contaminación, por ejemplo altas concentraciones de fósforo (Mora et al. 2007) (**Figura 42**).

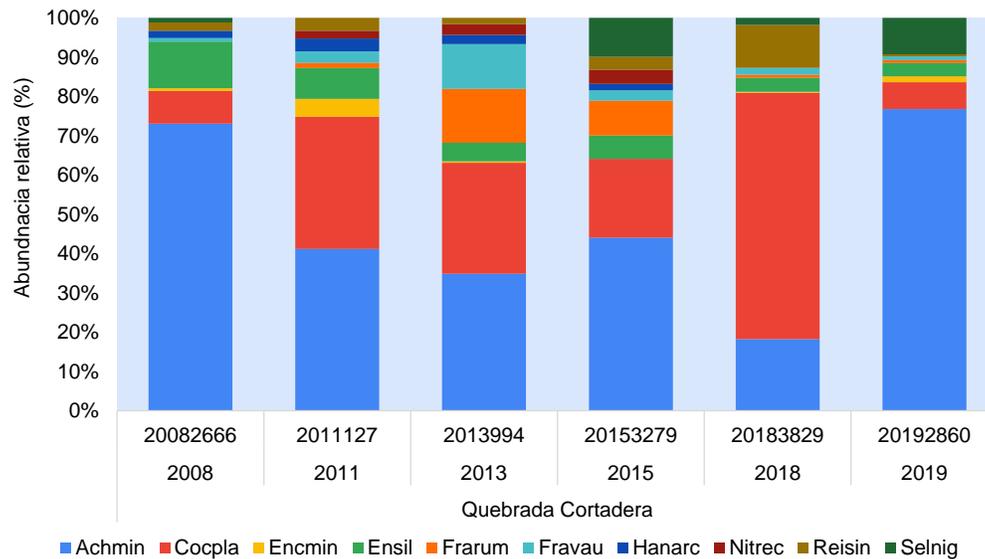


Figura 42. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Cortadera -sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

4.2.1.3 Quebrada Plumaraña

En Quebrada Plumaraña se registraron 22 especies y 2 morfo especies, en total 15 géneros y 11 familias. Las especies que se destacaron por la mayor abundancia fueron *Achnantheidium minutissimum* registrada en aguas bien oxigenadas y con flujo constante (Taylor 2007), *Sellaphora nigri* (De Notaris) C.E.Wetzel & L.Ector que es una especie ampliamente distribuida con tolerancia a la contaminación (Wetzel et al. 2015), *Reimeria sinuata* (Gregory) Kociolek & Stoermer presente en aguas circumneutrales a alcalinas con alta concentración de oxígeno aunque también se registra en ambientes con baja concentración de nutrientes, siendo tolerante a altos niveles de nitrógeno (Taylor et al. 2007) y *Encyonema silesiacum* es una especie ampliamente distribuida que se encuentra en aguas oligotróficas a eutróficas y pueden tolerar condiciones de contaminación fuertes (Taylor et al. 2007) (**Figura 43**).

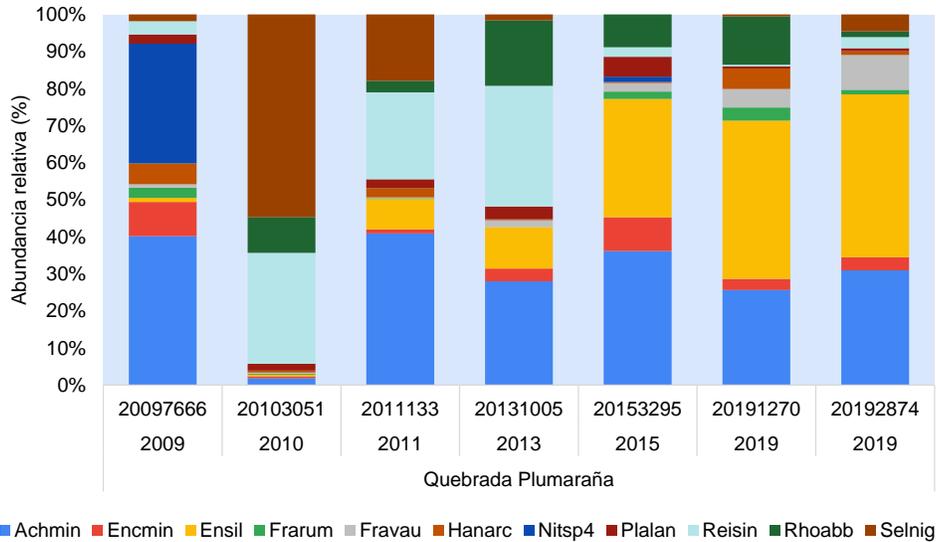


Figura 43. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Plumaraña-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Peñas Blancas**

En la quebrada Peñas Blancas se determinaron 22 especies, 1 morfo especie, 3 afines y 1 con forma y se registraron 2 especies teratológicas distribuidas en 21 géneros y 13 familias. En dos de las muestras (año 2010 y 2018) se destacó *Reimeria sinuata* por su mayor abundancia. *Hannaeae arcus* hizo el mayor aporte en la muestra de 2014 y *Fragilaria capucina var. rumpens* fueron las siguientes especies que mayor aporte hicieron al sistema (Figura 44).

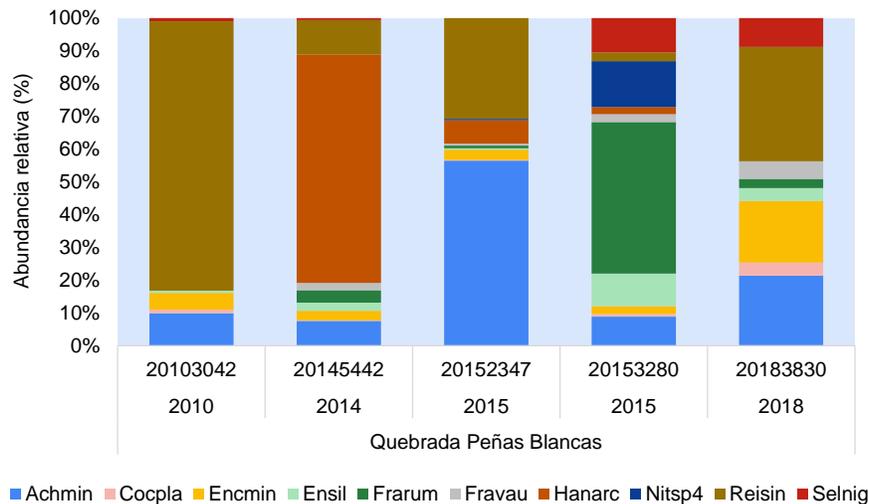


Figura 44. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Peñas Blancas-sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Carrascales**

En la Quebrada Carrascales se identificaron 25 especies, 2 morfo especies y 2 con forma y 4 afines, 17 géneros y 12 familias. De estas, especies superaron el 5 % de la abundancia destacándose *Achnantheidium minutissimum*, *Hannaea arcus* y *Sellaphora nigri* (Figura 45). Estas especies son reconocidas por habitar diferentes sistemas, desde los que presentan bajas concentraciones de nutrientes, bien oxigenados hasta sistemas con alta concentración de iones, tanto ácidas como alcalinas (Potapova & Hamilton, 2007; Wetzel 2015).

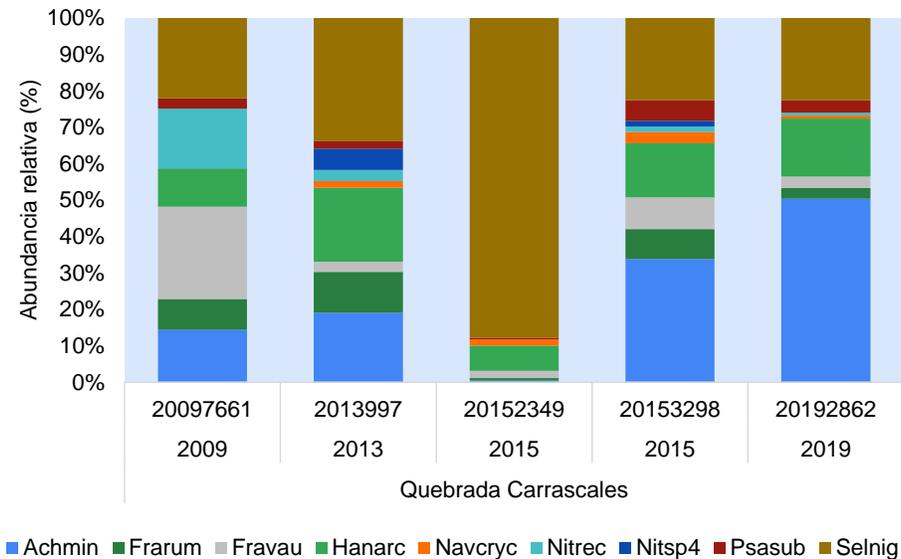


Figura 45. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Carrascales -sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Siberia I**

La comunidad de diatomeas de Quebrada Siberia estuvo conformada por 13 especies, 2 morfo especie y 1 afín, en total 12 géneros y 8 familias. Las especies *Achnantheidium minutissimum*, *Fragilaria capucina var. rumpens* y *Hannaea arcus* superaron en densidad a las demás, destacándose por su mayor aporte (Figura 46).

Del 2010 al 2013 la comunidad estuvo dominada por *Achnantheidium minutissimum* que se caracteriza por habitar aguas bien oxigenadas, *Hannaea arcus* fue más abundante en el 2018, es una especie representativa en zonas de corriente y de ambientes con altas concentraciones de nutrientes y *Fragilaria capucina var. rumpens* tiene amplia distribución y habita en aguas con concentraciones bajas a intermedias de nutrientes (Taylor *et al.* 2007).

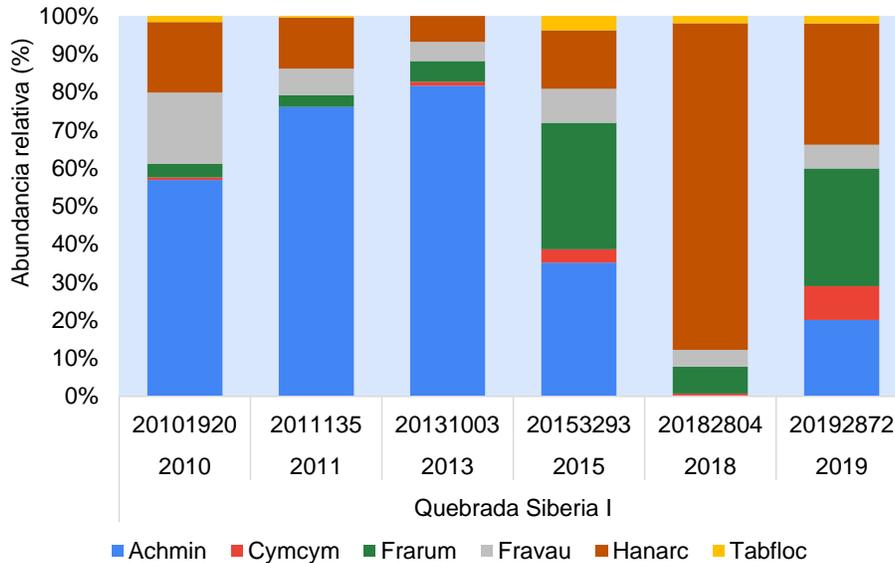


Figura 46. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Siberia I -sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Chocolatal**

La Quebrada Chocolatal estuvo representada por 19 especies de diatomeas, 2 morfo especies, 3 con forma y 4 afines, distribuidas en 20 géneros y 14 familias. Se destacaron 3 especies: *Diatoma mesodon* (Ehrenberg) Kützing, *Psammothidium subatomoides* y *Sellaphora nigri* por su mayor abundancia con aportes en cada caso superiores al 39 % (Figura 47). *Diatoma mesodon* es una especie de amplia distribución, registrada en ambientes con baja concentración de nutrientes, media y alta (Kim & Min, 2017). *Psammothidium subatomoides* ha sido registrada en ambientes con alta concentración de nutrientes (Schneck et al. 2007).

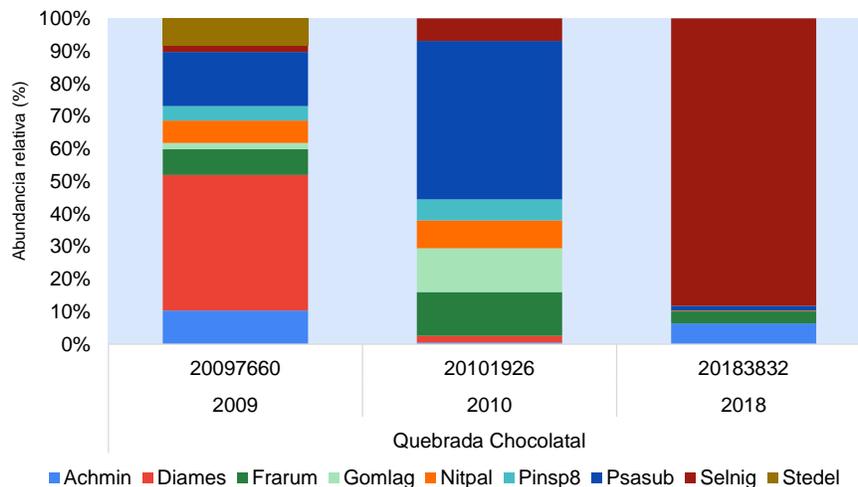


Figura 47. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Chocolatal -sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Quebrada Palacio - Buitrago**

La comunidad de diatomeas de Quebrada Buitrago estuvo compuesta por 24 especies, 2 morfo especies, 2 con forma y 2 afines, 18 géneros y 12 familias. La distribución de las especies fue particular en cada muestra siendo más representativa *Hannaea arcus* en 2007, *Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson en 2009, *Fragilaria capucina* var. *rumpens* en 2013 y *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* en 2019 (**Figura 48**). En general estas especies son frecuentes en sistemas en los cuales la concentración de nutrientes es alta (*Hannaea arcus*) (Ramírez *et al.* 2008; Alvial *et al.* 2008) y *Epithemia adnata* ha sido reportada en ambientes con alta concentración de fosfatos y baja conductividad (Donato-Rondón *et al.* 2022).

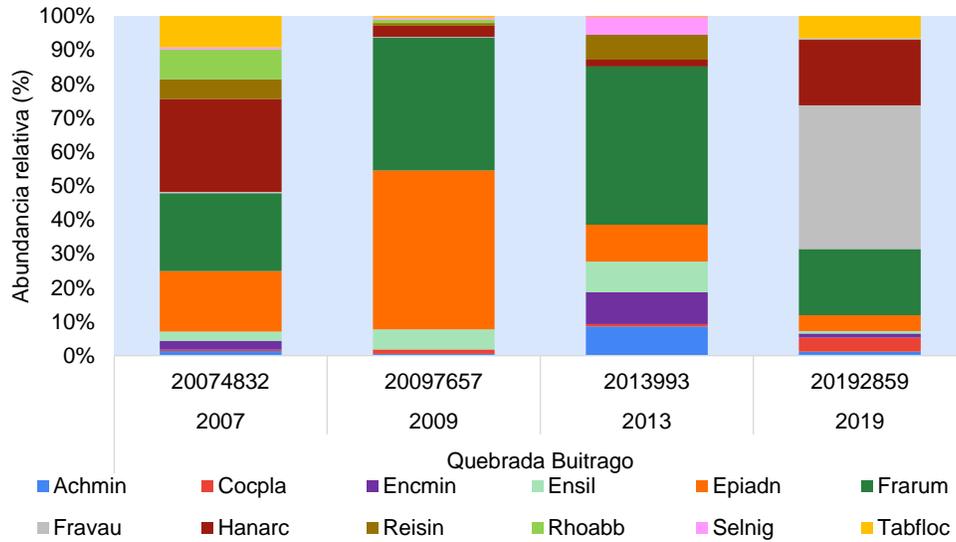
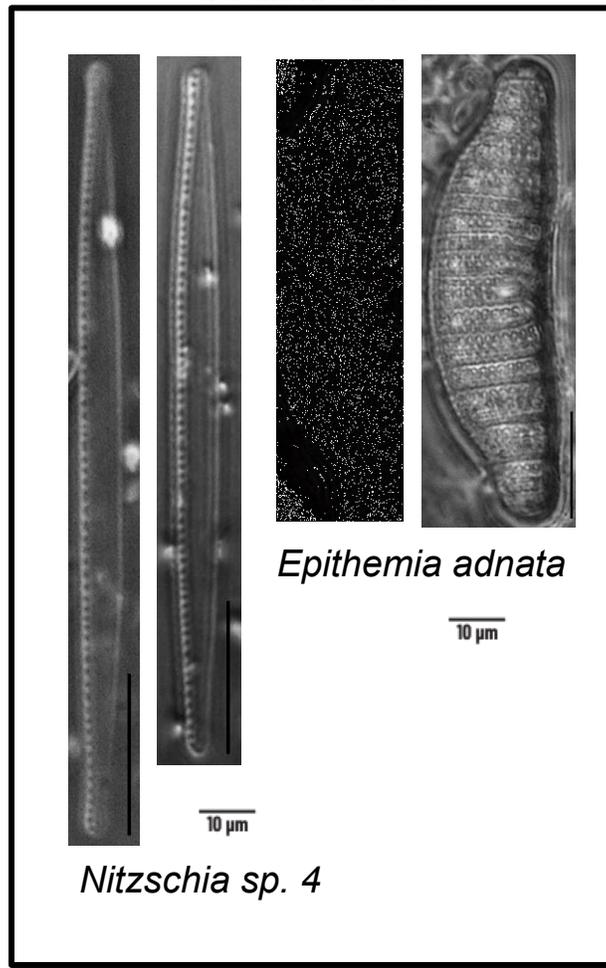
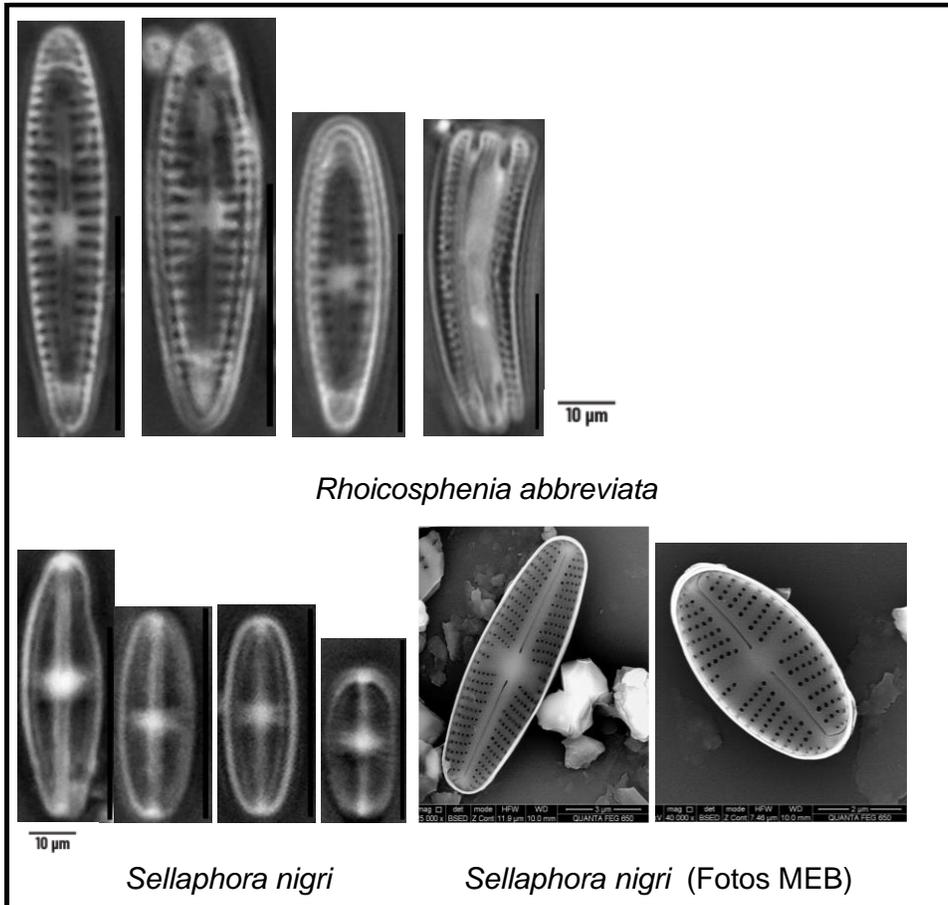


Figura 48. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Buitrago -sistema río Blanco. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

Tabla 3. Imágenes de las especies de la comunidad de diatomeas más representativas de Sistema Río Blanco





4.2.1.4 Sistema San Rafael

La comunidad de diatomeas del Sistema San Rafael estuvo conformada por 23 familias, 39 géneros por 62 especies, 16 morfo especies, 13 con forma y 18 afines. Se analizaron 26 muestras que presentaron abundancias superiores a 200 valvas entre los años 2008 y 2021. En la **Tabla 4** se presentan las imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas en el Sistema San Rafael.

Se destacaron de los 39 géneros *Eunotia*, *Navicula*, *Pinnularia*, *Nitzschia* y *Gomphonema* con más de 9 especies cada una, sin embargo, el número de géneros con solo una especie fue considerablemente mayor (26 géneros) (**Figura 49**). En el **Anexo 19** se presenta el registro de abundancia de la comunidad de diatomeas en Sistema San Rafael. Si bien las abundancias se verán en las gráficas a continuación, es preciso anotar que para esta comunidad *Cyclostephanos dubius*, *Craticula affines ambigua*, *Craticula affines cuspidata*, *Gyrosigma con forma scalproides*, *Lemnicola hungarica* y *Rhopalodia gibberula* son especies específicas.

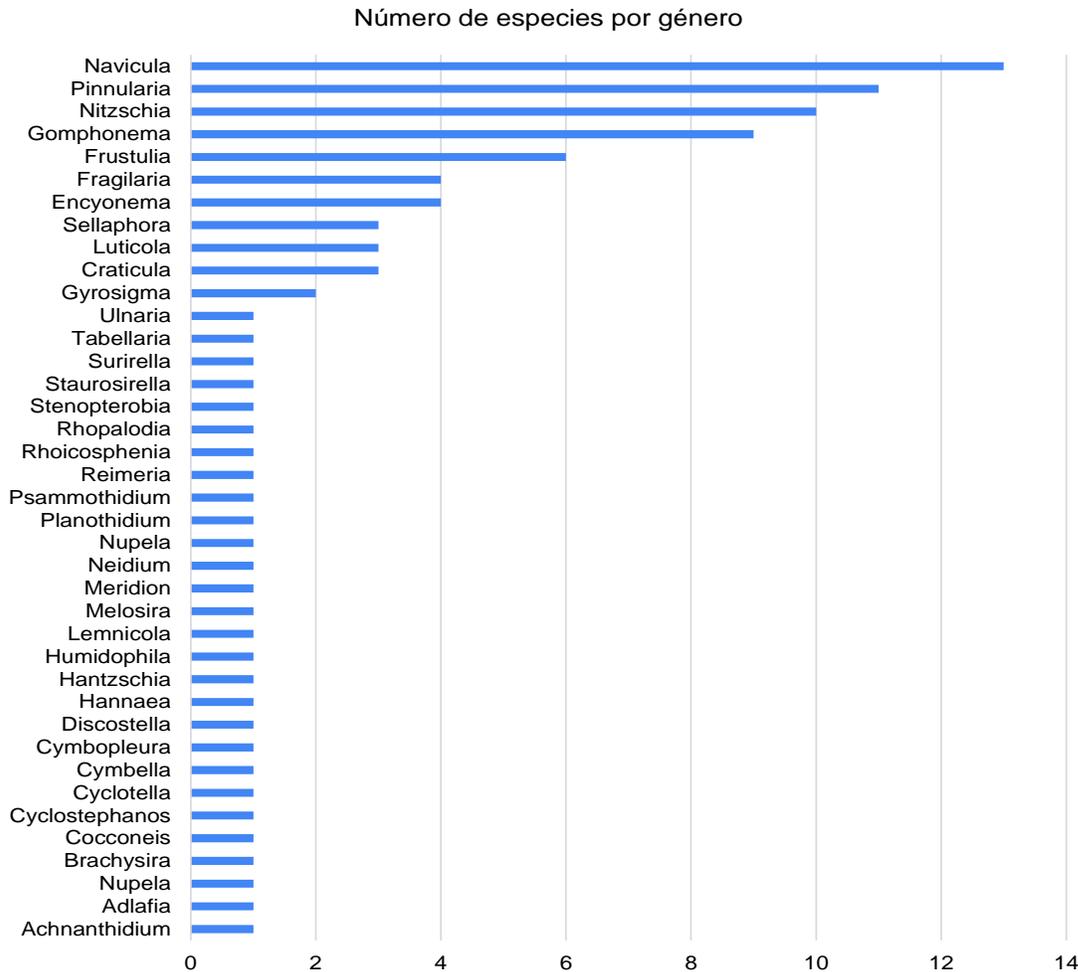


Figura 49. Número de especies por géneros registradas en las muestras de sistema Norte-San Rafael.

▪ **Nacimiento Río Teusacá**

La comunidad de diatomeas de las muestras correspondientes al Nacimiento de Río Teusacá estuvo compuesta por 22 especies, 6 morfo especies, 4 con forma y 4 afines, en total 20 géneros y 17 familias. De estas especies, 16 superaron el 5 % de la abundancia relativa por muestra *Eunotia con forma acutinasuta* en 2019 y *Eunotia subarcuatooides* Alles, Nörpel & Lange-Bertalot en las muestras de 2015, 2019 y 2020 (**Figura 50**). Se destacó la alta representatividad de especies del género *Eunotia*, siendo un género favorecido por condiciones de pH y conductividad bajas así como alto contenido de sustancias húmicas (Lange-Bertalot et al. 2011)

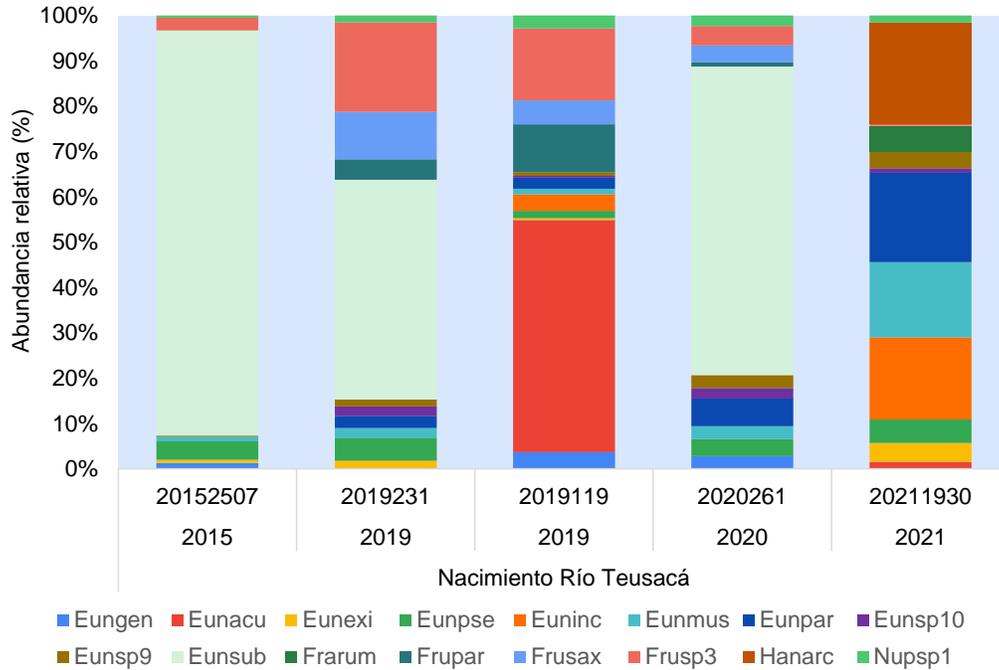


Figura 50. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de nacimiento río Teusacá -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Puente Adobes**

La comunidad de diatomeas de Puente Adobes estuvo representada por 24 especies, 1 morfo especie, 2 con forma, y 5 afines, en total 17 géneros y 15 familias. De estas, 7 representaron el 5% o lo superaron en términos de densidad en las tres muestras (1 de 2018 y 2 de 2019) siendo *Navicula rostellata* Kützing en los tres casos la especie que mayor aporte hizo a la comunidad con abundancia relativa superior al 49 % (**Figura 51**). Esta especie es reconocida por tener una amplia distribución, siendo reportada en ambientes con altas concentraciones de nutrientes eventualmente (Segura-García *et al.* 2010).

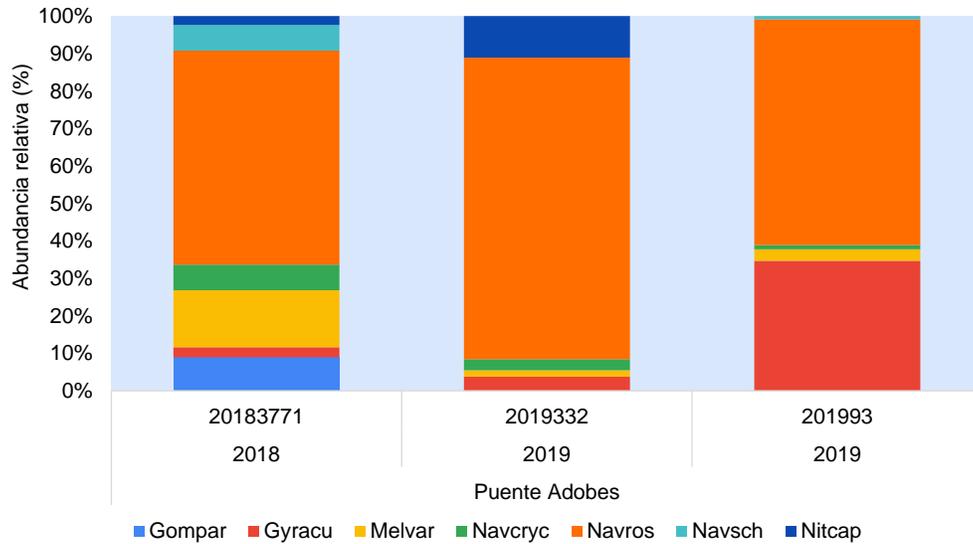


Figura 51. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de puente Adobes -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Puente La Violeta**

La comunidad de diatomeas de Puente La Violeta estuvo conformada por 23 especies, 2 morfo especies, 1 con forma y 4 afines distribuidas en 20 géneros y 15 familias. El género *Navicula* fue el más representativo en las 3 muestras, en los años 2018 y 2019 se destacó *Navicula rostellata* y en 2020 *Navicula schroeteri* Meister, siendo 2 de las 8 especies que superaron el 5 % de la abundancia relativa por muestra (**Figura 52**). Estas dos especies han sido registradas en ambientes con altas concentraciones de nutrientes, principalmente Nitrógeno y Fósforo proveniente de actividades de agricultura (Shibabaw *et al.* 2021).

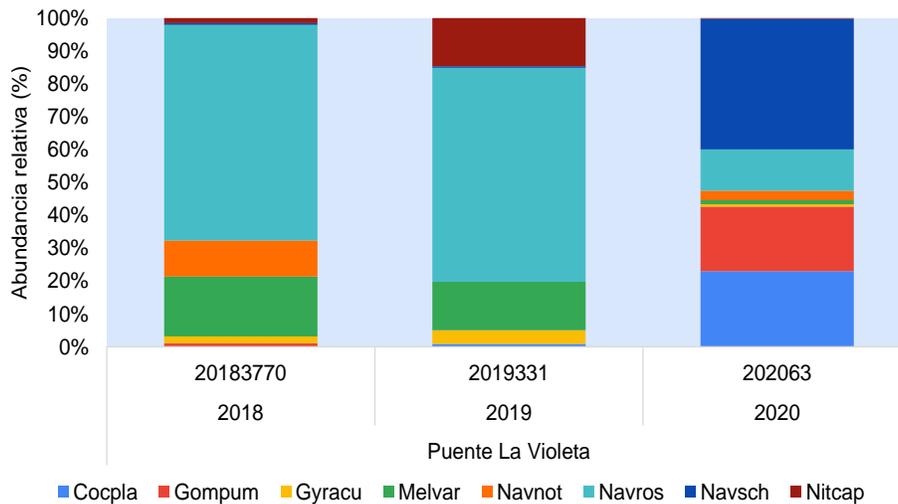


Figura 52. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de puente La Violeta -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **La Cabaña**

En las muestras analizadas del punto La Cabaña se registraron 29 especies, 1 con forma, 4 afines pertenecientes a 15 géneros y 13 familias. De estas especies, 3 sobresalieron por su mayor abundancia relativa: *Encyonema silesiacum* con 61 % en la muestra de 2018, *Sellaphora saugerresii* (Desmazières) C.E.Wetzel & D.G.Mann con el 35 % en la muestra de 2019 y *Cocconeis placentula* 21 % en 2020 (**Figura 53**).

Estas especies comparten la posibilidad de ser tolerantes a contaminación por nutrientes, en el caso de *Encyonema silesiacum* específicamente fósforo (Taylor *et al.*, 2007; Mora *et al.*, 2017) y *Cocconeis placentula* puede habitar sistemas con ph alcalino o circumneutral (Gari & Corigliano 2007).

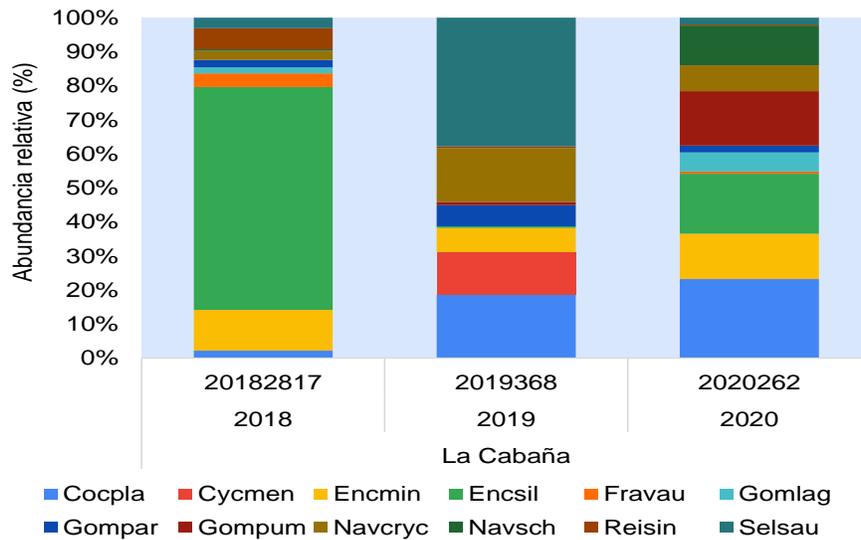


Figura 53. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de La Cabaña -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Entrada La Calera**

Del punto Entrada La Calera se tuvieron en cuenta 2 muestras, en estas se registraron 25 especies, 1 morfo especie, 1 con forma y 2 afines distribuidas en 17 géneros y 14 familias. Se destacaron 11 especies que superaron el 5% de la abundancia relativa total, en el año 2018 *Sellaphora saugerresii* fue la especie que mayor aporte hizo y en 2021 *Cocconeis placentula* (**Figura 54**).

En este punto la tendencia fue la mayor abundancia de especies tolerantes a la contaminación por nutrientes con una amplia distribución (Taylor *et al.*, 2007).

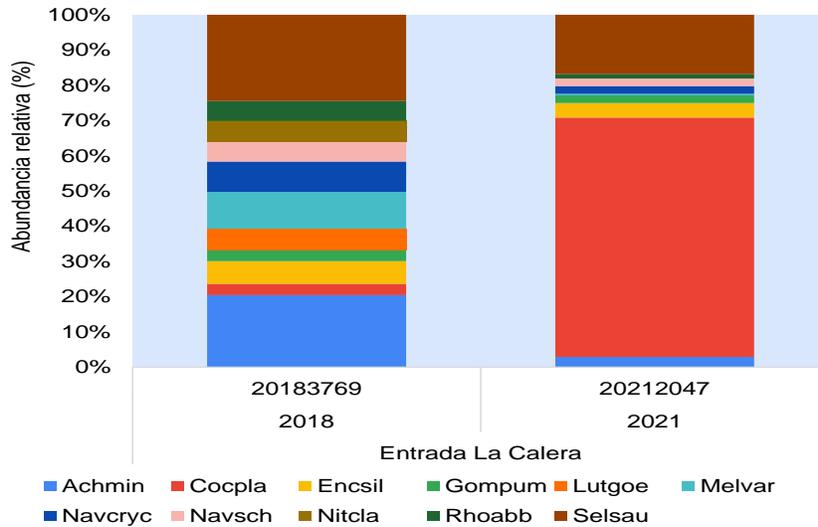


Figura 54. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de entrada La Calera -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Puente Sopó**

La comunidad de diatomeas del punto Puente Sopó estuvo conformada por 29 especies, 5 morfo especies, 4 con forma y 6 afines distribuidas en 26 géneros y 17 familias. De estas, 9 especies presentaron abundancia relativa superior al 5 %. En la muestra de 2018 *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing fue la especie con la mayor abundancia (63 %) reportada por presentar amplia distribución, dentro de la cual se destacan las zonas de escorrentía de nutrientes por actividades agrícolas (Segura-García *et al.* 2012) y en 2021 *Cyclotella meneghiniana* Kützing con 33 % siendo una especie conocida por su tolerancia a niveles intermedios de contaminación por nutrientes, específicamente Nitrógeno (Lobo *et al.* 2004) (Figura 55).

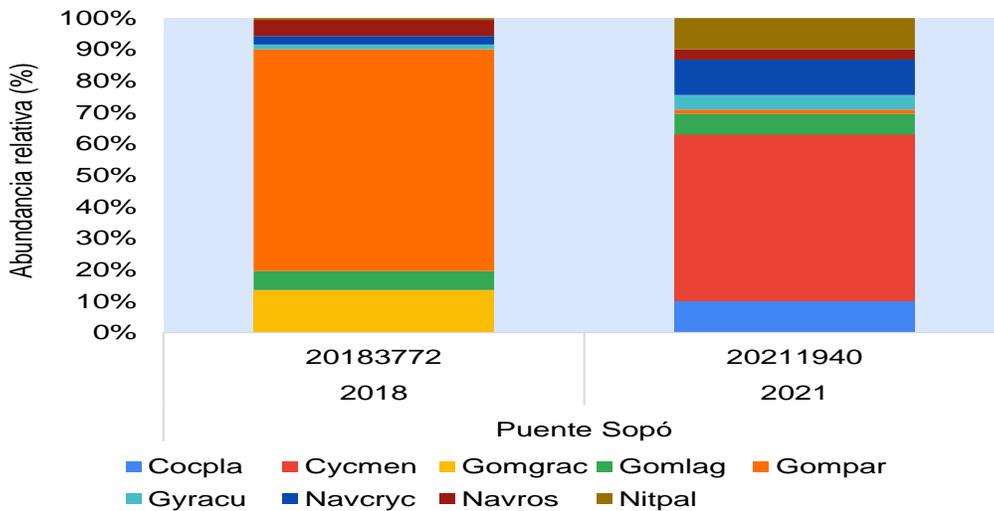


Figura 55. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de Puente Sopó -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Confluencia Quebrada Simaya**

La comunidad de diatomeas del punto Confluencia Quebrada Simaya estuvo conformada por 27 especies, 3 con forma y 2 afines distribuidas en 16 géneros y 11 familias. De estas especies, 7 se destacaron por presentar abundancia relativa superior al 5%. En la muestra de 2018 se destacó *Cocconeis placentula* con el 40 % y *Encyonema silesiacum* con el 45 % en 2020 (**Figura 56**). Son especies reportadas como tolerantes a la contaminación, moderada a fuerte en el caso de *Cocconeis placentula* con altos requerimientos periódicos de Nitrógeno (Moresco *et al.* 2015) y fuerte en el caso de *Encyonema silesiacum* específicamente por fósforo (Mora *et al.*, 2017)

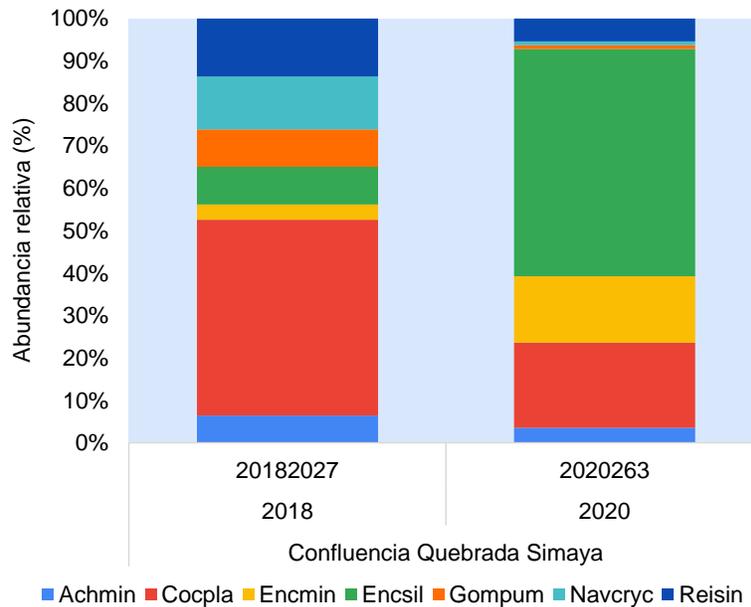


Figura 56. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de La Cabaña -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Puente Francis**

La comunidad de diatomeas de Puente Francis estuvo conformada por 27 especies, 1 morfo especie y 1 con forma, distribuidas en 17 géneros y 15 familias en las 3 muestras que entraron. Se destacaron 7 especies por hacer aportes mayores al 5 % en las 3 muestras revisadas, en 2009 y 2015 *Navicula cryptocephala* Kützing que es una especie ampliamente distribuida, común en aguas con pH de moderado a alto y tolerante a aumento de nutrientes (Taylor *et al.* 2017) y *Sellaphora saugerresii* en 2021, que comparte la característica de poder habitar ambientes con altos contenidos de nutrientes (Taylor *et al.* 2017) (**Figura 57**).

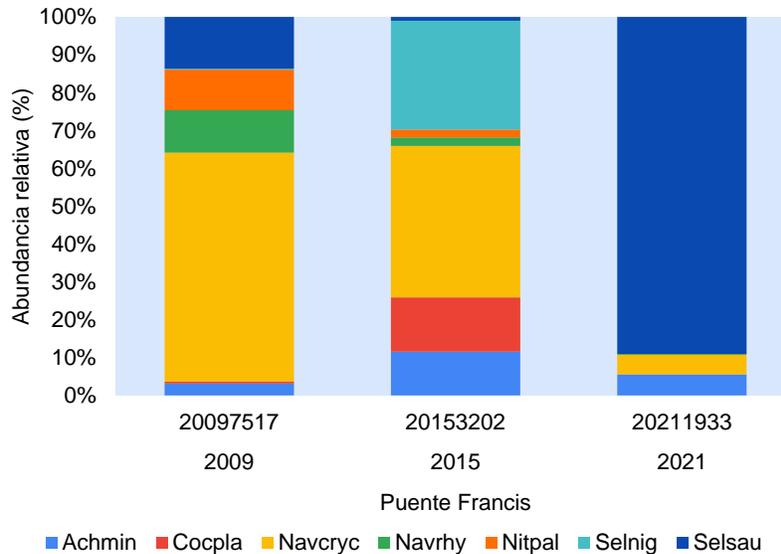


Figura 57. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de Puente Francis -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Descarga de fondo**

En el punto Descarga de Fondo se registraron 25 especies 2 morfo especies, 1 con forma y 2 afines, distribuidas en 17 géneros y 14 familias en las 3 muestras. Superaron el 5 % de la abundancia relativa total 6 especies, sobresaliendo por su mayor aporte *Achnantheidium minuttisimum* y *Fragilaria capucina var. vaucheriae* (Figura 58). *Achnantheidium minuttisimum* ha sido registrada en ambientes limpios y bien oxigenados (Taylor et al. 2017) y *Fragilaria capucina var. vaucheriae* tiene un amplio rango ecológico y abarca una extensa distribución, prefiriendo ambientes de baja alcalinidad (Taylor et al. 2017; Baattrup et al., 2022).

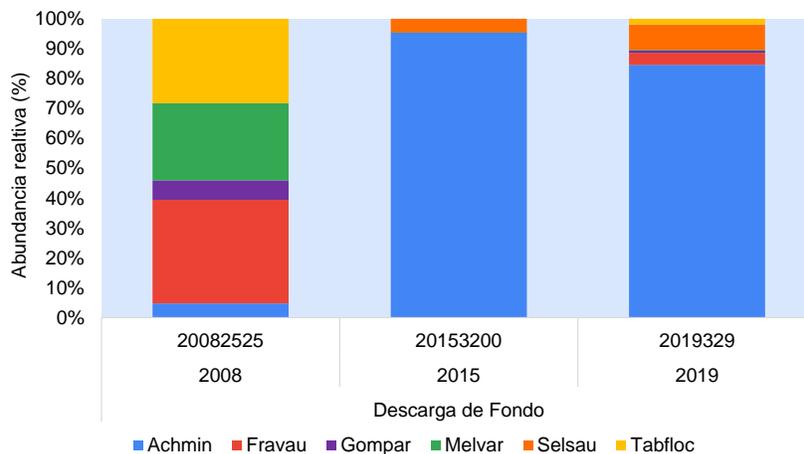
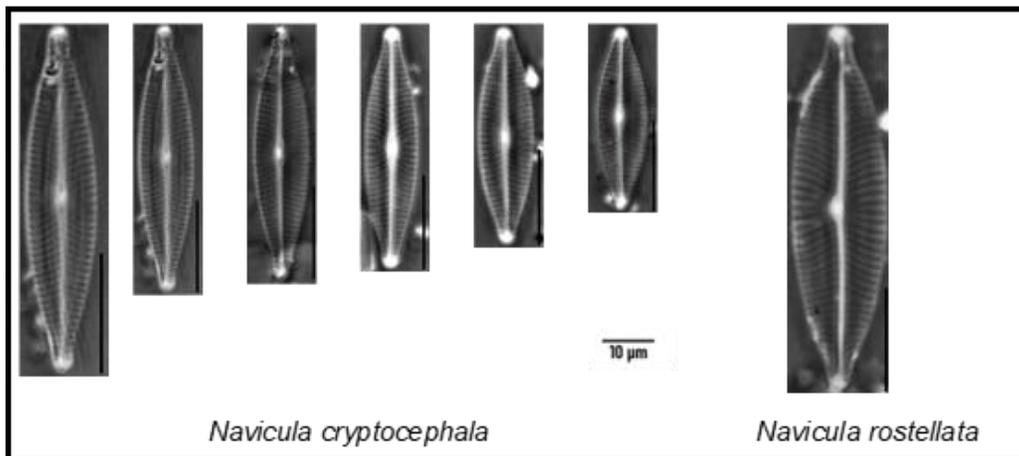
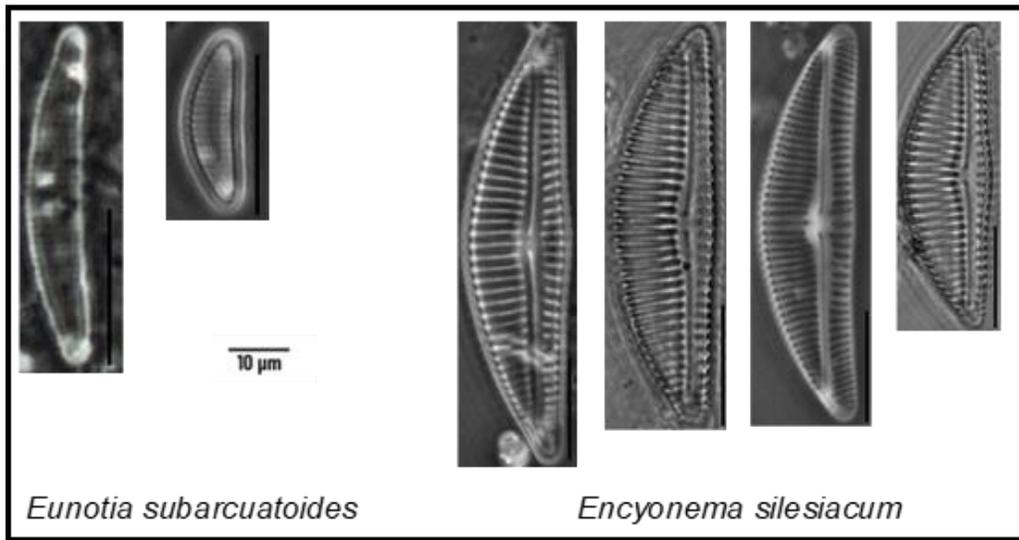
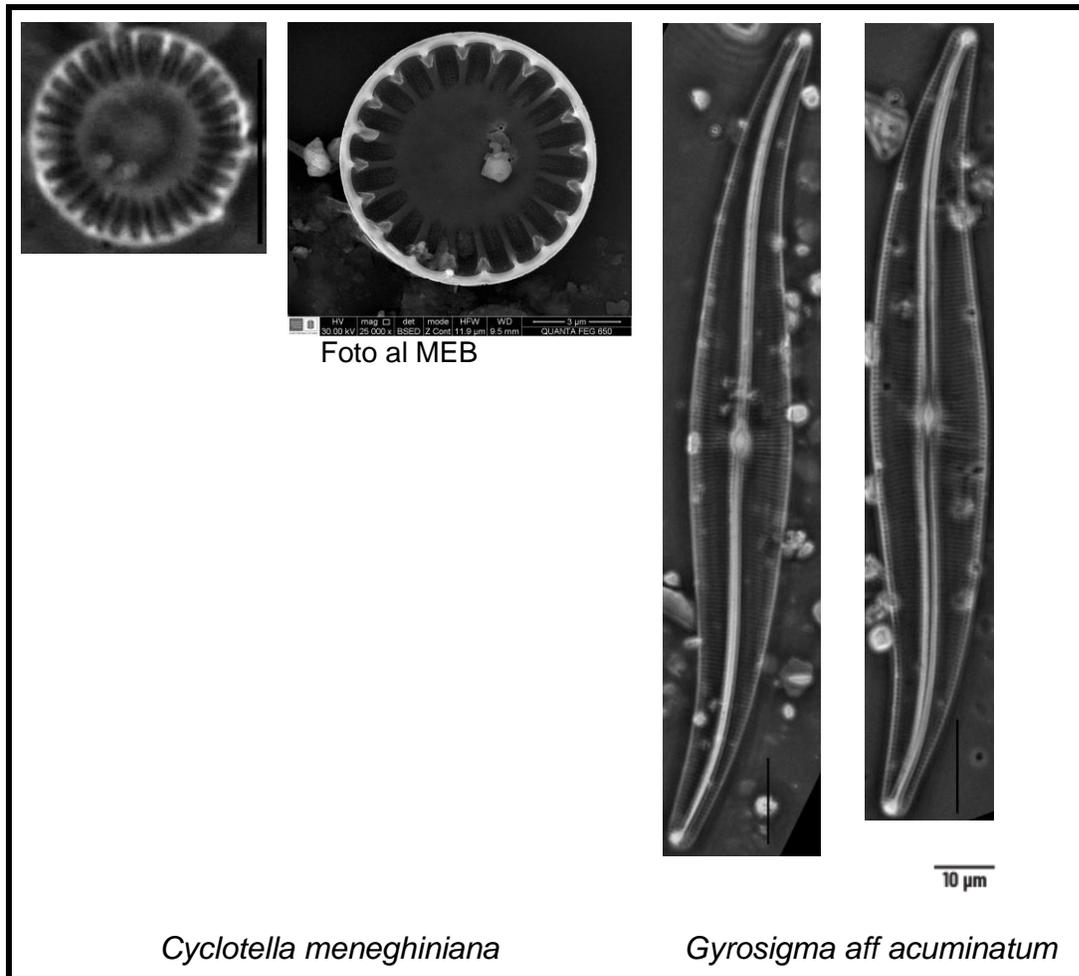


Figura 58. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de descarga de fondo -sistema San Rafael. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

Tabla 4. Imágenes de las especies de diatomeas más representativas del Sistema San Rafael





4.2.1.5 Sistema Tibitoc

La comunidad de diatomeas del Sistema Tibitoc estuvo conformada por 35 especies, 12 morfo especies, 8 con forma, 14 afines y 1 teratológica, distribuidas en 24 géneros y 16 familias. Se escogieron 18 muestras de los años 2018 a 2021 (**Anexo 17**). En la **Tabla 5** se presenta el registro de imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas de Zona Tibitoc.

De los 24 géneros registrados, 3 se destacaron por presentar entre 8 y 9 especies cada una, por el contrario, 14 géneros presentaron 1 sola especie (**Figura 59**). En el **Anexo 20** se presenta el registro de abundancia de la comunidad de diatomeas del Sistema Tibitoc.

Número de especies por géneros

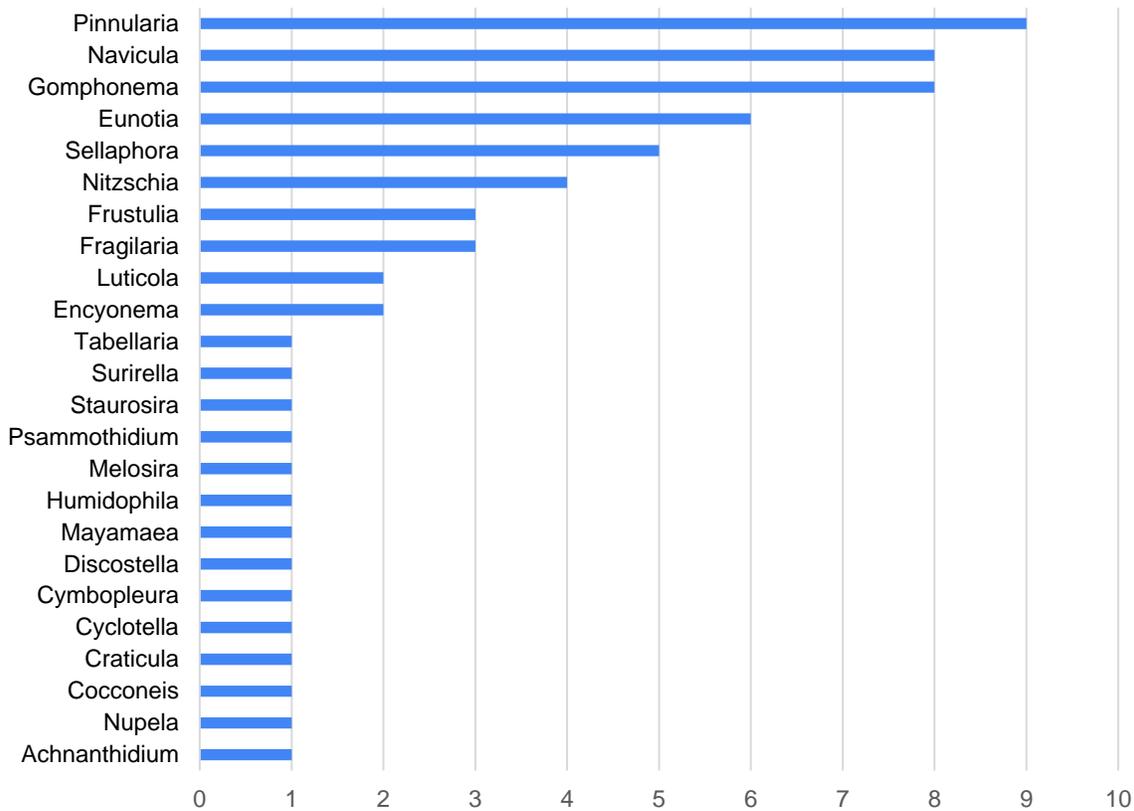


Figura 59. Número de especies por géneros registradas en las muestras de sistema Tibitoc-sistema Norte.

▪ **Río Bogotá antes del Sisga**

La comunidad de diatomeas del Río Bogotá antes del Sisga estuvo conformada por 30 especies, 4 morfo especies, 2 con forma y 3 afines, en total 18 géneros y 17 familias. Las especies más representativas por su abundancia relativa fueron *Achnantheidium minutissimum*, *Sellaphora saugerresii*, *Sellaphora nigri* y *Nitzschia palea* (Kützing) W.Smith (Figura 60).

Estas especies reflejan estados particulares posiblemente del punto de monitoreo, *Achnantheidium minutissimum* es una especie registrada en ambientes bien oxigenados (Taylor *et al.*, 2007) que fue abundante en 2018, posterior a esto, se evidenció el aumento de *Sellaphora saugerresii* en el mismo año, que es una especie registrada en un amplio rango de ambientes incluso, zonas muy contaminadas característica que comparte con *Nitzschia palea* (Taylor *et al.*, 2007).

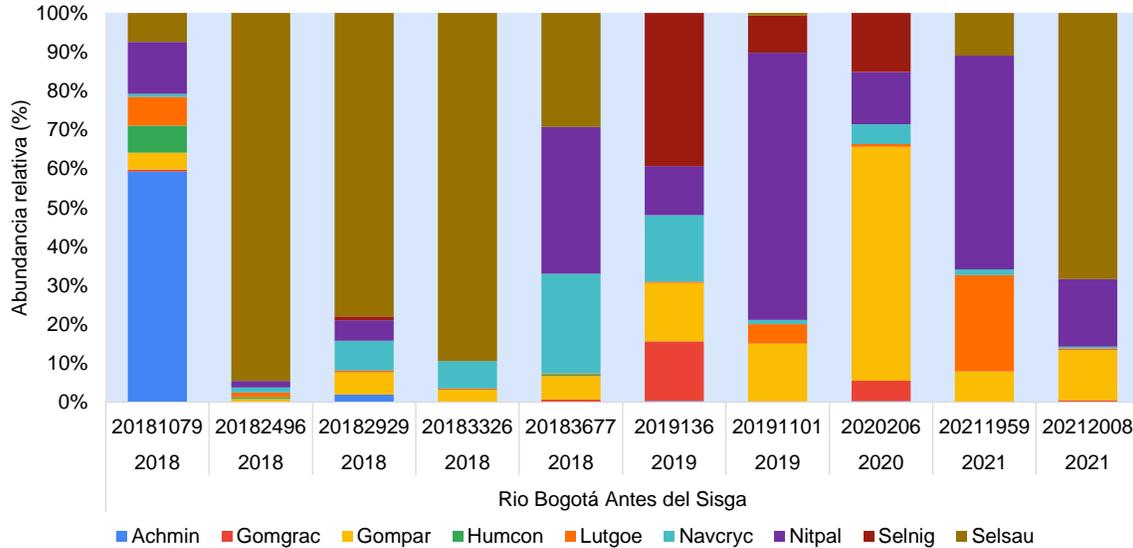


Figura 60. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Bogotá-antes del Sisga-sistema Tibitoc. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Río Bogotá después del Sisga**

La comunidad de diatomeas del Río Bogotá después del Sisga estuvo conformada por 29 especies, 5 morfo especies, 2 con forma y 4 afines distribuidas en 21 géneros y 19 familias. Los mayores aportes fueron de *Sellaphora saugerresii*, *Navicula cryptocephala* y *Nitzschia palea* (Figura 61).

En este punto las especies más abundantes fueron representativas de ambientes con altas concentraciones de nutrientes capaces de tolerar zonas contaminadas (Taylor *et al.* 2017).

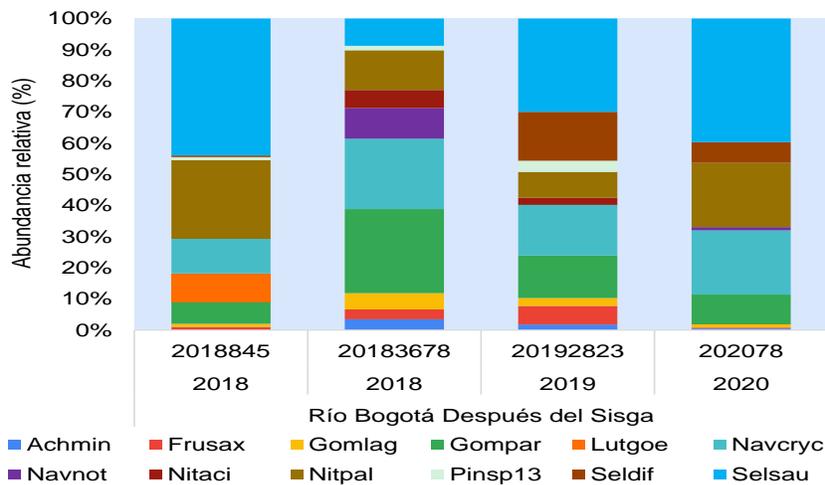


Figura 61. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Bogotá-antes del Sisga-sistema Tibitoc. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Río Bogotá antes de Tominé**

La comunidad de diatomeas del Río Bogotá antes de Tominé estuvo conformada por 33 especies, 1 de ellas teratológica, 4 morfo especies, 3 con forma y 3 afines, distribuidas en 19 géneros y 17 familias. Las especies más representativas fueron *Sellaphora saugerresii* y *Craticula molestiformis* en las muestras de 2018, 2019 y 2020 y *Gomphonema parvulum* fue más abundante en la segunda muestra de 2018 (**Figura 62**). Estas especies son registradas en la literatura como tolerantes a contaminación por nutrientes (Taylor *et al.* 2017). Además de estas fueron específicas para este sistema *Mayamaea permitis* y *Sellaphora pupula*.

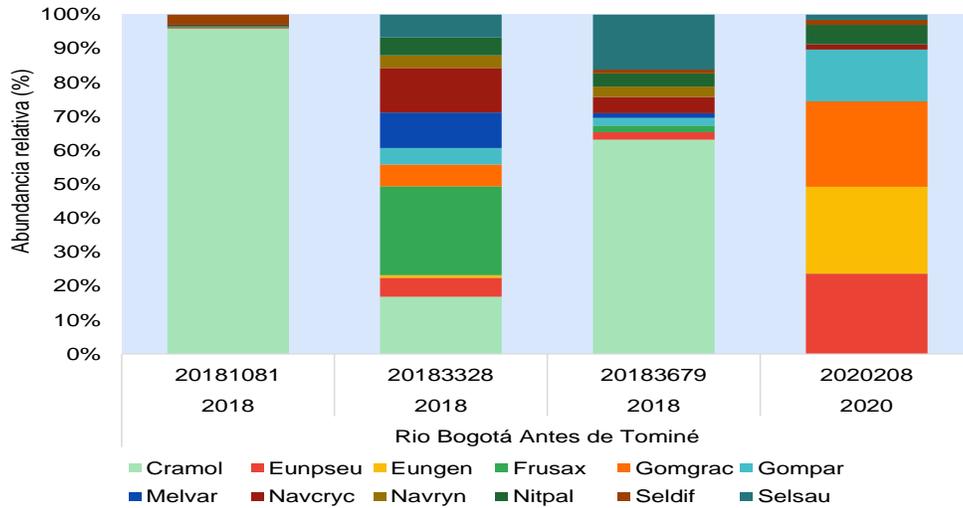
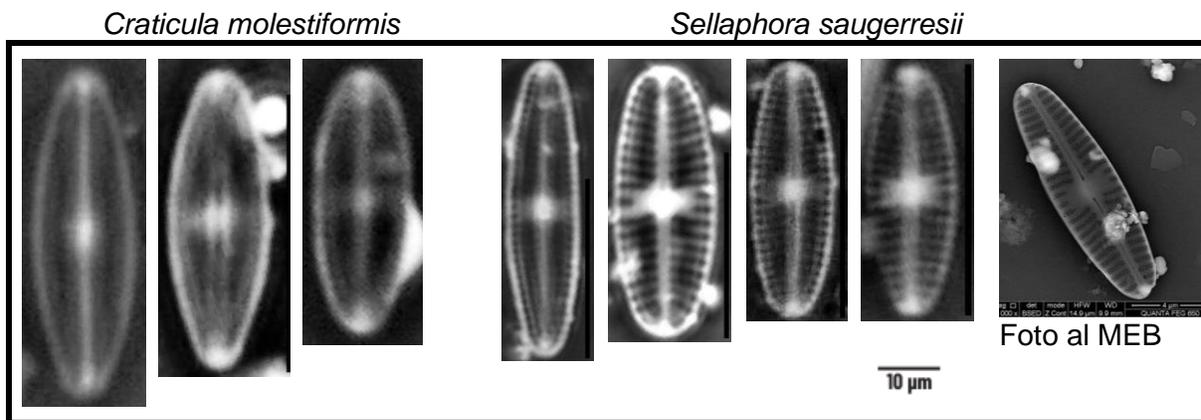
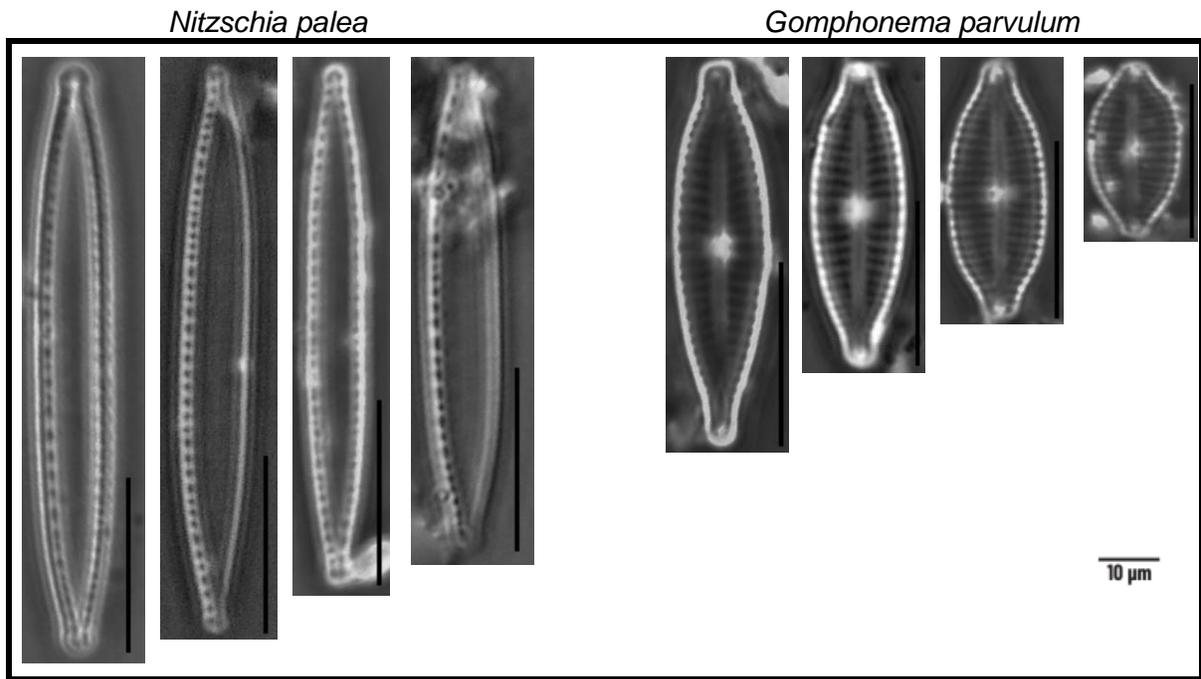


Figura 62. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Bogotá-antes del Sisga-sistema Tibitoc. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

Tabla 5. Imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas enregistradas en Sistema Tibitoc.



4.2.2 Sistema Sur

4.2.2.1 Sistema Chisacá

La comunidad de diatomeas del Sistema Chisacá estuvo conformada por 43 especies (3 de las cuales fueron teratológicas: *Fragilaria capucina* var. *rumpens* (teratológica), *Fragilaria cf. capucina* var. *vaucheriae* (teratológica) y *Hannaea arcus* (teratológica) 14 morfo especies, 7 con forma y 10 afines, distribuidas en 30 géneros y 18 familias. De las muestras revisadas, cumplieron con la abundancia requerida 22 muestras entre 2009 y 2022, siendo estas las utilizadas para las revisiones taxonómicas (**Anexo 21**). En la **Tabla 6** se presentan las imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas en Sistema Chisacá.

En general, se evidenció que fue mayor el número de géneros que estuvo representada por 1 especie respecto a los géneros que tuvieron 2 o más especies, siendo 1 (*Gomphonema*) el que presentó 11 especies. En la **Figura 63** se presenta el registro de abundancia de la comunidad de diatomeas de Sistema Chisacá.

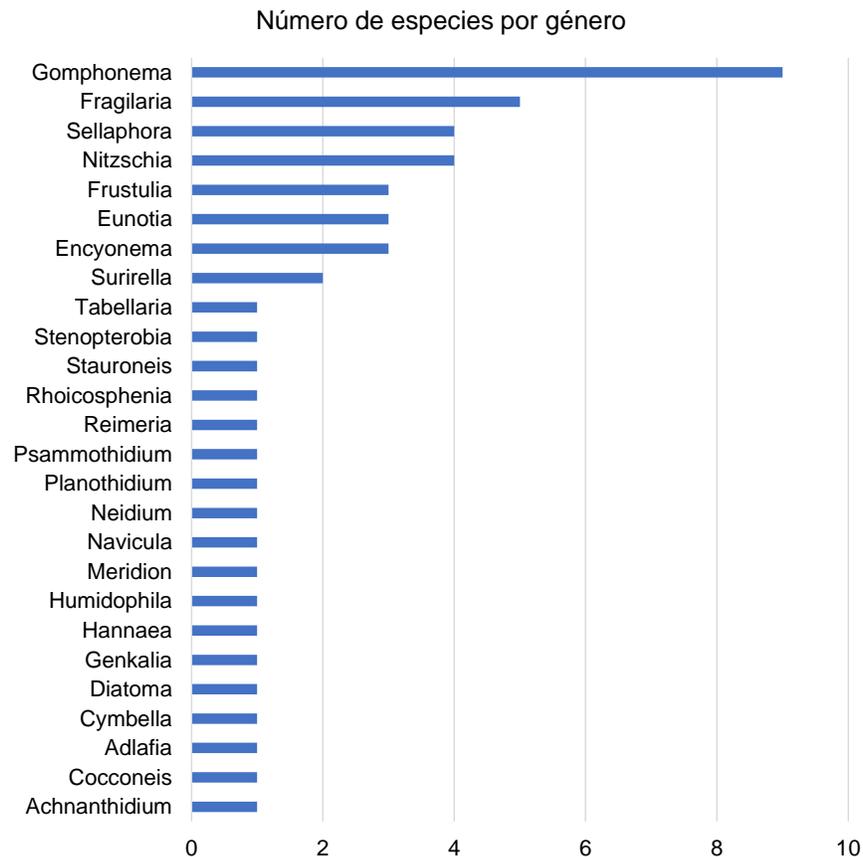


Figura 63. Número de especies por género presente en la comunidad de diatomeas registrada en el sistema Chisacá.

▪ **Río Mugroso**

La comunidad de diatomeas de Río Mugroso estuvo compuesta por 30 especies (1 de estas teratológica: *Fragilaria capucina var. rumpens*), 3 morfo especies, 5 con forma y 5 afines , en total se registraron 24 géneros y 17 familias en 10 muestras. Las especies más representativas fueron *Hannaea arcus*, en la muestra de 2009, 2013 y 2018 y *Gomphonema sp.4* en 2018, 2020 y *Encyonema minutum* (Hilse) D.G.Mann con un aporte del 87 %, en 2022, en 2021 se presentó mayor abundancia de *Gomphonema cf. paludosum* 2 (**Figura 64**). *Hannaea arcus* es una especie reportada en ambientes corrientes, tolerantes a altas concentraciones de nutrientes (Ramírez *et al.* 2008; Alvial *et al.* 2008) *Encyonema minutum* ha sido registrada como una especie con bajos requerimientos de Nitritos, baja conductividad y concentración de sulfatos (Montoya-Moreno, 2013).

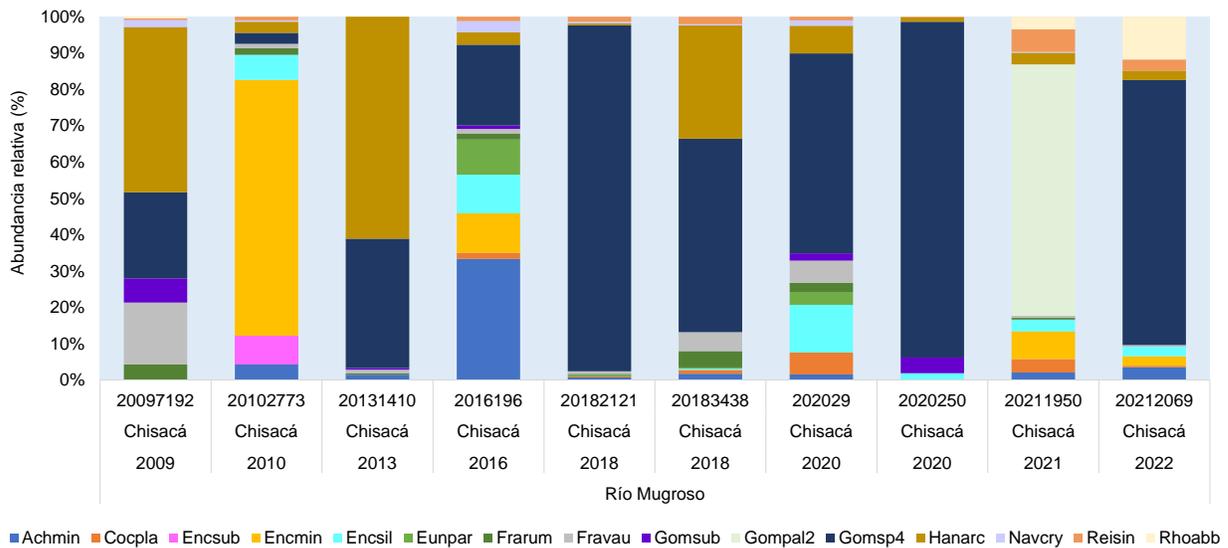


Figura 64. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Mugroso-sistema Chisacá. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

▪ **Río Chisacá**

La comunidad de diatomeas del Río Chisacá estuvo compuesta por 36 especies, 6 morfo especies, 7 con forma y 6 afines, distribuidas en 25 géneros y 16 familias, se tuvieron en cuenta 12 muestras de 2010 hasta 2021, cumpliendo con una abundancia superior a 200 valvas cada una. Las especies más representativas fueron *Fragilaria capucina var. rumpens*, *Cocconeis placentula* y *Hannaea arcus* (**Figura 65**).

Fragilaria capucina suele preferir ambientes con pH bajos además de presentar una amplia distribución (Taylor *et al.*, 2007; Baattrup *et al.*, 2022); por su parte *Cocconeis placentula* y *Hannaea arcus* son reconocidas por ser tolerantes a contaminación moderada y altas concentraciones de nutrientes (Alvial *et al.* 2008).

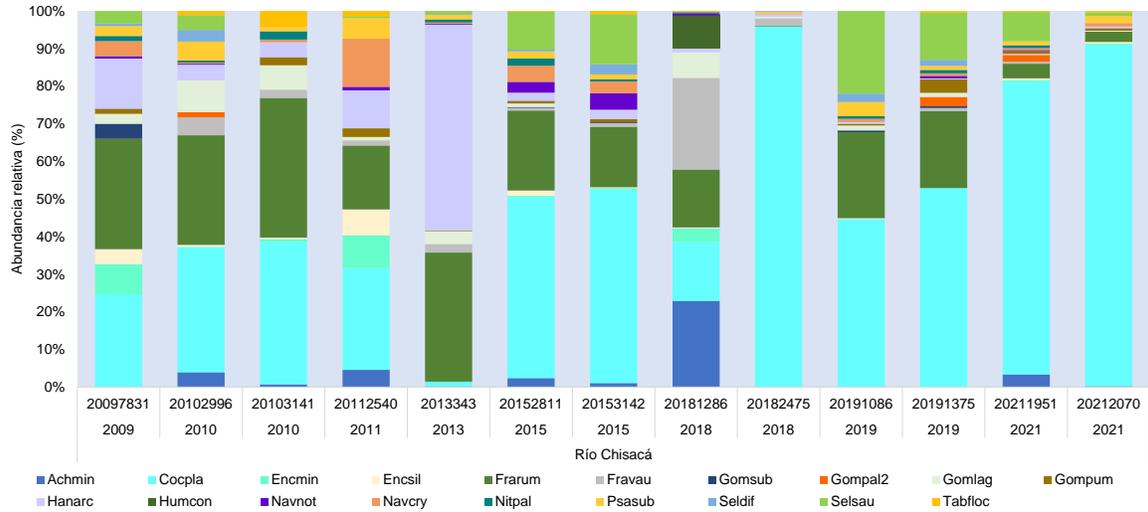
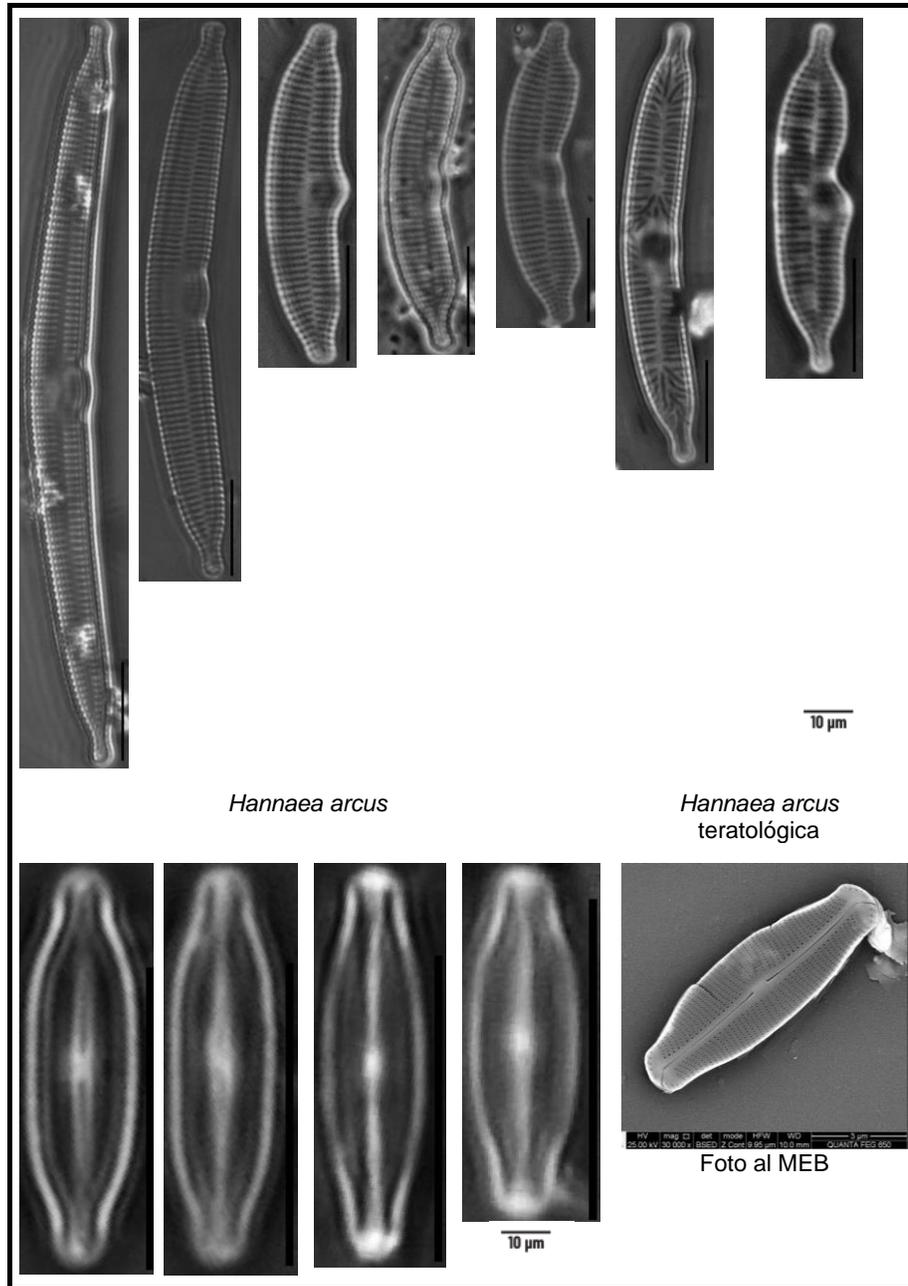


Figura 65. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Chisacá-sistema Chisacá. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%

Tabla 6. Imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas de Sistema Chisacá



4.2.2.2 Sistema Regadera

La comunidad de diatomeas del Sistema La Regadera estuvo conformada por 53 especies (2 de estas teratológicas *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* y *Fragilaria capucina* var. *rumpens*), 16 morfo especies, 17 con forma y 14 afines, 38 géneros y 20 familias. En total se tuvieron en cuenta 50 muestras entre los años 2008 y 2010. En la **Tabla 7** se presentan las imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas de Sistema Regadera.

De los 38 géneros que se registraron, 21 estuvieron representados por 1 especie cada uno, siendo la tendencia general de la comunidad, en contra posición, 3 géneros (*Eunotia*, *Gomphonema* y *Pinnularia*) presentaron el mayor número de especies con más de 10 en cada caso. En la **Figura 66** se presentan las imágenes de las especies más representativas. En el **Anexo 22** se presenta el registro de abundancia de Sistema Regadera.

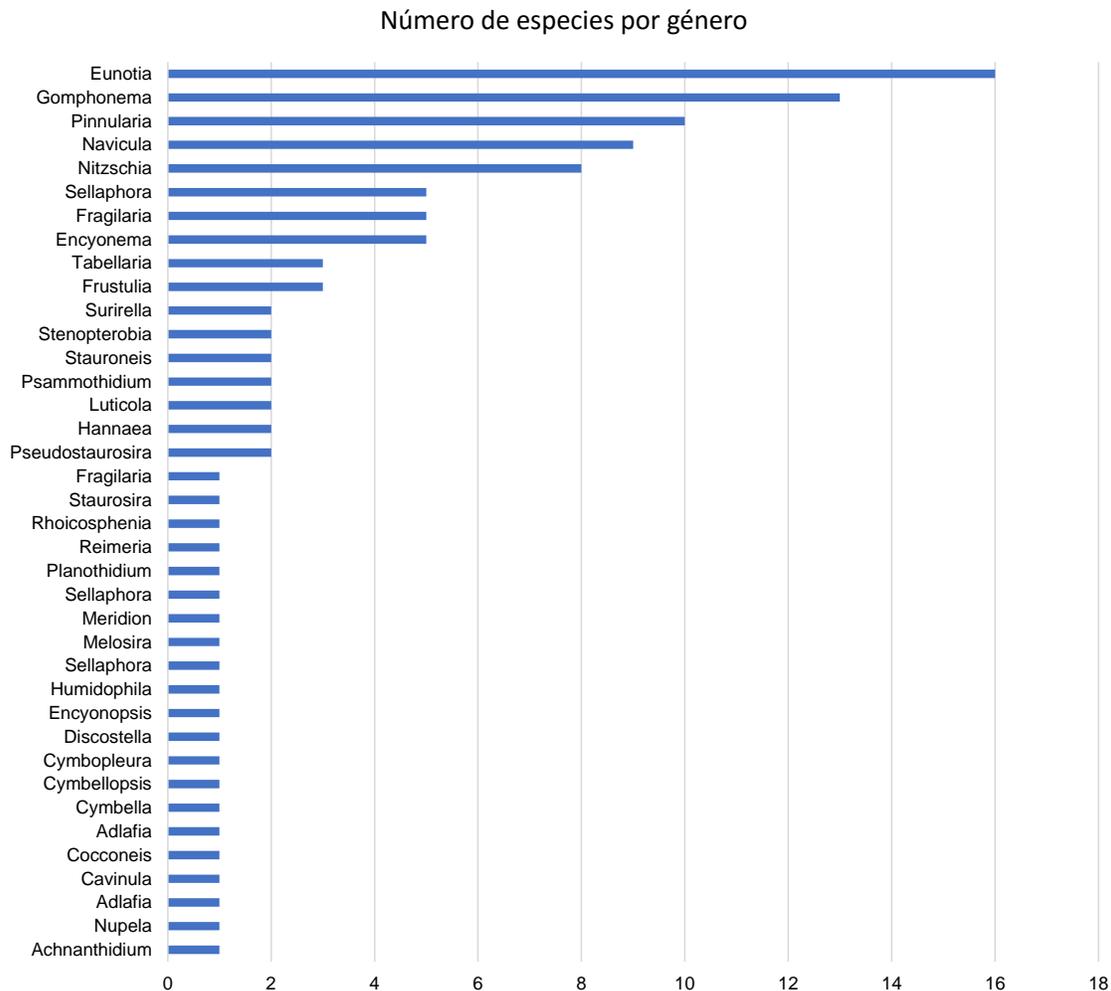


Figura 66. Número de especies por género presente en la comunidad de diatomeas registrada en el sistema la Regadera.

▪ **Río Curubital**

La comunidad de diatomeas del Río Curubital estuvo conformada por 40 especies, 3 de ellas teratológicas, 10 morfo especies, 21 con forma y 11 afines, en total 28 géneros y 17 familias. Se contaron 17 muestras que cumplieron con la abundancia requerida para el análisis taxonómico desde el año 2009 hasta el 2021 (**Figura 67**).

Las especies más representativas fueron *Fragilaria capucina* var. *rumpens*, *Hannaea arcus*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia palea*, *Sellaphora saugerresii* y *Gomphonema lagenula* Kützing (**Figura 67**).

Tanto *Hannaea arcus*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia palea*, *Sellaphora saugerresii* y *Gomphonema lagenula* son especies de amplia distribución y frecuente mente registradas en ambientes con alta concentración de nutrientes (Taylor et al., 2007, Abarca et al. 2014). *Fragilaria capucina* y *Navicula cryptocephala* han sido reportadas en ambientes con bajas concentraciones de sulfatos (<12 mg /L) (Montoya-Moreno & Aguirre-Ramírez, 2013).

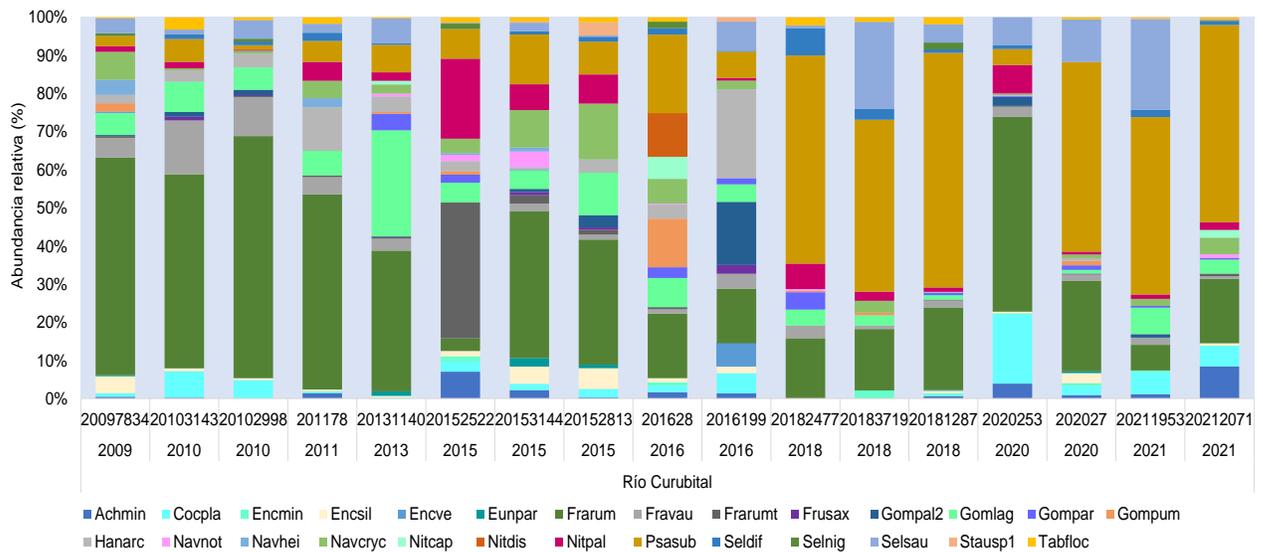


Figura 67. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Curubital-sistema Regadera. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

▪ **Río Chisacá-Regadera**

La comunidad de diatomeas del Río Chisacá-Regadera estuvo compuesta por 44 especies, 2 de ellas teratológicas, 5 morfo especies, 9 con forma y 4 afines distribuidas en 27 géneros y 18 familias en las 17 muestras analizadas desde el año 2008 hasta el 2021.

Las especies más representativas fueron *Achnantheidium minutissimum* (especie con una amplia distribución tolerando principalmente aguas bien oxigenadas, pero con la posibilidad de habitar aguas con baja concentración de nutrientes hasta alta concentración (Potapova & Hamilton, 2007). *Cocconeis placentula*, ha sido registrada como tolerante a la contaminación orgánica moderada siendo de amplia distribución (Taylor et al, 2007)

Fragilaria capucina var. *vaucheriae* es reconocida por habitar zonas de baja alcalinidad (Baattrup *et al.*, 2022) y *Gomphonema* sp.4 (Figura 68).

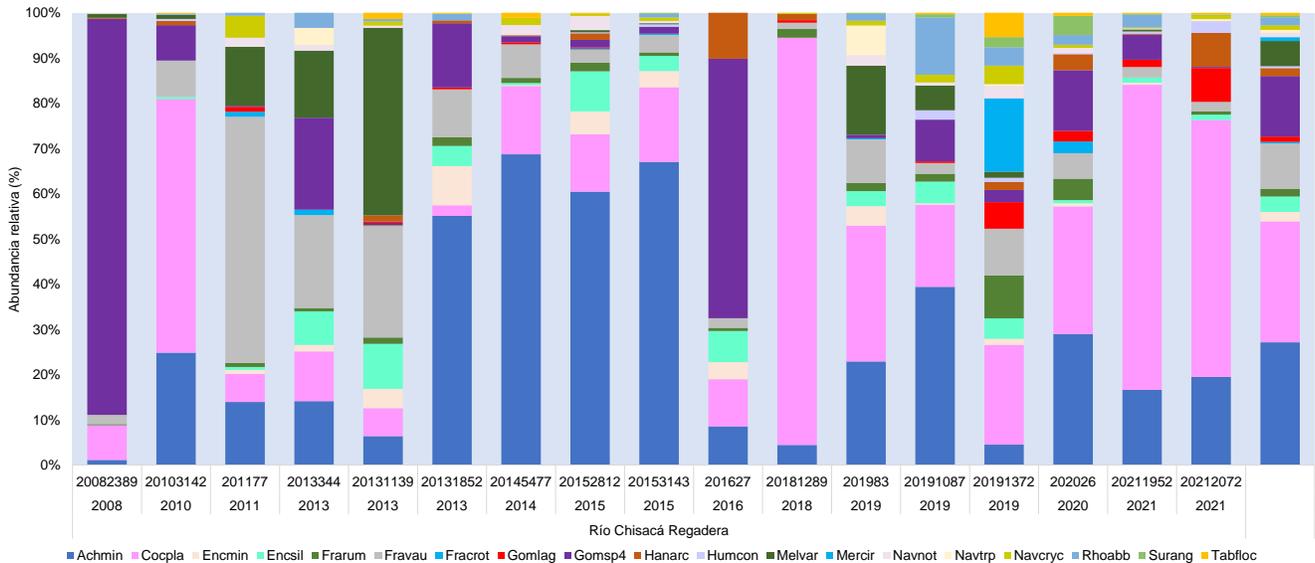


Figura 68. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Chisacá-Regadera, sistema Regadera. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

▪ **Río Tunjuelo**

La comunidad de diatomeas del Río Tunjuelo estuvo conformada por 39 especies, 2 morfo especies, 14 con forma y 6 afines distribuidas en 24 géneros y 19 familias en las 16 muestras que se analizaron desde los años 2010 al 2021.

Las especies que se destacaron por su mayor abundancia fueron *Achnantheidium minutissimum*, *Fragilaria capucina* var. *rumpens*, *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* y *Gomphonema lagenula* (Figura 69). *Achnantheidium minutissimum* suele estar presente en ambientes con bajas concentraciones de nutrientes (Taylor *et al.* 2007), *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* ha sido registrada en ambientes de baja alcalinidad (Baattrup *et al.*, 2022)

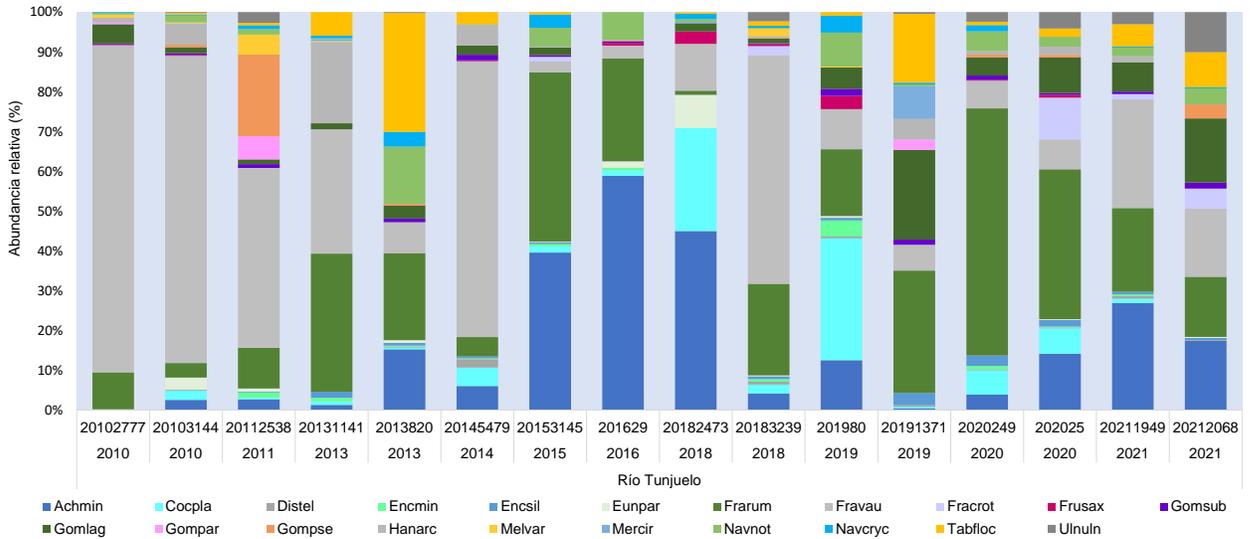
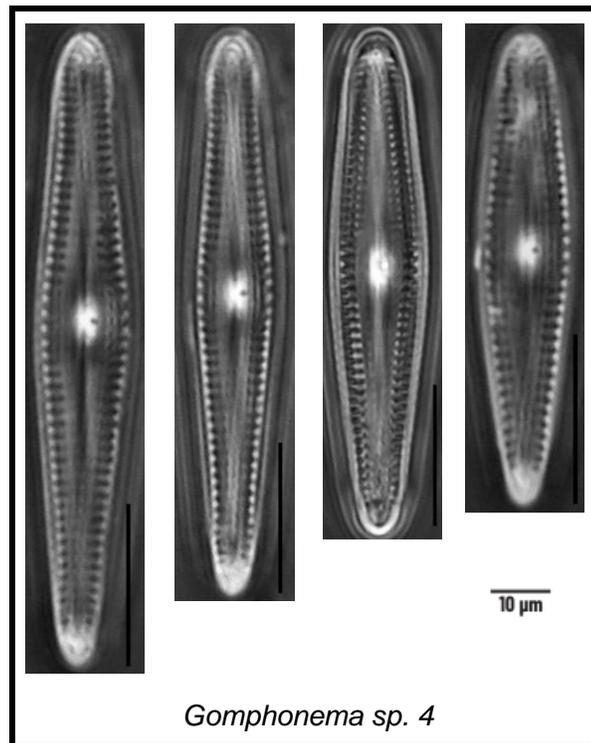
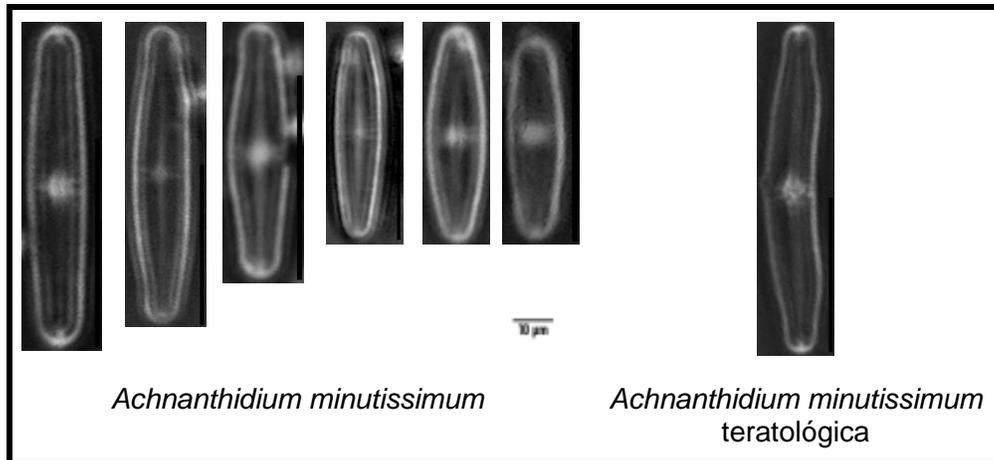


Figura 69. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de río Tunjuelo- sistema Regadera. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

Tabla 7. Imágenes de las especies de la comunidad de diatomeas más representativas en Sistema Regadera





4.2.2.3 Sistema Yomasa

En la Quebrada Yomasa-Sistema Yomasa se identificaron 32 especies, 1 de ellas teratológica (*Fragilaria capucina var. rumpens*) 11 morfo especies, 6 con forma y 9 afines, en total 22 géneros y 16 familias. Se analizaron 14 muestras desde el año 2007 al 2021. En la **Tabla 8** se presentan las imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas de Sistema Yomasa.

De los 24 géneros que se registraron, 15 presentaron 1 especie y 2 géneros (*Eunotia* y *Pinnularia*) presentaron entre 8 y 9 especies, los demás géneros presentaron entre 4 y 5 especies cada uno. En la **Figura 70** se encuentran las imágenes de las especies más representativas. En el **Anexo 23** se presenta la abundancia de la comunidad de diatomeas en el Sistema Yomasa.

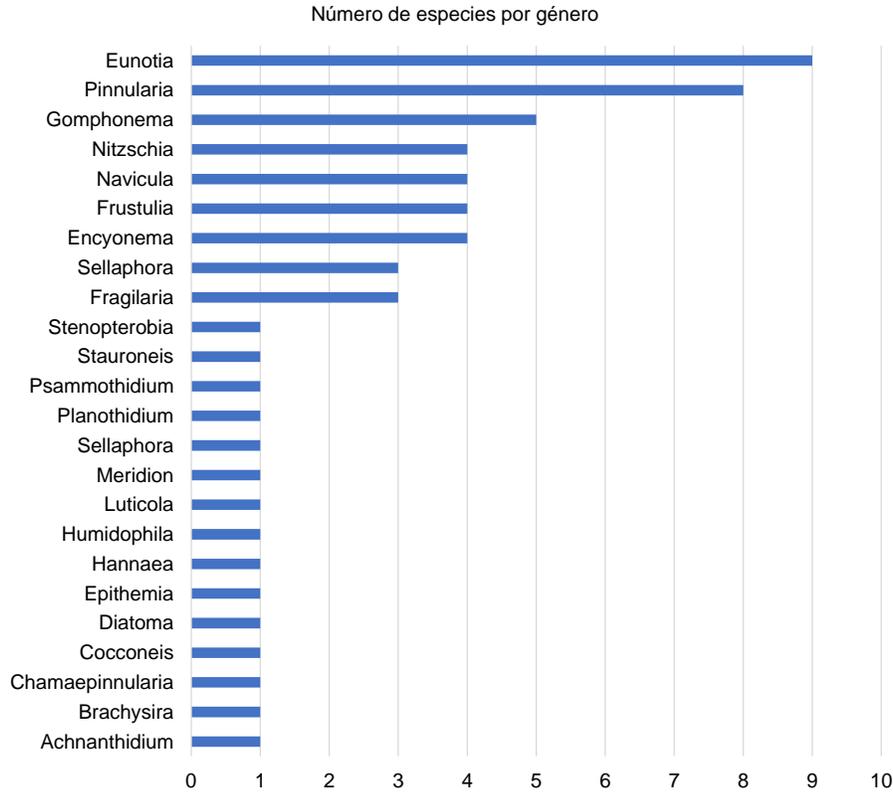


Figura 70. Número de especies por género registrados en la quebrada Yomasa en el sistema Yomasa.

▪ **Quebrada Yomasa, Aguas arriba**

La comunidad de diatomeas de la Quebrada Yomasa aguas arriba estuvo conformada por 26 especies, 10 morfo especies, 7 con forma y 6 afines, en total se registraron para este punto 21 géneros y 17 familias. En 2007 y 2009 se destacó *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*, en 2011, 2015 y en 2018 *Fragilaria capucina* var. *rumpens* sobresalió por su mayor abundancia y finalmente, en 2019 y 2021, *Psammothidium subatomoides* hizo el mayor aporte (**Figura 71**). *Fragilaria capucina* es una especie con un amplio rango ecológico registrada en ambientes de baja alcalinidad (Donato-Rondón & Abuhatab-Aragón, 2018; Baattrup *et al.*, 2022) y *Psammothidium subatomoides* en ambientes oligotróficos (Potapova, 2009).

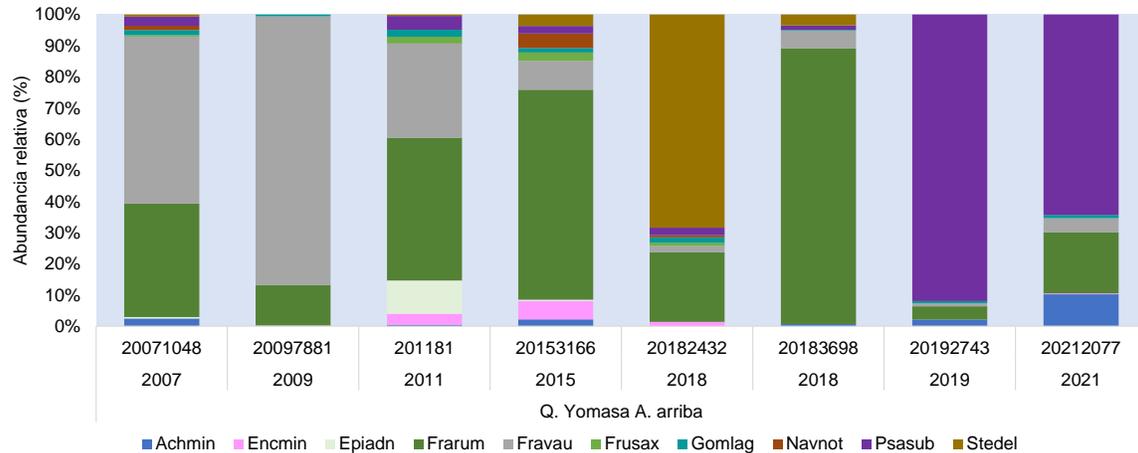


Figura 71. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Yomasa aguas arriba-sistema Yomasa. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

▪ **Quebrada Yomasa, Aguas abajo**

En la comunidad de diatomeas del punto Aguas debajo de la quebrada Yomasa se registraron 24 especies, 1 de ellas teratológica, 3 morfo especies, 3 con forma y 5 afines distribuidas en 17 géneros y 13 familias. En el año 2009 y 2011 se destacó *Fragilaria capucina var. vaucheriae*, en 2013, 2015 y 2018 *Fragilaria capucina var. rumpens* y en 2021 *Psammothidium subatomoides* (**Figura 72**). *Fragilaria capucina* es una especie con un amplio rango ecológico registrada en ambientes de baja alcalinidad (Donato-Rondón & Abuhatab-Aragón, 2018; Baattrup *et al.*, 2022) y *Psammothidium subatomoides* en ambientes oligotróficos (Potapova, 2009).

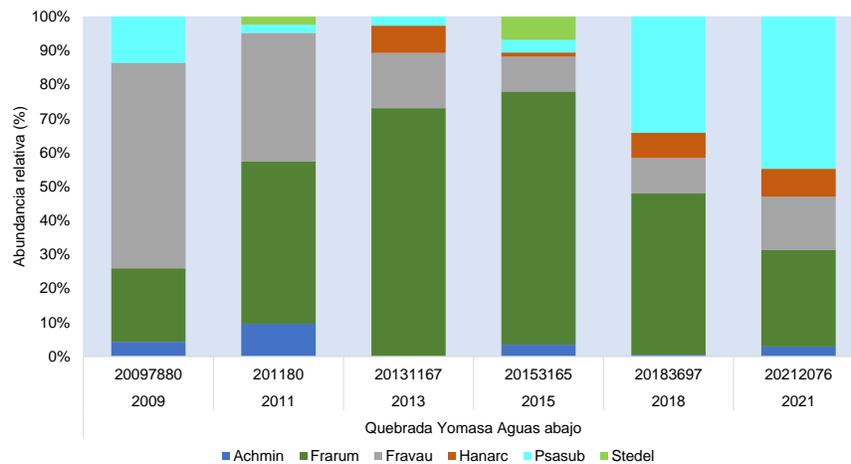
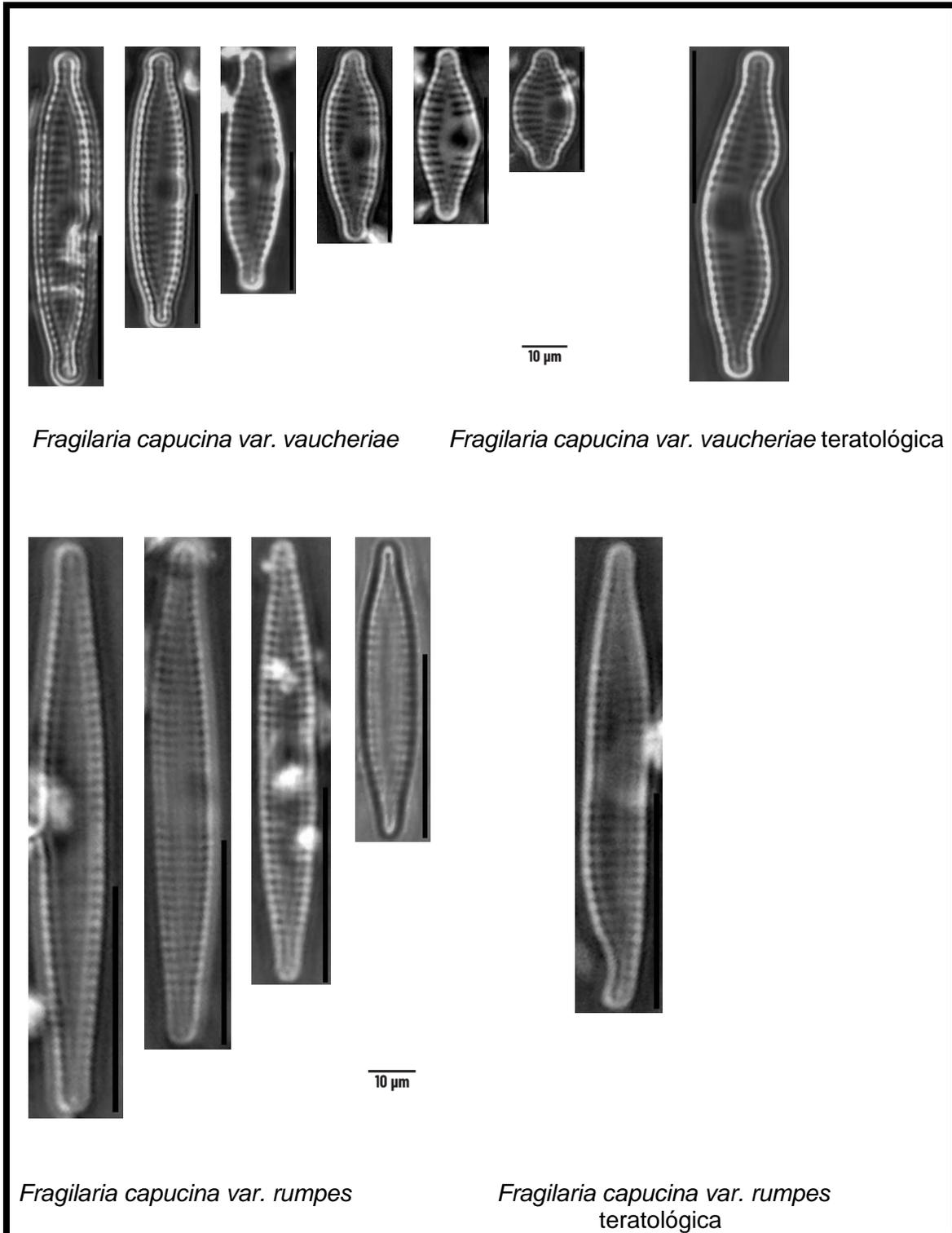


Figura 72. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada Yomasa aguas abajo-sistema Yomasa. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

Tabla 8. Imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas de Sistema Yomasa



4.2.2.4 Sistema El Delirio

La comunidad de diatomeas del Sistema El Delirio, estuvo compuesta por 33 especies, 1 de ellas teratológica (*Hannaea arcus*), 4 morfo especies, 10 con forma y 6 afines, en total 23 géneros y 16 familias en 17 muestras que fueron identificadas desde el año 2018 hasta el 2020. En el **Anexo 24**, se presenta la composición de la comunidad con las especies Id.

Como tendencia general la comunidad presentó un mayor número de géneros que solamente estuvieron representados por 1 especie, respecto al número de géneros que presentaron varias especies, *Eunotia* y *Gomphonema* fueron los géneros representados por más especies (**Figura 73**).

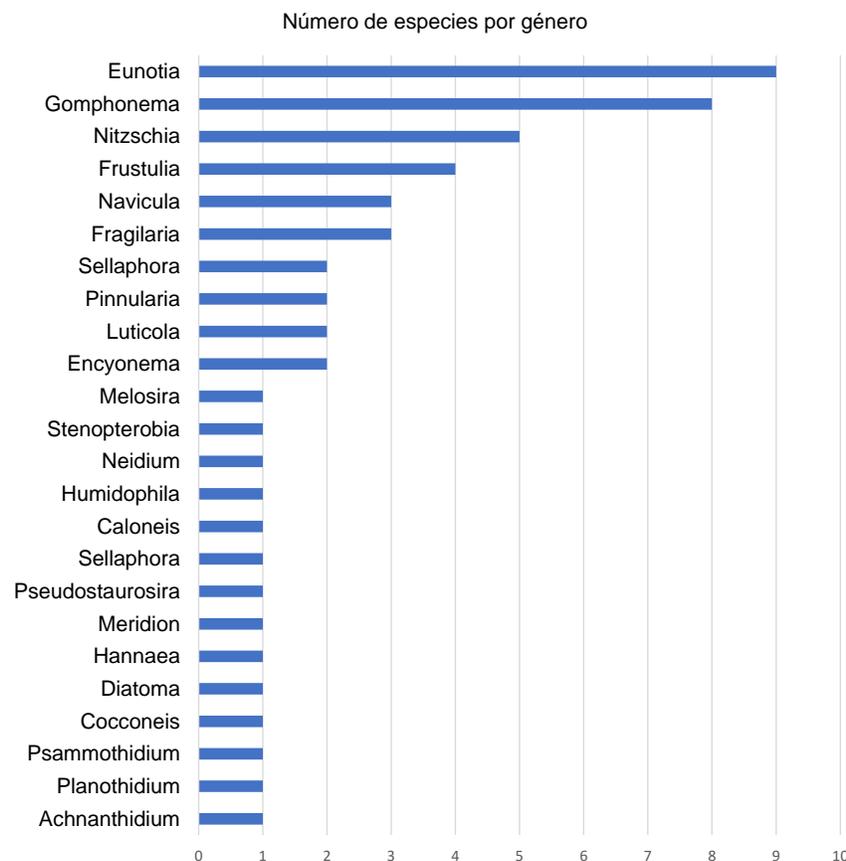


Figura 73. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de sistema El Delirio. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

▪ Decantadores San Cristóbal

La comunidad de diatomeas del punto Decantadores San Cristóbal estuvo conformada por 21 especies, 1 morfo especie, 2 con forma y 4 afines distribuidas en 6 géneros y 14 familias en las 3 muestras entre el año 2018 y 2021. En 2018 y en una muestra de 2021 *Hannaea arcus* fue sobresaliente, siendo una especie registrada en ambientes de corriente con altas concentraciones de nutrientes (Ramírez *et al.* 2008), evidenciándose un cambio en la segunda muestra con el aumento de la abundancia de *Psammothidium subatomoides* que ha sido reportada en ambientes con bajas concentraciones de nutrientes (Potapova, 2009).

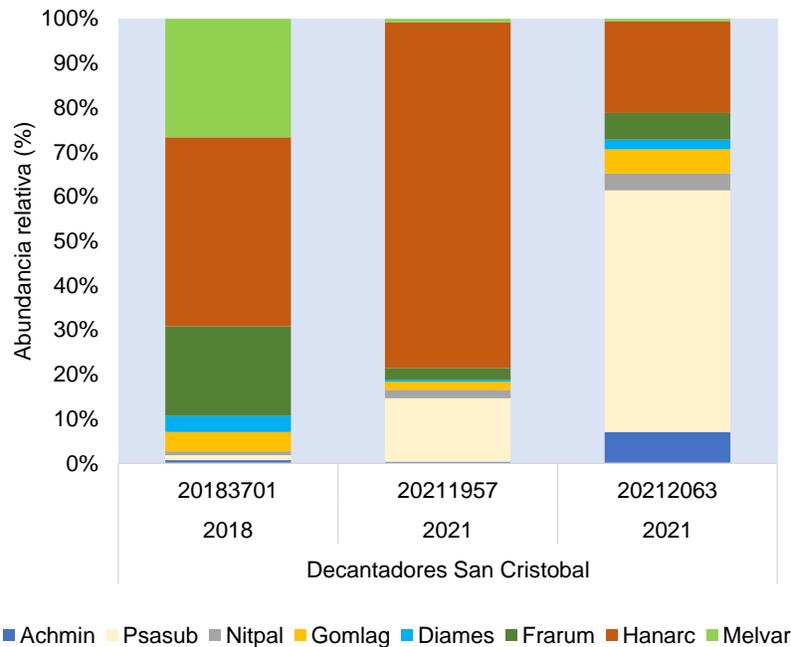


Figura 74. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de decantadores San Cristóbal-sistema El Delirio. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

▪ **Intersección Upatá Palo Blanco**

La comunidad de diatomeas del punto Intersección Quebrada La Uputa y Quebrada Palo Blanco estuvo compuesta por 29 especies, 6 morfo especie, 5 con forma y 4 afines en 22 géneros y 16 familias. De las muestras revisadas, se eligieron 6 que cumplieron con la abundancia requerida entre los años 2015 al 2020. Las especies más representativas fueron *Fragilaria capucina* var. *rumpens*, *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*, *Cocconeis placentula* y *Hannaea arcus* (teratológica) (Figura 75).

Cocconeis placentula es frecuente en hábitats bentónicos donde se adhieren a rocas, macrófitos y algas. Es común en los cuerpos de agua dulce y es de amplia distribución geográfica, particularmente donde el pH es circumneutral o alcalino (Taylor *et al.* 2007) y *Hannaea arcus* es representativa de zonas de corriente y con altas concentraciones de nutrientes (Ramirez *et al.* 2008).

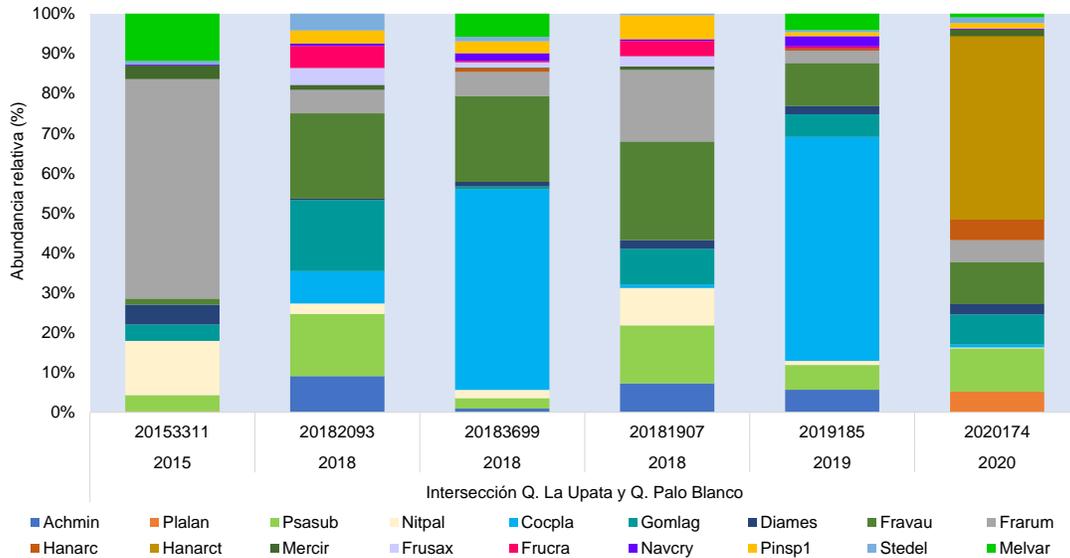


Figura 75. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de intersección quebrada La Upata y quebrada Palo Blanco-sistema El Delirio. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

▪ **Quebrada La Osa**

La comunidad de diatomeas de la Quebrada La Osa registrada en las 8 muestras seleccionadas dada su abundancia, estuvo representada por 26 especies, 1 morfo especie, 6 con forma y 3 afines distribuidas en 21 géneros y 15 familias. Las dos especies que sobre salieron por su mayor abundancia fueron *Fragilaria capucina var. rumpens* destacándose en 5 muestras y *Psammothidium subatomoides* siendo superior en 2 muestras, en la muestra 2019255 la comunidad estuvo repartida en un mayor número de especies (Figura 76).

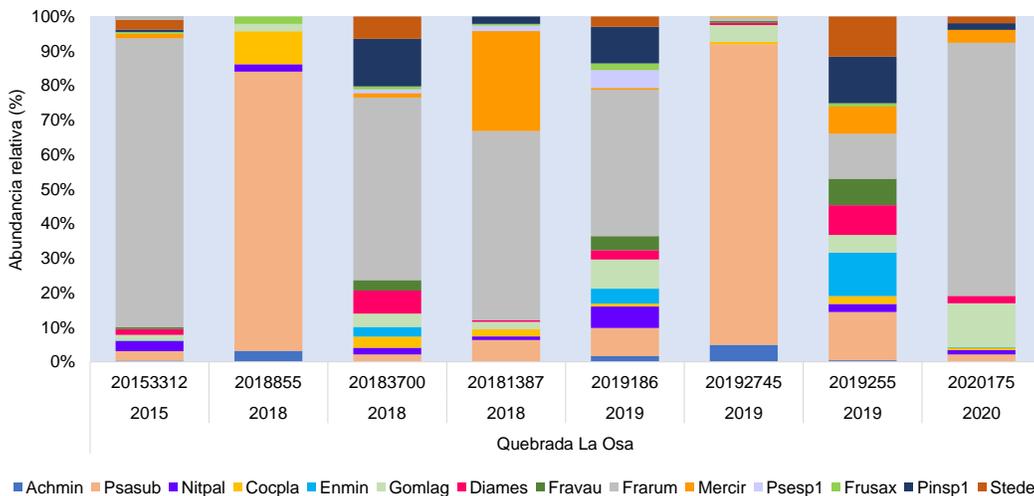
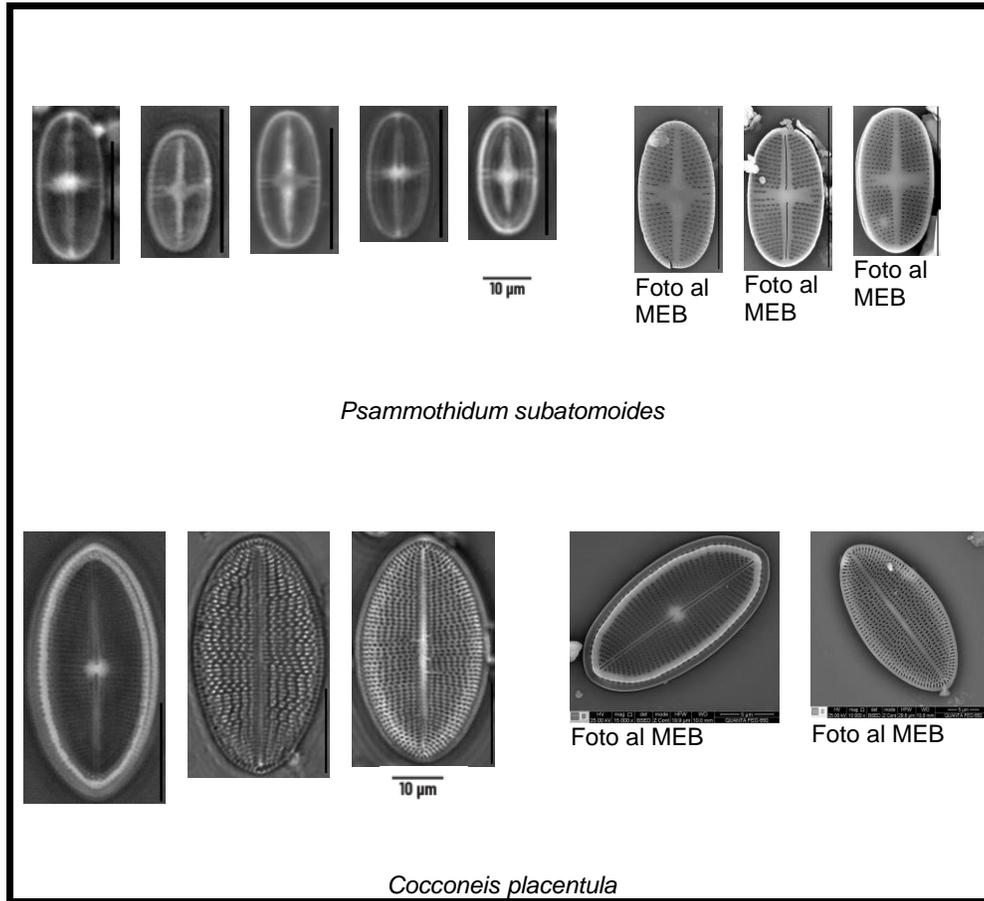


Figura 76. Abundancia relativa de las especies de diatomeas registradas en las muestras de quebrada La Osa-sistema El Delirio. Especies con abundancias mayores o iguales al 5%.

Tabla 9. Imágenes de las especies más representativas de la comunidad de diatomeas del Sistema El Delirio.



4.3 ANÁLISIS DEL PATRÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

El Análisis de Correspondencia Distendido (DCA), usado para detectar el patrón de cambio en la composición de especies de las zonas de estudio, mostró un alto poder explicativo de la composición de especies en el gradiente ambiental (longitud eje 1=7.08), resumiendo ampliamente la distribución de la comunidad (Figura 77). En la **Tabla 10** se presenta el resumen del modelo y en la Tabla 11, las especies que marcan los cambios significativos en la composición de la comunidad entre las diferentes zonas de estudio.

Tabla 10. Análisis de Correspondencia Distendido (DCA), resumen del modelo

	DCA1	DCA2	DCA3	DCA4
Eigenvalues	0.627	0.515	0.452	0.338
Decorana values	0.662	0.547	0.439	0.321
Axis lengths	7.080	4.657	3.659	3.359

Tabla 11. Especies significativas en el modelo DCA con sus respectivos acrónimos (Sp_Id).

Sig: p=0 (***), p= 0.001 (**), p= 0.01 (*), p= 0.05 (.)

Especie	Sp_Id	r ²	Pr(>r)	Sig
<i>Achnantheidium minutissimum</i>	Achmin	0.10	0.00	***
<i>Cocconeis placentula</i>	Cocpla	0.23	0.00	***
<i>Craticula affines . molestiformis</i>	Cramol	0.06	0.02	*
<i>Diatoma mesodon</i>	Diames	0.04	0.03	*
<i>Encyonema minutum</i>	Encmin	0.03	0.04	*
<i>Encyonema silesiacum</i>	Encsil	0.08	0.00	***
<i>Eunotia con forma. acutinasuta</i>	Eunacu	0.06	0.03	*
<i>Eunotia con forma. exigua</i>	Eunexi	0.03	0.04	*
<i>Eunotia affines . genuflexa</i>	Eungen	0.05	0.02	*
<i>Eunotia muscicola</i>	Eunmus	0.03	0.05	*
<i>Eunotia nymanniana</i>	Eunnym	0.09	0.00	***
<i>Enunotia con forma. pseudosudetica</i>	Eunpse	0.12	0.00	***
<i>Eunotia sp. 10</i>	Eunsp10	0.15	0.00	***
<i>Eunotia sp. 9</i>	Eunsp9	0.11	0.00	***
<i>Eunotia subarcuatooides</i>	Eunsub	0.21	0.00	***
<i>Fragilaria capucina var. rumpens</i>	Frarum	0.13	0.00	***
<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	Fravau	0.04	0.01	**
<i>Frustulia con forma. crassinervia</i>	Frucra	0.07	0.00	**
<i>Frustulia affines . pararhomboides</i>	Frupar	0.12	0.00	***
<i>Frustulia affines . saxonica</i>	Frusax	0.11	0.00	***
<i>Frustulia sp. 3</i>	Frusp3	0.17	0.00	***
<i>Gomphonema affines . affines ine var. rhombicum</i>	Gomaffines r	0.04	0.03	*
<i>Gomphonema affines . gracile</i>	Gomgra	0.06	0.00	**
<i>Gomphonema lagenula</i>	Gomlag	0.05	0.00	**
<i>Gomphonema parvulum</i>	Gompar	0.12	0.00	***
<i>Gomphonema pumilum sentu lato</i>	Gompum	0.05	0.01	**
<i>Gomphonema sp. 4</i>	Gomsp4	0.13	0.00	***
<i>Gyrosigma affines . acuminatum</i>	Gyracu	0.15	0.00	***
<i>Hannaea arcus</i>	Hanarc	0.16	0.00	***
<i>Luticola affines . goeppertiana</i>	Lutgoe	0.05	0.02	*
<i>Melosira varians</i>	Melvar	0.14	0.00	***
<i>Navicula cryptocephala</i>	Navcryc	0.11	0.00	**
<i>Navicula longicephala</i>	Navlon	0.04	0.02	*
<i>Navicula affines . notha</i>	Navnot	0.04	0.01	*
<i>Navicula rostellata</i>	Navros	0.33	0.00	***
<i>Navicula schroeteri</i>	Navsch	0.06	0.01	*
<i>Neidium sp. 2</i>	Neisp2	0.04	0.03	*
<i>Nitzschia affines . capitellata</i>	Nitcap	0.13	0.00	***
<i>Nitzschia palea</i>	Nitpal	0.21	0.00	***
<i>Nupela sp. 1</i>	Nupsp1	0.20	0.00	***
<i>Pinnularia pisculus var. angusta</i>	Pinpis	0.09	0.00	**
<i>Pinnularia sp. 13</i>	Pinsp13	0.06	0.01	**
<i>Pinnularia sp. 16</i>	Pinsp16	0.04	0.03	*
<i>Pinnularia sp. 8</i>	Pinsp8	0.06	0.00	**
<i>Pinnularia affines . subcapitata</i>	Pinsub	0.03	0.03	*
<i>Psammothidium subatomoides</i>	Psasub	0.29	0.00	***
<i>Reimeria sinuata</i>	Reisin	0.04	0.02	*
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	Rhoabb	0.03	0.05	*

Especie	Sp_Id	r ²	Pr(>r)	Sig
<i>Sellaphora difficillima</i>	Seldif	0.08	0.00	***
<i>Sellaphora nigri</i>	Selnig	0.02	0.05	*
<i>Sellaphora saugerresii</i>	Selsau	0.18	0.00	***
<i>Surirella angusta</i>	Surang	0.05	0.01	**
<i>Tabellaria flocculosa</i>	Tabfloc	0.08	0.00	***

5. DESARROLLO DEL MODELO DE BIOINDICACIÓN

El Índice de Calidad Ecológica -ICE fue establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2018) como una metodología a implementar para el desarrollo de sistemas de calidad biológica en el país. Su metodología se basa en estadística multivariada y contempla la cuantificación de los óptimos y tolerancias de las especies en función de un gradiente ambiental, todo enmarcado dentro de las particularidades de cada cuenca a nivel regional.

A continuación, se presentan cada uno de los pasos realizados para el desarrollo del modelo de bioindicación para la EAAB-ESP, siguiendo dicha metodología.

5.1 METODOLOGÍA ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA – ICE

La metodología para el desarrollo del ICE se basa en los métodos descritos por Haase & Nolte (2008), Chalar et al., (2011), Longo et al., (2014), y Hernandez et al., (2018) y comprende en general 4 pasos descritos a continuación:

Paso 1

El primer paso consiste en analizar la matriz de datos biológica por medio de un análisis de correspondencia distendido (Detrended Correspondence Analysis o DCA) y con ello determinar el uso de un modelo lineal o unimodal. Como regla general en teoría ecológica si la longitud del gradiente del DCA es mayor a 2 desviaciones estándar, se asume un modelo de respuesta unimodal de las especies (Ter Braak & Prentice, 1988). Este modelo de respuesta requiere que el análisis de la relación especies-variables ambientales se realice mediante una Análisis de Correspondencia Canónica (ACC).

El ACC calcula qué combinaciones lineales de las especies (variables dependientes) tienen la mejor correlación con una combinación lineal de las variables ambientales (variables independientes) (Haase & Nolte, 2008). Así, el objetivo central de esta técnica es establecer el conjunto de variables más explicativas de la composición de la comunidad de diatomeas para calcular sobre dicho gradiente ambiental los óptimos y tolerancias de las especies.

Paso 2

Antes de correr el ACC, se evaluó la importancia de las variables ambientales mediante un procedimiento de *forward selection* junto con un test de permutaciones de Montecarlo, con el fin de escoger sólo aquellas variables que fueran significativas en el modelo ($p < 0.05$). De igual manera, se exploró el Factor de Inflación de la Varianza (FIV) para evitar la inclusión de variables altamente correlacionadas, dejando solo aquellas con un $FIV < 10$. Una vez

seleccionadas las variables a incluir se corrió un ACC para explorar la relación entre especies y variables ambientales.

En este paso se tuvieron en cuenta varios ejes del ACC. En aquellos sistemas en donde la correlación de las variables retenidas en el modelo estuviese altamente correlacionada con los ejes 2 y 3, también fueron incluidos, estableciendo así un índice para cada eje ambiental.

Paso 3

Con los valores de los puntajes de las muestras (samples scores) del primer eje del ACC se realizó un reescalamiento mediante una regresión lineal, ajustando el puntaje más bajo a 1 (lugar más impactado-hipereutrífico) y el puntaje más alto a 10 (lugar menos impactado-oligotrófico). Sin embargo, en aquellos modelos en donde las variables ambientales presentaron scores negativos, el ajuste de los samples scores no se invirtió. Esto con el fin de asegurar que la dirección del gradiente correspondiera la máxima calidad con valores bajos de las variables ambientales y viceversa.

Una vez reescalado el eje se obtiene la distribución de los sitios a lo largo del gradiente de impacto. Los puntajes reescalados se utilizaron para calcular los óptimos y tolerancias de las especies a partir de un modelo de promedios ponderados (Weighted Averaging -WA), mediante la función *crossval* del paquete rioja (Juggins & Juggins, 2020).

Paso 4

El cálculo del índice ICE se realizó basado en Haase & Nolte (2008) para cada gradiente ambiental en cada uno de los sistemas, siguiendo la siguiente expresión:

$$ICE = \frac{\sum Op_i * Tol_i * Ab_i}{\sum Op_i * Ab_i} \quad (1)$$

Donde,

Op_i es el óptimo de la especie i

Tol_i es la tolerancia de la especie i

Ab_i es la abundancia transformada ($\log_{10}(\text{abundancia}+1)$) de la especie i en cada punto

Para todos los sistemas se cuantificó un índice para cada gradiente ambiental significativo retenido en el ACC.

6. CORRELACIÓN DE LAS ESPECIES CON LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS- MODELO ACC

La correlación de las especies con el gradiente ambiental se realizó agrupando las zonas de monitoreo definidas en el seguimiento limnológico de las fuentes de abastecimiento. Así, se definieron 3 grandes sistemas:

Sistema Norte, que incluye todas las corrientes de las zonas Chuza y Río Blanco.

Sistema Sur, que incluye las corrientes de San Rafael, Regadera, Chisacá y Yomasa.

Sistema San Rafael-Tibitoc, que incluye todas corrientes de dichas zonas.

Dado que la longitud del gradiente del DCA mostró una respuesta unimodal en todos los sistemas, la correlación de las diatomeas con las variables ambientales se realizó mediante un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC).

Para el AAC se corrió un modelo inicial con procedimiento *forward selection* basado en un test de permutación (999 permutaciones) con el fin de identificar las variables significativas y reducir el número de variables explicativas que mejoraran la calidad del modelo. mediante el cálculo del factor de inflación de la varianza (vif) se evaluó la multicolinealidad entre variables y finalmente, la significancia de los ejes canónicos y del modelo fue evaluada por medio de un ANOVA (999 permutaciones, $p < 0.05$).

Para establecer las especies significativas en el modelo se utilizó la función *envfit* del paquete Vegan, la cual cuantifica la correlación de cada especie con las variables ambientales en el espacio de ordenación. Todos los modelos de ordenación fueron realizados con el paquete Vegan (Oksanen et al., 2007) del software R (R Core Team, 2018).

6.1 SISTEMA NORTE

El modelo de ACC para las 103 muestras que componen este sistema explicó el 16% de la variación de la relación especies-variables ambientales. los tres primeros ejes de modelo de ordenación fueron significativos y explicaron el 67% de la varianza total (**Anexo 25**). el primer eje 1 explicó el 36% de la varianza y estuvo asociado con la mineralización (ALCA, DUR, ST y PH), el segundo eje explicó el 17% de la varianza y estuvo asociado con el hierro (Fe) y el tercer componente reunió el 14% de la varianza y estuvo asociado con los nutrientes (PT y NH4). En el **Figura 78** se presenta el resumen del modelo.

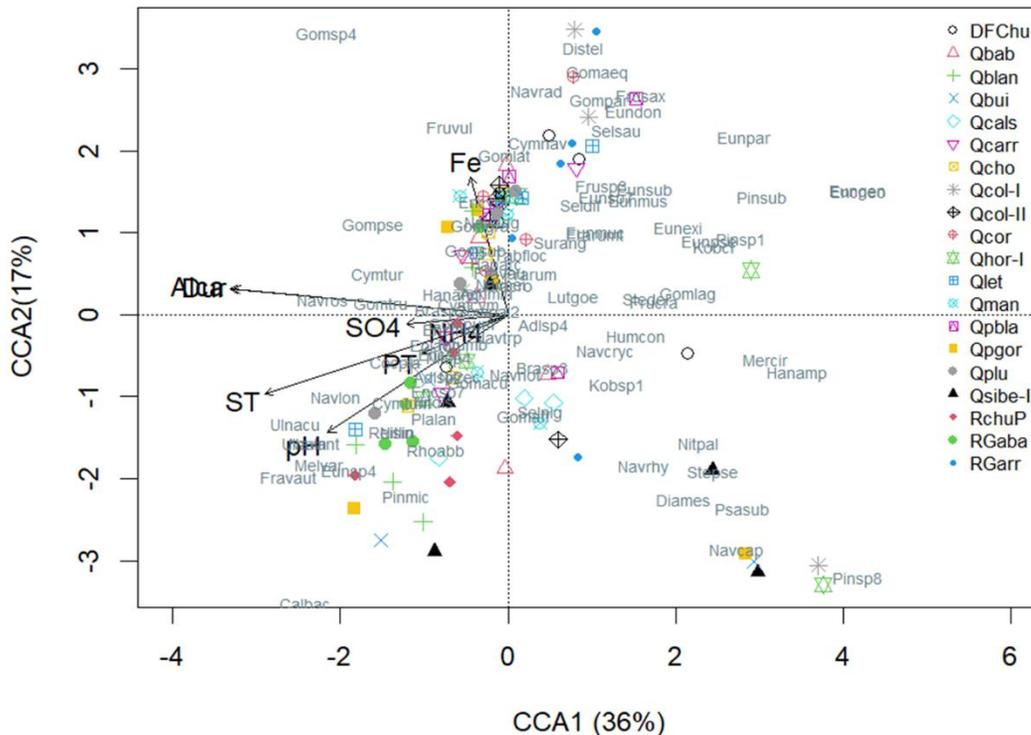


Figura 78 Análisis de Correspondencia Canónica para las muestras del Sistema Norte.

De las 98 especies registradas, 53 especies presentaron una alta correlación con las variables ambientales del modelo (**Tabla 12**). En la mayoría de los muestreos de las estaciones Qcor, Qlet, Qbab, Qman, Qcho, Qplu, Qcol-II y RGuarr, en donde se observó menor pH y alto contenido de Fe, baja concentración de sólidos y de nutrientes, la comunidad de diatomeas estuvo representada principalmente por especies que suelen preferir ambientes desde oligotróficos a mesotróficos con baja contaminación como *Hannaea arcus*, *Achnantheidium minutissimum*, *Cymbella cymbiformis*, *Fragilaria rumpens*, *Fragilaria vaucheriae*, *Eunotia minor*, *Discostella stelligera*, *Sellaphora saugerresi* y *Brachysira* sp.2 (Lange-Bertalot & Metzeltin, 1996; Taylor et al., 2007).

En las estaciones RGaba, RchuP y Qblan, las cuales presentaron mayor contenido de PT, pH y ST, las especies más recurrentes fueron *Rhopalodia abbreviata*, *Nitzschia dissipata*, *Nitzschia recta*, reportadas en la literatura como tolerantes a contaminación, así como especies medianamente tolerantes como *Encyonema silesiacum*, *Encyonema minutum*, *Cocconeis placentula*, *Reimeria sinuata*, *Planothidium lanceolatum* y *Melosira varians*.

Se destacan Qhor-I y Qpgor por ser temporalmente muy variables en composición. En estos puntos, así como en la Qsibe-I, se observó un predominio de especies muy tolerantes a la contaminación como *Nitzschia palea*, *Navicula capitatoradiata*, *Navicula rhynchocephala*, así como especies con preferencias por hábitats con bajo contenido electrolítico como *Diatoma mesodon*, *Psammothidium subatomoides*, *Stenopterobia pseudodelicatissima* y *Pinnularia* sp.8.

Tabla 12. Especies significativas en el modelo ACC para el Sistema Norte. Sig: 0 ** 0.001**
 *** 0.01 ** 0.05 ' ' 0.1

Especie	Sp_Id	r ²	pvalor	Sig
<i>Achnanthydium minutissimum</i>	Achmin	-0.68	0.01	**
<i>Brachysira sp. 2</i>	Brasp2	0.26	0.00	**
<i>Cocconeis placentula</i>	Cocpla	-0.88	0.00	***
<i>Cymbella cymbiformis</i>	Cymcym	-0.59	0.03	*
<i>Diatoma mesodon</i>	Diames	0.84	0.00	***
<i>Discostella stelligera</i>	Distel	0.41	0.01	*
<i>Encyonema minutum</i>	Encmin	-0.91	0.00	***
<i>Encyonema silesiacum</i>	Encsil	-0.85	0.00	***
<i>Eunotia cf. acutinasuta</i>	Eunacu	0.88	0.03	*
<i>Eunotia aff. donatoi</i>	Eundon	0.53	0.03	*
<i>Eunotia cf. exigua</i>	Eunexi	0.91	0.00	**
<i>Eunotia minor</i>	Eunmin	0.46	0.01	**
<i>Eunotia mucophila</i>	Eunmuc	0.69	0.04	*
<i>Eunotia muscicola</i>	Eunmus	0.80	0.00	***
<i>Eunotia parasiolii</i>	Eunpar	0.94	0.01	**
<i>Eunotia cf. pseudosudetica</i>	Eunpse	0.97	0.00	**
<i>Eunotia sp. 7</i>	Eunsp7	0.71	0.01	*
<i>Eunotia subarcuatoidea</i>	Eunsub	0.83	0.00	**
<i>Fragilaria capucina var. rumpes</i>	Frarum	0.79	0.00	***
<i>Fragilaria capucina var. rumpes Terat</i>	Frarumt	0.87	0.01	**
<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	Fravau	-0.56	0.00	***
<i>Frustulia cf. crassinervia</i>	Frucra	0.96	0.01	**
<i>Frustulia aff. saxonica</i>	Frusax	0.72	0.00	**
<i>Frustulia sp. 3</i>	Frusp3	0.72	0.01	*
<i>Gomphonema lagenula</i>	Gomlag	1.00	0.00	***
<i>Gomphonema parvulum</i>	Gompar	0.74	0.00	**
<i>Hantzschia amphioxys</i>	Hanamp	0.98	0.00	**
<i>Hannaea arcus</i>	Hanarc	-0.62	0.00	***
<i>Humidophila contenta</i>	Humcon	0.94	0.01	**
<i>Melosira varians</i>	Melvar	-0.87	0.00	**
<i>Meridion circulare var. constrictum</i>	Mercir	0.98	0.00	***
<i>Navicula aff. antonii</i>	Navant	-0.85	0.03	*
<i>Navicula capitatoradiata</i>	Navcap	0.88	0.03	*
<i>Navicula cryptocephala</i>	Navcryc	0.85	0.00	***
<i>Navicula rhyngocephala</i>	Navrhy	0.86	0.03	*
<i>Nitzschia dissipata</i>	Nitdis	-0.76	0.00	**
<i>Nitzschia palea</i>	Nitpal	0.87	0.00	***
<i>Nitzschia recta</i>	Nitrec	-0.60	0.00	**
<i>Nitzschia sp. 4</i>	Nitsp4	-0.74	0.01	*
<i>Nuplea neglecta</i>	Nupneg	0.74	0.00	***
<i>Pinnularia sp. 1</i>	Pinsp1	0.92	0.00	**
<i>Pinnularia sp. 8</i>	Pinsp8	0.93	0.00	***
<i>Pinnularia aff. subcapitata</i>	Pinsub	1.00	0.01	**
<i>Planothidium lanceolatum</i>	Plalan	-0.67	0.00	***
<i>Psammothidium subatomoides</i>	Psasub	0.88	0.00	***

Especie	Sp_Id	r ²	pvalor	Sig
<i>Reimeria sinuata</i>	Reisin	-0.86	0.00	***
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	Rhoabb	-0.73	0.00	***
<i>Sellaphora nigri</i>	Selnig	0.34	0.00	***
<i>Sellaphora saugerresii</i>	Selsau	0.68	0.01	**
<i>Stenopterobia aff. delicatissima</i>	Stedel	0.99	0.00	***
<i>Stenopterobia aff. pseudodelicatissima</i>	Stepse	0.88	0.00	**
<i>Tabellaria flocculosa</i>	Tabfloc	0.22	0.00	***

6.2 SISTEMA SUR

El número de muestras analizadas en este sistema fueron 103. El modelo explicó el 16% de la variación en la relación especies-variables ambientales. Los tres primeros ejes del modelo fueron significativos y explicaron el 73% de la varianza acumulada. Todas las variables ambientales incluidas en el modelo fueron significativas (**Anexo 26**). Los resultados muestran que el eje 1 explicó el 38% de la varianza y estuvo asociado con la mineralización (Cond, Turb, CL, Alca), el segundo eje explicó el 18% de la varianza y estuvo asociado con el Hierro (Fe) y el tercer eje explicó el 16% y estuvo asociado con los NO₃ y SO₄ (**Figura 79**).

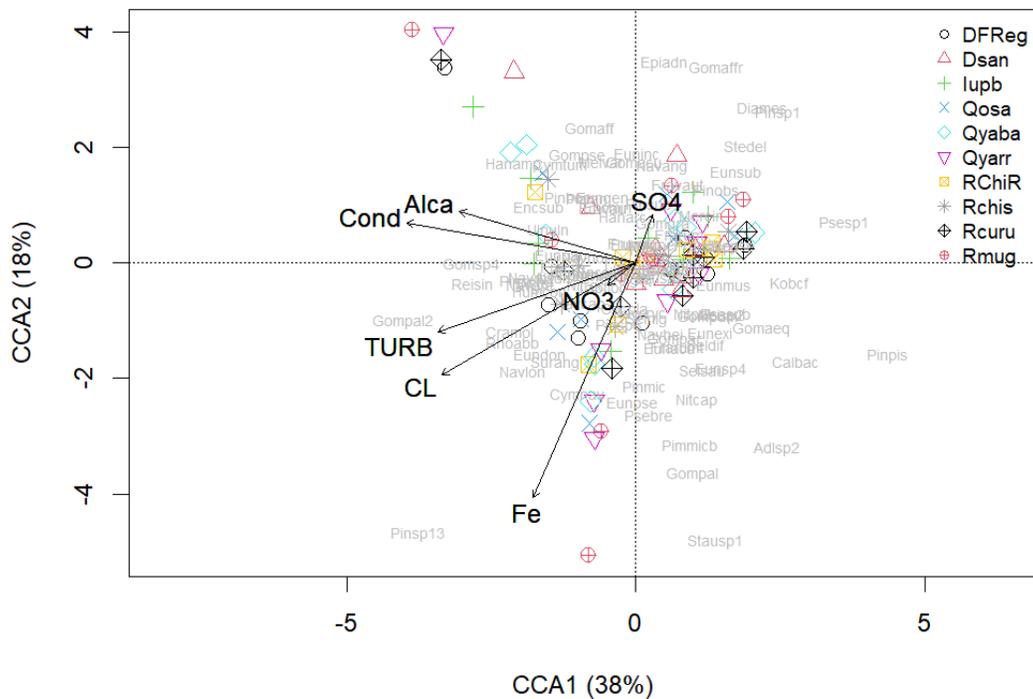


Figura 79. Análisis de Correspondencia Canónica para las muestras del Sistema Sur y El Delirio

De acuerdo con el análisis, los ríos del sistema Sur y El Delirio presentan una alta variabilidad temporal y no se observan patrones claros en la composición de especies que

difiera entre los sitios de muestreo (**Figura 79**). Sin embargo, se observan en general algunas tendencias en la composición que están asociadas con la fisicoquímica.

De las 100 especies incluidas en el análisis, 40 presentaron una correlación significativa con las variables ambientales (**Tabla 13**). Particularmente cuando se observa mayor contenido de Fe, Cloruros y Turbidez, suelen ser recurrentes especies como *Fragilaria crotonensis*, *Gomphonema cf subclavatum*, *Gomphonema affine*, *Gomphonema aff gracile*, *G.pseudoaugur*, *Navicula notha*, *Ulnaria ulna*, *Eunotia cf parasiolii* y *Achnantheidium minutissimum*, especies que en su mayoría suelen ser registradas en sistemas mesotróficos a eutróficos. De otro lado, las especies que aparecen más correlacionadas con la Conductividad y Alcalinidad en estos sistemas son *Rhopalodia abbreviata*, *Reimeria sinuata*, *Surirella angusta*, *Gomphonema sp.4*, *Gomphonema paludosum2*, *Encyonema silesiacum* y *Hannaea arcus*. Asociados con mayores concentraciones de SO₄, las especies más recurrentes fueron *Nitzschia palea*, *Eunotia cf exigua*, *Sellaphora saugerresii*.

Tabla 13. Especies significativas en el modelo ACC para el Sistema Sur. Sig: 0 '**' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1**

Especie	Sp_id	r2	pvalor	Sig
<i>Achnantheidium minutissimum</i>	Achmin	0.42	0.00	***
<i>Diatoma mesodon</i>	Diames	0.29	0.00	***
<i>Discostella stelligera</i>	Distel	0.36	0.00	***
<i>Encyonema minutum</i>	Encmin	0.06	0.04	*
<i>Encyonema silesiacum</i>	Encsil	0.16	0.00	***
<i>Encyonema cf. subminutum</i>	Encsub	0.06	0.04	*
<i>Eunotia cf. exigua</i>	Eunexi	0.08	0.01	*
<i>Eunotia aff. genuflexa</i>	Eungen	0.05	0.07	.
<i>Eunotia muscicola</i>	Eunmus	0.12	0.01	**
<i>Eunotia parasiolii</i>	Eunpar	0.07	0.03	*
<i>Fragilaria crotonensis</i>	Fracro	0.34	0.00	***
<i>Fragilaria capucina var. rumpes</i>	Frarum	0.38	0.00	***
<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	Fravau	0.20	0.00	***
<i>Frustulia cf. crassinervia</i>	Frucra	0.05	0.05	*
<i>Gomphonema cf. aequirostrum</i>	Gomaeq	0.10	0.01	**
<i>Gomphonema affine</i>	Gomaff	0.17	0.00	**
<i>Gomphonema aff. gracile</i>	Gomgra	0.12	0.01	**
<i>Gomphonema lagenula</i>	Gomlag	0.30	0.00	***
<i>Gomphonema cf. paludosum2</i>	Gompal2	0.12	0.01	**
<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	Gompse	0.27	0.00	***
<i>Gomphonema sp. 4</i>	Gomsp4	0.69	0.00	***
<i>Gomphonema cf. subclavatum</i>	Gomsub	0.10	0.01	**
<i>Hannaea arcus</i>	Hanarc	0.10	0.01	**
<i>Humidophila contenta</i>	Humcon	0.05	0.09	.
<i>Meridion circulare var. constrictum</i>	Mercir	0.17	0.00	**
<i>Navicula aff. notha</i>	Navnot	0.30	0.00	***
<i>Neidium sp. 2</i>	Neisp2	0.07	0.04	*
<i>Nitzschia palea</i>	Nitpal	0.22	0.00	***
<i>Pinnularia pisculus var. angusta</i>	Pinpis	0.07	0.05	*
<i>Pinnularia sp. 1</i>	Pinsp1	0.22	0.00	**

Especie	Sp_Id	r2	pvalor	Sig
<i>Psammothidium subatomoides</i>	Psasub	0.50	0.00	***
<i>CF. Pseudostaurosira sp. 1 aff. elliptica</i>	Psesp1	0.08	0.03	*
<i>Reimeria sinuata</i>	Reisin	0.50	0.00	***
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	Rhoabb	0.25	0.00	***
<i>Sellaphora difficillima</i>	Seldif	0.21	0.00	***
<i>Sellaphora saugerresii</i>	Selsau	0.13	0.00	**
<i>Stenopterobia aff. delicatissima</i>	Stedel	0.19	0.00	***
<i>Surirella angusta</i>	Surang	0.07	0.04	*
<i>Tabellaria flocculosa</i>	Tabfloc	0.25	0.00	***
<i>Ulnaria ulna</i>	Ulnuln	0.50	0.00	***

6.3 SISTEMA TIBITOC-SAN RAFAEL

Los ríos y quebradas de las San Rafael y Tibitoc que componen este sistema abarcaron un total de 44 muestras. El modelo explicó el 26% de la variación en la relación especies-variables ambientales. Los tres primeros ejes del modelo fueron significativos y explicaron el 81% de la varianza acumulada. Todas las variables ambientales incluidas en el modelo fueron significativas (**Anexo 27**). Los resultados muestran que el eje 1 explicó el 47% de la varianza y estuvo asociado con la mineralización (Cond y pH), el segundo eje explicó el 20% de la varianza y estuvo asociado con los nutrientes, principalmente con el NKJ, los NO3 y el PRS, en ese orden de importancia (Figura 80).

De las 93 especies, 33 especies fueron significativas en el modelo (**Tabla 14**). En el sistema San Rafael-Tibitoc particularmente en las estaciones RteCal, RBDS, RtePAd, RtePS, RBAT, RteSi, DFSR y RteCab donde se registraron altos valores de PRS, Conductividad y NKJ, el conjunto de especies significativamente asociadas son *Navicula cryptocephala*, *Sellaphora saugerresii*, *Nitzschia palea*, *Gomphonema parvulum*, *Selaphora nigri* y *Gomphonema affine var rhombicum*. En las estaciones cuyos pH y concentración de NO3 como en algunas estaciones de del RBDS, RtePS, RteCal y RtePF, las especies altamente relacionadas son *Nitzschia capitellata*, *Gomphonema pumilum*, *Gyrosigma aff. acuminatum* y *Navicula rostellata*. Ambos conjuntos de especies suelen ser reportadas en la literatura como tolerantes a contaminación.

De otro lado, cuando los valores de nutrientes no son tan elevados, la comunidad de diatomeas está compuesta por especies que suelen preferir ambientes oligotróficos como *Eunotia subarcuatooides*, *Eunotia nymanniana*, *Eunotia incisa*, *Frustulia saxonica*, *Frustulia crassinervia*.

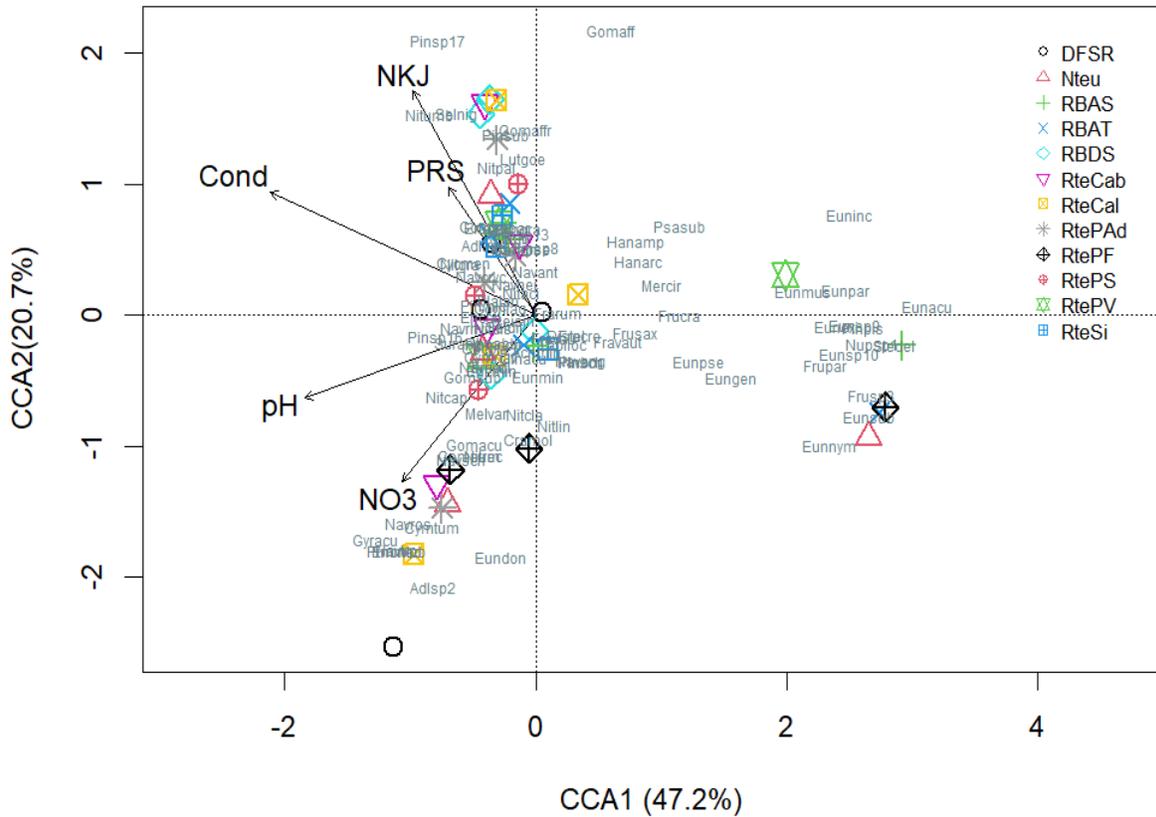


Figura 80 Análisis de Correspondencia Canónica para las muestras del Sistema San Rafael y Tibitoc.

Tabla 14. Especies significativas en el modelo ACC para el Sistema San Rafael-Tibitoc. Sig : 0 ‘****’ 0.001 ‘***’ 0.01 ‘**’ 0.05 ‘.’ 0.1

Especie	Sp_id	r2	pvalor	Sig
<i>Cymbella cf. tumida</i>	Cymtum	0.24	0.005	**
<i>Eunotia cf. acutinasuta</i>	Eunacu	0.28	0.004	**
<i>Eunotia cf. exigua</i>	Eunexi	0.51	0.001	***
<i>Eunotia aff. genuflexa</i>	Eungen	0.16	0.042	*
<i>Eunotia incisa</i>	Euninc	0.27	0.010	**
<i>Eunotia muscicola</i>	Eunmus	0.55	0.001	***
<i>Eunotia nymanniana</i>	Eunnym	0.39	0.004	**
<i>Eunotia parasiolii</i>	Eunpar	0.56	0.001	***
<i>Enunotia cf. pseudosudetica</i>	Eunpse	0.37	0.002	**
<i>Eunotia sp. 10</i>	Eunsp10	0.72	0.001	***
<i>Eunotia sp. 9</i>	Eunsp9	0.76	0.001	***
<i>Eunotia subarcuatoides</i>	Eunsub	0.55	0.001	***
<i>Frustulia cf. crassinervia</i>	Frucra	0.20	0.014	*
<i>Frustulia aff. pararhomboides</i>	Frupar	0.49	0.001	***
<i>Frustulia aff. saxonica</i>	Frusax	0.15	0.034	*
<i>Frustulia sp. 3</i>	Frusp3	0.77	0.001	***
<i>Gomphonema aff. affine var. rhombicum</i>	Gomaffr	0.17	0.031	*

Especie	Sp_Id	r2	pvalor	Sig
<i>Gomphonema parvulum</i>	Gompar	0.37	0.001	***
<i>Gomphonema pumilum sentu lato</i>	Gompum	0.19	0.012	*
<i>Gyrosigma aff. acuminatum</i>	Gyracu	0.46	0.001	***
<i>Luticola aff. goeppertiana</i>	Lutgoe	0.19	0.020	*
<i>Melosira varians</i>	Melvar	0.37	0.001	***
<i>Navicula cryptocephala</i>	Navcryc	0.30	0.002	**
<i>Navicula aff. notha</i>	Navnot	0.17	0.023	*
<i>Navicula rostellata</i>	Navros	0.62	0.001	***
<i>Navicula schroeteri</i>	Navsch	0.27	0.004	**
<i>Nitzschia aff. capitellata</i>	Nitcap	0.20	0.013	*
<i>Nitzschia palea</i>	Nitpal	0.54	0.001	***
<i>Nupela sp. 1</i>	Nupsp1	0.90	0.001	***
<i>Pinnularia pisculus var. angusta</i>	Pinpis	0.75	0.001	***
<i>Sellaphora nigri</i>	Selnig	0.21	0.019	*
<i>Sellaphora saugerresii</i>	Selsau	0.27	0.005	**
<i>Stenopterobia aff. delicatissima</i>	Stedel	0.21	0.042	*

7. CUANTIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA

En la **Figura 81** se esquematiza la rutina de análisis y los pasos en general realizados para el desarrollo del ICE para las fuentes del Acueducto. Una vez seleccionadas las variables significativas en el modelo ACC, se procedió con el reescalonamiento de los ejes, modificando el método de Haase & Nolte (2008), el cual dependió del signo de los ejes ambientales en el espacio de ordenación. Si las variables más importantes en el eje ambiental eran positivas se realizó el procedimiento de reescalonamiento siguiendo lo recomendado por Haase & Nolte (2008), en caso contrario, no se invirtió.

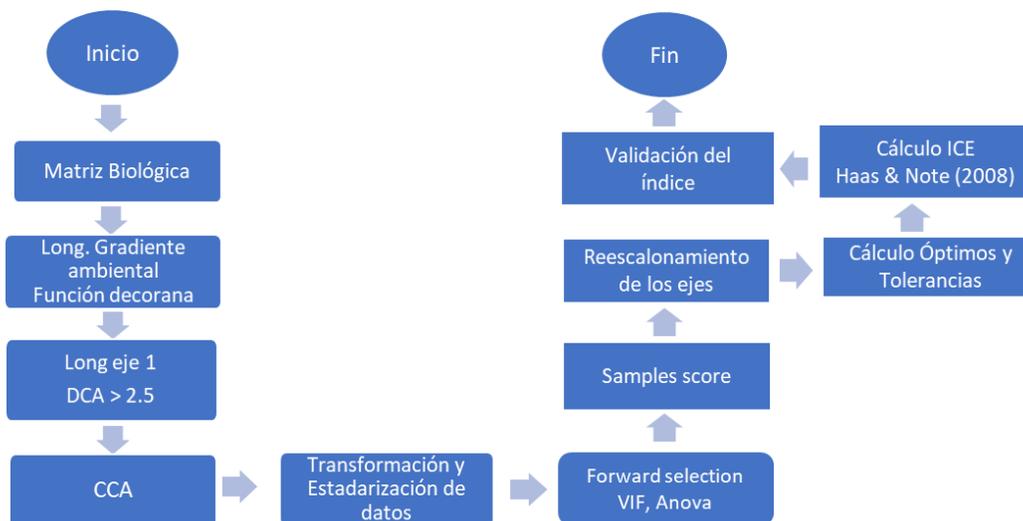


Figura 81 Esquema de la secuencia de análisis y cálculo del Índice de Calidad Ecológica.

7.1 VALORES ÓPTIMOS Y DE TOLERANCIA DE LAS ESPECIES

Los óptimos y tolerancias de las especies son la base para el cálculo del ICE. Los gradientes ambientales descritos para cada sistema en el capítulo 6 fueron la base para su cuantificación. Así, para cada sistema se tuvieron en cuenta entre 2 o 3 ejes que resumieran el gradiente ambiental relacionado con la mineralización, los nutrientes y/o iones importantes para la calidad del agua como el Hierro.

A continuación, se presentan para cada sistema los valores calculados de los óptimos y tolerancias de las especies para cada eje ambiental en cada sistema

7.1.1 Óptimos y Tolerancias de las especies del Sistema Norte

Los óptimos y tolerancias de las especies del sistema Norte se cuantificaron para los 3 gradientes ambientales detectados en el ACC. Las variables con mayor correlación para cada eje (gradiente) ambiental son presentadas en la Tabla 15. En la **Tabla 20** se presenta el listado de especies con sus respectivos óptimos y tolerancias.

Tabla 15. Gradientes ambientales definidos en el modelo ACC para el Sistema Norte. Se resaltan las variables más importantes en cada eje.

Variables	CCA1	CCA2	CCA3
Alca	-0.96	0.09	-0.17
ST	-0.84	-0.28	-0.18
pH	-0.62	-0.42	0.09
Fe	-0.13	0.49	-0.28
Dur	-0.95	0.09	-0.02
SO4	-0.35	-0.03	0.35
NH4	-0.07	-0.02	0.44
PT	-0.30	-0.14	-0.53

Tabla 16. Óptimos y Tolerancias de las especies calculados para cada uno de los gradientes ambientales establecidos en el modelo ACC (Tabla 6) del Sistema Norte.

Especie	Especie Id	Eje Mineralización		Eje Hierro		Eje Nutrientes	
		Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia
<i>Achnantheidium minutissimim</i>	Achmin	3.66	1.34	4.04	1.96	6.44	1.08
<i>Adlafia sp. 2</i>	Adlsp2	3.45	1.18	4.87	1.66	6.60	0.62
<i>Brachysira sp. 2</i>	Brasp2	4.08	1.33	2.63	0.85	6.53	1.28
<i>Brachysira sp. 3</i>	Brasp3	4.46	0.85	2.69	0.59	6.97	1.22
<i>Caloneis bacillum</i>	Calbac	1.01	1.33	7.29	1.49	1.00	1.03
<i>Cocconeis placentula</i>	Cocpla	1.95	1.53	6.46	1.02	3.47	2.22
<i>Cymbella cymbiformis</i>	Cymcym	3.46	0.63	3.52	1.23	7.28	0.41
<i>Cymbopleura naviculiformis</i>	Cymnav	4.98	1.38	1.18	2.28	6.26	1.00
<i>Cymbella cf. tumida</i>	Cytmum	2.88	0.65	5.30	1.61	7.72	0.76

Especie	Especie_I d	Eje		Eje Hierro		Eje Nutrientes	
		Mineralización	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia
<i>Cymbella cf. turgidula</i>	Cymtur	3.18	0.50	3.58	1.00	6.85	0.40
<i>Diatoma mesodon</i>	Diames	7.51	2.29	7.91	1.55	6.78	0.71
<i>Discostella stelligera</i>	Distel	4.89	0.63	1.65	0.85	6.36	0.56
<i>Encyonema minutum</i>	Encmin	2.88	1.15	5.50	1.73	6.82	1.33
<i>Encyonema neogracile</i>	Encneo	8.61	1.33	3.98	1.49	2.97	1.03
<i>Encyonema silesiacum</i>	Encsil	2.83	0.86	5.80	1.33	6.89	1.19
<i>Encyonema sp. 7</i>	Encsp7	2.91	0.68	6.40	2.05	7.10	0.46
<i>Encyonema subminutum</i> cf.	Encsub	3.08	1.33	4.30	1.49	6.98	1.03
<i>Encyonema vulgare</i>	Encvul	4.08	1.31	2.96	0.96	6.63	1.37
<i>Epithemia adnata</i>	Epiadn	2.81	0.56	5.43	0.68	6.28	0.49
<i>Eunotia cf. acutinasuta</i>	Eunacu	8.67	1.33	8.70	1.49	6.34	1.03
<i>Eunotia aff. donatoi</i>	Eundon	5.36	0.21	1.20	0.46	6.04	0.07
<i>Eunotia cf. exigua</i>	Eunexi	6.21	1.62	2.62	1.72	4.88	1.30
<i>Eunotia aff. genuflexa</i>	Eungen	8.61	1.33	3.98	1.49	2.97	1.03
<i>Eunotia minor</i>	Eunmin	5.29	0.21	0.24	0.48	6.28	0.15
<i>Eunotia mucophila</i>	Eunmuc	5.57	0.41	1.95	0.36	5.34	0.75
<i>Eunotia muscicola</i>	Eunmus	6.16	1.21	1.66	1.77	4.54	1.34
<i>Eunotia parasiolii</i>	Eunpar	7.76	1.56	2.91	1.97	3.27	0.56
<i>Eunotia pseudosudetica</i> cf.	Eunpse	6.51	1.68	3.58	4.14	6.50	0.54
<i>Eunotia sp. 4</i>	Eunsp4	2.31	1.33	8.05	1.49	10.00	1.03
<i>Eunotia sp. 7</i>	Eunsp7	5.93	0.59	1.62	0.53	4.66	1.12
<i>Eunotia subarcuatoides</i>	Eunsub	6.26	1.17	1.89	1.05	4.44	1.20
<i>Fragilaria crotonensis</i>	Fracro	3.58	0.75	3.94	1.20	6.84	0.77
<i>Fragilaria capucina var. rumpes</i>	Frarum	4.49	1.79	3.95	1.78	6.38	1.12
<i>Fragilaria capucina var. rumpes teratológica</i>	Frarumt	6.28	2.26	3.82	1.94	4.74	1.44
<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	Fravau	3.71	0.91	3.63	1.50	6.90	0.85
<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae teratológica</i>	Fravaut	2.70	1.25	6.14	0.31	6.59	2.52
<i>Frustulia cf. crassinervia</i>	Frucra	5.93	1.73	3.34	3.55	6.03	1.04
<i>Frustulia aff. saxonica</i>	Frusax	5.65	1.33	1.85	1.04	5.38	1.51
<i>Frustulia sp. 3</i>	Frusp3	5.99	0.60	1.57	0.54	4.55	1.14
<i>Frustulia vulgaris</i>	Fruvul	3.49	1.10	3.93	1.51	6.59	0.81
<i>Gomphonema acuminatum</i>	Gomacu	3.45	1.19	5.49	1.52	6.85	0.99
<i>Gomphonema aequirostrum</i> cf.	Gomaeq	6.40	1.33	1.20	1.49	3.76	1.03
<i>Gomphonema affine</i>	Gomaff	4.10	1.33	2.77	1.49	7.78	1.03
<i>Gomphonema aff. gracile</i>	Gomgra	4.40	1.80	2.33	0.57	6.04	1.02
<i>Gomphonema lagenula</i>	Gomlag	7.36	2.69	5.47	3.73	5.75	0.98

Especie	Especie_I d	Eje		Eje Hierro		Eje Nutrientes	
		Óptim o	Toleranc ia	Óptim o	Toleranc ia	Óptim o	Toleranc ia
<i>Gomphonema lateripunctatum</i> cf.	Gomlat	3.36	0.76	3.03	0.49	6.76	0.61
<i>Gomphonema paludosum</i> 2 cf.	Gompal2	3.03	0.22	5.12	0.74	6.43	0.10
<i>Gomphonema parvulum</i>	Gompar	5.25	1.32	2.49	1.93	5.69	0.96
<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	Gompse	2.82	1.33	5.42	1.49	6.13	1.03
<i>Gomphonema pumilum sentu lato</i>	Gompum	3.35	1.42	4.66	2.15	7.45	1.06
<i>Gomphonema sp. 4</i>	Gomsp4	3.06	1.33	3.73	1.49	6.17	1.03
<i>Gomphonema subclavatum</i> cf.	Gomsub	3.52	0.93	4.12	1.53	6.64	0.67
<i>Gomphonema truncatum</i>	Gomtru	2.54	0.75	5.56	0.48	5.89	0.90
<i>Hantzschia amphioxys</i>	Hanamp	8.56	0.06	6.34	3.25	5.18	3.06
<i>Hannaea arcus</i>	Hanarc	3.63	0.69	3.74	1.32	6.96	0.63
<i>Hannaea arcus teratológica</i>	Hanarct	2.33	1.33	6.05	1.49	7.79	1.03
<i>Humidophila contenta</i>	Humcon	5.34	2.54	4.86	2.90	6.26	1.13
<i>Kobayasiella CF</i>	Kobcf	7.87	1.33	7.22	1.49	7.23	1.03
<i>Kobayasiella sp. 1</i>	Kobsp1	4.75	0.33	6.05	0.40	6.96	0.17
<i>Luticola aff. goeppertiana</i>	Lutgoe	4.26	1.33	6.05	1.49	6.98	1.03
<i>Melosira varians</i>	Melvar	1.24	0.93	6.62	0.43	3.52	1.67
<i>Meridion circulare var. constrictum</i>	Mercir	8.45	2.07	5.00	2.88	3.86	2.18
<i>Navicula angusta</i>	Navang	4.51	2.01	3.46	2.79	5.40	1.42
<i>Navicula aff. antonii</i>	Navant	1.40	1.49	6.64	0.65	3.76	1.63
<i>Navicula capitatoradiata</i>	Navcap	8.52	1.33	8.58	1.49	7.29	1.03
<i>Navicula cryptocephala</i>	Navcryc	6.42	2.31	6.71	1.64	7.05	0.61
<i>Navicula heimansioides</i> cf.	Navhei	4.09	2.08	4.29	1.59	6.08	1.35
<i>Navicula longicephala</i>	Navlon	3.26	1.33	4.39	1.49	6.87	1.03
<i>Navicula aff. notha</i>	Navnot	5.12	2.74	5.91	2.15	6.97	1.20
<i>Navicula radiosa</i>	Navrad	3.81	0.19	2.76	0.06	7.59	0.24
<i>Navicula rhyncocephala</i>	Navrhy	7.91	4.03	8.24	2.23	7.17	0.82
<i>Navicula rostellata</i>	Navros	1.43	1.66	6.23	2.30	4.57	1.88
<i>Navicula tripunctata</i>	Navtrp	3.17	0.63	4.31	1.09	7.17	0.41
<i>Nitzschia dissipata</i>	Nitdis	2.41	0.45	6.64	0.90	8.42	1.15
<i>Nitzschia linearis</i>	Nitlin	3.38	0.95	7.02	0.96	7.82	1.20
<i>Nitzschia palea</i>	Nitpal	8.24	2.49	7.98	1.48	6.33	0.91
<i>Nitzschia recta</i>	Nitrec	2.96	1.14	6.06	0.99	7.45	0.96
<i>Nitzschia sp. 4</i>	Nitsp4	2.39	0.64	6.44	0.93	8.67	1.06
<i>Nitzschia aff. umbonata</i>	Nitumb	2.28	0.16	6.34	1.02	8.25	1.20
<i>Nupela neglecta</i>	Nupneg	6.26	3.28	6.99	1.86	6.52	0.76
<i>Pinnularia microstauron</i> cf.	Pinmic	2.38	3.98	8.03	2.06	9.95	2.67

Especie	Especie_I d	Eje		Eje Hierro		Eje Nutrientes	
		Óptim o	Toleranc ia	Óptim o	Toleranc ia	Óptim o	Toleranc ia
<i>Pinnularia sp. 1</i>	Pinsp1	8.54	1.44	7.73	1.09	6.84	0.84
<i>Pinnularia sp. 8</i>	Pinsp8	9.06	0.99	8.04	1.88	5.82	1.40
<i>Pinnularia subcapitata</i> aff.	Pinsub	8.53	2.00	6.22	4.03	5.38	1.20
<i>Planothidium lanceolatum</i>	Plalan	2.72	0.88	6.90	1.15	6.86	0.91
<i>Psammothidium subatomoides</i>	Psasub	8.63	1.90	8.31	1.16	6.39	0.85
<i>Reimeria sinuata</i>	Reisin	1.90	0.79	6.90	1.25	5.46	1.33
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	Rhoabb	2.14	0.79	7.42	1.22	6.59	0.69
<i>Sellaphora difficillima</i>	Seldif	5.57	2.37	3.71	2.71	6.09	0.72
<i>Sellaphora nigri</i>	Selnig	4.46	1.81	6.88	1.09	6.72	0.80
<i>Sellaphora saugerresii</i>	Selsau	5.42	0.85	0.94	2.00	6.24	0.65
<i>Stauroneis sp. 1</i>	Stasp1	4.58	1.07	2.03	1.92	6.07	0.65
<i>Stenopterobia delicatissima</i> aff.	Stedel	6.56	1.94	4.47	3.30	5.58	1.45
<i>Stenopterobia pseudodelicatissima</i> aff.	Stepse	8.32	1.92	8.40	1.41	7.27	0.25
<i>Surirella angusta</i>	Surang	4.70	4.04	6.83	0.66	5.35	2.38
<i>Tabellaria flocculosa</i>	Tabfloc	4.01	0.84	2.85	0.52	7.37	0.88
<i>Ulnaria acus</i>	Ulnacu	1.46	0.14	6.48	0.34	4.82	0.55
<i>Ulnaria ulna</i>	Ulnuln	2.78	1.33	6.12	1.49	6.77	1.03

7.1.2 Óptimos y Tolerancias de las especies del Sistema Sur

En el sistema Sur 3 gradientes ambientales significativos fueron retenidos en el ACC, relacionados con los mismos factores ambientales anteriormente mencionados (Tabla 17). Dentro del eje de nutrientes (CCA 3), los SO₄ fue la variable con mayor correlación, sin embargo, se tuvo en cuenta los NO₃ dada la importancia del nitrógeno en la eutroficación de los sistemas. En la Tabla 18 se registran óptimos y tolerancias establecidos del sistema sur.

Tabla 17. Gradientes ambientales definidos en el modelo ACC para el Sistema Sur. Se resaltan las variables más importantes en cada eje

	CCA1	CCA2	CCA3	CCA4
Cond	-0.79	0.14	0.19	0.25
Fe	-0.35	-0.80	0.10	0.22
TURB	-0.68	-0.24	-0.16	0.27
Alca	-0.61	0.18	0.59	-0.46
SO₄	0.06	0.16	0.65	0.33
CL	-0.66	-0.38	-0.31	0.04
NO₃	-0.10	-0.08	-0.54	0.10

Tabla 18. Óptimos y Tolerancias de las especies calculados para cada uno de los gradientes ambientales establecidos en el modelo ACC (Tabla 8) del sistema Sur

Especie	Especie Id	Eje Mineralización		Eje Hierro		Eje Nutrientes	
		Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia
Achnanthidium minutissimum	Achmin	5.47	1.27	5.35	1.24	3.93	0.83
Adlafia sp. 2	Adlsp2	8.25	0.22	5.67	0.17	1.90	0.27
Caloneis bacillum	Calbac	9.06	0.85	6.03	0.34	3.83	1.46
Cocconeis placentula	Cocpla	6.49	1.33	5.89	0.67	3.07	1.13
Craticula aff. molestiformis	Cramol	5.67	1.63	6.48	0.62	2.98	0.64
Cymbopleura naviculiformis	Cymnav	7.07	2.56	6.80	0.30	2.88	1.14
Cymbella cf. tumida	Cymtum	4.52	1.24	6.50	0.94	4.63	1.29
Cymbella cf. turgidula	Cymtur	7.61	1.24	5.73	0.94	3.66	1.29
Diatoma mesodon	Diames	8.91	0.77	6.57	0.44	6.05	1.39
Discostella stelligera	Distel	5.71	0.54	4.34	1.03	4.38	0.61
Encyonema minutum	Encmin	5.63	2.16	6.82	1.26	5.04	1.34
Encyonema neogracile	Encneo	7.87	0.32	6.72	0.63	4.81	2.03
Encyonema silesiacum	Encsil	5.62	1.87	6.40	1.29	4.00	1.21
Encyonema cf. subminutum	Encsub	4.81	0.74	6.65	2.02	5.41	1.19
Epithemia adnata	Epiadh	7.69	0.19	7.13	0.51	6.01	0.18
Eunotia cf. acutinasuta	Eunacu	7.93	0.03	6.61	0.19	3.56	3.23
Eunotia aff. donatoi	Eundon	5.91	1.26	4.71	1.04	3.32	1.38
Eunotia cf. exigua	Eunexi	7.99	1.17	5.92	0.80	3.73	1.49
Eunotia aff. genuflexa	Eungen	5.65	1.24	3.26	0.94	4.96	1.29
Eunotia incisa	Euninc	7.44	0.41	5.96	1.20	4.67	1.42
Eunotia minor	Eunmin	7.47	1.45	5.81	0.92	4.69	0.94
Eunotia muscicola	Eunmus	8.71	1.10	6.21	0.70	3.81	1.61
Eunotia nymanniana	Eunnym	7.52	0.68	5.60	0.82	4.35	0.71
Eunotia parasiolii	Eunpar	5.56	1.66	5.75	1.53	3.80	1.13
Enunotia cf. pseudosudetica	Eunpse	7.08	1.79	5.82	0.83	2.95	1.17
Eunotia sp. 4	Eunsp4	8.68	0.75	6.60	0.59	3.55	1.24
Eunotia subarcuatoidea	Eunsub	8.12	0.68	5.99	0.44	4.63	2.14
Fragilaria crotonensis	Fracro	5.64	0.56	3.48	1.81	4.48	0.58
Fragilaria capucina var. rumpes	Frarum	7.88	1.23	5.89	1.01	4.45	1.58
Fragilaria capucina var. rumpes teratológica	Frarumt	7.56	1.08	5.43	0.77	2.43	1.15
Fragilaria capucina var. vaucheriae	Fravau	6.51	1.26	5.29	1.27	5.12	1.14
Fragilaria capucina var. vaucheriae teratológica	Fravaut	7.81	0.83	5.74	0.48	4.94	3.46
Frustulia cf. crassinervia	Frucra	8.15	0.81	6.14	0.41	4.38	0.95
Frustulia aff. pararhomboides	Frupar	7.81	1.24	7.34	0.94	7.09	1.29
Frustulia aff. saxonica	Frusax	7.52	1.49	5.95	0.90	4.23	1.63
Frustulia vulgaris	Fruvul	6.78	2.29	6.63	1.43	4.31	1.37
Gomphonema acuminatum	Gomacu	7.24	1.37	6.69	1.07	5.13	1.34
Gomphonema cf. aequirostrum	Gomaeq	9.06	1.16	6.21	0.57	3.80	1.71
Gomphonema affine	Gomaff	6.13	1.19	2.65	2.57	4.65	1.11
Gomphonema aff. affine var. rhombicum	Gomaffr	7.96	1.24	7.85	0.94	5.63	1.29
Gomphonema aff. gracile	Gomgra	6.71	1.75	2.97	3.10	4.69	2.03
Gomphonema lagenula	Gomlag	7.60	1.31	5.51	1.34	4.00	1.67
Gomphonema cf. paludosum	Gompal	8.01	0.25	6.24	0.43	1.58	0.71
Gomphonema cf. paludosum2	Gompal2	2.22	3.65	9.66	2.58	2.79	0.60
Gomphonema parvulum	Gompar	7.56	1.23	5.51	1.31	3.41	1.59
Gomphonema pseudoaugur	Gompse	5.90	0.62	3.13	1.62	5.61	0.78
Gomphonema pumilum sentu lato	Gompum	7.53	0.93	6.27	0.70	2.78	0.94
Gomphonema sp. 4	Gomsp4	2.89	1.32	8.50	1.25	4.22	0.56

Especie	Especie Id	Eje Mineralización		Eje Hierro		Eje Nutrientes	
		Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia	Óptimo	Tolerancia
Gomphonema cf. subclavatum	Gomsub	5.54	2.48	6.27	2.23	4.22	1.17
Hantzschia amphioxys	Hanamp	4.00	1.24	8.04	0.94	4.60	1.29
Hannaea arcus	Hanarc	6.39	1.93	7.09	1.33	4.82	1.44
Hannaea arcus teratológica	Hanarct	8.72	2.39	5.81	1.00	9.91	4.05
Humidophila contenta	Humcon	5.79	1.13	5.18	0.95	4.25	1.01
Kobayasiella CF	Kobcf	8.62	0.41	5.90	0.22	2.12	0.63
Luticola cf. acidoclinata	Lutacl	7.25	2.10	6.76	0.47	4.53	2.15
Luticola aff. goeppertiana	Lutgoe	7.26	1.68	6.32	0.85	4.76	2.14
Melosira varians	Melvar	6.08	1.56	6.12	1.04	5.32	1.13
Meridion circulare var. constrictum	Mercir	8.44	1.71	6.43	0.67	4.92	1.38
Navicula angusta	Navang	7.77	0.27	6.42	0.32	5.44	0.87
Navicula capitatoradiata	Navcap	6.28	2.78	6.83	1.94	2.72	1.38
Navicula cryptocephala	Navcryc	7.13	1.36	5.84	0.91	3.18	1.33
Navicula gregaria	Navgre	4.84	0.40	6.09	0.64	4.32	0.41
Navicula cf. heimansioides	Navhei	7.35	1.29	5.31	1.39	3.40	0.96
Navicula longicephala	Navlon	5.78	1.30	6.41	0.50	3.61	1.16
Navicula aff. notha	Navnot	6.21	1.19	4.96	1.45	4.09	1.11
Navicula rhyncocephala	Navrhy	5.81	1.42	6.49	0.79	3.54	0.92
Navicula tripunctata	Navtrp	5.70	1.77	6.21	0.60	4.38	1.02
Neidium sp. 2	Neisp2	8.84	0.71	6.22	0.34	2.91	1.51
Nitzschia acidoclinata	Nitaci	7.63	0.54	6.24	0.40	3.77	2.39
Nitzschia aff. capitellata	Nitcap	7.66	1.24	6.61	0.72	2.39	0.55
Nitzschia dissipata	Nitdis	6.51	2.21	7.25	1.44	3.24	1.51
Nitzschia gracilis	Nitgra	6.90	1.84	6.50	0.59	3.65	1.63
Nitzschia palea	Nitpal	8.12	1.11	6.03	0.69	3.45	1.63
Nitzschia recta	Nitrec	7.03	2.21	6.72	1.31	4.22	1.44
Pinnularia cf. microstauron var. brasiliensis	Pimmicb	8.04	1.61	6.20	0.76	2.14	0.73
Pinnularia borealis sensu lato	Pinbor	5.60	3.45	7.54	1.76	5.24	0.93
Pinnularia cf. microstauron	Pinmic	7.94	1.33	5.52	1.29	2.48	1.15
Pinnularia cf. obscura	Pinobs	8.01	0.82	5.89	0.48	3.47	1.91
Pinnularia pisculus var. angusta	Pinpis	9.66	0.13	6.32	0.11	4.63	1.55
Pinnularia aff. schoenfelderii	Pinsch	6.09	1.77	5.20	1.21	3.89	1.52
Pinnularia sp. 1	Pinsp1	9.15	0.86	6.48	0.44	6.00	1.18
Pinnularia sp. 13	Pinsp13	5.69	1.24	6.96	0.94	3.50	1.29
Pinnularia sp. 6	Pinsp6	6.97	1.31	6.78	0.78	4.26	1.94
Pinnularia aff. subcapitata	Pinsub	7.67	1.50	6.31	0.57	4.20	1.81
Planothidium lanceolatum	Plalan	7.30	2.09	6.38	1.12	6.48	3.21
Psammothidium subatomoides	Psasub	8.69	0.69	6.39	0.47	3.04	1.63
CF. Pseudostaurosira brevistriata	Psebre	7.78	0.42	5.87	0.22	2.46	1.33
CF. Pseudostaurosira sp. 1 aff. elliptica	Psesp1	9.67	0.55	6.31	0.25	5.38	0.99
Reimeria sinuata	Reisin	3.16	1.64	8.29	1.76	3.73	0.92
Rhoicosphenia abbreviata	Rhoabb	3.88	1.64	7.34	1.73	3.48	0.70
Sellaphora difficillima	Seldif	8.34	0.90	6.18	0.40	2.75	1.40
Sellaphora nigri	Selnig	7.00	1.75	5.78	0.93	3.10	0.95
Sellaphora saugerresii	Selsau	8.16	0.78	6.15	0.29	2.07	0.99
Stauroneis sp. 1	Stasp1	7.47	0.77	6.08	0.41	3.44	1.67
Staurosira sp. 1	Stausp1	8.25	0.26	5.94	0.41	1.66	0.33
Stenopterobia aff. delicatissima	Stedel	9.29	0.91	6.83	0.46	6.76	1.37
Stenopterobia aff. pseudodelicatissima	Stepse	8.41	0.76	6.01	0.09	2.72	0.12
Surirella angusta	Surang	5.36	1.26	6.28	0.87	3.26	0.71
Tabellaria flocculosa	Tabfloc	6.44	1.15	4.60	1.60	3.95	0.95
Ulnaria ulna	Ulnuln	5.75	0.35	2.79	1.66	4.84	0.61

7.1.3 Óptimos y tolerancias de las especies del sistema San Rafael-Tibitoc

Para la evaluación de los óptimos y tolerancias de las especies del sistema San Rafael-Tibitoc se incluyó el conjunto de datos de todos los sistemas evaluados, con el fin de ampliar el límite inferior del gradiente ambiental, dado que el número de muestras en el modelo correspondientes a la zona más limpia (Nacimiento Río Teusacá), no era representativa (5 muestras) y generó inconsistencias en la cuantificación de la calidad del agua.

De acuerdo con los resultados, todas las variables relacionadas con la mineralización y los nutrientes fueron retenidas en el primer eje del modelo. Las variables altamente correlacionadas con el gradiente ambiental fueron en su orden, Cloruros, Nitratos, Sodio y Sólidos suspendidos totales (**Tabla 19**). En la **Tabla 20** se presenta el listado de especies con sus respectivos óptimos y tolerancias para el primer eje del ACC.

Tabla 19. Gradiente ambiental definido en el modelo ACC establecido para el Sistema San Rafael Tibitoc teniendo en cuenta todos los sistemas evaluados. Se resaltan las variables con mayor correlación en el primer eje.

VARIABLES	CCA1	CCA2	CCA3
CL	0.900	0.001	0.260
Dur	0.109	0.882	0.371
NO3	0.842	0.011	-0.298
PRS	0.633	-0.035	0.517
Na	0.838	0.190	0.262
SO4	0.463	0.333	0.141
Fe	0.698	-0.023	0.106
SST	0.773	0.010	0.010
NKJ	0.690	-0.053	0.567
pH	-0.027	0.760	0.060
Cond	0.509	0.653	0.432

Tabla 20. Óptimos y Tolerancias de las especies calculados para cada uno de los gradientes ambientales establecidos en el modelo ACC () del sistema San Rafael-Tibitoc

Especie_Id	Especie	Optima	Tolerances
Achmin	<i>Achnanthydium minutissimum</i>	8.92	0.71
Adlsp2	<i>Adlafia sp. 2</i>	8.08	2.17
Brasp2	<i>Brachysira sp. 2</i>	9.76	0.31
Brasp3	<i>Brachysira sp. 3</i>	9.71	0.10
Calbac	<i>Caloneis bacillum</i>	8.71	0.27
Cocpla	<i>Cocconeis placentula</i>	8.07	0.70
Cramol	<i>Craticula aff. molestiformis</i>	4.70	1.26
Cycmen	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	5.12	0.64
Cymcym	<i>Cymbella cymbiformis</i>	9.57	0.23

Espece_Id	Espece	Optima	Tolerances
Cymnav	<i>Cymboppleura naviculiformis</i>	8.08	2.24
Cymtum	<i>Cymbella tumida</i>	7.42	2.62
Cymtur	<i>Cymbella cf. turgidula</i>	9.67	0.21
Diames	<i>Diatoma mesodon</i>	8.96	0.27
Distel	<i>Discostella stelligera</i>	8.16	1.29
Encmin	<i>Encyonema minutum</i>	8.71	0.82
Encneo	<i>Encyonema neogracile</i>	8.34	2.02
Encsil	<i>Encyonema silesiacum</i>	8.65	0.85
Encsp7	<i>Encyonema sp. 7</i>	9.45	0.15
Encsub	<i>Encyonema cf. subminutum</i>	8.76	0.33
Encvul	<i>Encyonema vulgare</i>	9.53	0.56
Epiadn	<i>Epithemia adnata</i>	9.43	0.20
Eunacu	<i>Eunotia cf. acutinasuta</i>	8.75	0.21
Eundon	<i>Eunotia aff. donatoi</i>	8.33	0.98
Eunexi	<i>Eunotia cf. exigua</i>	8.92	0.52
Eungen	<i>Eunotia aff. genuiflexa</i>	6.85	1.74
Euninc	<i>Eunotia incisa</i>	8.89	0.24
Eunmin	<i>Eunotia minor</i>	7.97	1.50
Eunmuc	<i>Eunotia mucophila</i>	9.77	0.19
Eunmus	<i>Eunotia muscicola</i>	9.06	0.44
Eunnym	<i>Eunotia nymanniana</i>	8.78	0.22
Eunpar	<i>Eunotia cf. parasiolii</i>	8.58	0.43
Eunpse	<i>Enunotia cf. pseudosudetica</i>	7.26	1.56
Eunsp10	<i>Eunotia sp. 10</i>	8.87	0.05
Eunsp4	<i>Eunotia sp. 4</i>	8.79	0.47
Eunsp7	<i>Eunotia sp. 7</i>	9.60	0.28
Eunsp9	<i>Eunotia sp. 9</i>	8.88	0.07
Eunsub	<i>Eunotia subarcuatoides</i>	8.90	0.13
Fracro	<i>Fragilaria crotonensis</i>	8.57	0.89
Frarum	<i>Fragilaria capucina var. rumpes</i>	8.94	0.56
Frarumt	<i>Fragilaria capucina var. rumpes Teratologica</i>	8.57	0.69
Fravau	<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	8.94	0.57
Fravaut	<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae Teratológica</i>	8.61	0.44
Frucra	<i>Frustulia cf. crassinervia</i>	8.09	1.21
Frupar	<i>Frustulia aff. pararhomboides</i>	8.63	0.81
Frusax	<i>Frustulia aff. saxonica</i>	7.80	1.41
Frusp3	<i>Frustulia sp. 3</i>	8.87	0.24
Fruvul	<i>Frustulia vulgaris</i>	7.28	1.89

Espece Id	Espece	Optima	Tolerances
Gomacu	<i>Gomphonema acuminatum</i>	8.49	1.37
Gomaeq	<i>Gomphonema cf. aequirostrum</i>	8.66	0.48
Gomaff	<i>Gomphonema affine</i>	8.14	0.88
Gomaffr	<i>Gomphonema aff. affine var. rhombicum</i>	6.27	1.36
Gomgra	<i>Gomphonema aff. gracile</i>	5.95	1.17
Gomlag	<i>Gomphonema lagenula</i>	8.30	0.87
Gomlat	<i>Gomphonema cf. lateripunctatum</i>	9.72	0.12
Gompal	<i>Gomphonema cf. paludosum</i>	8.22	0.21
Gompal2	<i>Gomphonema cf. paludosum2</i>	8.72	0.60
Gompar	<i>Gomphonema parvulum</i>	5.85	1.28
Gompse	<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	7.37	1.51
Gompum	<i>Gomphonema pumilum sentu lato</i>	6.97	1.43
Gomsp4	<i>Gomphonema sp. 4</i>	8.31	0.33
Gomsub	<i>Gomphonema cf. subclavatum</i>	8.29	1.08
Gomtru	<i>Gomphonema truncatum</i>	9.18	0.88
Gyracu	<i>Gyrosigma aff. acuminatum</i>	1.94	1.97
Hanamp	<i>Hantzschia amphioxys</i>	7.86	1.84
Hanarc	<i>Hannaea arcus</i>	9.27	0.47
Hanarct	<i>Hannaea arcus Teratológica</i>	8.70	0.26
Humcon	<i>Humidophila contenta</i>	7.82	1.44
Kobcf	<i>Kobayasiella CF</i>	8.66	0.24
Kobsp1	<i>Kobayasiella sp. 1</i>	9.19	0.08
Lutacl	<i>Luticola cf. acidoclinata</i>	8.51	0.62
Lutgoe	<i>Luticola aff. goeppertiana</i>	6.17	1.05
Melvar	<i>Melosira varians</i>	7.42	1.82
Mercir	<i>Meridion circulare var. constrictum</i>	8.78	0.42
Navang	<i>Navicula angusta</i>	9.03	0.45
Navant	<i>Navicula aff. antonii</i>	8.29	1.14
Navcap	<i>Navicula capitatoradiata</i>	8.36	0.38
Navcryc	<i>Navicula cryptocephala</i>	6.98	1.33
Navgre	<i>Navicula gregaria</i>	8.20	0.14
Navhei	<i>Navicula cf. heimansioides</i>	7.78	1.22
Navlon	<i>Navicula longicephala</i>	6.66	1.30
Navnot	<i>Navicula aff. notha</i>	7.67	1.61
Navrad	<i>Navicula radiosa</i>	9.49	0.10
Navrhy	<i>Navicula rhyncocephala</i>	7.07	1.23
Navros	<i>Navicula rostellata</i>	3.36	1.63
Navsch	<i>Navicula schroeteri</i>	5.35	1.48

Especie_Id	Especie	Optima	Tolerances
Navtri	<i>Navicula tripunctata</i>	8.16	1.35
Neisp2	<i>Neidium sp. 2</i>	8.33	0.24
Nitaci	<i>Nitzschia acidoclinata</i>	6.88	1.20
Nitcap	<i>Nitzschia aff. capitellata</i>	4.82	2.04
Nitcla	<i>Nitzschia aff. clausii</i>	6.60	1.65
Nitdis	<i>Nitzschia dissipata</i>	8.81	0.79
Nitgra	<i>Nitzschia gracilis</i>	7.42	1.25
Nitlin	<i>Nitzschia linearis</i>	8.52	1.30
Nitpal	<i>Nitzschia palea</i>	6.88	1.46
Nitrec	<i>Nitzschia recta</i>	9.19	0.50
Nitsp4	<i>Nitzschia sp.4</i>	9.37	0.22
Nitumb	<i>Nitzschia aff. umbonata</i>	6.39	2.84
Nupneg	<i>Nupela neglecta</i>	8.46	1.12
Nupsp1	<i>Nupela sp. 1</i>	8.84	0.09
Pimmicb	<i>Pinnularia cf. microstauron var. brasiliensis</i>	7.98	1.48
Pinbor	<i>Pinnularia borealis sensu lato</i>	8.51	0.51
Pinmic	<i>Pinnularia cf. microstauron</i>	8.75	1.17
Pinobs	<i>Pinnularia cf. obscura</i>	8.56	0.45
Pinpis	<i>Pinnularia pisculus var. angusta</i>	8.95	0.14
Pinsch	<i>Pinnularia aff. schoenfelderi</i>	8.44	0.30
Pinsp1	<i>Pinnularia sp. 1</i>	8.87	0.28
Pinsp13	<i>Pinnularia sp. 13</i>	6.05	0.68
Pinsp16	<i>Pinnularia sp.16</i>	4.50	0.70
Pinsp17	<i>Pinnularia cf. microstauron_Pinnularia sp. 17</i>	5.25	0.44
Pinsp6	<i>Pinnularia sp. 6 aff. notabilis</i>	8.48	0.64
Pinsp8	<i>Pinnularia sp. 8</i>	8.87	0.31
Pinsub	<i>Pinnularia aff. subcapitata</i>	8.38	1.03
Plalan	<i>Planothidium lanceolatum</i>	8.95	0.69
Psasub	<i>Psammothidium subatomoides</i>	8.67	0.49
Psebre	<i>CF. Pseudostaurosira brevistriata</i>	8.40	0.29
Pspes1	<i>CF. Pseudostaurosira sp. 1 aff. elliptica</i>	8.95	0.18
Reisin	<i>Reimeria sinuata</i>	9.12	0.58
Rhoabb	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	9.07	0.62
Seldif	<i>Sellaphora difficillima</i>	7.37	1.29
Selnig	<i>Sellaphora nigri</i>	8.58	1.21
Selsau	<i>Sellaphora saugerresii</i>	6.61	1.20
Stasp1	<i>Stauroneis sp. 1</i>	8.60	0.52
Stausp1	<i>Staurosira sp. 1</i>	8.28	0.16

Especie_Id	Especie	Optima	Tolerances
Stedel	<i>Stenopterobia aff. delicatissima</i>	9.15	0.32
Stepse	<i>Stenopterobia aff. pseudodelicatissima</i>	8.57	0.27
Surang	<i>Surirella angusta</i>	7.33	1.58
Tabfloc	<i>Tabellaria flocculosa</i>	9.49	0.55
Ulnacu	<i>Ulnaria acus</i>	8.08	1.48
Ulnuln	<i>Ulnaria ulna</i>	8.35	0.38

7.2 ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA

Para cada uno de los sistemas se elaboraron varios índices de calidad según el número de gradientes ambientales significativos en el modelo. A continuación se describen los rangos de variación en cada uno de ellos, así como los límites de calidad establecidos de acuerdo con lo sugerido por Segnini (2003), estableciendo como límite alto de calidad el percentil 75 y el menor valor calidad, el percentil 12.5 (**Tabla 21**).

Tabla 21. Límites de calidad establecidos para cada uno de los ICE según Segnini (2003) y colores asignados de acuerdo con Union European (2005).

Límites Percentiles	Calidad
$\geq P75$	Muy buena
$P25 > ICE < P75$	Buena
$P12.5 > ICE < P25$	Regular
$ICE < P12.5$	Mala

7.2.1 Sistema Norte

Los valores de calidad de los tres índices establecidos para el sistema Norte, junto con **sus límites de calidad** son presentados en la **Tabla 22** y **Figura 82**.

Para el ICE-Mineralización los valores por encima de 4.46 presentan calidad *Muy buena*, valores entre 3.82-4.46 presentan calidad *Buena*, valores entre 3.29-3.81, poseen calidad *Regular*, mientras que los valores inferiores a 3.29 representan *Mala calidad*. En general, en las corrientes del Sistema Norte el índice fluctúa entre 2.7-7.23, observándose atípicos en rangos muy altos de calidad en las quebradas Qhor-I, Qpgor, Qcho y datos atípicos en rangos muy bajos de calidad en la quebrada Cortadera -Qcor (**Figura 82**).

Los niveles de calidad para el ICE-Hierro muestra que los valores superiores a 6.1 presentan *Muy buena calidad*, el rango comprendido entre 4.8-6.1 califica Buena calidad, valores entre 4.8-4.6 puntúan calidad *Regular* y valores inferiores a 4.6 poseen Mala calidad. El rango de este índice fluctuó entre 3.82-7.58 y dichos valores fueron registrados en Quebrada Cortadera (20183829) y Quebrada La Horqueta I (20182743), respectivamente.

En el ICE-Nutrientes fluctuó entre 4.56-8.01 y fueron registrados en las quebradas Cortadera (20183829) y El Mangón (20153296), respectivamente. Los niveles de calidad *Muy Buena* se obtienen con valores superiores a 6.75, valores entre 6.27-6.75 indican *Buena Calidad*, el rango comprendido entre 5.98-6.27 puntúa *Calidad Regular* y valores inferiores a 5.98 indican *Mala Calidad*.

Para índice de nutrientes se observaron valores atípicos por debajo del rango de mala calidad en las quebradas Cortadera- Qcor, La Horqueta I-Qhor-I y Piedras Gordas- Qpgor. Asimismo, en el extremo opuesto del gradiente de nutrientes, se observa que la Quebrada El Mangón (20153296 y 20192875) constituye el sitio más oligotrófico del Sistema Norte (**Figura 82**).

En general, los índices establecidos mostraron una alta correlación con los samples scores, lo cual indica un ranqueo óptimo de cada uno de los gradientes. Tanto en el índice de mineralización como el índice de nutrientes, el aumento de la calidad del agua está asociada a mayores valores de las variables asociadas al índice. Por su parte, en el caso del índice asociado con el Hierro, la relación es inversa, obteniéndose valores altos de calidad ante bajos valores de Hierro en los cuerpos de agua (**Figura 83**).

En relación con las variables ambientales se observa una correlación inversa entre el ICE-Min con la dureza (Dur), Alcalinidad (Alca) y Sólidos Totales (ST). En el caso del ICE-Fe la correlación con los valores de Hierro en cada sistema es baja ($r=-0.26$, $p<0.05$), mientras que en relación con el índice de nutrientes se observa una relación media con el PT ($r=-0.33$, $p<0.05$). Cuando se correlacionan los valores de cada uno de los índices con el índice ICA, dicha relación es baja (**Figura 84**), lo cual podría estar relacionado con el hecho de que índice ICA incluye variables no relacionadas con la ecología de las diatomeas, como por ejemplo la concentración de Coliformes en el agua.

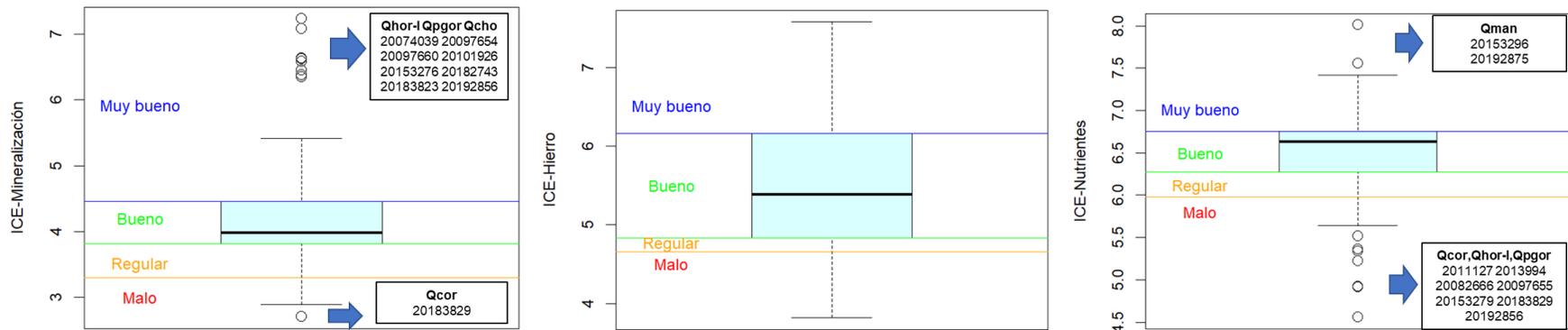


Figura 82. Variación de los Índices de Calidad ecológica establecidos para cada gradiente ambiental del Sistema Norte.

Tabla 22. Rangos de calidad para cada uno de los Índices del Sistema Norte.

	ICE Mineralización	ICE Hierro	ICE Nutrientes
Muy bueno	> 4.46	> 6.16	> 6.75
Bueno	3.82-4.46	4.83 - 6.16	6.27 - 6.75
Regular	3.3-3.82	5.88 - 4.83	5.98-6.27
Malo	< 3.3	< 4.66	<5.98

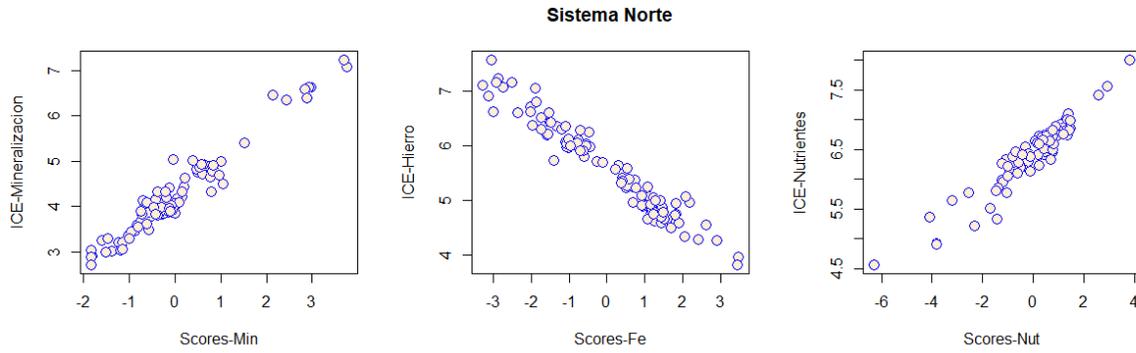


Figura 83. Relación del Índice con los scores ambientales del Sistema Norte

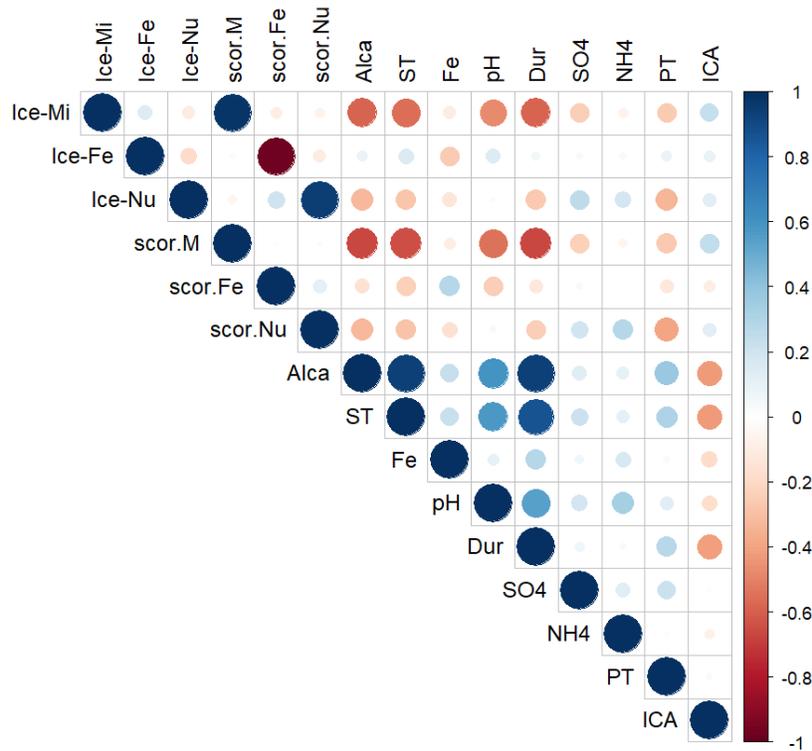


Figura 84. Correlación de los índices con las variables ambientales y el índice ICA para el Sistema Norte. ICE-Mi: Índice de Mineralización, ICE-Fe: Índice Hierro, ICE-Nu: Índice de Nutrientes, scor.M: scores Mineralización, scor.Fe: scores Hierro, scor.Nu: scores Nutrientes.

7.2.2 Sistema Sur-El Delirio

En la **Tabla 23** se presentan los límites de calidad establecidos para cada uno de los índices y en la **Figura 85** el rango de variación de estos y la identificación de los datos atípicos.

En el Índice de Mineralización valores superiores a 7.2 indican *Muy buena* calidad, el rango comprendido 6.28-7.2 indica *Buena* calidad, valores entre 5.6-6.2 puntúan calidad *Regular* y valores inferiores a 5.67 indican *Mala calidad*. En general, el ICE-Min establecido para los ríos del sistema Sur fluctúa entre 4.1-7.9, registrados en el Río Mugroso-Rmug y en la Quebrada La Osa (20181387). Todos los valores atípicos que se ubican en el rango de Mala calidad pertenecen al Río Mugroso (**Figura 85**).

Los valores del Índice de calidad relacionado con el Hierro fluctuaron entre 4.3-7.9, registrados en las estaciones Río Mugroso (20211950) y Descarga de Fondo-Regadera (20212068), respectivamente. Valores superiores a 6.07 corresponden a *Buena calidad*, el rango comprendido entre 5.75-6.07 indican *Buena calidad*, valores entre 5.5-5.74 puntúan *Calidad Regular* y valores inferiores a 5.5 indican Mala Calidad (**Tabla 23**). Un alto número de estaciones particularmente del Río Mugroso-Rmug y Río Chisacá-Regadera-RchiR presentaron muy altos valores de calidad relacionados con este índice, mientras que varias muestras de la Descarga de Fondo del embalse Regadera-DFReg presentaron altos valores de este ion y por ende su baja calidad (**Figura 85**).

En relación con el Índice de Nutrientes, valores superiores a 4.39 indican *Muy Buena Calidad*, valores entre 3.8-4.39 indican *Buena Calidad*, entre 3.6-3.8 puntúan *Calidad Regular* y valores del índice inferiores a 3.61, indican *Mala Calidad*. Se destaca el punto Intersección Upatá-Palo Blanco (2020174) por presentar el más alto valor de calidad relacionado con la trofía, particularmente relacionado con el contenido de NO₃.

Todos los índices presentaron una alta correlación con los samples scores (**Figura 86**). El ICE-Min presentó una relación inversa con la Conductividad ($r=-0.59$, $p<0.05$) así como con la Alcalinidad ($r=-0.41$, $p<0.05$), Turbidez ($r=-0.42$, $p<0.5$) y una relación directa con el índice ICA ($r=0.38$, $p<0.05$). El ICE-Fe muestra una correlación inversa con el contenido de Fe ($r=-0.42$, $p<0.05$) y el ICA ($r=0.30$), mientras que el índice de nutrientes la correlación con la concentración de NO₃ es débil ($r=-0.29$, $p<0.05$) (**Figura 87**).

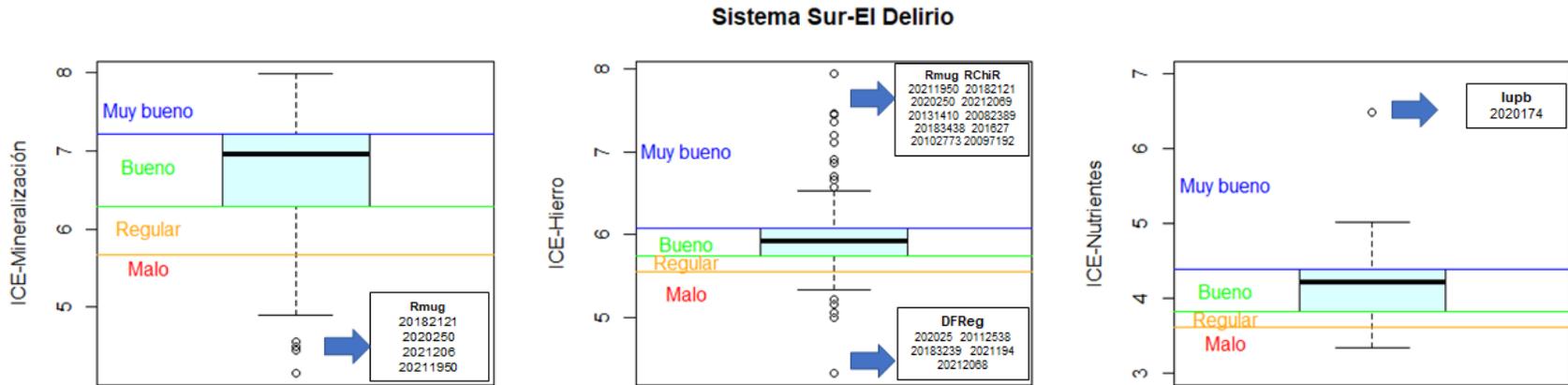


Figura 85. Variación del Índice de Calidad ecológica para cada gradiente ambiental del Sistema Sur-El Delirio

Tabla 23. Rangos de calidad para cada uno de los Índices del Sistema Sur

	ICE Mineralización	ICE Fe	ICE Nutrientes
Muy bueno	> 7.21	> 6.07	> 4.39
Bueno	6.28-7.21	5.75-6.07	3.81-4.39
Regular	5.67-6.28	5.55-5.75	3.61-3.81
Malo	<5.67	< 5.55	< 3.61

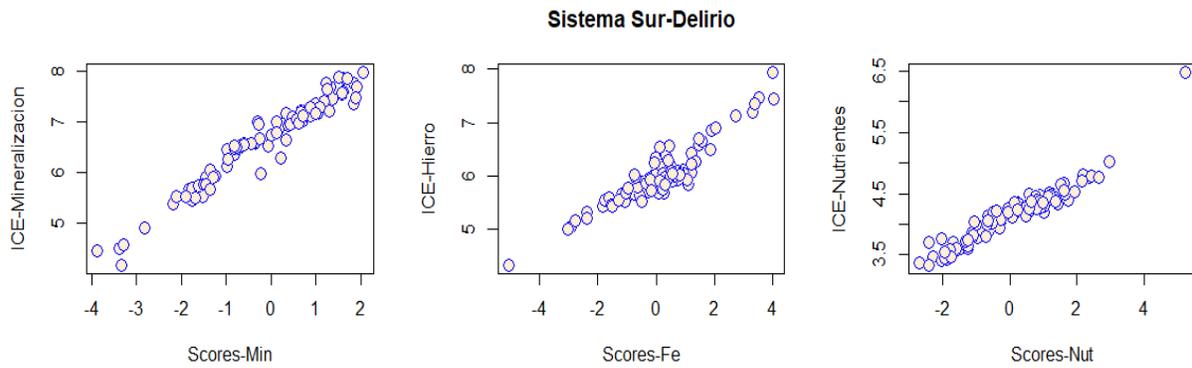


Figura 86. Relación del Índice con los scores ambientales del Sistema Norte

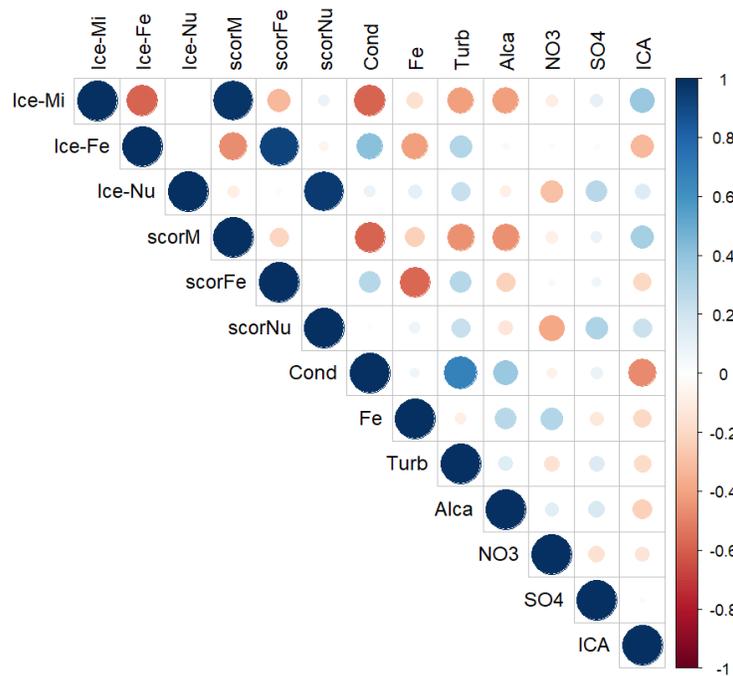


Figura 87. Correlación de los índices con las variables ambientales y el índice ICA para el Sistema Norte. ICE-Min: Índice de Mineralización, ICE-Fe: Índice Hierro, ICE-Nu: Índice de Nutrientes, scorM: scores Mineralización, scorFe: scores Hierro, scorNu: scores Nutrientes.

7.2.3 Sistema San Rafael-Tibitoc

Para el sistema San Rafael-Tibitoc, se desarrolló un índice integrado que resume en el primer eje un único gradiente ambiental que incluye tanto variables relacionadas con los nutrientes (NO3, PRS, SO4) como con la mineralización (Dur, pH, Cond, CL) inones como el Hierro, el Sodio y los Sólidos (SST). Dichas variables fueron retenidas en el análisis de todos los sistemas evaluados.

Los niveles de calidad de cada uno de los índices son presentados en la **Tabla 24**. En el Índice valores **superiores a 8.74** indican **Muy Buena Calidad**, valores del índice dentro de rango **7.92-8.74** indican **Buena Calidad**, valores entre **7.38-7.92** indican **Calidad Regular**

y valores **inferiores a 7.38** indican **Mala Calidad**. En este índice se destacan las muestras de Puente Adobes del Río Teusacá por presentar los más bajos valores de calidad, seguido de las estaciones Puente Violeta y Puente Sopó, así como las estaciones Antes del Sisga y Antes del Tominé en el Río Bogotá (**Figura 88**).

La relación del índice con los samples scores y las variables ambientales es presentada en la **Figura 89 y Figura 90**. El índice presenta una correlación inversa con todas las variables, excepto con el pH. La mayor correlación del ICE se observa con los NO3 ($r = -0.73, p < 0.01$), seguida por los SST ($r = -0.59, p < 0.01$), el Fe ($r = -0.58, p < 0.01$), SO4 ($r = -0.53$) y CL ($r = -0.51, p < 0.01$). Se destaca la alta correlación entre el índice y el ICA ($r = 0.6, p < 0.01$), la relación directa entre ambos índices demuestra la consistencia del índice desarrollado para medir la contaminación en las corrientes del sistema San Rafael-Tibitoc.

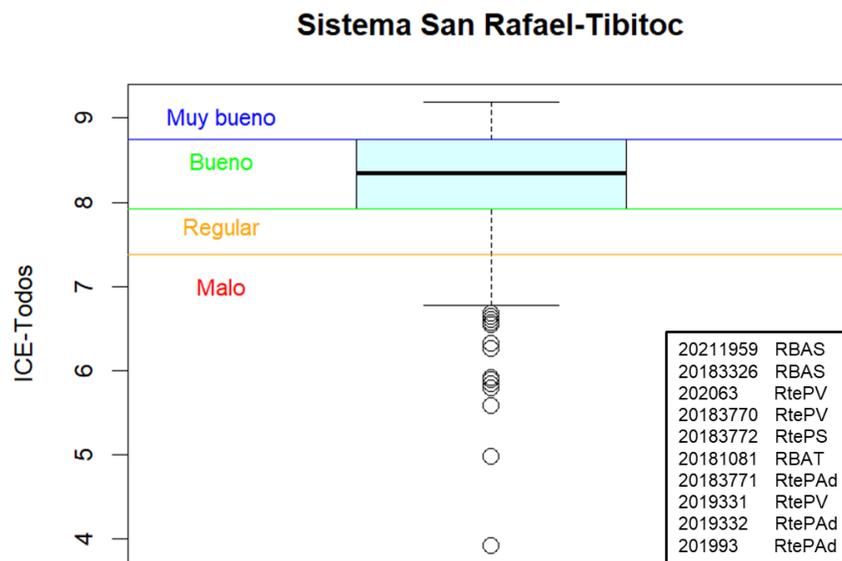


Figura 88. Variación del Índice de Calidad Ecológica-ICE para el Sistema San Rafael -Tibitoc tomando en cuenta el gradiente ambiental de todos los sistemas evaluados.

Tabla 24. Rangos de calidad del Índice de Calidad Ecológica-ICE para el Sistema San Rafael - Tibitoc

	ICE
Muy bueno	> 8.74
Bueno	7.92-8.74
Regular	7.38 - < 7.92
Malo	< 7.38

San Rafael-Tibitoc

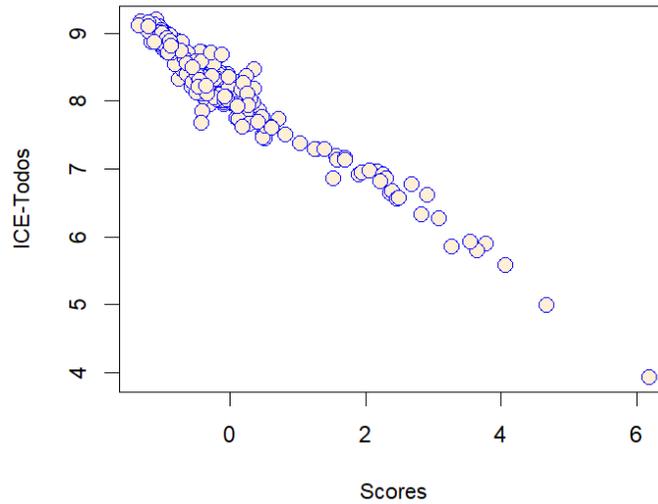


Figura 89. Relación del Índice con los scores ambientales para el Sistema San Rafael-Tibitoc, teniendo en cuenta el gradiente ambiental de todos los sistemas evaluados (ICE-Todos)

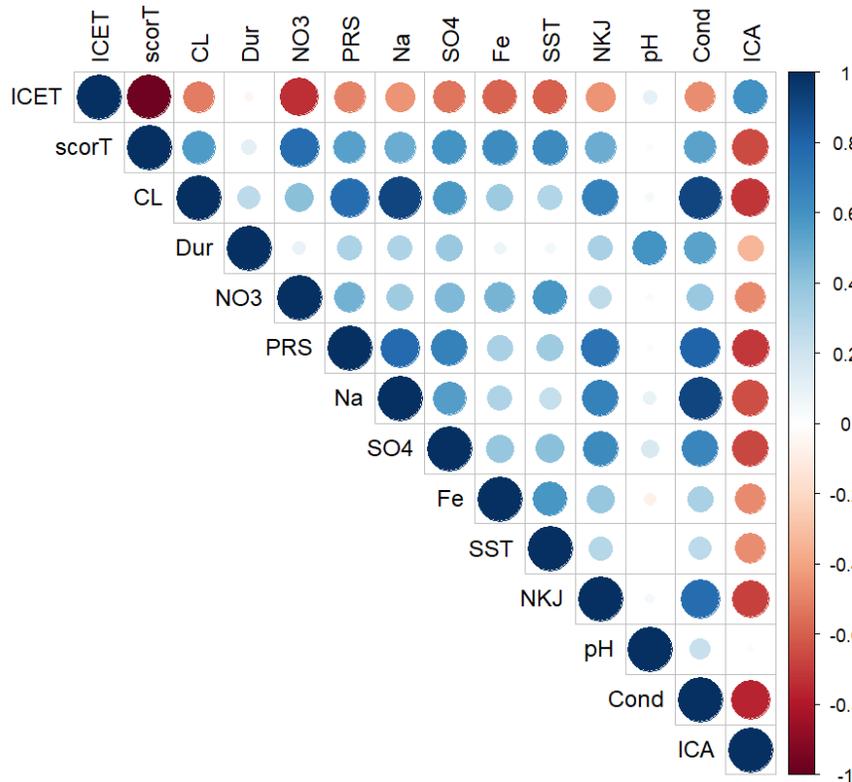


Figura 90. Correlación del ICE con las variables ambientales y el índice ICA para el Sistema San Rafael-Tibitoc. ScoT: scores del primer eje ambiental teniendo en cuenta Todos los sistemas evaluados.

7.2.4 Validación del Índice de Calidad Ecológica

Para la validación de los índices se desarrollaron funciones de transferencia para las variables seleccionadas del CCA utilizando los promedios ponderados (óptimo ecológico) y un modelo de mínimos cuadrados parciales (WA-PLS). También se usó bootstrapping como método de validación cruzada (1000 permutaciones). El WA-PLS se llevó a cabo para valorar la capacidad de predecir los valores de los scores del CCA usando los óptimos de las especies para los ejes (promedio ponderado del score). La selección del número de componentes se realizó siguiendo las recomendaciones de Juggins & Birks (2012), analizando el nivel de predicción, el error y el cambio en estos dos. Dichos análisis fueron realizados con el paquete rioja (Juggins & Juggins, 2020) del software R.

En el **Anexo 16** se encuentra el listado de las especies con sus respectivas abundancias de los conteos utilizados para la validación del modelo.

7.2.4.1 Validación Índices Sistema Norte

De acuerdo con los resultados de validación, el 90% de las abundancias de las especies están muy bien representadas en el índice de Mineralización, para el ICE-Fe el 88% de las abundancias de las especies reconstruye de manera significativa los scores ambientales y en el caso del ICE-Nutrientes, dicho porcentaje es del 75% (**Figura 91**). Los resultados muestran que los índices representan muy bien la calidad del sistema.

Aunque el coeficiente de regresión muestra una alta representación de las especies, los residuales del modelo revelan un ruido importante por falta de varianza constante, por lo que se sugiere robustecer el modelo con más muestreos, en particular en el extremo inferior del gradiente ambiental (zona El Delirio).

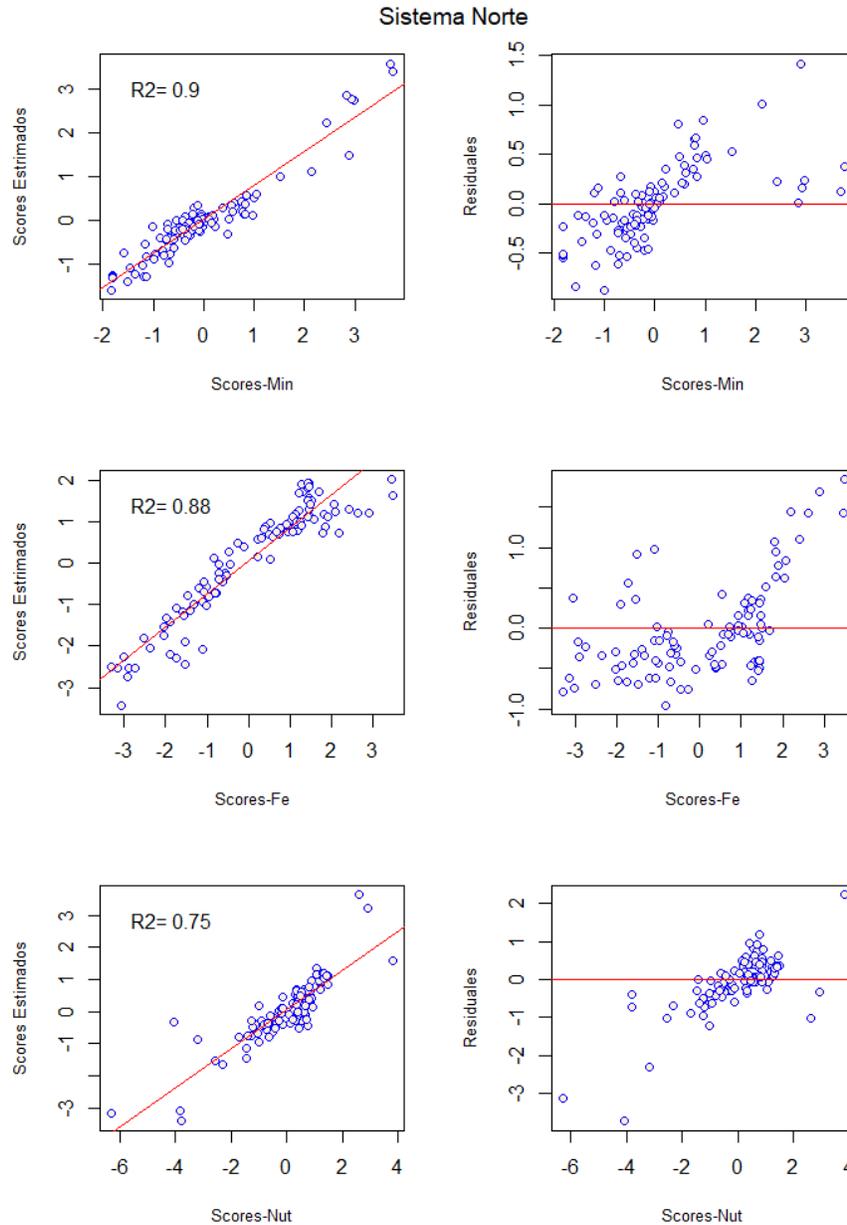


Figura 91. Validación estadística del modelo de bioindicación para el sistema Norte por medio del método de mínimos cuadrados parciales ponderados WAPLS

7.2.4.2 Validación Índices Sistema Sur-EI Delirio

La validación estadística de las muestras del sistema Sur muestra que para el ICE-Min el 85% de las abundancias de las especies están muy bien representadas en el índice, mientras que para el ICE-Fe y el ICE-Nutrientes dicha representación es menor (68%) (**Figura 92**). Sin embargo, todos representan una reconstrucción óptima de la calidad en este sistema.

En la **Figura 93** a **Figura 95** se presentan los valores de calidad comparados con los conteos de validación. Al comparar los puntajes de los índices se puede observar que, de

manera general, las muestras de validación puntúan el mismo rango de calidad obtenido en las muestras del modelo. En el caso del ICE-Min la Intersección de la quebrada Upatá Pablo Blanco-lupb y Quebrada Yomasa aguas arriba-Qyarr presentan Muy buena calidad, mientras que el Río Mugroso-Rmug se mantiene en calidad regular.

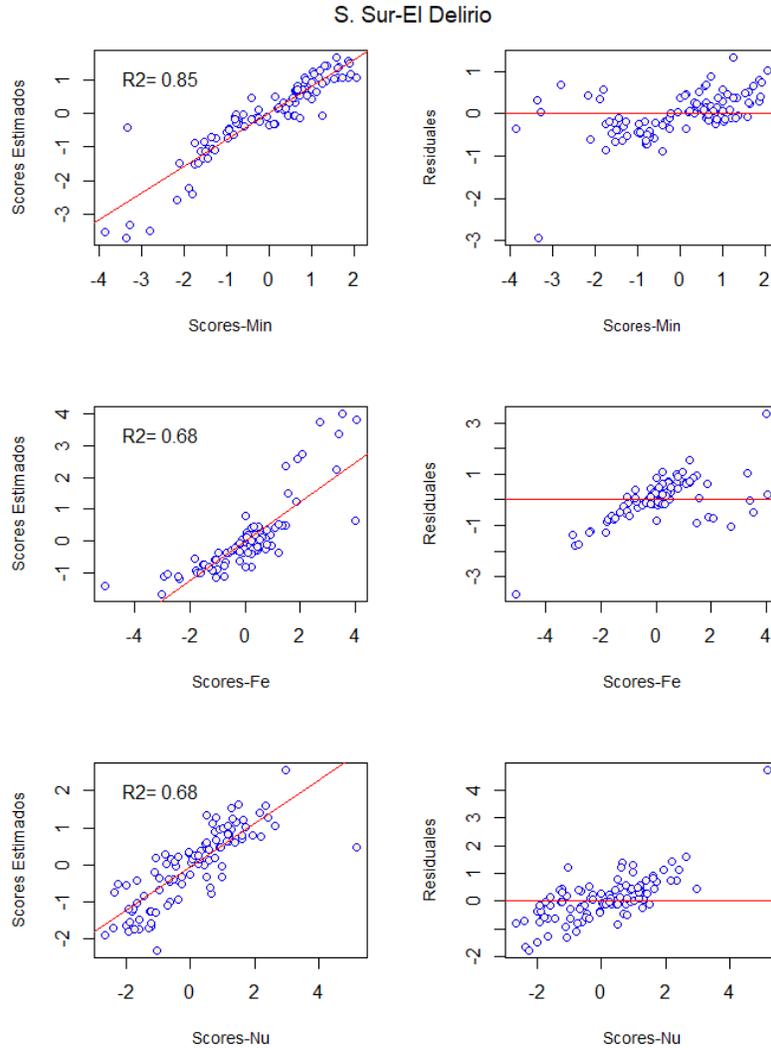


Figura 92. Validación estadística del modelo de bioindicación para el sistema Sur y El Delirio por medio del método de mínimos cuadrados parciales ponderados-WAPLS

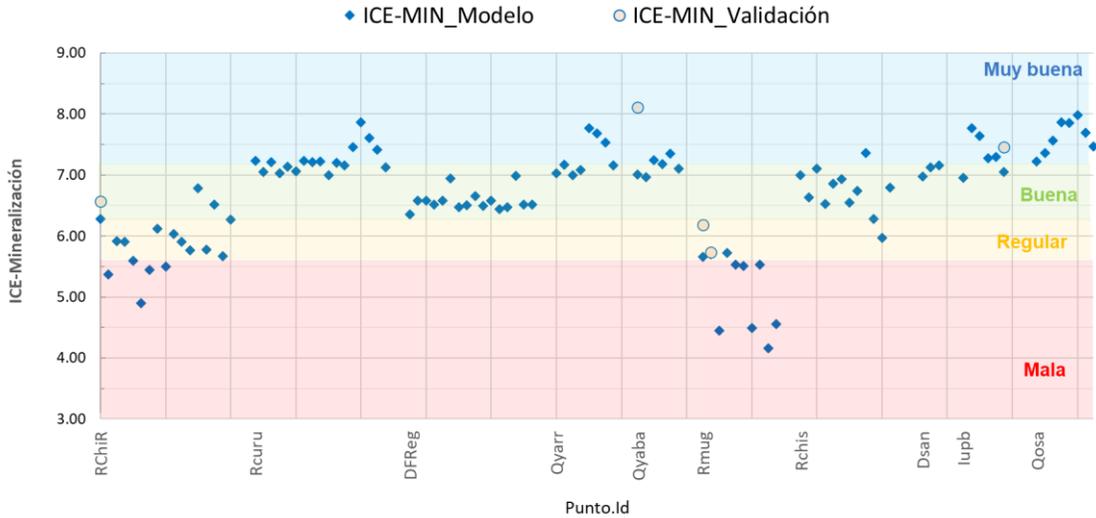


Figura 93. Comparación de los valores de calidad obtenidos mediante el ICE-Mineralización entre las muestras del modelo y el conjunto de muestras para validación del sistema Sur.

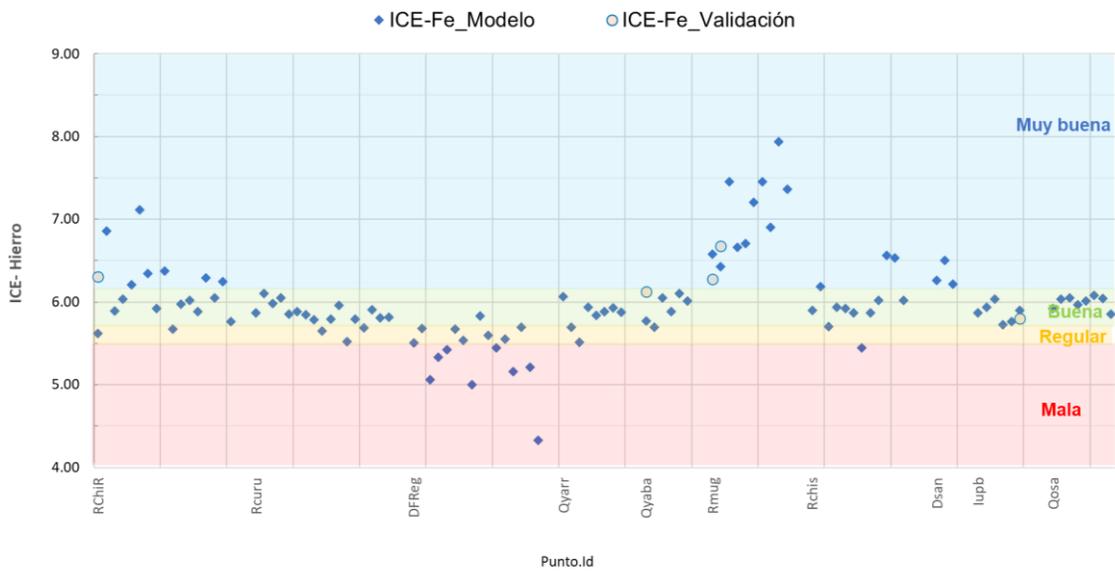


Figura 94. Comparación de los valores de calidad obtenidos mediante el ICE-Fe entre las muestras del modelo y el conjunto de muestras para validación del sistema Sur.

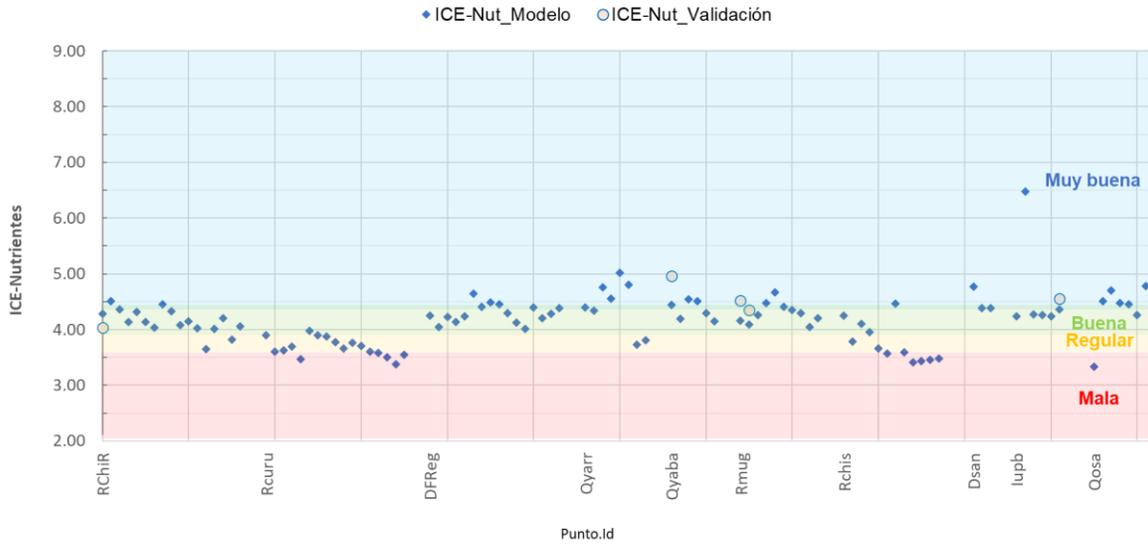


Figura 95. Comparación de los valores de calidad obtenidos mediante el ICE-Nu entre las muestras del modelo y el conjunto de muestras para validación del sistema Sur.

7.2.4.3 Validación Índices Sistema San Rafael-Tibitoc

En este sistema el porcentaje reconstruido por la composición de especies fue el de mayor porcentaje (95%), lo que demuestra que el índice elaborado para este sistema proporciona de manera más robusta una valoración precisa de la calidad del agua.

Los resultados de la validación estadística del modelo muestran que el 94% de las abundancias de las especies se encuentran muy bien representadas en el índice desarrollado. Asimismo, los residuales del modelo corroboran un buen ajuste del modelo (**Figura 96**).

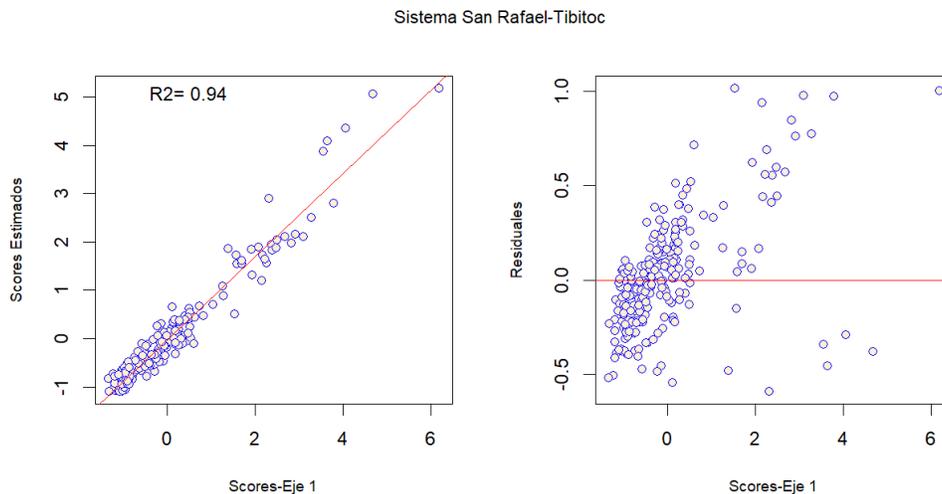


Figura 96. Validación estadística del modelo de bioindicación para el sistema Sur y El Delirio por medio del método de mínimos cuadrados parciales ponderados-WAPLS

Cuando se comparan los resultados del índice entre las muestras del modelo con las muestras de validación se observa que la mayor parte de las muestras del Nacimiento del Río Teusacá presentan Buena Calidad y algunas muestras puntúan como calidad Regular. Todas las muestras del Río Teusacá desde Puente Adobes hasta Puente Sopó poseen Muy Mala Calidad de manera consistente en los dos conjuntos de datos, mientras que las muestras de Puente Francis, La Calera y Confluencia de la Quebrada Simaya presentan una gran variabilidad en la calidad, pasando de periodos de Muy Mala Calidad a Regular y en algunas pocas muestras llegando a condiciones de Buena Calidad, lo cual podría estar asociado con periodos de dilución relacionado con la lluvia.

En el caso de las muestras de la Descarga de Fondo del embalse San Rafael, la calidad del agua varía entre Regular a Buena (**Figura 97**).

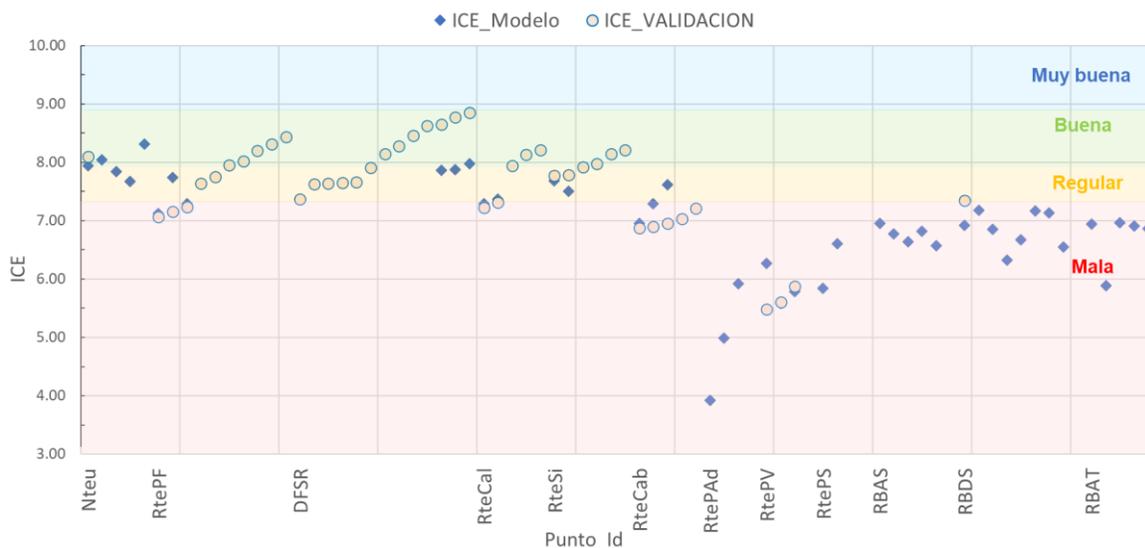


Figura 97. Comparación de los valores de calidad obtenidos mediante el ICE entre las muestras del modelo y el conjunto de muestras para validación del sistema San Rafael-Tibitoc.

8. PROCEDIMIENTO DEL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD ECOLÓGICA

El cálculo del ICE implica tres pasos, los cuales se describen a continuación, desde el software Excel.

Paso 1: Los datos de los conteos (abundancias relativas) deben ser transformados en $\log_{10}(\text{abundancia}+1)$. Las especies (código de la especie) deben ir en las columnas y las muestras con su respectivo código, en las filas.

Al final del listado del conteo se deben incluir los valores de los óptimos y tolerancias de cada una de las especies, las cuales deben coincidir en el mismo orden en el que están los conteos (**Figura 98**). Los óptimos y tolerancias de las especies varían del sistema analizado

(Sistema Norte, Sistema Sur, Sistema San Rafael-Tibitoc) y el índice que se requiera calcular (Mineralización, Hierro o Nutrientes).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Sample_id / Sp_id	Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cymen	Cytmum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil	Eundon	Eunexi
2	20183742	0.0256	0.0000	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0161	0.0000	0.0000
3	2019121	0.0092	0.0000	0.0133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0212	0.0000	0.0203	0.0000	0.0000
4	2019322	0.0149	0.0000	0.0500	0.0000	0.0084	0.0000	0.0000	0.0221	0.0000	0.0084	0.0000	0.0000
5	20182360	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0408	0.0000	0.0000
6	20183038	0.0813	0.0000	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0317	0.0000	0.0283	0.0000	0.0000
7	20182557	0.1336	0.0000	0.0171	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0344	0.0000	0.0000
8	202064	0.1196	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0019	0.0039	0.0077	0.0000	0.0096	0.0000	0.0000
9	201991	0.0812	0.0000	0.0280	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47													
48		Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cymen	Cytmum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil	Eundon	Eunexi
49	Optimo	3.2700	1.9400	2.5900	3.3800	2.5400	2.1500	3.3100	2.6000	1.3600	2.6000	3.4000	8.6600
50	Tolerancia	0.4300	0.9100	0.5000	0.1300	0.1700	0.5700	0.3400	0.2300	0.9100	0.1600	0.9100	1.0900
51													

Figura 98. Organización de la matriz de conteos juntos con los óptimos y tolerancias de las especies para el cálculo del ICE. Las especies de los conteos deben estar ordenadas de la misma manera que el listado de especies con los óptimos y tolerancias

A partir de este listado se procede a cuantificar el índice, de acuerdo con la ecuación (1)

$$ICE = \frac{\sum Op_i * Tol_i * Ab_i}{\sum Op_i * Ab_i} \quad (1)$$

Donde,

Op_i es el óptimo de la especie i

Tol_i es la tolerancia de la especie i

Ab_i es la abundancia transformada ($\log_{10}(\text{abundancia}+1)$) de la especie i en cada punto

Paso 2: Cálculo de la expresión del numerador. Para realizar la sumatoria de la expresión del numerador se debe multiplicar la abundancia transformada de cada especie por su correspondiente óptimo y tolerancia. Al final se debe realizar la sumatoria de cada una de las filas (muestras) (**Figura 99** y **Figura 100**).

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2	Sample_id / Sp_id	Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cycmen	Cymtum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil
3	20183742	0.0256	0.0000	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0161
4	2019121	0.0092	0.0000	0.0133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0212	0.0000	0.0203
5	2019322	0.0149	0.0000	0.0500	0.0000	0.0084	0.0000	0.0000	0.0221	0.0000	0.0084
6	20182360	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0408
7	20183038	0.0813	0.0000	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0317	0.0000	0.0283
8	20182557	0.1336	0.0000	0.0171	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0344
9	202064	0.1196	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0019	0.0039	0.0077	0.0000	0.0096
10	201991	0.0812	0.0000	0.0280	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0000
47											
48		Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cycmen	Cymtum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil
49	Optimo	3.2700	1.9400	2.5900	3.3800	2.5400	2.1500	3.3100	2.6000	1.3600	2.6000
50	Tolerancia	0.4300	0.9100	0.5000	0.1300	0.1700	0.5700	0.3400	0.2300	0.9100	0.1600
51											
52											
53	NUMERADOR										
54	20183742	=B2*B\$49*B\$50		0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0067
55	2019121	0.0130	0.0000	0.0172	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0127	0.0000	0.0084
56	2019322	0.0209	0.0000	0.0647	0.0000	0.0036	0.0000	0.0000	0.0132	0.0000	0.0035
57	20182360	0.0156	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0170
58	20183038	0.1143	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0189	0.0000	0.0118
59	20182557	0.1878	0.0000	0.0222	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0143
60	202064	0.1681	0.0000	0.0100	0.0000	0.0000	0.0024	0.0043	0.0046	0.0000	0.0040
61	201991	0.1142	0.0000	0.0363	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	0.0000	0.0000

Figura 99. Cálculo del promedio ponderado de las especies en la expresión del numerador.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	CC	CD
2	Sample_id / Sp_id	Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cycmen	Cymtum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil		
3	20183742	0.0256	0.0000	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0161		
4	2019121	0.0092	0.0000	0.0133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0212	0.0000	0.0203		
5	2019322	0.0149	0.0000	0.0500	0.0000	0.0084	0.0000	0.0000	0.0221	0.0000	0.0084		
6	20182360	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0408		
7	20183038	0.0813	0.0000	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0317	0.0000	0.0283		
8	20182557	0.1336	0.0000	0.0171	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0344		
9	202064	0.1196	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0019	0.0039	0.0077	0.0000	0.0096		
10	201991	0.0812	0.0000	0.0280	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0000		
47													
48		Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cycmen	Cymtum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil		
49	Optimo	3.2700	1.9400	2.5900	3.3800	2.5400	2.1500	3.3100	2.6000	1.3600	2.6000		
50	Tolerancia	0.4300	0.9100	0.5000	0.1300	0.1700	0.5700	0.3400	0.2300	0.9100	0.1600		
51													
52													
53	NUMERADOR												NUMERADOR
54	20183742	0.0359	0.0000	0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0067		
55	2019121	0.0130	0.0000	0.0172	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0127	0.0000	0.0084		=SUMA(B54:CB54)
56	2019322	0.0209	0.0000	0.0647	0.0000	0.0036	0.0000	0.0000	0.0132	0.0000	0.0035		0.372
57	20182360	0.0156	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0170		0.334
58	20183038	0.1143	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0189	0.0000	0.0118		0.438
59	20182557	0.1878	0.0000	0.0222	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0143		0.545
60	202064	0.1681	0.0000	0.0100	0.0000	0.0000	0.0024	0.0043	0.0046	0.0000	0.0040		0.434
61	201991	0.1142	0.0000	0.0363	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	0.0000	0.0000		0.328

Figura 100. Sumatoria del promedio ponderado de las especies en el numerador.

Paso 2: Cálculo de la expresión del denominador: Se procede a multiplicar la abundancia transformada de cada especie por su correspondiente tolerancia. Al final se debe realizar la sumatoria de cada una de las filas (muestras) (Figura 101 y Figura 102).

Paso 3: Cálculo del ICE: Se procede a dividir cada fila del numerador, con cada fila del denominador (**Figura 103**).

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	CC	CD	CE
2	Sample_Id / Sp_Id	Achmin	Adlsp2	Cocpla	Cramol	Cycmen	Cyrtum	Distel	Encmin	Encneo	Encsil			
3	20183742	0.0256	0.0000	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			0.0161
4	2019121	0.0092	0.0000	0.0133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0212	0.0000	0.0203			0.0203
5	2019322	0.0149	0.0000	0.0500	0.0000	0.0084	0.0000	0.0000	0.0221	0.0000	0.0084			0.0084
6	20182360	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0408			0.0408
7	20183038	0.0813	0.0000	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0317	0.0000	0.0283			0.0283
8	20182557	0.1336	0.0000	0.0171	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0344			0.0344
9	202064	0.1196	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0019	0.0039	0.0077	0.0000	0.0096			0.0096
47	201991	0.0812	0.0000	0.0280	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0000			0.0000
48														
49	Optimo	3.2700	1.9400	2.5900	3.3800	2.5400	2.1500	3.3100	2.6000	1.3600	2.6000			
50	Tolerancia	0.4300	0.9100	0.5000	0.1300	0.1700	0.5700	0.3400	0.2300	0.9100	0.1600			
51														
52	NUMERADOR											NUMERADOR		ICE
53	20183742	0.0359	0.0000	0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0067		0.484	
54	2019121	0.0130	0.0000	0.0172	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0127	0.0000	0.0084		0.355	=CD54/CD101
55	2019322	0.0209	0.0000	0.0647	0.0000	0.0036	0.0000	0.0000	0.0132	0.0000	0.0035		0.372	2.85
56	20182360	0.0156	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0170		0.334	2.91
57	20183038	0.1143	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0189	0.0000	0.0118		0.438	2.92
58	20182557	0.1878	0.0000	0.0222	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0143		0.545	2.96
59	202064	0.1681	0.0000	0.0100	0.0000	0.0000	0.0024	0.0043	0.0046	0.0000	0.0040		0.434	2.98
60	201991	0.1142	0.0000	0.0363	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	0.0000	0.0000		0.328	2.87
98														
99	DENOMINADOR											DENOMINADOR		
100	20183742	0.0110	0.0000	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0026		0.16	
101	2019121	0.0040	0.0000	0.0066	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0049	0.0000	0.0032		0.12	
102	2019322	0.0064	0.0000	0.0250	0.0000	0.0014	0.0000	0.0000	0.0051	0.0000	0.0013		0.13	
103	20182360	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065		0.11	
104	20183038	0.0350	0.0000	0.0027	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0073	0.0000	0.0045		0.15	
105	20182557	0.0574	0.0000	0.0086	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0055		0.18	
106	202064	0.0514	0.0000	0.0038	0.0000	0.0000	0.0011	0.0013	0.0018	0.0000	0.0015		0.15	
107	201991	0.0349	0.0000	0.0140	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000		0.11	

Figura 103. Cálculo final del Índice de Calidad Ecológica

La escala del ICE fluctuará entre 1 a 10, según la calidad del agua en cada muestra. Una vez calculado, el valor debe ser ubicado en los rangos de calidad presentados para cada sistema (**Tabla 22 a la Tabla 24**).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO

- Un total de 208 especies conforman la diversidad de especies de diatomeas de los sistemas de abastecimiento de EAAB-ESP.
- En los ríos del Sistema Norte que presentaron mayor contenido de PT, pH y ST, las especies más recurrentes fueron *Rhopalodia abbreviata*, *Nitzschia dissipata*, *Nitzschia recta*, reportadas en la literatura como tolerantes a contaminación, así como especies medianamente tolerantes como *Encyonema silesiacum*, *Encyonema minutum*, *Cocconeis placentula*, así como *Reimeria sinuata*, *Planothidium lanceolatum* y *Melosira varians*. Cuando poseen mayor contenido de Fe, pH es menor y la concentración de sólidos y nutrientes es baja, la comunidad de diatomeas está representada principalmente por especies que suelen preferir ambientes desde oligotróficos a mesotróficos con baja contaminación como *Hannaea arcus*, *Achnanthydium minutissimum*, *Cymbella cymbiformis*, *Fragilaria rumpens*, *Fragilaria vaucheriae*, *Eunotia minor*, *Discostella stelligera*, *Sellaphora saugerresi* y *Brachysira sp.2*.

- En el sistema Chuza se destacaron las aguas claras, con bajos valores de turbidez y sólidos y la tendencia del ph fue la alcalinidad. en este sistema la Quebrada Babilonia presentó valores mayores de conductividad, dureza, alcalinidad, amonio, fosforo reactivo soluble y sólidos disueltos totales.
- A nivel de composición de la comunidad, se destacó el aporte de *Achnantheidium minutissimum*, *Fragilaria capucina var. rumpes*, *Sellaphora saugerresii* y *Hannaea arcus*.
- Las quebradas del sistema Río Blanco son en general oxigenadas, así mismo, a nivel microbiológico se evidenciaron bajos valores de materia orgánica y por consiguiente de coliformes, reflejando las buenas condiciones del sistema. La comunidad de diatomeas del sistema río blanco presentó mayor diversidad, con un total de 99 especies, siendo las más representativas: *Achnantheidium minutissimum*, *Cocconeis placentula*, *Encyonema silesiacum*, *Encyonema minutum*, *Fragilaria capucina var. rumpes*, *Fragilaria capucina var. Vaucheriae*, *Hannaea arcus*, *Nitzschia sp. 4* y *Sellaphora nigri*.
- En el sistema San Rafael se evidencia que la Conductividad presenta valores altos respecto al sistema Chuza y Río Blanco, destacándose el punto Puente Sopó por los valores altos de Fósforo mientras que Puente Adobes tuvo los mayores valores de NO₃, NO₂. Se observó la misma tendencia en la composición de la comunidad de diatomeas, con mayor representatividad de *Achnantheidium minutissimum*, *Cocconeis placentula*, *Encyonema silesiacum* destacándose los aportes de *Eunotia subarcuatoides*, *Navicula rostellata* y *Sellaphora saugerresii*.
- En el sistema Tibitoc en general se observaron bajos valores de oxígeno disuelto y por el contrario, valores altos de conductividad, nutrientes y materia orgánica. En términos de composición, la comunidad estuvo mayor representada por *Craticula molestiformis*, *Gomphonema parvulum*, *Nitzschia palea* y *Sellaphora saugerresii*.
- Los ríos del sistema San Rafael-Tibitoc con altos valores de PRS, Conductividad y NKJ, son ambientes propicios para la recurrencia de especies como *Navicula cryptocephala*, *Sellaphora saugerresii*, *Nitzschia palea*, *Gomphonema parvulum*, *Selaphora nigri* y *Gomphonema affine var rhombicum*. Cuando los valores de NO₃ son mayores, suelen ser recurrentes *Nitzschia capitellata*, *Gomphonema pumilum*, *Gyrosigma aff. acuminatum* y *Navicula rostellata*. Ambos conjuntos de especies suelen ser reportadas en la literatura como tolerantes a contaminación.

- En los ríos del Sistema Sur cuando se observa mayor contenido de Fe, Cloruros y Turbidez, suelen ser recurrentes especies como *Fragilaria crotonensis*, *Gomphonema cf subclavatum*, *Gomphonema affine*, *Gomphonema aff gracile*, *G.pseudoaugur*, *Navicula notha*, *Ulnaria ulna*, *Eunotia cf parasiolii* y *Achnantheidium minutissimum*, especies que en su mayoría suelen ser registradas en sistemas mesotróficos a eutróficos. Asimismo, las especies que estuvieron más correlacionadas con la Conductividad y Alcalinidad en estos sistemas son *Rhopalodia abbreviata*, *Reimeria sinuata*, *Surirella angusta*, *Gomphonema sp.4*, *Gomphonema paludosum2*, *Encyonema silesiacum* y *Hannaea arcus*.
- En el Sistema Chisacá, de las variables revisadas, se destacó la Turbiedad del río Mugroso con mineralización más alta en el sistema, hecho que se evidenció también en el análisis de componentes principales, mientras que en el río Chisacá se registró mayor concentración de Fósforo Reactivo Soluble y Fósforo Total. En la comunidad de diatomeas se observó mayor abundancia de *Cocconeis placentula*, *Fragilaria capucina var. rumpens*, *Gomphonema sp. 4*, *Hannaea arcus* y *Sellaphora saugerresii*.
- En el sistema Regadera se observó baja conductividad, bajo contenido de sólidos y baja turbidez, así como baja mineralización. A nivel microbiológico, los valores máximos y los atípicos se encuentran dentro del rango de buena calidad bacteriológica. La comunidad de diatomeas estuvo compuesta por 112 especies, dentro de las cuales se destacó el aporte de *Achnantheidium minutissimum*, *Cocconeis placentula*, *Fragilaria capucina var. rumpens*, *Fragilaria capucina var. vaucheriae* y *Psammothidium subatomoides*.
- En el punto aguas arriba de la quebrada Yomasa se presentaron valores mayores de pH y Turbidez, mientras que en el punto aguas abajo, fueron mayores los valores de concentración de nitrógeno en sus diferentes formas.
- En términos de composición la comunidad de diatomeas estuvo mayormente representada principalmente (de acuerdo con su abundancia) por las especies *Fragilaria capucina var. rumpens*, *Fragilaria capucina var. vaucheriae* y *Psammothidium subatomoides*.
- En general, las aguas del sistema El Delirio son poco mineralizadas y por tanto con baja conductividad y circumneutrales, así como con bajo aporte de nutrientes. En la comunidad de diatomeas se destacó el aporte de *Psammothidium subatomoides*, *Gomphonema lagenula*, *Fragilaria capucina var. rumpens* y *Hannaea arcus*.

- Los índices aquí formulados con base en la comunidad de diatomeas reflejan de manera consistente los cambios con la calidad fisicoquímica, así como con las particularidades relacionadas con la mineralización propia de cada cuenca.
- Si bien todos los índices formulados reflejan de manera indirecta las presiones relacionadas con la concentración de nutrientes (en particular Fósforo y Nitrógeno), no son útiles para medir contaminación por materia orgánica estimada por DBO5 y DQO ni por metales pesados.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en la validación de los índices desarrollados, el alto porcentaje reconstruido por la composición de especies demuestra que los índices elaborados para los sistemas proporcionan de manera robusta una valoración adecuada de la calidad.

10. BIBLIOGRAFÍA

Abarca, J., Zimmermann, J. 2014. does the cosmopolitan diatom gomphonema parvulum (kützing) kützing have a biogeography?

Alvial, I. , Cruces, F. , Grosjean, M., Urrutia, R. & Araneda, A. 2008. Estructura comunitaria de diatomeas presentes en los sedimentos superficiales de ocho lagos andinos de Chile central. Revista Chilena de Historia Natural.81(1):83-94.

Baatrup, Pedersen, A., Jhonsen, T., Larsen, S. & Riis, T. 2022. Alkalinity and diatom assemblages in lowland streams: How to separate alkalinity from inorganic phosphorus in ecological assessments?. Science of the total environment. 823 (1).

Blanco, S., Munoz-Lopez, C. L., & Rivera-Rondon, C. A. (2020). Nupela eremica sp. nov.(Bacillariophyta, Naviculaceae) from a páramo lake in the Colombian Andes. *Phytotaxa*, 455(4), 295–300.

Castro-Roa, D., & G. Pinilla-Agudelo, 2014. Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnetica* 33: 297–312.

CEMAGREF, 1982. Étude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Q. E. Lyon – A. F. Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, 217 pp.

Chalar, G., R. Arocena, J. P. Pacheco, & D. Fabián, 2011. Trophic assessment of streams in Uruguay : A Trophic State Index for Benthic Invertebrates (TSI-BI). *Ecological Indicators* Elsevier Ltd 11: 362–369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.004>.

Cuna, E., Caballero, M., Zawisza, E. & Ruiz, C. 2015. Historia ambiental de un lago alpino en el centro de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 18(2):97-106.

Descy, J.-P., & M. Coste, 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen Taylor & Francis* 24: 2112–2116.

Díaz-Quirós, c., & c. a. Rivera-Rondón, 2004. diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *caldasias* 26: 381–394.

Donato-Rondón, J. & Abuhatab-Aragón Y.2018. Factors driving diversity and succession of diatom assemblages in a Neotropical rainforest stream. *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.*

Donato-R JC, Mendivelso HA, Pedraza-Garzón EL, Sabater S. 2022. Drivers of the diversity of diatoms in an oligotrophic Andean stream. *Int. J. Lim.* 58: 2

Gari, E.N & Corigliano, M.C. 2007. Spatial and temporal variations of *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenb.) 1854. Grunow, 1884 in drift and periphyton. *Braz. J. Biol.* 67(4): 587-595

IDEAM, INVEMAR. 2021. Protocolo de monitoreo del agua. Bogotá. pp 394-401.

Kelly, M. G., & B. A. Whitton, 1995. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* 7: 433–444.

Kobayasi, H., & S. Mayama, 1989. Evaluation of river water quality by diatoms. *The Korean Journal of Phycology* 4: 121–133.

Kolkwitz, R., & M. Marsson, 1902. Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna. *Abwasserbeseit* 1: 33–72.

Forero L, Longo M, Ramírez JJ y Chalar G. (2014). Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICERN-MAE), Colombia. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744)* Vol. 62 (Suppl. 2): 233-247

Haase, R., & U. Nolte, 2008. The invertebrate species index (ISI) for streams in southeast Queensland, Australia. *Ecological Indicators* 8: 599–613.

Hernández-Atilano, E., N. J. Aguirre, & J. A. Palacio, 2005. Variación espacio-temporal de la estructura de la comunidad de algas perifíticas en la microcuenca de la quebrada La Vega, municipio de San Roque (Antioquia), Colombia. *Actualidades Biológicas* 27: 67–77.

Hernández, E., D. M. Agudelo, E. Flórez, R. Sepúlveda, A. M. Zabala, Lady Vargas, M. Parra, G. Ramírez, & N. Aguirre, 2020. Índice de Calidad Ecológica y gestión hídrica en tres ecosistemas de Colombia. *Revista de Biología Tropical* 68: 1337–1345.

Hernandez, A., S. Sepulveda, V. Grajales, R. Aguirre, M. Velez, Q. Caicedo, V. Mesa, D.

Cortes, & M. Montoya, 2018. Ecological quality index using periphytic algae in San Juan river (Antioquia-Colombia). REVISTA MVZ CORDOBA UNIV CORDOBA FAC MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA, KM 26, VIA CIENEGA DE ORO ... 23: 6998–7012.

Juggins, S., & H. J. B. Birks, 2012. Quantitative environmental reconstructions from biological data Tracking environmental change using lake sediments. Springer: 431–494.

Juggins, S., & M. S. Juggins, 2020. Package 'rioja.' An R Package for the Analysis of Quaternary Science Data., 0.9 26:.

Kim, Y. & Min, O. 2017. A study of low-temperature and mountain epilithic diatom community in mountain stream at the Han River system, Korea. Journal of Ecology and Environment. 41:28.

Kociolek, P. (2010). *Hannaea arcus*. In Diatoms of North America. Retrieved August 07, 2022, from https://diatoms.org/species/hannaea_arcus

Koppen, J.D. 1975. A morphological and taxonomic consideration of *Tabellaria* (Bacillariophyceae) from the north-central United States. *Journal of Phycology* 11: 236-244.

Lamberti, G. A., 1996. The role of periphyton in benthic food webs. Algal ecology: freshwater benthic ecosystems. Academic Press, San Diego, California, USA 533–572.

Lange-Bertalot, H., & D. Metzeltin, 1996. Ecology–Diversity–Taxonomy. Indicators of oligotrophy–800 taxa representative of three ecologically distinct lake types. *Iconographia diatomologica* Koeltz Scientific Books Koenigstein 2: 1–390.

Lange BH, Bak M, Witkowski A. 2011. *Eunotia* and some related genera. In: Lange Bertalot H (ed) Diatoms of Europe - diatoms of the European inland waters and comparable habitats. Ruggell, Gantner, p 747

Leclercq, L., & B. Maquet, 1987. Deux nouveaux indices diatomiques et de qualité chimique des eaux courantes. Comparaison avec différents indices existants. *Cahiers De Biologie Marine* 28: 303–310.

Lobo, E.A.; Callegaro, V. L. M.; Wetzel, C. E.; Hermany, G.; Bes, D. Water quality evaluation of Condor and Capivara Streams, Municipal District of Porto Alegre, RS, Brazil, using epilithic diatom communities as bioindicators. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, v. 33, n. 2, p. 77-93, 2004c

Longo, M., G. Chalar, L. C. Forero, & J. J. Ramírez, 2014. Aquatic ecological index based on freshwater (ICERN-MAE) for the Río Negro watershed, Colombia. *Revista de Biología Tropical* 62: 233–247, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84907380748&partnerID=40&md5=a00fbf78c36635af664331e1c5abca68>.

Martínez, L. F., & J. C. Donato, 2003. Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un río de alta montaña tropical (Boyacá, Colombia). *Caldasia* 25: 337–354.

Medina – Tombé, M.F., Sala, S., Vouilloud, A. & Ramírez-Restrepo, J. 2017. Comparación morfológica y distribución geográfica de las especies *Tabellaria fenestrata* y *Tabellaria flocculosa* (Bacillariophyceae) en sistemas lóticos y lénticos de Colombia. 43 Actual Biol 39 (107): 43 – 50.

Medina-Tombé, M. F., Vouilloud, A. A., & Sala, S. E. (2019). *Terpsinoë musica* Ehrenberg (Bacillariophyceae), primer registro del género para Colombia. *Actualidades Biológicas*, 41(110), 5–13. <https://doi.org/10.17533/10.17533/udea.acbi.v41n110a01>

Metzeltin, D., & H. Lange-Bertalot, 1998. Tropical Diatoms of South America I. About 700 predominantly rarely known or new taxa representative of the neotropical flora. *Iconographia Diatomologica* 5. Koeltz, Konigstein, Germany .

Metzeltin, D., & H. Lange-Bertalot, 2007. Tropical diatoms of South America II. Special remarks on biogeographic disjunction. *Iconographia Diatomologica* 18. Koeltz Scientific Books. Koenigstein.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2018. Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial. MADS. Bogotá.

Montoya-Moreno, Y. & Aguirre-Ramírez, N. 2013. Knowledge to Ecological Preferences in a Tropical Epiphytic Algae to Use with Eutrophication Indicators. *Journal of Environmental Protection*. 4 (11): 37-35.

Moresco, C., Gubiani, E., Rodrigues, L. 2015. Periphytic diatoms as bioindicators in a tropical stream: from urban to rural environments. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*. 37 (4)427-437 p.

Oeding, S. & Taffines s, K. 2015. Are diatoms a reliable and valuable bio-indicator to assess sub tropical river ecosystem health? *Hydrobiologia* (2015) 758:151–169.

Oksanen, J., R. Kindt, P. Legendre, B. O'Hara, M. H. H. Stevens, M. J. Oksanen, & M. Suggests, 2007. The vegan package. *Community ecology package* 631–637.

Pantle, R. & H. Buck. 1955. Die biologische Ueberwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. -Gas-, Wasserfach 96: 604.

Pedraza-Garzón, E., & J. . Donato-Rondon, 2011. Diversity and distribution of diatoms in a mountain stream of the Colombian Andes. *Caldasia* 33: 177–191.

Ramírez, A. & Y. Plata-Díaz, 2008. Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña. *Acta Biologica Colombiana* 13: 199–216.

R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, Vienna, Austria, <https://www.r-project.org/>.

Richards, J., Tibby, J., Barr, C. & Goonan, P. 2020. Effect of substrate type on diatom-based water quality assessments in the Mount Lofty Ranges, South Australia. *Hydrobiologia*. 847: 3077-3090p.

Rivera, C. A., & J. C. Donato, 2008. Influencia de las variaciones hidrológicas y químicas sobre la diversidad de diatomeas bénticas In Donato, J. C. (ed), *Ecología de un río de montaña*. Bogotá: 83–101.

Rumrich, U., H. Lange-Bertalot, & M. Rumrich, 2000. *Diatomeen der Anden: von Venezuela bis Patagonien/Feuerland: und zwei weitere Beiträge*. ARG Gantner Verlag KG.

Sala, S. E., J. J. Ramírez, & Y. Plata, 2008. Diatoms from lentic and lotic systems in Antioquia, Chocó and Santander Departments in Colombia. 56: 1159–1178.

Sala, S., Vouilloud, A. A., Plata-díaz, Y., Pedraza, E., & Pimienta, A. (2014). Nupela species (Naviculales : Bacillariophyceae) from Colombian lowland waters including *N . acaciensis* nov . sp . and *N . catatumbensis* nov . sp . *Revista de Biología Tropical*, 62(March), 241–255.

Sala, Silvia E, Duque, S. R., Nuñez-Avellaneda, M., & Lamaro, A. A. (2002). Diatoms from the Colombian Amazonia. *Cryptogamie, Algol.*, 23(1), 75–99.

Sala, Silvia Estela, Duque, S. R., Nuñez-Avellaneda, M., & Lamaro, A. A. (1999). Nuevos registros de Diatomeas (Bacillariophyceae) de la Amazonia Colombiana. *Caldasia*, 21(1), 26–37.

Saxena, A., Tiwari, A., Kaushik, R., Iqbal, H.M.N, Parra-Saldívar, R.2020. Diatoms recovery from wastewater: Overview from and ecological and economic perspective. *Journal of Water Process Engineering*. 39.

Schneck, F., Torgan, L., Schwarzbald, A. 2007. Epilithic diatom community in a high-altitude stream impacted by fish farming in southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*. 19 (3): 341-355.

Segnini, S., 2003. El uso de macroinvertebrados bénticos como indicadores de la condición ecológica de los cuerpos de agua corriente. *Ecotropicos* 16: 45–63.

Segura-García, V., Israde- Alcántara. & _Maidana, N. 2010. The genus *Navicula* sensu stricto in the upper Lerma Basin, México. *I. Diatom research*. 25:2 (367-383).

Segura-García V., E. A. Cantoral-Uriza, I. Israde and N. Maidana. 2012. Epilithic diatoms (Bacillariophyceae) as indicators of water quality in the Upper Lerma River, Mexico. *Hidrobiológica* 22(1): 16-27.

Serodio, J.& Lavaud, J. 2021. Diatoms and their ecological importance. *Life Below Water, Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, pp1-9, 10.1007.

Simonato, J., J. P. Kociolek, S. E. Sala, Y. P. Díaz, & M. Núñez-Avellaneda, 2020. Three new *Luticola* species from the Andean-Amazonian transition in Colombia: taxonomy,

morphology and preliminary considerations of the biogeography of the genus. *Diatom Research* Taylor & Francis 1–17, <https://doi.org/10.1080/0269249X.2020.1813205>.

Shibabaw T, Beyene A, Awoke A, Tirfie M, Azage M, Triest L. 2021. Diatom community structure in relation to environmental factors in human influenced rivers and streams in tropical Africa. *PLoS One*. 3(16).

Stenger-Kovács, C., Lengyel E., Sebesyén, V. & Szabó, B. 2020. Effects of land use on streams: traditional and functional analyses of benthic diatoms. *Hydrobiologia*. 847 (2933-2946 p.

Stevenson, R., Y. Pan, & H. Van Dam, 1999. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms In Smol, J. P., & E. F. Stoermer (eds), *The diatoms: applications for the environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press: 57–85.

Taylor, J. C., W. R. Harding, & C. G. M. Archibald, 2007. An illustrated guide to some common diatom species from South Africa. Report to the Water Research Commission.

Ter Braak, C. J. F., & I. C. Prentice, 1988. A theory of gradient analysis *Advances in ecological research*. Elsevier: 271–317.

Potapova, M. & Hamilton, P. 2007. Morphological and ecological variation within the *Achnanthe minutissima* (BACILLARIOPHYCEAE) species complex. *J. Phycol.* 43:561: 567.

Union European, 2005. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000 / 60 / EC) Guidance document n° 13. Overall approach to the classification.

Vouilloud, A. A., Y. Plata-Díaz, E. Pedraza, A. Pimienta, S. Heguilor, A. Lamaro, & E. Sala, 2016. Distribución de *Eunotia parasiolii* (Bacillariophyceae) en ríos neotropicales (Colombia) y su implicancia en la taxonomía de la especie Distribution of *Eunotia parasiolii* (Bacillariophyceae) in Neotropical rivers (Colombia) and its implication on t. *Hidrobiológica* (México, DF) 26: 241–250.

Vouilloud, Amelia A., Sala, S. E., Núñez-Avellaneda, M., Montoya-Moreno, Y., & Duque, S. R. (2014). *Brachysira* (Naviculales, Bacillariophyceae) in lowland waters from Colombia. *Diatom Research*, 29(2), 147–163. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2013.866909>

Vouilloud, Amelia A., Sala, S. E., Avellaneda, M. N., & Duque, S. R. (2010). Diatoms from the Colombian and Peruvian Amazon: The genera *Encyonema*, *Encyonopsis* and *Gomphonema* (Cymbellales: Bacillariophyceae). *Revista de Biología Tropical*, 58(1), 45–62.

Wetzel, C.E., Ector, L., Van de Vijver, B., Compère, P. and Mann, D.G. 2015. Morphology, typification and critical analysis of some ecologically important small naviculoid species (Bacillariophyta) *Fottea, Olomouc* 15(2): 203–234

Zapata, A. M., & J. C. Donato, 2008. Regulación hidrobiológica de la biomasa algal béntica In Donato, J. C. (ed), *Ecología de un río de montaña de los Andes colombianos (Río Tota, Boyacá)*. Universidad Nacional de Colombia: 103–125.

11. PROTOCOLO DE MONITOREO, IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DIATOMEAS

El protocolo se propuso con el fin de establecer lineamientos para la colecta y análisis de las muestras de diatomeas en el laboratorio de aguas del Acueducto de Bogotá para la valoración de la calidad del agua en los diferentes estudios que lo requieran tanto para clientes internos y externos. Se relaciona este protocolo en el **Anexo 28**.

12. CATÁLOGO DE DIATOMEAS

Se diseñó un catálogo iconográfico de las diatomeas que resume la diversidad encontrada en cada sistema en el cual, se especifican los caracteres diferenciadores para las especies registradas en las fuentes superficiales de abastecimiento de la EAAB-ESP y se relaciona en el **Anexo 29**.

13. RIESGOS AMBIENTALES Y SST

13.1 SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO

13.1.1 Política de seguridad y salud en el trabajo

Las políticas de seguridad y salud en el trabajo de la compañía se verificaron en el mes de febrero durante el proceso de revisión por la dirección que se realiza semestralmente y se socializaron al 100% del personal del proyecto, así como al COPASST de la compañía.

13.1.1.1 Objetivos y metas de seguridad y salud en el trabajo

El sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo de CPA INGENIERÍA, está establecido con el fin de prevenir los accidentes laborales que pudieran presentarse debidos a las actividades del proyecto y que se encuentran identificados en la Matriz de Peligros, mediante la implementación de los controles, así mismo realizar gestión para prevenir enfermedades laborales que pudieran llegar a generarse debidas al desarrollo de las actividades del presente proyecto.

A continuación, se describen los resultados de los indicadores de seguridad y salud en el trabajo que nos permiten medir la eficacia de los controles implementados.

Frecuencia de accidentalidad: Durante el periodo evaluado no se presentaron accidentes debidos a las actividades desarrolladas por el personal del proyecto.

Severidad de accidentalidad: Dado que no se presentaron accidentes no tenemos días perdidos causados por accidentes laborales.

Proporción de accidentes mortales: Durante el periodo evaluado el personal del proyecto no presentó ningún accidente, así mismo, no hay pérdida de vidas en accidentes laborales.

Ausentismo por causa medica: No se presentan días de ausentismo de los trabajadores que participan en el proyecto.

Nivel de Incidencia y Prevalencia: El principal riesgo de enfermedad laboral en los trabajadores del proyecto es el osteomuscular y el visual, debido a que durante la mayor parte del tiempo los trabajadores deben permanecer en su puesto de trabajo sentados y realizando movimientos un poco forzados frente al microscopio, o realizando informes frente al computador, sin embargo, no se tuvieron reportes de enfermedad laboral en ninguno de los trabajadores.

13.1.2 Afiliaciones a seguridad social y riesgos laborales

En la gráfica podemos evidenciar que mes a mes la totalidad de los trabajadores que se encuentran en el proyecto cuentan con seguridad social y riesgos laborales.



13.1.3 Inducción y capacitación

Durante el periodo evaluado no se presentaron cambios en el personal del proyecto, por lo tanto, no hubo la necesidad de realizar inducciones.

Así mismo en este periodo en cumplimiento del plan de trabajo establecido para la compañía se realizaron las siguientes capacitaciones, de acuerdo con los riesgos evaluados.

13.1.3.1 Emergencias

- Capacitar y Socializar el Plan de Emergencias.
- Capacitación en primeros auxilios básicos

13.1.3.2 Bioseguridad

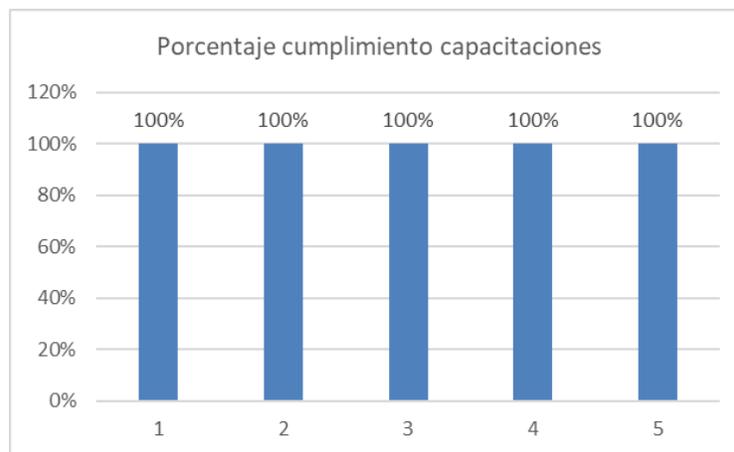
- Capacitaciones en Medidas de bioseguridad COVID-19

13.1.3.3 Riesgo biomecanico

- Capacitaciones Higiene Postural y de Columna - Ejercicios de Relación y Flexibilidad - Movimientos Repetidos y Repetitivos - estiramiento - Calistenia. - Líderes pausas activas

13.1.3.4 Copasst

- Socialización para el COPASST en Funciones y Responsabilidades



13.1.4 Control de los riesgos

13.1.4.1 Osteomuscular y visual

Durante el periodo evaluado se realizan pausas activas con el personal, así como capacitaciones Higiene Postural y de Columna - Ejercicios de Relación y Flexibilidad - Movimientos Repetidos y Repetitivos - estiramiento - Calistenia. - Líderes pausas activas.

Se dispone el espacio de tiempo para realizar juntamente con todo el personal, la pausa activa durante 15 minutos en horas de la tarde, la metodología es a través de dinámicas donde se realice movilidad articular de todo el cuerpo.

13.1.4.2 Riesgo químico

Dentro de los riesgos más importantes en la actividad de la compañía está el químico. Para ello la trabajadora cuenta con sus elementos de protección personal adecuados.

Las sustancias químicas utilizadas en el laboratorio de CPA INGENIERÍA S.A.S., para el desarrollo de las actividades del proyecto están rotuladas e identificadas de acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado. Cada una de las sustancias se encuentra caracterizada y cuenta con su respectiva hoja de seguridad.

PERÓXIDO DE HIDRÓGENO 30%	SOLUCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO	NAPHRAX
		

13.1.4.3 Locativo

Con el fin de prevenir accidentes locativos, los equipos y elementos del laboratorio se encuentran organizados de manera adecuada como se muestra a continuación.

continuación, se evidencia la organización de los elementos del laboratorio dispuestos para el proyecto



13.1.4.4 Promoción y prevención

Se realiza actividad de P&P con todo el personal de la compañía como actividad del Comité Paritario de Seguridad y Salud en el Trabajo de Hábitos y Estilos de Vida Saludable con un desayuno con Fruta.



13.1.4.5 Emergencias

En el mes de mayo se realiza simulacro en el laboratorio de la compañía con el fin de poner en práctica el procedimiento de emergencias por derrame de químicos.

Se simuló el derrame de una sustancia química en el laboratorio, en el cual la directora se lesiona la mano con una sustancia química, en seguida los brigadistas activan la evacuación de los trabajadores del área afectada y la lesión es atendida. La analista del laboratorio realiza la atención del derrame utilizando los elementos para el control de derrames dispuestos para ello.



13.1.4.6 Biológicos

La compañía cuenta con personal de aseo quien de acuerdo con la programación mantiene la limpieza de los puestos de trabajo y los baños.

13.2 BIOSEGURIDAD

13.2.1 Covid-19

Se realiza seguimiento al esquema de vacunación para Covid-19 del personal participante en el proyecto, evidenciando que tanto el personal interno (5) como externo (4) cuenta la totalidad de sus dosis aplicadas minimizando las probabilidades de portar y propagar el virus.

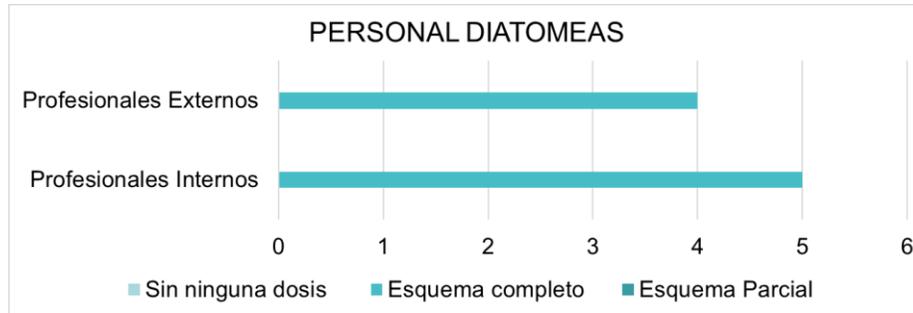


Figura 104. Personal Diatomeas

13.2.2 Auto reportes de salud

13.2.2.1 Objetivo

Identificar posibles casos de contagio de Covid-19 entre la población trabajadora de la organización que participa en el proyecto “Indicadores de calidad diatomeas”, a fin de tomar las medidas sanitarias oportunas según corresponda de acuerdo con los lineamientos legales vigentes establecidos y dar seguimiento las condiciones de salud del personal.

13.2.2.2 Alcance

Aplica para el personal activo que desarrolla actividades para el proyecto “Indicadores de calidad diatomeas”.

13.2.2.3 Metodología

Mediante la herramienta formularios de Google se aplica de manera digital la encuesta de auto reporte de condiciones de salud.

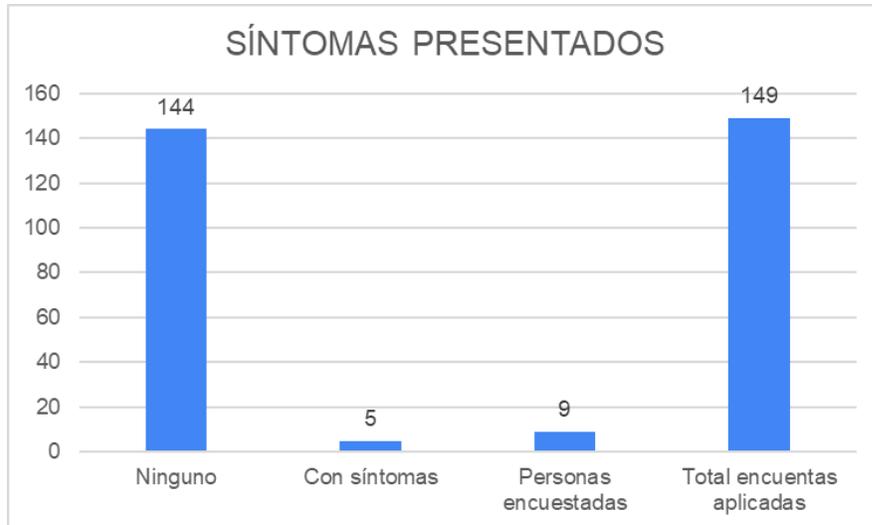


Figura 105. Síntomas presentados

Mediante la herramienta **Google Forms** se encuestó al personal de manera semanal y se realizó la siguiente pregunta al personal participante en el proyecto: ¿Ha presentado alguno de los siguientes síntomas o situaciones?

Donde se evidencia que de las 9 personas participantes del Proyecto 5 manifestaron presentar síntomas asociados al Covid-19 sin embargo ninguno de los casos fue confirmado positivo. El total de encuestas aportadas durante el periodo fue de 149.

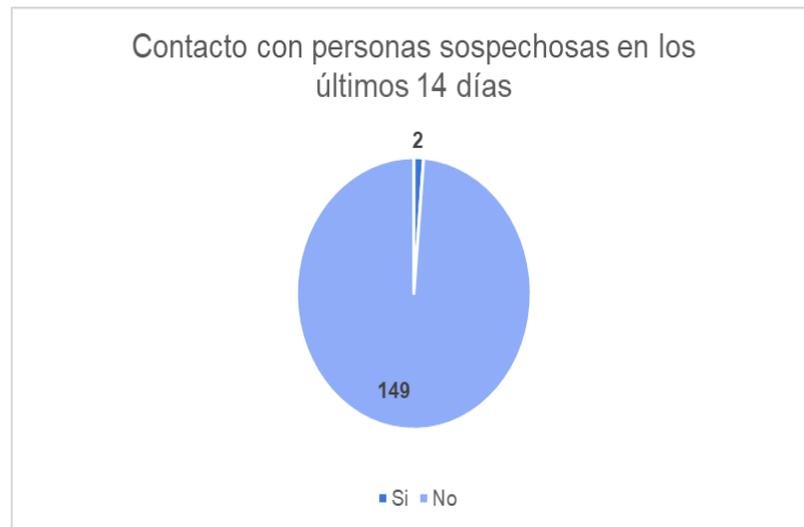


Figura 106. Contacto con personas positivas

Se formuló la pregunta: ¿Ha tenido contacto con personas que hayan presentado los Síntomas o Positivos para Covid en los últimos 14 días?

A la cual 2 personas manifestaron haber tenido contacto con casos sospechosos de ser positivos, durante dichos periodos en que se registraron los reportes se estableció comunicación continua para garantizar el cumplimiento de los protocolos de bioseguridad, dichos casos no fueron confirmados positivos.

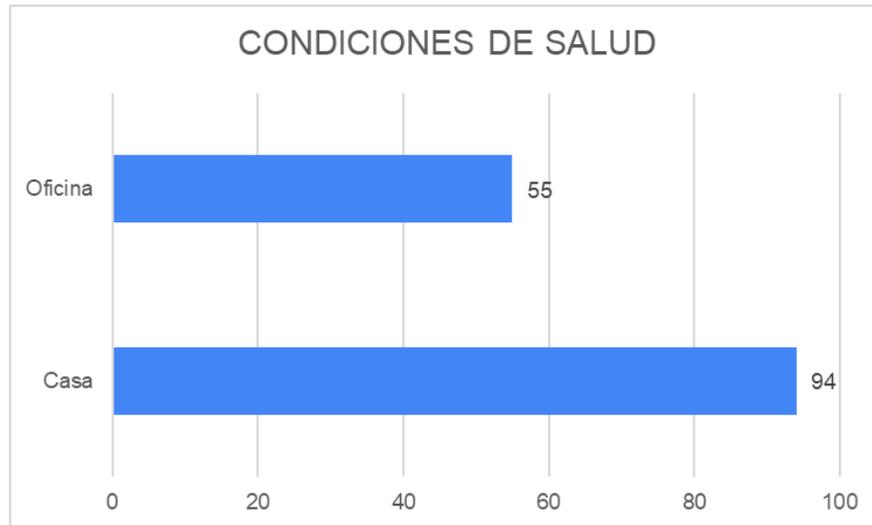


Figura 107. Modalidad de trabajo

Durante el seguimiento se ejecutaron actividades en campo las cuales tuvieron cobertura en Seguridad y Salud en el Trabajo según los estándares normativos y contractuales establecidos.

La modalidad de trabajo que prevaleció fue presencial, dado que para el mes de septiembre se retornó a la presencialidad en la mayoría de casos cumpliendo con los protocolos de bioseguridad definidos en el marco normativo con un alcance para la totalidad del personal, sin embargo se observa que gran parte de las actividades realizadas se ejecutaron desde casa.

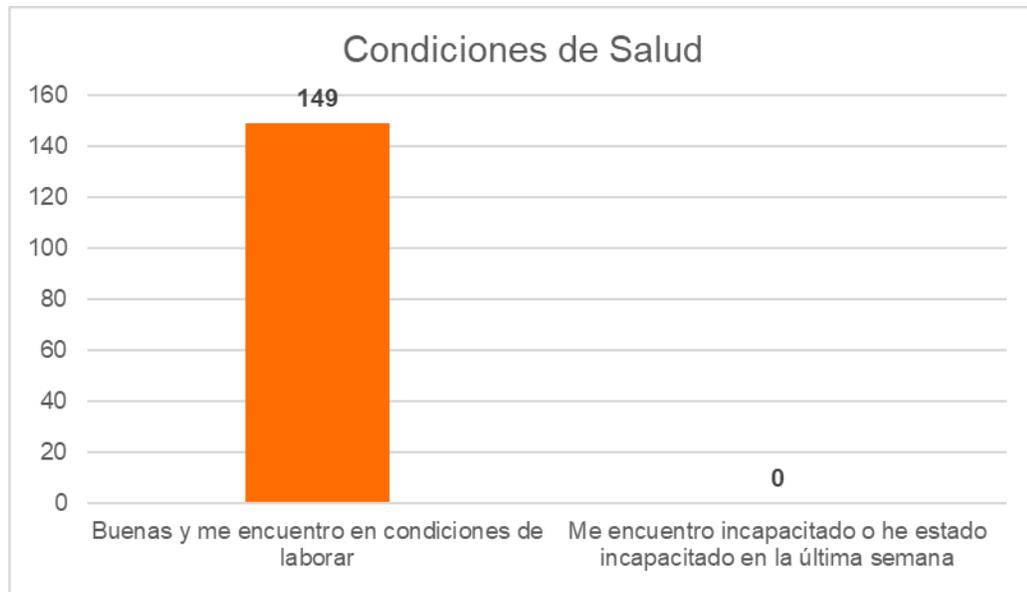


Figura 108. Condiciones de salud

Se solicitó al personal referir mediante el formulario indicar sus condiciones de salud son, donde podían referir una de las siguientes afirmaciones:

- Buenas y me encuentro en condiciones de laborar
- Me encuentro incapacitado o he estado incapacitado en la última semana

La grafica refleja los resultados obtenidos, donde no se presentaron incapacidades en el personal participante del proyecto.

13.3 GESTIÓN AMBIENTAL

La Compañía en su Plan de Gestión de Residuos Sólidos tiene establecidos diferentes tipos de residuos como resultado de su actividad, entre ellos están los residuos ordinarios resultantes de servicio de consumo de alimentos, cafetería y baños, los cuales se disponen con el servicio público de basuras. Los residuos reciclables, como son papel plástico cartón y vidrio son gestionados con recicladores de la zona.

- El personal recibió capacitación en cuanto a clasificación de disposición de Residuos

Los residuos peligrosos, los cuales son resultado de las actividades del laboratorio se han clasificado en:

Y34 – Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida.

Y42 – Disolventes orgánicos con exclusión de disolventes halogenados.

Debido a que el montaje se finalizó entre el 11 y 15 de marzo por parte de los profesionales de CPA INGENIERÍA S.A.S. y la profesional encargada, se encuentra en proceso de guardar las muestras en los respectivos viales, no se generaron más residuos dentro del proyecto.

Acorde a la normatividad nacional vigente se realiza la disposición de los residuos según el código de colores establecido. Los bidones que teníamos almacenados hasta el momento fueron recogidos para disposición final el 22 de marzo, estamos a la espera de certificado de disposición.



DESCONT SAS ESP
R-RT-07

MANIFIESTO DE RECOLECCION DE RESIDUOS
AVISO IMPORTANTE

Estimado Cliente, cualquier cambio o ajuste al manifiesto de recolección deberá solicitarse dentro de los 3 días hábiles siguientes, usando los canales de comunicación establecidos: Tel: 6780005, mail: servicioalcliente@descont.com.co

FECHA: 2022-03-22 11:06:57
ID MANIFIESTO: 3655367
ID CLIENTE: 37045
CLIENTE: COMPAÑIA DE PROYECTOS AMBIENTALES E INGENIERIA S.A.S. CPA INGENIERIA S.A.S.
PA: INGENIERIA S.A.S.
DIRECCION: CL 106 NISSA 21
CIUDAD: BOGOTA
NIT: 830042614
CC OPERARIO: 1033506151
OPERARIO: ANDRES ROBERTO BOLACA PINZON
CC AUXILIAR: 1085167809
AUXILIAR: LUIS JOSE ALVARADO ORTIZ
VEHICULO: G0V 898

RESIDUOS

RESIDUO -> CANT / KG
ENVASES DE QUIMICOS -> (1 / 1)
PLASTICO CONTAMINADO -> (1 / 1)
QUIMICOS VENCIDOS O CON AVERIAS -> (1 / 18)
RESIDUOS QUIMICOS -> (2 / 69)

TOTAL Cantidad: 5
TOTAL Kilos: 89.00

CLIENTE

NOMBRE: VICTOR BOGANO
CC: 78704389
OPERARIO

NOMBRE: ANDRES ROBERTO BOLACA PI



DESCONT SAS ESP
Gestión Integral de Residuos

Acta No: 16365135

CERTIFICADO DE RECOLECCION, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS

DESCONT S.A.S. E.S.P., con NIT 804002433-1, certifica que COMPAÑIA DE PROYECTOS AMBIENTALES E INGENIERIA S.A.S. CPA INGENIERIA S.A.S., con número de identificación 830042614-3 ubicado(a) en, CL 106 NISSA-21, municipio de BOGOTÁ entregó para tratamiento y disposición final los residuos peligrosos, el día 22 de marzo de 2022 que se detallan a continuación, según los manifiestos: 3655367.

Id Cliente: 37045

Clasificación	Tipo Residuo	Kilogramos	Tratamiento - Empresa
A4130	ENVASES DE QUIMICOS	1,00	Celda de Seguridad - TRACOL SAS ESP
A4140	RESIDUOS QUIMICOS	69,00	Celda de Seguridad - TRACOL SAS ESP
A4140	QUIMICOS VENCIDOS O CON AVERIAS	18,00	Celda de Seguridad - TRACOL SAS ESP
A4140	PLASTICO CONTAMINADO	1,00	Celda de Seguridad - TRACOL SAS ESP

Total de Kilogramos: 89,00

El proceso de tratamiento es el siguiente:

Celda de Seguridad:
La disposición final de los residuos se realizó en la celda de seguridad de la empresa TRATAMIENTOS Y RELLENOS AMBIENTALES DE COLOMBIA S.A.S. E.S.P ubicada en la vereda balsillas jurisdicción del municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca; quien cuenta con licencia ambiental otorgada por la CAR mediante resoluciones 989 del 26 de mayo de 2015 y 1821 del 14 de julio de 2017.

Los residuos fueron transportados por DESCONT S.A.S. E.S.P. hasta las instalaciones de las plantas de tratamiento mencionadas en este documento.

Se expide a solicitud del interesado el 19 de agosto de 2022

Verifique la autenticidad de este certificado visitando el siguiente enlace o escaneando el código QR:
https://clientes.descont.com.co/clientes/@report-viewer?id=report_Actualizacion&id=16365135


OLGA JANETH LOPEZ AGUDELO
Representante Legal



Figura 109. Gestión Ambiental

13.4 MATRIZ DE RIESGOS

El total de Riesgos identificados del proyecto es de 73, de los cuales a lo largo del Proyecto se identificó la materialización de 5 de ellos, de las cuales se les realizó el seguimiento correspondiente en pro de minimizar los impactos de cada uno verificando y realizando seguimiento periódico en conjunto con el departamento de Proyectos de la compañía.




Figura 110. Materialización Riesgos

De los 5 Riesgos identificados 2 de ellos fueron determinados cerrados en su materialización a la fecha, debido a que se identificaron, pero se tomaron las medidas de acción correctivas pertinentes, inmediatas y necesarias para poder cerrar el hallazgo y se implementó con éxito el plan de acción correspondiente por lo cual no se volvió a presentar en el transcurso de ejecución del proyecto.




Figura 111. Nivel de Riesgos

Y 3 de ellos fueron los riesgos a los que periódicamente se realizó seguimiento para tratar de minimizar los impactos, vigilar su comportamiento e implementar planes de emergencia adecuados para ejercer un control del riesgo. Entre eso riesgos 3 de ellos fueron calificados como riesgos Altos y 2 Riesgo Bajo.




Figura 112. Seguimiento Materialización

Tabla 25. Matriz de Riesgos

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CONSECUENCIA DE LA OCURRENCIA DEL EVENTO	ESTADO	NIVEL DE RIESGO	PLAN DE ACCIÓN	ESTADO DE SEGUIMIENTO	FECHA PROGRAMADA DE CIERRE
31	Demoras en los procesos de selección y contratación del personal.	Retrasos en la ejecución del contrato. Reprogramación de actividades. Incremento en costos. Tiempos muertos.	Seguimiento	Alto	<p>Contar con un listado de profesionales suplentes para cada uno de los perfiles del proyecto.</p> <p>Realizar la contratación de los profesionales del proyecto, estableciendo los productos y los tiempos de entrega de común acuerdo con cada profesional</p> <p>Asegurar que cada uno de los contratos de los profesionales críticos cuente con la respectiva clausula penal por incumplimiento del contrato</p>	<p>Todo el personal del proyecto se encuentra contratado de manera formal por parte de la compañía.</p> <p>Los profesionales críticos, quienes se encuentra por prestación de servicios cuentan en su contrato con la respectiva cláusula de penalidad</p> <p>06-09-2021 Se está ubicando el personal suplente para el proyecto.</p> <p>16-09-2021 En el transcurso de la semana se realiza revisión de bases de datos de profesionales, sin embargo no se encuentran profesionales que cumplan. Para el viernes 17 de septiembre se programa la publicación para la consecución de personal de back up.</p>	<p>Se realiza el cierre del seguimiento debido a la finalización del proyecto.</p> <p>El riesgo no vuelve a materializarse.</p>
40	Errores u omisiones en la coordinación e integración de equipos, materiales, recurso humano y demás bienes requeridos para la ejecución de las actividades del contrato.	Reprogramación de actividades. Demoras en la ejecución del contrato. Incremento en costos. Tiempos muertos.	Seguimiento	Alto	<p>Ajuste del Plan de Calidad que incluye la programación de actividades.</p> <p>Seguimiento semanal al cronograma de actividades</p>	<p>07-09-2021 Se encuentra ajustado el Plan de Calidad y será entregado para revisión por parte del EAAB el día 09-09-2021.</p> <p>Se realiza seguimiento semanal al Cronograma de Actividades identificando posibles retrasos y estableciendo planes de acción.</p> <p>16/09/2021 Se continúa con la realización de ajuste del cronograma de acuerdo con las observaciones emitidas por EAAB.</p>	<p>Se realiza el cierre del seguimiento debido a la finalización del proyecto.</p> <p>El riesgo no vuelve a materializarse.</p>
78	Ineficiencia en el manejo de equipos. Daños o pérdida de equipos por falta de habilidad y/o conocimiento de proveedores Subcontratistas.	Reprogramación de actividades. Demoras en la ejecución del contrato. Incremento en costos.	Seguimiento	Medio	<p>Se revisa el tipo de empaque utilizado para el envío de las placas y se refuerza.</p> <p>Se realiza el cambio de proveedor de servicio de transporte.</p>	<p>Se envían nuevamente las placas sin reportarse novedades.</p>	<p>Se realiza el cierre del seguimiento debido a la finalización del proyecto.</p> <p>El riesgo no vuelve a materializarse.</p>

14. LECCIONES APRENDIDAS

▪ Lecciones aprendidas en el desarrollo del proyecto

Recopilación de la información histórica y conservación de las muestras:

El presente proyecto fue posible gracias a la información fisicoquímica histórica con la que cuenta la EAAB-ESP, así como las muestras colectadas durante el desarrollo del proyecto “Evaluación Limnológica de las fuentes de agua captadas por el Acueducto de Bogotá”, en los últimos 16 años y dadas en custodia a la colección del Museo Javeriano de Historia Natural. El resguardo tanto de las muestras como la información fisicoquímica, constituyeron un valor agregado del proyecto.

Asesoría permanente con taxónomos:

Se recomienda acompañamiento permanente de especialistas en taxonomía para asegurar la validez de las determinaciones taxonómicas. En este aspecto, se contó con varios encuentros de trabajo entre el equipo de especialistas de la DIE y de CPA, lo que permitió identificar en tiempo récord y de manera consistente las especies y morfoespecies presentes en las fuentes de abastecimiento del Acueducto. El intercambio de información y conocimiento entre expertos es fundamental en todas las fases del proyecto.

Número de muestras, análisis previo y tiempo de ejecución:

Para robustecer el modelo de bioindicación aquí presentado es fundamental la inclusión de un mayor número de muestras de todas las fuentes de monitoreo. Las muestras históricas provenientes del seguimiento limnológico permitirá seguir revisando el funcionamiento de los modelos aquí desarrollados. El tiempo de ejecución dependerá del número de muestras históricas a incluir y del conocimiento previo que se posea de la composición de especies en las cuencas de estudio.

Para mejorar el tiempo de ejecución en un proyecto de estas dimensiones, es fundamental dedicar mayor tiempo al análisis cualitativo de las muestras antes de proceder a los conteos de las mismas.

Muestras con densidades subóptimas de diatomeas:

Para evitar el preconteo inicial para considerar una muestra apta para el análisis de diatomeas, se hace necesario que en el análisis del perifiton se rotulen aquellas muestras con mayor abundancia y diversidad de diatomeas para ser incluidas en el análisis de diatomeas.

Apropiación de conocimiento experto:

Para el desarrollo de un proyecto con alcances similares en las empresas del sector, se requiere una comunidad de práctica y aprendizaje para apropiación de conocimiento experto en taxonomía y ecología para desarrollar modelos robustos de bioindicación. El

conocimiento del funcionamiento ecológico de los sistemas en estudio es fundamental a la hora de tomar decisiones informadas a la luz de los resultados estadísticos del modelo.

Aspectos administrativos:

Para el óptimo funcionamiento del proyecto se requiere tener la mínima rotación del personal, por lo que se sugiere mantener continuidad en las actividades y un equipo interdisciplinario para el desarrollo del proyecto.

Gestión Ambiental

Entregar de manera separada al gestor de RESPEL los residuos del proyecto y los demás residuos del laboratorio.

ANEXOS

- Anexo 1 Formato 49 cadena de custodia y vigilancia matriz agua V01
- Anexo 2 Formatos preparados
- Anexo 3 Disposición de residuos
- Anexo 4 Muestras para validación del modelo
- Anexo 5 Formato morfometría
- Anexo 6 acrónimos utilizados para las especies
- Anexo 7 Base de datos fisicoquímicas para muestras del modelo
- Anexo 8 Medidas de tendencia central zona Chuza
- Anexo 9 Medidas de tendencia central sistema Río Blanco
- Anexo 10 Medidas de tendencia central sistema San Rafael
- Anexo 11 Medidas de tendencia central sistema Tibitoc
- Anexo 12 Medidas de tendencia central sistema Chisacá
- Anexo 13 Medidas de tendencia central sistema Regadera
- Anexo 14 Medidas de tendencia central sistema Yomasa
- Anexo 15 Medidas de tendencia central sistema El Delirio
- Anexo 16 Composición comunidad de diatomeas
- Anexo 17 Registro de abundancia sistema chuza
- Anexo 18 Registro de abundancia sistema Río Blanco
- Anexo 19 Registro de abundancia sistema San Rafael
- Anexo 20 Registro de abundancia sistema Tibitoc
- Anexo 21 Registro de abundancia sistema Chisacá
- Anexo 22 Registro de abundancia sistema Regadera
- Anexo 23 Registro de abundancia sistema Yomasa
- Anexo 24 Registro de abundancia sistema El Delirio
- Anexo 25 Resumen del modelo sistema Norte
- Anexo 26 Resumen del modelo sistema Sur y El Delirio
- Anexo 27 Resumen del modelo sistema San Rafael y Tibitoc
- Anexo 28 Protocolo de monitoreo, cuantificación e identificación de diatomeas
- Anexo 29 Catálogo iconográfico de diatomeas
- Anexo 30 Gestión Ambiental