EnSoíl

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

Coeficientes de exportación de parámetros declarados latentes y saturados según uso de suelo en la cuenca del río Maipo

INFORME FINAL

Rev. 2

Octubre 2026

Información del documento

Estudio	Coeficientes de exportación de parámetros declarados latentes y saturados según uso de suelo en la cuenca del río Maipo		
Mandante	Ministerio del Medio Ambiente		
ID licitación	608897-74-LE25	**Código proyecto**	P2508
Documento	Informe final	**Versión**	Rev2

Control de cambios

	Revisión 0	**Revisión 1**	**Revisión 2**
Elaborado por	Jorge Alcaíno Francisca Mihovilovic Simón Burgos Magdalena Lagos Alex Samuel	Jorge Alcaíno Francisca Mihovilovic Simón Burgos Magdalena Lagos Alex Samuel	Jorge Alcaíno Francisca Mihovilovic Simón Burgos Magdalena Lagos Alex Samuel
Fecha	01-09-2026	01-10-2026	26-10-2026
Revisado por	Francisca Mihovilovic	Francisca Mihovilovic	Francisca Mihovilovic
Fecha	01-09-2026	01-10-2026	26-10-2026
Aprobado por	Jorge Alcaíno	Jorge Alcaíno	Jorge Alcaíno
Fecha	01-09-2026	01-10-2026	26-10-2026



Jorge Alcaíno
Cofundador y Gerente de Proyectos
EnSoil

EnSoil

Av. Apoquindo 6410 Of 605
Las Condes, Santiago
www.ensoil.cl

Contenido

GLOSARIO 12

1 INTRODUCCIÓN 14

1.1 ANTECEDENTES 14
1.2 OBJETIVO DEL ESTUDIO 16
1.2.1 Objetivo general 16
1.2.2 Objetivos específicos 16
1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO 16
1.4 ORGANIZACIÓN DEL INFORME 18
1.5 REUNIONES CON LA CONTRAPARTE TÉCNICA Y ACTIVIDADES 19

2 RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA DE COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN 20

2.1 RECOPILACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN 20
2.1.1 Definición, uso y limitaciones de los coeficientes de exportación 20
2.1.2 Recopilación de coeficientes de exportación para parámetros saturados y latentes 22
2.2 REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DEL PROYECTO GORE, SEREMI MA, AQEX (2023-2024) 29
2.2.1 Fuentes de emisión y actividades 30
2.2.2 Coeficientes de exportación 35

3 MEDICIONES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO EN ÁREAS DE VIGILANCIA 37

3.1 BASES METODOLÓGICAS DEL PLAN DE MUESTREO 38
3.1.1 Trabajo con capas de información geográfica 38
3.1.2 Definición de número de muestras 44
3.1.3 Tipos de muestras 45
3.1.4 Consideraciones para el muestreo 46
3.2 EJECUCIÓN DEL MUESTREO 46
3.2.1 Planificación del muestreo 46
3.2.2 Metodología general 46
3.2.3 Hallazgos y dificultades 50
3.2.4 Ajustes realizados al plan de muestreo propuesto 52
3.2.5 Ubicación de puntos de muestreo 54
3.2.6 Descripción de las muestras 57
3.2.7 Análisis en laboratorio de muestras 61
3.3 RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO 67
3.3.1 Resultados de muestras de suelo, sedimentos y polvo 67
3.3.2 Resultados de muestras de agua 72
3.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE MUESTREO 73
3.4.1 Análisis estadístico de muestras de suelo 73
3.4.2 Metodología del análisis estadístico 73
3.4.3 Diferencias de concentración según uso de suelo 74
3.4.4 Diferencias de concentración según fuente difusa 74
3.4.5 Diferencias de concentración según área de vigilancia 74
3.4.6 Análisis espacial de muestras de suelo 80
3.4.7 Análisis de muestras de agua 84
3.4.8 Análisis de resultados particulares 84

4 METODOLOGÍA DE MODELACIÓN 86

4.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE TRANSPORTE DE SOLUTOS 86
4.2 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN PARA EL MODELO 88
4.2.1 Topografía 88
4.2.2 Tipo de suelo 89
4.2.3 Uso de suelo 91
4.2.4 Datos fluviométricos 99
4.2.5 Datos meteorológicos 105
4.2.6 Datos de calidad del agua 111
4.3 HERRAMIENTA DE MODELACIÓN 130
4.3.1 Análisis crítico de modelos para estimar coeficientes de exportación 130
4.3.2 Selección de herramienta de modelación óptima 133

5 MODELACIÓN PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN 141

5.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA OBTENER COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN 141
5.1.1 Configuración y delimitación de la cuenca 141
5.1.2 Definición de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) 144
5.1.3 Datos climáticos y escenarios de precipitación 148
5.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE MODELACIÓN 151
5.2.1 Validación hidrológica 151
5.2.2 Validación de sedimentos 157
5.3 DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN 160
5.3.1 Evaluación de incertidumbre 163
5.3.2 Nitrógeno de nitrato 165
5.3.3 Fósforo de Ortofosfato 166
5.3.4 DBO_5 167
5.3.5 Cloruro 168
5.3.6 Zinc disuelto 169
5.3.7 Sulfatos 171

6 ESTIMACIÓN DE CARGA ANUAL DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 179

6.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN 179
6.2 ESTIMACIÓN DE CARGAS ANUALES POR USO DE SUELO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 195
6.2.1 Evaluación de incertidumbre en estimación de cargas de contaminantes 203
6.2.2 Carga de Nitrógeno de Nitrato 204
6.2.3 Carga de Fósforo de Ortofosfato 209
6.2.4 Carga de DBO_5 214
6.2.5 Carga de Zinc disuelto 219
6.2.6 Carga de Sulfatos 224
6.2.7 Carga de Cloruros 229

7 ANÁLISIS INTEGRAL DE LA CARGA CONTAMINANTE 235

7.1 CONTRASTE DE RESULTADOS DE MODELACIÓN DE CARGA Y DE MUESTREO DE SUELO 235
7.1.1 Convergencias entre ambas líneas de evidencia 235
7.1.2 Nitrato: una aparente discrepancia explicable por representatividad de muestreo y por la diferencia entre stock y flujo 236
7.1.3 Zinc disuelto en las AV MP-1 y MP-2 236

7.1.4 pH: evidencia de suelo no capturada por los coeficientes de exportación 236
7.1.5 Síntesis del contraste 237
7.2 Análisis global de contaminantes, fuentes aportantes y sensibilidad a la precipitación 237
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 239
8.1 Conclusiones 239
8.1.1 Antecedentes e información de base 239
8.1.2 Campaña de muestreo 239
8.1.3 Herramienta de modelación 239
8.1.4 Coeficientes de exportación 240
8.1.5 Cargas y su respuesta a la precipitación 240
8.1.6 Distribución espacial de las fuentes 241
8.1.7 Contribución de las fuentes difusas a la condición observada 241
8.1.8 Contraste entre suelo y modelación 242
8.2 Recomendaciones 242
8.3 Limitaciones, incertidumbres y brechas de información 243
8.4 Aplicabilidad de los resultados al PPDH del río Maipo 244
9 BIBLIOGRAFÍA 247

Tablas

Tabla 1 – Parámetros considerados en la NSCA y su estado 17
Tabla 2 – Estructura y contenidos del informe de acuerdo a bases técnicas 18
Tabla 3 – Detalle de reuniones de coordinación y actividades 19
Tabla 4 – Coeficientes de exportación para nitratos y nitrógeno total 22
Tabla 5 – Coeficientes de exportación para ortofosfato y fósforo total 24
Tabla 6 – Coeficientes de exportación para cloruros 26
Tabla 7 – Coeficientes de exportación para sulfato 27
Tabla 8 – Coeficientes de exportación para zinc 28
Tabla 9 – Resumen inventario de actores y/o actividades de la cuenca del río Maipo 32
Tabla 10 – Descripción de actividades de fuentes difusas 33
Tabla 11 – Clasificación de fuentes en estudio GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) 33
Tabla 12 – Actividades industriales con respectivos parámetros 34
Tabla 13 – Coeficientes de exportación utilizados en estudio GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) 36
Tabla 14 – Resultados emisiones fuentes difusas, estudio GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) 36
Tabla 15 – Comparativa coeficientes de exportación GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) con literatura 37
Tabla 16 – Fuentes del inventario reclasificadas 41
Tabla 17 – Actividades asociadas a fuentes difusas por área de vigilancia 43
Tabla 18 – Muestras consideradas por área de vigilancia y tipo de fuente difusa 44
Tabla 19 – Inconvenientes y medidas alternativas adoptadas 50
Tabla 20 – Comparación plan de muestreo propuesto y realizado 53
Tabla 21 – Puntos de muestreo realizado 55
Tabla 22 – Descripción de muestras 58

Tabla 23 – Parámetros fisicoquímicos de terreno en agua 60
Tabla 24 – Parámetros analizados para muestras de suelo/sedimento/polvo 61
Tabla 25 – Parámetros analizados para muestras de agua superficial 62
Tabla 26 – Métodos y límites analíticos indicados por el laboratorio (suelos) 62
Tabla 27 – Métodos y límites analíticos indicados por el laboratorio (aguas) 63
Tabla 28 – Resultados de muestras de suelo, sedimentos y polvo 67
Tabla 29 – Resultados de muestras de agua 72
Tabla 30 – Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis por parámetro, según fuente difusa, uso de suelo y área de vigilancia 75
Tabla 31 – Concentración media por fuente difusa para parámetros de mayor relevancia 79
Tabla 32 – Concentración media por uso de suelo para parámetros de mayor relevancia 79
Tabla 33 – Concentración media por área de vigilancia para parámetros de mayor relevancia 79
Tabla 34 – Resultados de muestras de agua e información base 84
Tabla 35 – Comparación de parámetros de agua entre puntos de Extracción de Áridos (MA-4) y puntos de Background/Cond. Natural (MA-2, MA-3) 85
Tabla 36 – Caracterización de muestras de polvo urbanas 85
Tabla 37 – Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos de la cuenca del Río Maipo, para dos bandas de profundidad: 0-30 cm y 30-200 cm 90
Tabla 38 – Faenas mineras que fueron incluidas en el mapa de uso de suelo 92
Tabla 39 – Usos de suelo y cobertura en la cuenca del río Maipo (km2 y % de la zona). 96
Tabla 40 – Estaciones fluviométricas con datos para el periodo de modelación. El promedio anual en m3/s corresponde para el periodo 2014-2024 99
Tabla 41 – Estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación de la cuenca del río Maipo, con información diaria para el periodo 2014-2024 de precipitación (Pr), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), humedad relativa (HR), velocidad del viento (Vv) y radiación total (Rad). .. 106
Tabla 42 – Criterio de validación de información de calidad ambiental: Umbral de validez para valores menores al límite de detección (LD) 112
Tabla 43 – Estaciones de medición de calidad del agua para el periodo 2014-2024 112
Tabla 44 – Usos de suelo utilizados en la modelación de la cuenca del Río Maipo en SWAT+ y su cobertura en la cuenca. 144
Tabla 45 – Extracto de archivo de entrada "plant" para parametrización de coberturas vegetacionales . 145
Tabla 46 – Archivo de entrada "urban" para parametrización de usos de suelo antrópicos 145
Tabla 47 – Criterios de clasificación de contenido de carbono orgánico en el suelo (FAO, 2006) 146
Tabla 48 – Clasificación de los suelos de Maipo según su textura, contenido de carbono orgánico, grupo hidrológico NRCS (Hydrological Soil Group, HSG), y Curva Número (CN) 146
Tabla 49 – Valores de albedo adoptados en el modelo para cada tipo de suelo 147
Tabla 50 – Valores de factor de erodibilidad del suelo adoptados en el modelo para cada tipo de suelo 147
Tabla 51 – Parámetros estadísticos de estación meteorológica Quinta Normal Santiago (DMC, 330020) 149
Tabla 52 – Escenarios de precipitación: Clasificación de cada año simulado según condiciones hidrológicas 150
Tabla 53 – Generados de Clima (WGEN) estación Los Tilos 150
Tabla 54 – Puntos de calibración de modelo SWAT+ y estaciones fluviométricas con datos observados de caudal mensual correspondientes 151
Tabla 55 – Errores de calibración hidrológica 155
Tabla 56 – Bandas porcentuales de error superiores e inferiores por estación 156
Tabla 57 – Estaciones de monitoreo de sólidos suspendidos totales utilizadas para la calibración de sedimentos en SWAT+. 157
Tabla 58 – Errores de calibración de sedimentos 160

Tabla 59 – Usos de suelo considerados en el cálculo de coeficientes de exportación de contaminantes. 163
Tabla 60 – Coeficientes de exportación de nitrato (NO_3^--N) en kg/año/ha..... 172
Tabla 61 – Coeficientes de exportación de fósforo de ortofosfato (PO_4^{-3}-P) en kg/año/ha..... 173
Tabla 62 – Coeficientes de exportación de DBO_5 en kg/año/ha 174
Tabla 63 – Coeficientes de exportación de cloruro (Cl^-) en kg/año/ha 175
Tabla 64 – Coeficientes de exportación de zinc disuelto (Zn^{2+}) en kg/año/ha 176
Tabla 65 – Coeficientes de exportación de sulfato (SO_4^{-2}) en kg/año/ha..... 177
Tabla 66 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Nitrógeno de Nitrato (kg/ha/año) 180
Tabla 67 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Fósforo de ortofosfato (kg/ha/año) 182
Tabla 68 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de DBO_5 (kg/ha/año)..... 183
Tabla 69 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Cloruro (Cl^-) (kg/ha/año) 185
Tabla 70 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Zinc disuelto (Zn^{2+}) (kg/ha/año) ... 186
Tabla 71 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Sulfato (SO_4^{-2}) (kg/ha/año) 187
Tabla 72 – Área en hectáreas (ha) por uso de suelo y por área de vigilancia, para los contaminantes nitrato, fosfato, DBO_5, zinc disuelto y sulfato. 195
Tabla 73 – Área en hectáreas (ha) por uso de suelo y por área de vigilancia, para el contaminante cloruro. 195
Tabla 74 – Cargas anuales de nitrógeno de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo). 198
Tabla 75 – Cargas anuales de fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{3-}$) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo). 199
Tabla 76 – Cargas anuales de DBO_5 en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo). 200
Tabla 77 – Cargas anuales de zinc disuelto (Zn) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo). 201
Tabla 78 – Cargas anuales de sulfato (SO_4^{-2}) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo). 202
Tabla 79 – Cargas anuales de cloruro (Cl^-) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo). 203
Tabla 80 – Error de estimación de caudal mensual y carga contaminante a partir de bandas porcentuales inferiores y superiores. 204
Tabla 81 – Concentración aportante de $N\text{-}NO_3^-$ por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA 209
Tabla 82 – Concentración aportante de $P\text{-}PO_4^{-3}$ por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA 214
Tabla 83 – Concentración aportante de DBO_5 por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA 219
Tabla 84 – Concentración aportante de zinc disuelto por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA..... 224
Tabla 85 – Concentración aportante de sulfato por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA 229

Tabla 86 – Concentración aportante de cloruro por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA 234
Tabla 87 – Contraste entre coeficientes de exportación (modelación) y concentraciones en suelo (muestreo) 237
Tabla 88 – Fuentes difusas relevantes por sector para aplicación a PPDH 245

Figuras

Figura 1 – Río Maipo y sus afluentes 15
Figura 2 – Coeficientes de exportación para nitratos y nitrógeno total 24
Figura 3 – Coeficientes de exportación para ortofosfato y fósforo total 26
Figura 4 – Coeficientes de exportación para cloruros 27
Figura 5 – Coeficientes de exportación para sulfatos 28
Figura 6 – Coeficientes de exportación para zinc 29
Figura 7 – Distribución espacial de los usos del suelo en la cuenca del río Maipo 30
Figura 8 – Distribución espacial de los usos del suelo en la cuenca del río Maipo con buffer 1 km del río . 31
Figura 9 – Fuentes difusas en la cuenca del río Maipo 32
Figura 10 – Áreas de vigilancia de la norma 39
Figura 11 – Fuentes difusas 40
Figura 12 – Fuentes difusas consideradas 42
Figura 13 – Fuentes difusas consideradas y usos de suelo asociados 44
Figura 14 – Fotografías de trabajos en terreno 50
Figura 15 – Fotografías de trabajos en terreno 52
Figura 16 – Puntos de muestreo realizado 55
Figura 17 – Concentraciones de nitrato según fuente difusa (p=0,005) 76
Figura 18 – Concentraciones de zinc según fuente difusa (p=0,048) 76
Figura 19 – Concentraciones de plomo según fuente difusa (p=0,045) 77
Figura 20 – Concentraciones de nitrato según uso de suelo (p=0,0006) 77
Figura 21 – pH según área de vigilancia (p=0,0002) 78
Figura 22 – Concentraciones de zinc según área de vigilancia (p=0,014) 78
Figura 23 – Concentraciones de zinc en suelos 81
Figura 24 – Concentraciones de plomo en suelos 81
Figura 25 – Concentraciones de cloruro en suelos 82
Figura 26 – Concentraciones de sulfato en suelos 82
Figura 27 – Concentraciones de nitrato-N en suelos 83
Figura 28 – pH en suelos 83
Figura 29 – Fuentes puntuales y difusas de contaminación en la cuenca del Río Maipo, en estado activo. 87
Figura 30 – Topografía de la cuenca del río Maipo, a partir del MDE de SRTM (USGS, 2017). 88
Figura 31 – Clasificación de tipo de suelo en la cuenca del Río Maipo, en base a propiedades de suelo de CLSoilMaps (Galleguillos et al., 2022) y carbono orgánico (Padarian et al., 2017). 90
Figura 32 – Mapa de ubicación de yacimientos metálicos de la Región Metropolitana. 92
Figura 33 – Formaciones geológicas definidas por SERNAGEOMIN (1980) que tienen un mayor impacto en la calidad del agua. 95
Figura 34 – Mapa de uso de suelos en la cuenca del río Maipo. 98
Figura 35 – Estaciones fluviométricas DGA con disponibilidad de datos para el periodo 2014-2024. 101
Figura 36 – Serie de caudales medios mensuales en el Río Maipo (en m^3/s) [panel superior] y sus tributarios [panel inferior] para el periodo 2014-2024. 102

Figura 37 – Caudales medidos en distintas ubicaciones del río Maipo en julio 2022, diciembre 2022, julio 2023 y diciembre 2024. 103
Figura 38 – Serie de caudales medios mensuales en el Río Mapocho (en m^3/s) [panel superior] y sus tributarios [panel inferior] para el periodo 2014-2024. 104
Figura 39 – Precipitación media anual con respecto a la altitud en la cuenca del Río Maipo para el periodo 1988-2018. Solo se presenta información para estaciones con menos de un 3% de datos faltantes. El gradiente de precipitación se estima en 150 mm/km. 105
Figura 40 – Temperatura media anual con respecto a la altitud en la cuenca del Río Maipo para el periodo 1990-2018. El gradiente de temperatura se estima en -4°C/km. 106
Figura 41 – Estaciones meteorológicas en la cuenca del Río Maipo, con datos para el periodo 2014-2024. 107
Figura 42 – Información meteorológica diaria en la estación AGROMET La Platina (AG162) para el periodo 2014-2024. 108
Figura 43 – Información meteorológica diaria en la estación AGROMET Los Tilos (AG285) para el periodo 2014-2024. 109
Figura 44 – Series de precipitación anual registrada en la cuenca del Río Maipo para el periodo 2014-2024. 110
Figura 45 – Precipitación media mensual en la cuenca del Río Maipo para el periodo 2014-2024. 111
Figura 46 – Ubicación de estaciones de calidad de agua, clasificadas según fuente: agua superficial DGA, pozo DGA y agua superficial Alto Maipo. 115
Figura 47 – Mediciones de Cloruro (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024. 117
Figura 48 – Mediciones de zinc disuelto (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024. 118
Figura 49 – Mediciones de Sulfato (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024. 119
Figura 50 – Mediciones de Nitrógeno de Nitrato (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024. 120
Figura 51 – Mediciones de Fósforo de Ortofosfato (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024. 121
Figura 52 – Mediciones de DBO_5 (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024. 122
Figura 53 – Concentración media de nitrógeno de Nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo. 125
Figura 54 – Concentración media de fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{-3}$) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo. 126
Figura 55 – Concentración media de DBO_5 en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo. 127
Figura 56 – Concentración media de zinc disuelto en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo 128
Figura 57 – Concentración media de Sulfatos (SO_4^{-2}) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo 129
Figura 58 – Concentración media de cloruro (Cl^-) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo 130
Figura 59 – El ciclo del nitrógeno 136
Figura 60 – Reservas de nitrógeno en SWAT+ y procesos que mueven el nitrógeno entre reservas. 137
Figura 61 – El ciclo del fósforo 139
Figura 62 – Reservas de fósforo en SWAT+ y procesos de movimiento de P entre reservas 140

Figura 63 – Subcuencas del modelo SWAT+ y la red hidrográfica asociada. Los números de subcuenca se presentan en color negro y los números de cauces en azul. 143
Figura 64 – Creación de la zona de inundación (floodplain) en QSWAT+ 148
Figura 65 – Ubicación de estaciones fluviométricas utilizadas para la calibración de SWAT+. 153
Figura 66 – Caudales mensuales simulados vs observados (m^3/s) en los ríos Colorado, Olivares, Angostura, Estero Pintué, río Molina, Estero Yerba Loca y Estero Arrayán. 154
Figura 67 – Ubicación de estaciones de monitoreo de sólidos suspendidos totales utilizadas para la calbración de sedimentos en SWAT+. 158
Figura 68 – SST simulados vs observados en los ríos Colorado y Volcán, y estero El Morado. 159
Figura 69 – Ubicación de puntos donde se consideró el cálculo de los coeficientes de exportación de contaminantes de la cuenca del río Maipo. 162
Figura 70 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Nitrógeno de Nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo). 189
Figura 71 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{-3}$) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo). 190
Figura 72 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de DBO_5 (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo). 191
Figura 73 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Cloruro (Cl^-) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo). 192
Figura 74 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Zinc disuelto (Zn^{2+}) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo). 193
Figura 75 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Sulfato (SO_4^{-2}) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo). 194
Figura 76 – Carga de nitrógeno de nitrato en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica. 206
Figura 77 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de nitrógeno de nitrato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica. 206
Figura 78 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Nitrógeno de Nitrato, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO. 207
Figura 79 – Carga de fósforo de ortofosfato en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica. 210
Figura 80 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de fósforo de ortofosfato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica. 211
Figura 81 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Fósforo de ortofosfato, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO. 212
Figura 82 – Carga de DBO_5 en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica. 216
Figura 83 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de DBO_5 en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica. 216
Figura 84 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante DBO_5, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO. 217

Figura 85 – Carga de Zinc disuelto en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica. 220
Figura 86 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de Zinc disuelto en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica. 221
Figura 87 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Zinc disuelto, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO. 222
Figura 88 – Carga de Sulfato en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica. 225
Figura 89 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de Sulfato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica. 226
Figura 90 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Sulfato, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO. 227
Figura 91 – Carga de cloruro en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica..... 230
Figura 92 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de Cloruro en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica..... 231
Figura 93 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Cloruro, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO..... 232

Anexos

Anexo 1 – Registro de reuniones
Anexo 2 – Base de datos de coeficientes de exportación
Anexo 3 – Inventario de fuentes modificado
Anexo 4 – Plan de muestreo propuesto
Anexo 5 – Gestiones realizadas
Anexo 6 – Registros de terreno
Anexo 7 – Informes de laboratorio
Anexo 8 – Base de datos de resultados
Anexo 9 – Información geográfica
Anexo 10 – Modelo
Anexo 11 – Estimación de coeficientes de exportación
Anexo 12 – Estimación de cargas

Glosario

Especies, elementos y parámetros

CE: Conductividad eléctrica
Cl^-: Cloruro (ion)
Cr: Cromo total
DBO_5: Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)
DQO: Demanda Química de Oxígeno
LD: Límite de Detección
LQ: Límite de Cuantificación
N: Nitrógeno
NH_3: Amoniaco (especie no ionizada)
NH_4^+: Amonio (ion)
Ni: Níquel
$N\text{-}NH_4^+$: Amonio expresado como N (o nitrógeno amoniacal o NH_4^+-N)
$N\text{-}NO_2^-$: Nitrito expresado como N (o NO_2^--N)
$N\text{-}NO_3^-$: Nitrato expresado como N (o NO_3^--N)
NO_2^-: Nitrito (ion)
NO_3^-: Nitrato (ion)
NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl
OD: Oxígeno disuelto
P: Fósforo
Pb: Plomo
PE: Poder espumógeno
pH: Potencial de hidrógeno
PO_4^{3-}: Fosfato / Ortofosfato (ion)
$P\text{-}PO_4^{3-}$: Fosfato expresado como P (o PO_4^{3-}-P)
SD: Sólidos sedimentables
SO_4^{2-}: Sulfato (ion)
SST: Sólidos Suspendidos Totales
T°: Temperatura
Zn: Zinc

Unidades

cm: centímetros
ha: hectáreas
kg: kilogramos
L: litros
mg: miligramos
µS: micro Siemens

Siglas

AGROMET: Portal de la Red Agroclimática Nacional

AV: Área de Vigilancia
CONAF: Corporación Nacional Forestal
DGA: Dirección General de Aguas
DMC: Dirección Meteorológica de Chile
FAO: *Food and Agriculture Organization*
GORE: Gobierno Regional
HRU: Unidad de Respuesta Hidrológica
ICPMS: Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
MA: Medio Ambiente
MAE: *Mean Absolute Error* / Error Absoluto Medio
MDE: Modelo Digital de Elevación
MMA: Ministerio del Medio Ambiente
NRCS: *Natural Resources Conservation Service* (USDA)
NSCA: Norma Secundaria de Calidad Ambiental
PBIAS: *Percent Bias* / Porcentaje de sesgo
PTAS: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas
PTRILes: Planta de tratamiento de RILes
PTRS: Planta de tratamiento de residuos sólidos
RILES: Residuos Industriales Líquidos
RM / RMS: Región Metropolitana (de Santiago)
RMSE: *Root Mean Square Error* / Error Cuadrático Medio
SEREMI: Secretaría Regional Ministerial
SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería
SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*
SWAT+: *Soil and Water Assessment Tool*
USDA: United States Department of Agriculture
USEPA: *United States Environmental Protection Agency*
USGS: *United States Geological Survey*

Áreas de vigilancia

AN-1: Angostura 1 (Estero Angostura entre Estero Paine (I) y bajo junta Estero Paine (II))
LA-1: Lampa 1 (Estero Lampa entre Estero Tiltil y Estero Colina)
MA-1: Maipo 1 (Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán)
MA-2: Maipo 2 (Río Yeso)
MA-3: Maipo 3 (Río Olivares)
MA-4: Maipo 4 (Río Maipo entre Estero Angostura y Río Mapocho)
MA-5: Maipo 5 (Río Maipo entre Estero Popeta y Desembocadura)
MP-1: Mapocho 1 (Río Molina)
MP-2: Mapocho 2 (Río Mapocho entre Estero Arrayán y bajo junta Estero de Las Rosas)
PU-1: Puangue 1 (Estero Puangue antes Estero Carén)
PU-2: Puangue 2 (Estero Puangue entre Estero Améstica y bajo junta Estero de los Mayos)

1 Introducción

El presente documento corresponde al Informe final del estudio "Coeficientes de exportación de parámetros declarados latentes y saturados según uso de suelo en la cuenca del río Maipo", encargado por el Ministerio del Medio Ambiente mediante licitación pública N° 608897-74-LE25.

1.1 Antecedentes

Las fuentes difusas o no puntuales (NPS) son formas de contaminación cuya fuente y magnitud no pueden identificarse con precisión, pero que se evidencian en la presencia de contaminantes en cuerpos de agua, suelos o aire (Xepapadeas, 2011).

La calidad del agua se define por sus características físicas, químicas y biológicas, tanto en su estado natural como tras la intervención humana, y varía según su uso. Los sistemas de agua dulce son de los más afectados por la actividad humana: más de un millón de sustancias ingresan a las cuencas por descargas directas (industria, minería, agricultura, zonas urbanas) e indirectas (escorrentía, deposición atmosférica), alterando la calidad del agua y afectando ecosistemas y la salud humana.

Las perturbaciones, sean naturales o antrópicas, afectan los ecosistemas acuáticos de manera diversa según el componente alterado. La agricultura ha duplicado el aporte de nitrógeno (N) y fósforo (P) a los ecosistemas terrestres, lo que podría estar relacionado con el aumento de N_2O en la atmósfera (Vitousek, 1994).

En aguas superficiales, el carbono se mide como DBO_5, y el nitrógeno en formas de NH_4^+, NO_3^-, NO_2^- y Nitrógeno Kjeldahl; el fósforo como PO_4^{3-} y fósforo total. La caracterización de estos nutrientes es clave, ya que su exceso puede provocar eutrofización en los sistemas acuáticos.

En este contexto, es importante la calidad de aguas del río Maipo, el cual nace en la laguna Nacimiento, en la cordillera, y recorre 250 km hasta desembocar en el océano Pacífico en Llolleo. A lo largo de su curso recibe importantes afluentes, como los ríos Volcán, Colorado, Yeso, Mapocho, Clarillo y Puangue. La cuenca es clave por abastecer de agua a Santiago y por su intenso uso para minería, generación hidroeléctrica, agricultura, turismo y desarrollo urbano.

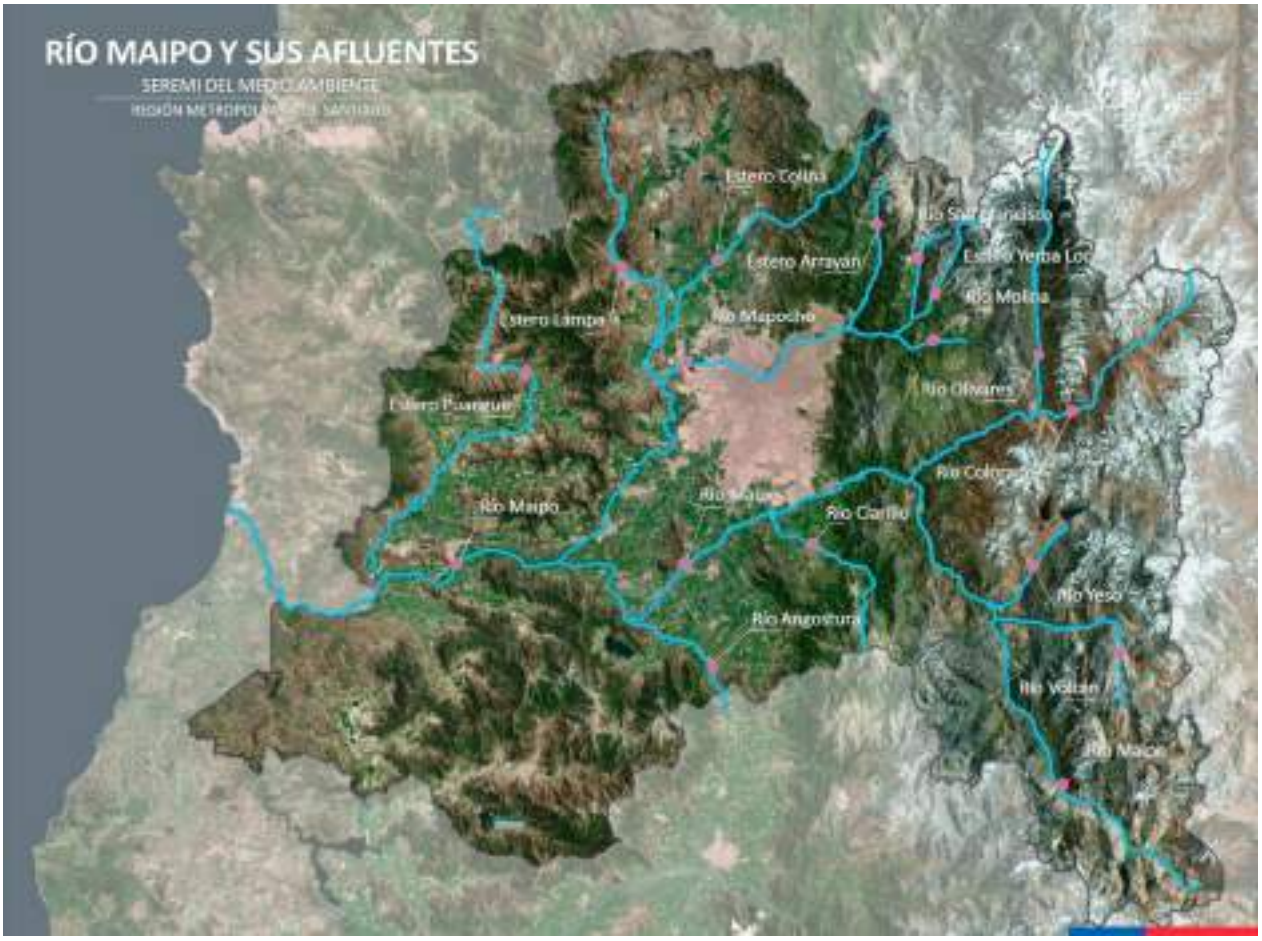


Figura 1 – Río Maipo y sus afluentes
Fuente: Seremi Medio Ambiente RM – Ecosistemas acuáticos – Humedales[1]

La regulación hídrica principal es el Embalse El Yeso, pero ante la creciente presión sobre los recursos, se han impulsado medidas para mejorar la gestión y calidad del agua. En 2014 se establecieron las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) para proteger los ecosistemas acuáticos del Maipo, fijando estándares para 12 parámetros como pH, conductividad, oxígeno disuelto, nutrientes, metales pesados y DBO_5, monitoreados mensualmente por la DGA.

En 2023, la cuenca fue declarada zona saturada para varios de estos parámetros (OD, CE, pH, cloruros, sulfatos, nitratos, ortofosfatos, zinc), y con contaminación latente en DBO_5, mediante el Decreto Supremo N°21 del Ministerio del Medio Ambiente (D.S. N°21/2023 del MMA). Esto llevó en 2025 al inicio del Plan de Prevención y Descontaminación (PPDH Río Maipo)[2].

El estudio del Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (2024) caracterizó más de 1.100 actividades o actores con potencial contaminante en la cuenca. Las fuentes difusas predominan en la parte media y baja del río Maipo y en el Mapocho bajo, asociadas a la industria, generación energética, inmobiliarias,

[1] https://biodiversidadrm.mma.gob.cl/ecosistemas-acuaticos/humedales/
[2] https://planesynormas.mma.gob.cl/normas/expediente/index.php?tipo=busqueda&id_expediente=945604

agricultura y extracción de áridos. En tanto, en las partes altas (Maipo alto y Mapocho alto) predominan los sitios en condición natural, el turismo y la hidroelectricidad.

Muchas de estas actividades carecen de permisos ambientales o registros oficiales, dificultando el control de la contaminación. Pese a la fuerte intervención humana en la cuenca, algunas zonas naturales están siendo protegidas por ONG, municipios y el Ministerio del Medio Ambiente.

1.2 Objetivo del estudio

1.2.1 Objetivo general

De acuerdo a las bases de licitación, el objetivo general corresponde a determinar los coeficientes de exportación de contaminantes provenientes de fuentes difusas, asociadas a los usos de suelo en la cuenca del río Maipo, a partir del análisis de la composición de diferentes tipos de suelo y mediante la aplicación de modelación matemática.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la consultoría, como indicados en las bases, corresponden a:

a) Realizar una recopilación bibliográfica sobre los coeficientes de exportación de los parámetros saturados y latentes tanto a nivel nacional como internacional, y analizar los valores utilizados en la modelación de fuentes difusas en la cuenca del río Maipo.
b) Realizar mediciones fisicoquímicas del suelo mediante un plan de muestreo representativo de la composición fisicoquímica de los suelos en las áreas de vigilancia monitoreo de la cuenca del río Maipo.
c) Proponer una metodología para seleccionar las herramientas de modelación matemática que permitan determinar los coeficientes de exportación de los parámetros latentes y saturados en distintos escenarios de precipitación, según los usos o coberturas de suelo relevantes en la cuenca del río Maipo.
d) Estimar la carga anual de parámetros saturados y latentes provenientes de cada tipo de fuente difusa, asociada a los usos de suelo caracterizados fisicoquímicamente.
e) Realizar un análisis integral de la carga contaminante con perspectiva de cuenca en las áreas de vigilancia de las subcuencas del río Maipo en relación al comportamiento de los parámetros declarados saturados y latentes de la NSCA.

1.3 Alcance del estudio

La consultoría comprende, en resumen, recopilar antecedentes nacionales e internacionales sobre coeficientes de exportación de parámetros saturados y latentes, analizar su aplicación en la cuenca del Maipo, realizar mediciones fisicoquímicas de suelos en áreas de vigilancia, y desarrollar una modelación para obtener coeficientes de exportación bajo distintos escenarios de precipitación según los usos de suelo y tipos de fuentes difusas. Además, se busca estimar la carga anual de contaminantes desde fuentes difusas y realizar un análisis integral de la carga en cada subcuenca en función de los parámetros declarados en la NSCA. Estos parámetros se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros considerados en la NSCA y su estado

Parámetros	Saturación	Latencia
pH	X	
conductividad eléctrica (CE)	X	
oxígeno disuelto (OD)	X	
cloruro (Cl^-)	X	
sulfato ($SO4^{-2}$)	X	
demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)		X
nitrato ($N\text{-}NO_3^-$)	X	
ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{-3}$)	X	
plomo disuelto (Pb)		
níquel disuelto (Ni)		
zinc disuelto (Zn)	X	
cromo total (Cr)		

Nota: se marcan en verde aquellos que se encuentran en estado de saturación o latencia.

Cabe señalar que, en el componente de modelación, será necesario adoptar una serie de supuestos, simplificaciones y generalizaciones propias de una evaluación a gran escala. Las decisiones tomadas para realizar la parametrización del modelo serán fundamentadas y se utilizarán criterios basados en literatura internacional, o experiencia profesional; no obstante, existirán incertidumbres inherentes a la metodología. Entre los aspectos más relevantes se incluyen los siguientes:

- **Disponibilidad limitada de muestras de suelo**: El número de muestras del estudio es limitado en relación con la superficie de la cuenca y con la heterogeneidad de sus usos de suelo, tipos de suelo, geología y distancia a fuentes contaminantes (especialmente en zonas con riego, manejo agrícola intensivo o presencia de complejos coluviales y aluviales). Además, la campaña se realizó en un periodo específico y solo a nivel superficial (0–10 cm). Por ello, los resultados del muestreo se utilizaron como una línea de evidencia complementaria a la modelación, y no como un insumo directo de esta. Las propiedades de suelo requeridas por el modelo se obtuvieron de productos de información disponibles a escala de cuenca (CLSoilMaps y el mapa nacional de carbono orgánico del suelo), según se describe en la Sección 4.2.2.
- **Limitaciones propias del modelo SWAT+**: El modelo SWAT+ se orienta principalmente al modelamiento hidrológico y de nutrientes, y no incluye módulos específicos para el comportamiento de metales o metaloides disueltos o adsorbidos. Por ello, sus cargas fueron ser estimadas de forma indirecta, mediante balance de masa inverso con concentraciones observadas y caudales, complementado con relaciones empíricas para Zn disuelto cuando faltó información.
- **Procesos hidrogeoquímicos en el cauce no representados**: La disolución, precipitación y transformación de elementos en el cauce debido a variaciones hidrogeoquímicas (pH, redox, alcalinidad o complejación) no podrá ser representada, ya que SWAT+ carece de capacidades para modelar tales procesos. En consecuencia, la composición química del agua en el río puede diferir de la estimada exclusivamente a partir de procesos de transporte superficial y subsuperficial.
- **Incertidumbres en parámetros de erosión y transporte**: Factores como erodabilidad del suelo, cobertura vegetal, transporte subsuperficial y otros parámetros calibrables presentan incertidumbres asociadas a la disponibilidad limitada de datos observados de calidad de agua. Esto puede afectar la capacidad del modelo para reproducir con precisión la variabilidad espacial y temporal de las cargas exportadas.

- **Limitaciones estructurales del modelamiento a escala de cuenca**: Existen incertidumbres inherentes al modelamiento, incluyendo la representación simplificada de aportes de aguas subterráneas, limitaciones en la simulación de procesos urbanos complejos, distinta sensibilidad del modelo ante eventos hidrológicos extremos y de manera importante, la ausencia de la incorporación de fuentes puntuales de manera detallada.
- **Variabilidad en prácticas de manejo y usos de suelo:** Las prácticas agrícolas (fertilización, arado, riego), cambios en cobertura vegetal y otras intervenciones presentan alta variabilidad espacial y temporal y no siempre existe información detallada para parametrizarlas. Con respecto a lo anterior, se han incluido y parametrizado de manera específica los sectores donde se utiliza riego con RILES, pero pueden existir otras prácticas que no serán representadas. En resumen, el modelo deberá incorporar supuestos promedios o rangos generales, lo que puede influir en la estimación final de exportaciones y cargas por uso de suelo.

1.4 Organización del informe

Este documento corresponde al informe final del estudio, que considera los resultados de la sistematización de reuniones con la contraparte técnica, y todas las actividades relacionadas a los objetivos a), b), c), d) y e), de acuerdo a las bases técnicas.

Este informe está organizado de manera tal que las secciones que se presentan a continuación coincidan en general con las actividades y subactividades indicadas en las bases de licitación, y que permita una fácil comprensión del documento. En cada sección se explica de manera general la metodología utilizada para la realización de la actividad y sus resultados, en caso de corresponder. El informe se estructura entonces de la siguiente forma:

Tabla 2 – Estructura y contenidos del informe de acuerdo a bases técnicas

Sección del informe	Subsección del informe	Actividad y objetivo según bases
1. Introducción	1.5 Reuniones con la contraparte técnica y actividades	Punto 3.1 de las bases y Actividad OE2.3 (objetivo b) Punto 3.3 de las bases
2. Recopilación bibliográfica de coeficientes de exportación	2.1 Revisión de coeficientes de exportación	Actividad OE1.1 (objetivo a)
	2.2 Revisión estudios previos	Actividad OE1.2 (objetivo a)
3. Mediciones fisicoquímicas del suelo en áreas de vigilancia	3.1 Bases metodológicas del plan de muestreo	Actividad OE2.1 (objetivo b)
	3.2 Ejecución del muestreo	Actividades OE2.2, OE 2.3, OE2.4, OE2.5 y OE2.6 (objetivo b)
	3.3 Resultados de análisis de laboratorio	Actividad OE2.7 (objetivo b)
	3.4 Discusión de resultados de muestreo	Actividad OE2.7 (objetivo b)
4. Metodología de modelación	4.1 Introducción a la modelación hidrológica y de transporte de solutos	-
	4.2 Recopilación de información para el modelo	Actividad OE3.1 (objetivo c)
	4.3 Herramienta de modelación	Actividades OE3.2 y OE3.3 (objetivo c)
5. Modelación para determinar coeficientes de exportación	5.1 Modelación matemática para obtener coeficientes de exportación	Actividad OE3.4 (objetivo c)
	5.2 Validación de resultados de modelación	Actividad OE3.5 (objetivo c)

Sección del informe	Subsección del informe	Actividad y objetivo según bases
	5.3 Determinación de coeficientes de exportación	Actividad OE3.6 (objetivo c)
6. Estimación de carga anual de parámetros y análisis de sensibilidad	6.1 Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación	Actividad OE4.2 (objetivo d)
	6.2 Estimación de cargas anuales por uso de suelo y análisis de sensibilidad	Actividad OE4.1, OE4.2, OE5.1 y OE.5.3 (objetivo d y e)
7. Análisis integral de la carga contaminante	7.1 Contraste de resultados de modelación de carga y de muestreo de suelo	Actividad OE5.2 (objetivo e)
	7.2 Análisis global de contaminantes, fuentes aportantes y sensibilidad a la precipitación	Actividad OE5.1, OE5.2 y OE5.3 (objetivo e)
8. Conclusiones y recomendaciones	-	-

1.5 Reuniones con la contraparte técnica y actividades

La primera actividad de la consultoría corresponde a la reunión de inicio del estudio realizada el día 8 de octubre de 2025 de manera presencial en las oficinas de la Seremi del Medio Ambiente (con algunos participantes de manera online), en que se presentó la contraparte técnica, el equipo consultor, el plan de trabajo y cronograma y se revisaron antecedentes del sitio en estudio. La minuta de la reunión y la presentación realizada en esta instancia se incluyen en el Anexos 1.

Además, se han realizado reuniones de coordinación y presentación de avances, en las que ha participado la contraparte técnica y profesionales del equipo consultor. El detalle de estas reuniones de coordinación y seguimiento se presenta en la Tabla 3, y las minutas y presentaciones (donde corresponda) se presentan en el Anexo 1.

Por último, se desarrolló una capacitación a funcionarios del Ministerio y Seremi del Medio Ambiente en el uso del modelo SWAT, en cumplimiento del punto 3.3 de las bases técnicas. Los registros de esta sesión se presentan en el Anexo 1.

Tabla 3 – Detalle de reuniones de coordinación y actividades

Reunión	Fecha, hora, modalidad	Objetivo y detalle
Reunión de inicio	08-10-2025 16:30 Presencial/Híbrida	Presentación de contraparte y equipo consultor; revisión de plan de trabajo y cronograma; revisión de antecedentes.
Reunión de seguimiento 1	05-12-2025 09:30 Online	Revisión de metodología de diseño de plan de muestreo.
Reunión de seguimiento 2	14-01-2026 15:00 Online	Revisión de consultas y comentarios con respecto a informe 1, con el objetivo de planificar el muestreo restante.
Reunión de seguimiento 3	20-03-2026 12:00 Online	Avance de consultoría, en particular del muestreo y modelación.
Reunión de seguimiento 4 (Presentación de informe de avance 2)	05-06-2026 15:00 Online	Presentación de resultados parciales de la consultoría asociados al Informe de avance 2 y resolver posibles dudas.

Reunión	Fecha, hora, modalidad	Objetivo y detalle
Reunión de seguimiento 5 (Presentación de informe final)	22-09-2026 12:00 Online	Revisión de consultas y comentarios con respecto a informe final, además de presentar los resultados.
Capacitación a profesionales del MMA	07-10-2026 9:30 Híbrida	Capacitación a profesionales del Ministerio y Seremi del Medio Ambiente en el uso del modelo SWAT, incluyendo desarrollo de inputs y compresión de outputs.

2 Recopilación bibliográfica de coeficientes de exportación

En esta sección se presentan los resultados de la actividad OE1, correspondiente al objetivo específico a) "Realizar una recopilación bibliográfica sobre los coeficientes de exportación de los parámetros saturados y latentes tanto a nivel nacional como internacional, y analizar los valores utilizados en la modelación de fuentes difusas en la cuenca del río Maipo".

2.1 Recopilación y sistematización de información sobre coeficientes de exportación

2.1.1 Definición, uso y limitaciones de los coeficientes de exportación

Los coeficientes de exportación constituyen una herramienta ampliamente utilizada en la evaluación de cargas difusas de contaminantes a escala de cuenca hidrográfica. Estos coeficientes representan una tasa media anual de exportación de un determinado analito desde una unidad de superficie asociada a un tipo de uso o cobertura de suelo, y se expresan comúnmente en unidades de masa por área y tiempo (por ejemplo, kg/ha/año). Su principal utilidad radica en permitir una estimación simplificada de aportes difusos en contextos donde la información de monitoreo es limitada o donde se requiere una primera aproximación al balance de cargas contaminantes (Johnes, 1996; Reckhow et al., 1980).

El uso sistemático de coeficientes de exportación se remonta a fines de la década de 1970 y comienzos de los años 1980, principalmente en el marco de estudios de eutrofización y manejo de lagos y embalses en Norteamérica y Europa. Trabajos como los de Reckhow et al. (1980) establecieron la base conceptual del enfoque, demostrando que era posible relacionar cargas anuales de nutrientes (nitrógeno y fósforo) con el patrón de usos de suelo a escala de cuenca, mediante coeficientes empíricos derivados de balances de masa y datos observados en ríos y lagos.

Posteriormente, la metodología fue ampliamente adoptada y refinada para distintos contextos climáticos y territoriales, incorporándose en manuales técnicos, guías de planificación de cuencas y estudios de evaluación ambiental. Con el tiempo, su aplicación se extendió desde nutrientes hacia otros parámetros de interés ambiental, incluyendo sales y metales traza (Edwards et al., 1999).

Históricamente, los coeficientes de exportación se han utilizado principalmente para la estimación de nutrientes, debido a su rol central en procesos de eutrofización y degradación de la calidad del agua. Entre los analitos más frecuentemente evaluados destacan el nitrógeno total y sus formas inorgánicas (NO_3^-, NH_4^+), además del fósforo total y ortofosfato (PO_4^{3-} o PO_4-P).

Posteriormente, a partir de la década de los 90 y especialmente en estudios recientes, el enfoque se ha extendido a otros parámetros considerados saturados o latentes, tales como iones mayoritarios, particularmente cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}), relevantes en cuencas con influencia geogénica, minera o de retornos de riego(Edwards et al., 1999; Svensson et al., 2010), además de metales traza, como zinc (Zn), especialmente en estudios de cuencas urbanas e industriales (Skinner et al., 2009).

En este contexto, los coeficientes de exportación se han consolidado como una herramienta útil para abordar contaminantes cuya presencia en el sistema acuático responde a procesos difusos, acumulativos y de larga escala temporal.

Los coeficientes de exportación son parámetros empíricos, derivados generalmente a partir de balances de masa a escala de cuenca, donde se relacionan las cargas anuales medidas en un punto de control (por ejemplo, un lago o estación fluviométrica) con la superficie de los distintos usos de suelo aguas arriba; promedios regionales, obtenidos a partir de la síntesis de múltiples estudios de cuencas con características similares de clima, uso de suelo y geología; o modelos inversos de calidad de agua, donde los coeficientes de exportación se calibran para reproducir concentraciones o cargas observadas.

La literatura muestra que los coeficientes de exportación presentan una alta variabilidad, incluso para un mismo tipo de uso de suelo. Esta variabilidad responde a múltiples factores, entre los que se incluyen:

- Clima e hidrología, particularmente la magnitud y estacionalidad de la precipitación y la escorrentía.
- Tipo de uso de suelo y prácticas de manejo, como intensidad de fertilización, tipo de cultivo, sistemas de riego y manejo de residuos.
- Propiedades del suelo, incluyendo textura, materia orgánica, capacidad de retención y parámetros geomorfológicos como pendiente (los que en su conjunto afectan la erodabilidad del suelo).
- Conectividad hidrológica e hidrogeológica, es decir, el grado en que las superficies aportantes están efectivamente conectadas al cauce principal.
- Características geológicas y geogénicas, las que son especialmente relevantes para parámetros como sulfato, cloruro y metales.

En este contexto, los coeficientes de exportación refieren a rangos posibles, más que a constantes universalmente aplicables. En efecto, el uso de coeficientes de exportación presenta limitaciones importantes, las que incluyen:

- No representan la dinámica temporal intra-anual, por lo que no capturan eventos extremos ni estacionalidad.
- Asumen una relación lineal entre superficie de uso de suelo y carga exportada, lo que puede no ser válido en sistemas altamente regulados o no lineales.
- Pueden sobreestimar o subestimar cargas en cuencas con fuerte intervención antrópica (canales, embalses, derivaciones) o con aportes puntuales dominantes (fuentes puntuales).
- Su transferibilidad entre regiones climáticas y productivas distintas es limitada sin procesos de ajuste y calibración local.

Estas limitaciones son especialmente relevantes en la cuenca del río Maipo, donde las fuentes puntuales y la estacionalidad de caudales juegan un rol central en la calidad de agua.

2.1.2 Recopilación de coeficientes de exportación para parámetros saturados y latentes

Se han recopilado coeficientes de exportación de la literatura científica para los parámetros cloruros, sulfatos, nitratos, ortofosfatos y zinc (los que se encuentran en calidad de saturación para la cuenca del río Maipo), estos se presentan en el Anexo 2.

Cabe notar que los parámetros oxígeno disuelto, conductividad eléctrica o pH si bien también en saturación no poseen coeficientes de exportación ya que son parámetros dependientes de condiciones hidrogeoquímicas del medio.

Para realizar la recopilación se consolidaron los resultados en las siguientes categorías de acuerdo a la información disponible en la literatura:

- Agrícola (algodón, frutales, granos, maíz, silvicultura, soya, vegetales, NE – no especificado).
- Bosque (matorral, nativo, nativo/humedal, NE – no especificado).
- Comercial (NE – no especificado).
- Esparcimiento (NE – no especificado).
- Ganadería (NE – no especificado).
- Industrial (NE – no especificado).
- Residencial (NE – no especificado).
- Urbano (NE – no especificado).

A continuación, se presenta un breve resumen de los coeficientes de exportación recopilados.

2.1.2.1 Nitratos y nitrógeno total

La información sobre coeficientes de exportación para nitratos es escasa por lo que adicionalmente se incluyó estudios que indicaran coeficientes de exportación para nitrógeno total (edáfica, 2020; Mendez, 2018; Reckhow et al., 1980; Seremi Medio Ambiente Región de Los Ríos, 2023; Shrestha et al., 2008; USEPA, 2005; Wang et al., 2020). Los resultados resumidos se presentan en la Tabla 4 y en la Figura 2.

Tabla 4 – Coeficientes de exportación para nitratos y nitrógeno total

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
Agrícola	**0,54**	**123,28**	**21,04**	**33**
NO_3^--N	5	5	5,00	1
NE	5	5	5,00	1
Total N	0,54	123,28	21,54	32
Algodón	10	10	10,00	1
Granos	5,3	5,3	5,30	1
Maíz	11,1	11,1	11,10	1
NE	0,54	123,28	21,87	26
Soya	12,5	12,5	12,50	1
Vegetales	2,1	79,6	40,85	2
Bosque	**0,04**	**38**	**6,63**	**51**
NO_3^--N	1,09	11,71	5,11	4
Matorral	5,8	11,71	8,76	2
Nativo	1,84	1,84	1,84	1
Silvicultura	1,09	1,09	1,09	1

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
Total N	0,04	38	6,75	47
Matorral	0,3	30,85	9,37	14
Nativo	0,6	38	5,96	13
Nativo/Humedal	0,69	3,8	2,25	2
NE	0,04	38	6,90	12
Silvicultura	1,37	7,32	3,60	6
Comercial	**1,9**	**13,8**	**8,90**	**3**
Total N	1,9	13,8	8,90	3
NE	1,9	13,8	8,90	3
Esparcimiento	**3,2**	**3,2**	**3,20**	**1**
Total N	3,2	3,2	3,20	1
NE	3,2	3,2	3,20	1
Ganadería	**100**	**7979,9**	**2652,08**	**5**
Total N	100	7979,9	2652,08	5
NE	100	7979,9	2652,08	5
Industrial	**1,9**	**14**	**6,77**	**3**
Total N	1,9	14	6,77	3
NE	1,9	14	6,77	3
Residencial	**5**	**7,5**	**6,60**	**3**
Total N	5	7,5	6,60	3
NE	5	7,5	6,60	3
Urbano	**0,49**	**40**	**10,26**	**15**
NO_3^--N	0,49	0,49	0,49	1
NE	0,49	0,49	0,49	1
Total N	1,48	40	10,96	14
NE	1,48	40	10,96	14
Total general	**0,04**	**7979,9**	**127,34**	**114**

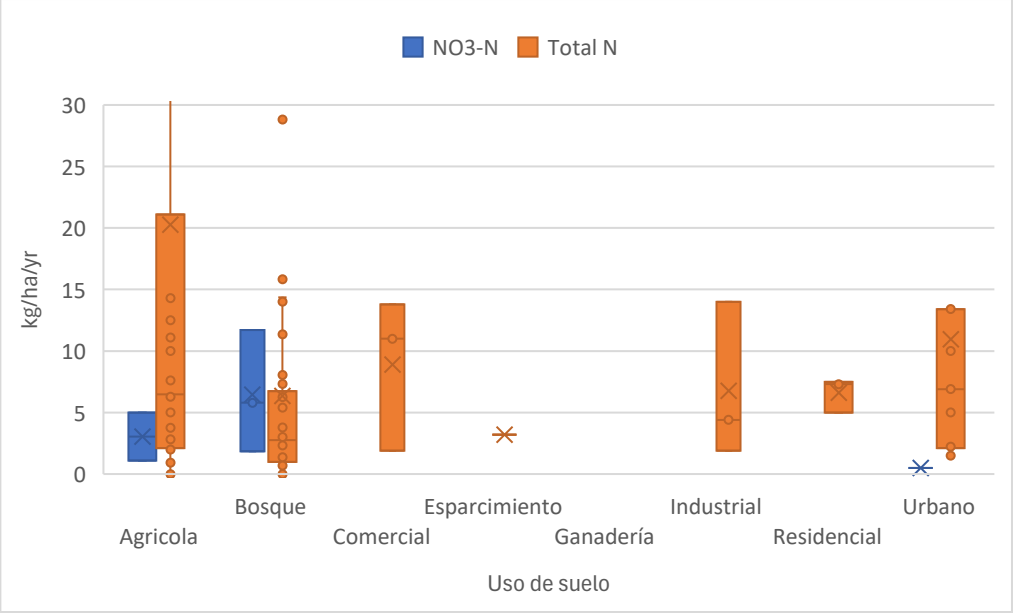


Figura 2 – Coeficientes de exportación para nitratos y nitrógeno total

Como se puede observar en la tabla anterior, se pudieron recopilar un total de 114 coeficientes de exportación de la literatura revisada. La actividad que más aportaría en cuanto a nitratos/nitrógeno total es la ganadería con hasta 7979,9 kg/ha/año seguida por la actividad agrícola (no especificada) con hasta 123,28 kg/ha/año. La actividad que menos aportaría nitratos/nitrógeno total sería las áreas destinadas a esparcimiento, con solo 3,2 kg/ha/año.

2.1.2.2 Ortofosfato y fósforo total

Al igual que para nitratos, la información sobre coeficientes de exportación para ortofosfato se complementó con estudios que indicaran coeficientes de exportación para fósforo total (edáfica, 2020; McGuckin et al., 1999; Mendez, 2018; Seremi Medio Ambiente Región de Los Ríos, 2023; USEPA, 2005; White & Hammond, 2006). Los resultados resumidos se presentan en la Tabla 5 y Figura 3.

Tabla 5 – Coeficientes de exportación para ortofosfato y fósforo total

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
Agrícola	**0,06**	**18,6**	**1,89**	**26**
PO_4^{3-}-P	0,1	0,55	0,33	2
NE	0,1	0,55	0,33	2
Total-P	0,06	18,6	2,02	24
Algodón	4,3	4,3	4,30	1
Frutales	0,18	0,18	0,18	1
Granos	0,22	1,5	0,91	3
Maíz	2	2	2,00	1
NE	0,06	3,25	1,05	15
Soya	4,6	4,6	4,60	1
Vegetales	0,26	18,6	9,43	2
Bosque	**0,007**	**4,9**	**0,63**	**47**

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
PO_4^{3-}-P	0,13	0,19	0,16	4
Matorral	0,13	0,16	0,15	2
Nativo	0,19	0,19	0,19	1
Silvicultura	0,17	0,17	0,17	1
Total-P	0,007	4,9	0,67	43
Matorral	0,05	4,9	1,11	16
Nativo	0,007	1,29	0,44	15
Nativo/Humedal	0,09	0,21	0,15	2
NE	0,06	0,9	0,36	4
Silvicultura	0,2	0,88	0,47	6
Comercial	**0,1**	**7,6**	**3,57**	**3**
Total-P	0,1	7,6	3,57	3
NE	0,1	7,6	3,57	3
Esparcimiento	**0,1**	**0,1**	**0,10**	**1**
Total-P	0,1	0,1	0,10	1
NE	0,1	0,1	0,10	1
Ganadería	**10**	**795,2**	**333,30**	**5**
Total-P	10	795,2	333,30	5
NE	10	795,2	333,30	5
Industrial	**0,4**	**4,1**	**2,77**	**3**
Total-P	0,4	4,1	2,77	3
NE	0,4	4,1	2,77	3
Residencial	**0,77**	**2,2**	**1,39**	**3**
Total-P	0,77	2,2	1,39	3
NE	0,77	2,2	1,39	3
Urbano	**0,18**	**6,23**	**1,74**	**11**
PO_4^{3-}-P	0,25	0,83	0,54	2
NE	0,25	0,83	0,54	2
Total-P	0,18	6,23	2,01	9
NE	0,18	6,23	2,01	9
Total general	**0,007**	**795,2**	**18,06**	**99**

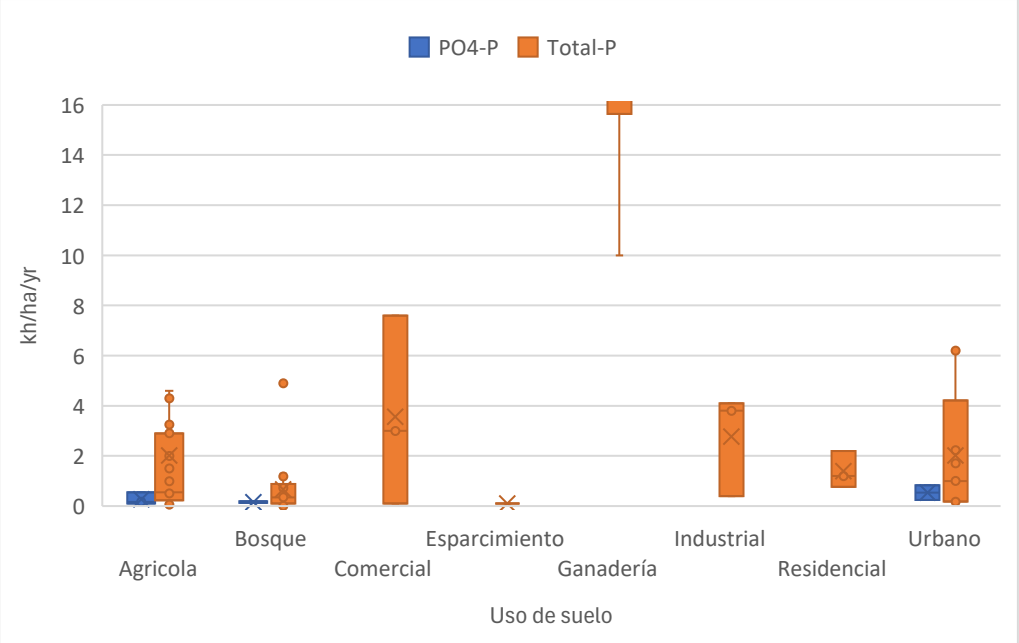


Figura 3 – Coeficientes de exportación para ortofosfato y fósforo total

Como se puede observar en la tabla anterior, se pudieron recopilar un total de 99 coeficientes de exportación de la literatura revisada. La actividad que más aportaría en cuanto a ortofosfato/fosforo total es, al igual que para nitrógeno, la ganadería con hasta 795,2 kg/ha/año de P total, seguida por la actividad agrícola (vegetales) con hasta 18,6 kg/ha/año de P total. La actividad que menos aportaría ortofosfato/fosforo total sería las áreas destinadas a esparcimiento, con solo 0,1 kg/ha/año de P total.

2.1.2.3 Cloruros

La información para cloruros es muy limitada, con pocos estudios sobre la materia disponibles en la literatura (Kopáček et al., 2014; Simpson, 1991; Svensson et al., 2010), los que fueron resumidos en la Tabla 6 y Figura 4.

Tabla 6 – Coeficientes de exportación para cloruros

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
Agrícola	**17,7**	**17,7**	**17,70**	**1**
NE	17,7	17,7	17,70	1
Bosque	**6,0**	**9,7**	**7,23**	**3**
NE	6,0	9,7	7,23	3
Total general	**6,0**	**17,7**	**9,85**	**4**

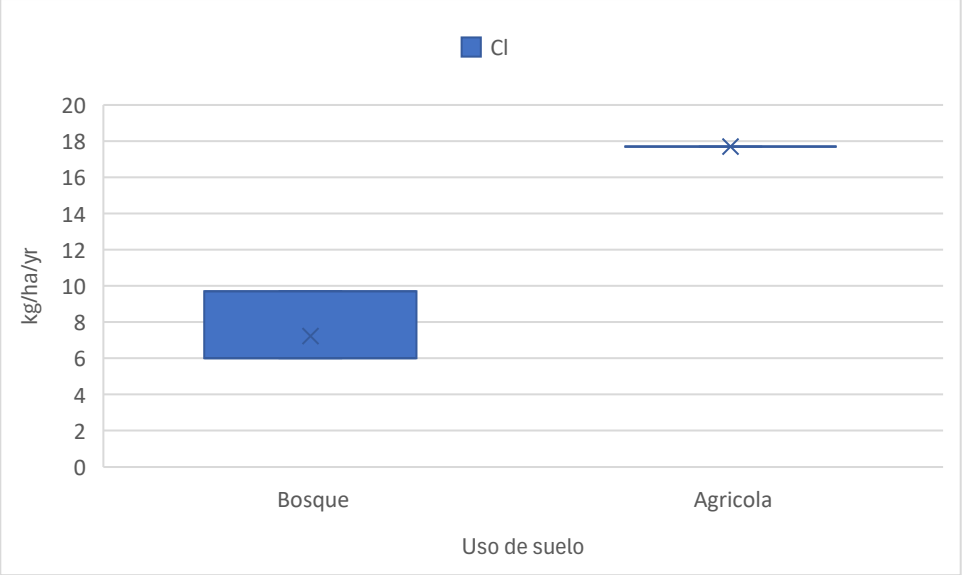


Figura 4 – Coeficientes de exportación para cloruros

Se pudieron recopilar solo 4 coeficientes de exportación de la literatura revisada. En este respecto se puede mencionar que la actividad agrícola posee mayor potencial de aporte a cloruros con 17,7 kg/ha/año versus un uso de suelo de tipo bosque, para lo cual la literatura indica 7,23 kg/ha/año.

2.1.2.4 Sulfato

La información para sulfatos es también limitada (Edwards et al., 1999), aunque no tanto que cloruros. Los coeficientes de información recopilados fueron resumidos en Tabla 7 y Figura 5.

Tabla 7 – Coeficientes de exportación para sulfato

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
Bosque	**9,4**	**131**	**54,34**	**12**
NE	9,4	131	54,34	12
Total general	**9,4**	**131**	**54,34**	**12**

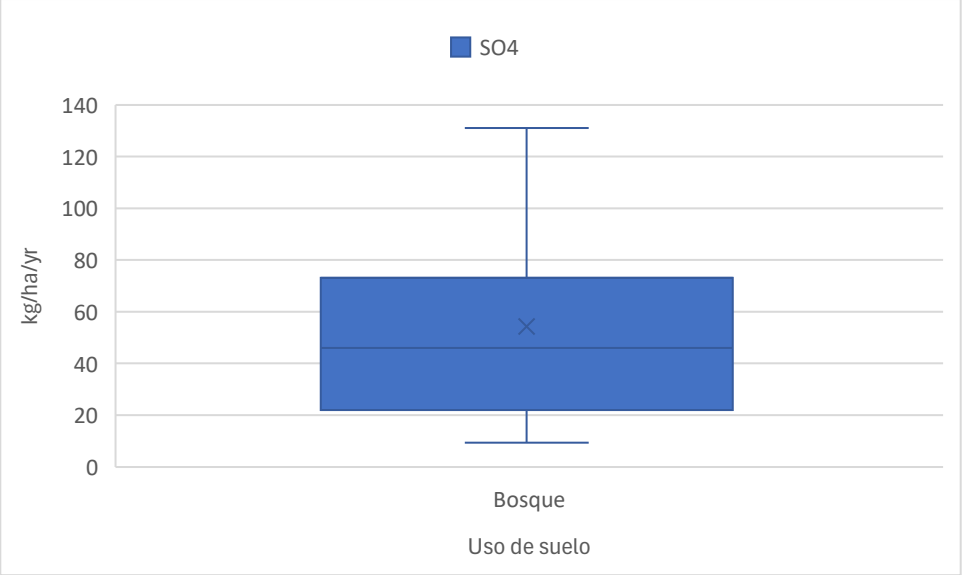


Figura 5 – Coeficientes de exportación para sulfatos

Como se puede ver en la tabla anterior, solo se pudieron recopilar 12 coeficientes de exportación para uso de suelo tipo bosque (no especificado). Estos tienen una variación de 9,4 a 131 kg/ha/año.

2.1.2.5 Zinc

Solo se pudieron recopilar 3 coeficientes de información de la literatura revisada (Skinner et al., 2009), resumiéndose la información en la Tabla 8 y Figura 6.

Tabla 8 – Coeficientes de exportación para zinc

Uso	Mínimo	Máximo	Promedio	N° CE
Agrícola	**0,044**	**0,044**	**0,04**	**1**
NE	0,044	0,044	0,04	1
Bosque	**0,13**	**0,13**	**0,13**	**1**
NE	0,13	0,13	0,13	1
Urbano	**1**	**1**	**1,00**	**1**
NE	1	1	1,00	1
Total general	**0,044**	**1**	**0,39**	**3**

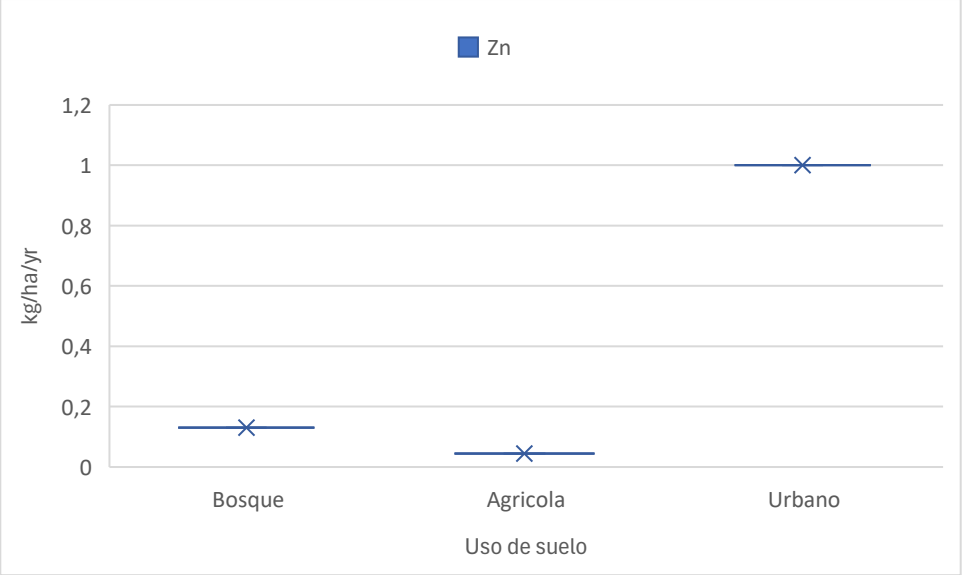


Figura 6 – Coeficientes de exportación para zinc

Se puede observar de la tabla anterior que el uso que más zinc aporta es el urbano con 1 kg/ha/año, que es más de 20 veces el coeficiente de exportación para agrícola (no especificado) y casi 10 veces el de bosque (no especificado).

2.2 Revisión y análisis crítico del Proyecto GORE, Seremi MA, AqEx (2023-2024)

El estudio desarrollado por GORE Santiago, Ministerio del Medio Ambiente y AquaExpert "Análisis y aplicación de un modelo de calidad de agua en la cuenca del río Maipo"(Gobierno Regional Metropolitano de Santiago, 2024), o Estudio GORE-AquaExpert (2024), tuvo por objetivo realizar una análisis de la calidad de las aguas y aplicar un modelo matemático que integre la información de la cuenca del río Maipo. En particular las principales actividades u objetivos específicos consistieron en:

- Objetivo 1: Sistematizar y validar información existente, que permita diseñar una propuesta de modelo conceptual del sistema hídrico de la cuenca del río Maipo.
- Objetivo 2: Efectuar una caracterización cuantitativa de las fuentes emisoras de la cuenca del río Maipo considerando fuentes puntuales, difusas y condición natural (inventario de emisiones).
- Objetivo 3: Levantar información de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de la cuenca del río Maipo.
- Objetivo 4: Caracterizar y analizar los caudales y variables meteorológicas de la cuenca del río Maipo.
- Objetivo 5: Realizar un análisis integral de la cuenca, mediante un modelo matemático de calidad de agua, que relacione contaminantes, fuentes emisoras de presiones antrópicas y de calidad de agua natural de la cuenca del río Maipo.
- Objetivo 6: Proponer metodología de índice de Calidad Ambiental (ICA) de la cuenca del río Maipo para el seguimiento de la NSCA.

2.2.1 Fuentes de emisión y actividades

En particular, los objetivos 1, 2 y 3 indicados anteriormente, consideraron las revisión y análisis de información espacial (por subcuenca y área de vigilancia) sobre usos de suelo, ubicación de fuentes puntuales, además de información fisicoquímica de caracterización de fuentes emisoras y monitoreos de aguas superficiales realizados en el mismo estudio. Esta información, además de datos climáticos y meteorológicos, fue utilizada para elaborar y calibrar un modelo matemático para estimar la calidad de agua de la cuenca.

En las siguientes figuras se presenta espacialmente parte de la información recopilada y analizada en este estudio.

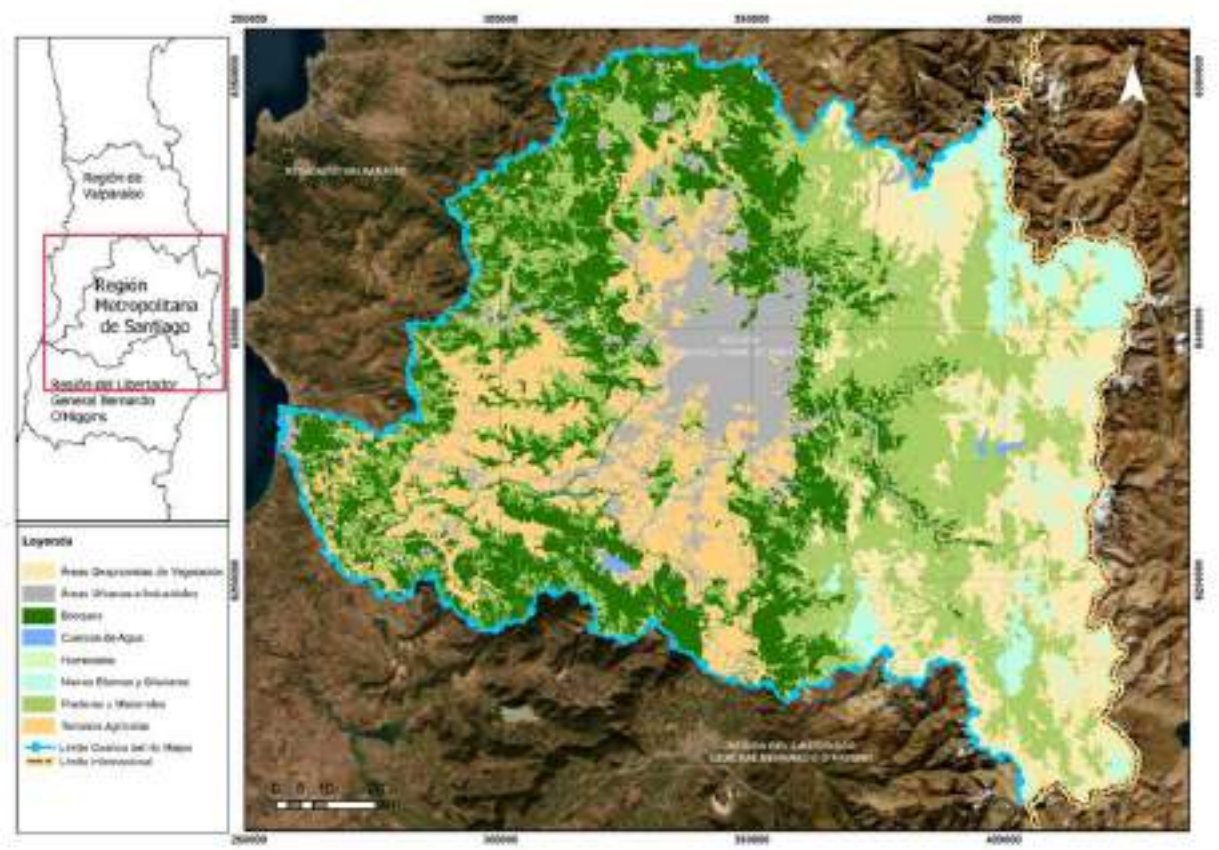


Figura 7 – Distribución espacial de los usos del suelo en la cuenca del río Maipo
Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) en base a Corporación Nacional Forestal (2013)[3]

[3] Referida como capa CONAF (2013) de aquí en adelante

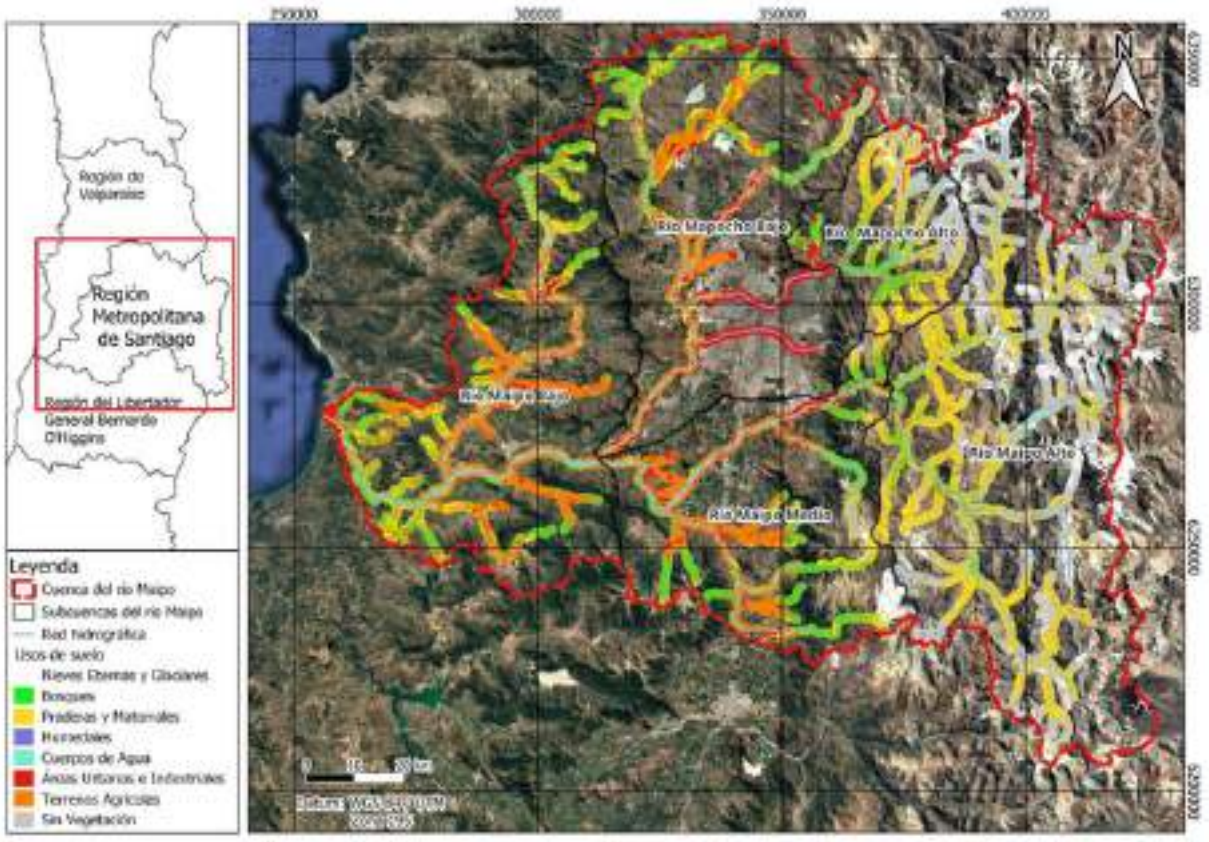


Figura 8 – Distribución espacial de los usos del suelo en la cuenca del río Maipo con buffer 1 km del río
Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) en base a CONAF (2013)

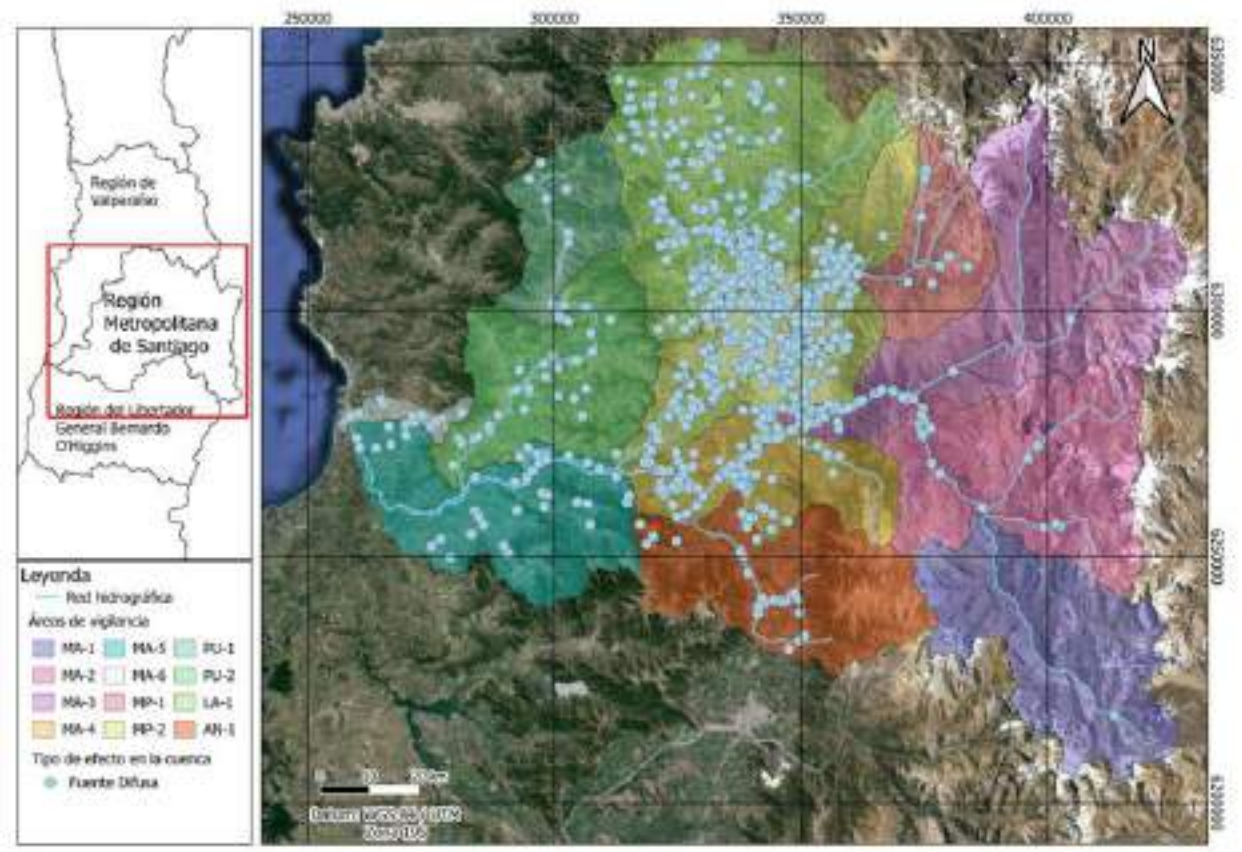


Figura 9 – Fuentes difusas en la cuenca del río Maipo

Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) en base a CONAF (2013)

Tabla 9 – Resumen inventario de actores y/o actividades de la cuenca del río Maipo

Tipo Actividad y/o actores	N° Actores y/o Actividades	Tipo de Fuente o clasificación según impacto
Agrícola/Agropecuaria	110	Difusa y sin emisión
Áridos	89	Difusa y puntual
Canal	101	Puntual
Cauces de importancia	19	Condición natural y difusa
Condición Natural o Seminatural	43	Condición natural
Descarga Desconocida	1	Puntual
Derechos de Agua	487	Extracción de agua
Embalse	12	Extracción de agua
Energía	71	Difusa y puntual
Industrial	176	Difusa
Inmobiliarios	523	Difusa
Minería	78	Difusa, desconocido y sin emisión
Norma Secundaria de Calidad Ambiental del Río Maipo (NSCA)	33	Condición natural
Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)	21	Extracción de agua
Planta de Tratamiento de Agua Potable Rural (PTAP Rural)	17	Extracción de agua
Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS)	81	Puntual, difusa, desconocido y sin emisión
Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos (PTRILes)	215	Puntual, difusa, desconocido y sin emisión
Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos (PTRS/Lodos)	17	Difusa y sin emisión
Turismo	33	Difusa
Vertederos Ilegales	55	Difusa
Total de actores y/o actividades en la Cuenca del Río Maipo	**2182**	

Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

El estudio describe los criterios bajo los cuales se clasificaron las actividades y tipo de fuente. En particular para las fuentes difusas, la descripción de cada actividad se presenta a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10 – Descripción de actividades de fuentes difusas

Actividad	Tipo de fuente	Descripción
Agricola/ Agropecuaria	Difusa	Uso de fertilizantes y pesticidas. La mayoría de estos actores corresponden a planteles de aves y de cerdos. Secundariamente se registraron pequeños predios y parcelas agrícolas, fundos, cultivos de cítricos y olivos, algunas viñas, etc.
Áridos	Difusa	Aporte en la turbidez y cambios en las riberas de los cauces.
Cauces de importancia	Difusa	Este punto corresponde a un vertedero ilegal cercano al cauce, y se estima que las crecidas del río debido a las lluvias transportaron basura hacia este punto.
Energía	Difusa	Corresponde principalmente a los parques solares y fotovoltaico, concentradas en la subcuenca del Mapocho bajo. Gran parte de estas plantas fotovoltaicas, se encuentran aún en fase de proyecto y no han iniciado su construcción u operación. Además, también se identificó dos centrales de biogás.
Industrial	Difusa	Destaca la subcuenca del Mapocho bajo con 168 actividades de diversos rubros, desde laboratorios químicos, plantas de reciclaje, fábricas de elementos para la construcción, entre otros.
Inmobiliarios	Difusa	Corresponden a conjuntos inmobiliarios y edificios para la vivienda, hospitales, centros comerciales, iglesias, entre otras estructuras presentes en la ciudad.
Minería	Difusa	Actividades mineras.
PTAS	Difusa	Utilizan sus aguas tratadas para regadío de áreas verdes.
PTRILes	Difusa	Sus efluentes son utilizados para actividades secundarias, e.g., de regadío o para el lavado de neumáticos.
PTRS/Lodos	Difusa	Han sido utilizados como abono en la tierra y posteriormente debido al arrastre de las lluvias pueden llegar al cauce.
Turismo	Difusa	Destacando sitios como camping y hostales en el Cajón del Maipo, centros de ski en Farellones, el parque acuático El Oasis en Isla de Maipo, entre otros.
Vertederos ilegales	Difusa	Acopio ilegal de basura y escombros, ubicados principalmente en las riberas de los ríos Maipo y Mapocho.

Fuente: Elaboración propia en base a GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

En la Tabla 11 se encuentra la clasificación realizada en el estudio, la cual en la cuenca identifica 2.182 fuentes, categorizadas en tipos de actividad. En particular, un 52% de estas fuentes corresponde a fuentes difusas, donde las con mayor cantidad de actores corresponde al sector inmobiliario, seguido del industrial, agrícola/agropecuario y áridos, entre otros.

Tabla 11 – Clasificación de fuentes en estudio GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

Actividad	Condición Natural	Desconocido	Difusa	Extracción de agua	Puntual	Sin Emisión	Total
Inmobiliarios	–	–	523	–	–	–	**523**
Derechos de agua	–	–	–	487	–	–	**487**
PTRILes	–	1	13	–	43	158	**215**
Industrial	–	–	176	–	–	–	**176**
Agricola/Agropecuaria	–	–	109	–	–	1	**110**
Canal	–	–	–	–	101	–	**101**
Áridos	–	–	87	–	2	–	**89**
PTAS	–	3	18	–	50	10	**81**

Actividad	Condición Natural	Desconocido	Difusa	Extracción de agua	Puntual	Sin Emisión	Total
Minería	–	3	51	–	–	24	**78**
Energía	–	–	60	–	11	–	**71**
Vertederos ilegales	–	–	55	–	–	–	**55**
Condición Natural o Seminatural	43	–	–	–	–	–	**43**
Turismo	–	–	33	–	–	–	**33**
NSCA	33	–	–	–	–	–	**33**
PTAP	–	–	–	21	–	–	**21**
Cauces de importancia	18	–	1	–	–	–	**19**
PTRS/Lodos	–	–	15	–	–	2	**17**
PTAP Rural	–	–	–	17	–	–	**17**
Embalse	–	–	–	12	–	–	**12**
Descarga Desconocida	–	–	–	–	1	–	**1**
Total	**94**	**7**	**1.141**	**537**	**208**	**195**	**2.182**

Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

Tal como se mencionó recientemente, se clasificaron las fuentes de emisión, donde llama la atención la proporción de fuentes categorizadas como "Sin Emisión" en la actividad de PTRILes, las cuales representan un 73% de la actividad, y un 81% de las fuentes identificadas en la categoría de emisión. Al realizar un análisis de la descripción de estas fuentes, es posible notar que varios de los RILes, a pesar de no ser descargados a un cuerpo de agua, son destinados a riego o infiltración en predios cercanos. En este sentido, se realizó una revisión de estas fuentes para eventualmente clasificarlas como fuentes difusas, debido a que contribuyen a la composición química del suelo en analitos de interés. Como resultado, se obtuvo que 49 de las 158 fuentes identificadas como "Sin Emisión" corresponderían a riego con riles, por lo cual podrían ser clasificadas como fuentes difusas.

Luego, en el estudio se realiza una recopilación bibliográfica para determinar los parámetros asociados a distintas fuentes y actividades. En la Tabla 12 se presenta la recopilación realizada por GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024).

Tabla 12 – Actividades industriales con respectivos parámetros

Actividad	Parámetros
Sistemas de tratamiento y deposición de residuos industriales de Viñas	DBO_5, DQO, SST, SD, pH, T°, nitrógeno amoniacal, fósforo, PE
Plantas de tratamiento y colectores domiciliarios	Nitrógeno orgánico, azufre, calcio, magnesio, sales solubles, acidifica pH
Sistemas de tratamiento de residuos industriales de faenadoras y Frigoríficos	DBO_5, DQO, SST, SD, pH, T°, Grasas, PE, nitrógeno amoniacal, fósforo, materia orgánica, Aceites
Planta de tratamiento de concentrados	DBO_5, DQO, SST, SD, pH, T°, PE, nitrógeno amoniacal, fósforo, materia orgánica
Sistemas de tratamiento secundarios de RILes de Papeles	Nitrógeno, fosforo, materia orgánica disuelta, quelantes, cloratos y compuestos metálicos
Sistema de tratamiento Planta avícola	materia orgánica, SST, grasas, nitrógeno, fosforo, DBO_5, proteínas (sangre)

Actividad	Parámetros
Sistemas de tratamiento para planteles de cerdos	DBO_5, DQO, SST, SD, pH, T°, Grasas, PE, nitrógeno amoniacal, fósforo, materia orgánica
Criancero de cerdo	DBO_5, DQO, SST, SD, pH, nitrógeno amoniacal, fósforo, materia orgánica, bacterias, plomo
Termoeléctrica	Tº, pH, DQO, SST, HTP, Aceites y Grasas, Sulfuros y Fenoles
Hidroeléctrica	Sedimento, régimen hidrológico
Extracción de áridos	Sedimento, DBO_5
Minería de caliza	Calcio, aceite, hidrocarburos, pH, Conductividad eléctrica, SST, SD, sulfatos, dureza
Planta de vapor	pH, aceites, T°, SST.
Agricultura	Fertilizantes (nutrientes (Nitrógeno, fósforo, potasio y azufre)) + pesticidas/ Cobre, Plomo, Manganeso, Cobalto, Zinc.
Minería de cobre y molibdeno	cobre: cobre, hierro, sulfato, zinc, mercurio, hierro, manganeso, níquel. Molibdeno: (contaminantes comunes) material particulado, óxidos de azufre, metales pesados (plomo, arsénico, cadmio y mercurio).
Planta de tratamiento de baterías	Mercurio, cadmio, litio, manganeso, plomo, níquel, zinc.
Reciclaje de neumáticos fuera de uso	Hidrocarburos, azufre, acero y colorantes
Planta elaboradora de cerveza	Residuo (Bagazo, que emiten gases invernadero). DBO_5, DQO, sólidos en suspensión, agentes patógenos, nitrógeno, carbono, fósforo, calcio, sodio, sulfatos, metales pesados.
Planta de aceite de oliva	Taninos, compuestos fenólicos, polialcoholes, pectinas, sacáridos y lípidos.
RILes planta elaboradora harina y aceite de pescado	Aceites, grasas, sólidos en suspensión, DBO_5, acidifica pH.
Sistema de tratamiento de residuos industriales sólidos (reciclaje y disposición de aceites vegetales)	DBO_5, SST, Nitrógeno, Fósforo, Coliformes fecales, Aceites y grasas.
Sistema de tratamiento de residuos industriales líquidos (frutas y hortalizas)	SST, SD, aceites y grasas, fósforo, nitrógeno amoniacal, PE, DBO_5.
Sistema de tratamiento de residuos industriales líquidos (comida mascotas)	DBO_5, Coliformes fecales, Fósforo, Nitrógeno, SST, Fenoles, Aceites y grasas (pH, Conductividad eléctrica, Temperatura).
Plantas de tratamiento, disposición y/o eliminación de residuos peligrosos, incluidos los infecciosos.	Líquidos lixiviados, Zinc, Cobre, Plomo, Níquel, Cromo, Mercurio, Hierro, Aceites y grasas, DBO_5.

Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

2.2.2 Coeficientes de exportación

Por otro lado, en el Anexo II del estudio, se presenta una estimación de emisiones de fuentes por medio de la aplicación de coeficientes de exportación. Cabe notar que esto se realizó únicamente para el sector agrícola/agropecuario y para minería, además de realizarse únicamente para nutrientes. Los coeficientes utilizados se presentan en la Tabla 13. Ahora bien, estos resultados no se encontraron en el informe, y tampoco se identificaron fuentes de información.

Tabla 13 – Coeficientes de exportación utilizados en estudio GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

Analito	Factor (kg/ha/año)	Sector
Nitrógeno total cerdos	2,71	Agrícola/agropecuario
Nitrógeno total	9,8	Agrícola/agropecuario
Nitrato	5	Agrícola/agropecuario
Fósforo total cerdos	0,144	Agrícola/agropecuario
Fósforo total	0,99	Agrícola/agropecuario
Fosfatos	0,1	Agrícola/agropecuario
Fosfatos	0,5	Minería

Fuente: GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

Además, los resultados son presentados con un identificador, las hectáreas correspondientes y la emisión por analito. Al realizar un cruce con la base de datos del catastro de fuentes, se obtuvo el hallazgo de que varios no se encontraban en este producto, por lo cual se asume que se consideraron en cierto momento, pero luego fueron descartados. En la Tabla 14 se pueden observar los resultados por área de vigilancia para las actividades consideradas. En total, se consideraron 85 fuentes del sector agrícola/agropecuario y 30 del sector minero.

Tabla 14 – Resultados emisiones fuentes difusas, estudio GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

	Agrícola/Agropecuario				Minería	
AV	Nitrato	Nitrógeno Total	Fosfatos	Fósforo Total	Fosfatos	Total
-	0,3	0,5	0,0	0,1	2,1	**3,0**
AN-1	2,7	5,8	0,1	0,6	–	**9,2**
LA-1	1,8	3,5	0,0	0,4	1,2	**6,9**
MA-2	0,4	0,8	0,0	0,1	0,0	**1,3**
MA-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
MA-4	9,7	19,0	0,1	1,9	0,0	**30,7**
MA-5	36,7	69,7	0,5	7,4	0,0	**114,3**
MP-1	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	**0,6**
MP-2	2,6	5,1	0,1	0,5	0,0	**8,3**
PU-1	0,0	0,7	0,0	0,1	–	**0,8**
PU-2	17,9	35,7	0,3	3,6	–	**57,5**
MA-1	–	–	–	–	0,0	**0,0**
Total	**72,3**	**141,2**	**1,1**	**14,7**	**3,4**	**232,7**

Nota: Emisiones en toneladas por año.; AV: Área de vigilancia

Fuente: Elaboración propia a partir de GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024)

La revisión de los coeficientes de exportación utilizados por GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) indica que los valores adoptados para las actividades agropecuarias y mineras se encuentran, en

general, dentro de los rangos reportados por la literatura internacional, aunque en el extremo bajo o medio de dichos rangos. En particular, los coeficientes de nitrógeno total y fósforo total para agricultura (9,8 y 0,99 kg/ha/año, respectivamente) son consistentes con valores medios utilizados en estudios de cuencas, mientras que los coeficientes asignados a ganadería porcina (2,71 kg N/ha/año y 0,144 kg P/ha/año) indican valores que suponen una conectividad hidrológica limitada y/o un manejo controlado de residuos (lo que puede sub-representar presiones locales intensas en sectores específicos). Un resumen de los coeficientes de exportación (CE) de GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) comparados con el rango encontrado en la literatura se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15 – Comparativa coeficientes de exportación GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024) con literatura

Actividad	Parámetro	CE AquaExpert (kg/ha/año)	Rango CE literatura (kg/ha/año)	Comentario
Agropecuario	Nitrógeno total (general)	9,8	~0,97-79,6	Valor moderado consistente con agricultura extensiva sin intensificación. Adecuado como promedio espacial para cuenca completa, pero puede subestimar zonas con alta fertilización.
Agropecuario	Nitrógeno total – cerdos	2,71	~2 - >7.000 (ganadería intensiva)	Valor bajo respecto a literatura internacional para sistemas confinados. Representa un promedio difuso no intensivo, válido solo si no hay planteles industriales.
Agropecuario	Nitrato (NO_3^-)	5	~2 - >40	Coherente con valores típicos reportados para agricultura mixta. No diferencia estacionalidad ni lixiviación preferencial.
Agropecuario	Fósforo total (general)	0,99	~0,06 - 18,6	Valor razonable, alineado con rangos medios bajos. Adecuado para evaluación de eutrofización a escala de cuenca.
Agropecuario	Fósforo total – cerdos	0,144	~0,1 - >700	Valor muy bajo frente a literatura internacional. Posible subestimación si existen corrales, purines o aplicación directa de estiércol.
Agropecuario	Fosfatos (PO_4^{3-})	0,1	~0,06 - 7,6	Valor bajo, consistente con fracción soluble del P. No captura pérdidas particuladas asociadas a sedimentos.
Minería	Fosfatos (PO_4^{3-})	0,5	Sin datos	No es habitual asignar CE de fosfatos a minería. Existen datos de literatura para usos comerciales e industriales que varían entre 0,1 y 7,6 kg/ha/año, por lo que el valor del CE asignado por estudio de 2024 para minería estaría dentro del rango bajo.

3 Mediciones fisicoquímicas del suelo en áreas de vigilancia

En esta sección se presentan los resultados de parte de la actividad OE2, correspondiente al objetivo específico b) “Realizar mediciones fisicoquímicas del suelo mediante un plan de muestreo representativo de la composición fisicoquímica de los suelos en las áreas de vigilancia de la cuenca del río Maipo”.

3.1 Bases metodológicas del plan de muestreo

El presente plan de muestreo tiene por objetivo ejecutar una campaña de caracterización fisicoquímica de suelos, representativa dentro de lo posible, que permita levantar evidencia en terreno sobre las fuentes difusas de la cuenca del río Maipo. El énfasis está puesto en tres grupos de parámetros: los asociados a procesos de exportación de nutrientes (N, P); los iones y metales priorizados asociados a parámetros en saturación y latencia del D.S. N°21/2023 del MMA, incluyendo Cl^-, SO_4^{2-} y Zn^{2+}; además de aquellos relevantes para el transporte particulado (erosión/sedimentos).

Para ellos, el plan se basa en un enfoque estratificado para la definición de puntos de muestreo. Este enfoque combina principalmente sectores asociados a fuentes difusas, usos o cobertura de suelo, zonas con influencia geológica sobre la calidad de las aguas, y sectores sin mayor intervención (background). Con ellos se busca: (i) cubrir la variabilidad espacial y las principales presiones de la cuenca, (ii) mantener la consistencia con las capas de información oficiales y (iii) asegurar la trazabilidad en la selección de los puntos.

Cabe señalar, sin embargo, que la representatividad de la campaña está limitada por varios factores:

- el número de muestras;
- la heterogeneidad del territorio, en términos de usos y tipos de suelo, geología y distancia a fuentes contaminantes, entre otros;
- la extensión de la cuenca;
- el hecho de que el muestreo se realiza en un periodo acotado y solo a nivel superficial.

Por estas razones, los resultados del muestreo no se utilizaron como insumo directo de la modelación, ya que ello habría introducido una incertidumbre elevada en la estimación de los coeficientes de exportación. En cambio, se utilizaron como una línea de evidencia complementaria e independiente, que permite caracterizar la composición fisicoquímica de los suelos asociados a las distintas fuentes difusas (Sección 3.4) y contrastar la coherencia de los resultados de la modelación (Sección 7.1). Los parámetros de suelo requeridos por el modelo se obtuvieron de información disponible a escala de cuenca (ver Sección 4.2.2).

3.1.1 Trabajo con capas de información geográfica

El proceso anterior fue realizado en sistema de información geográfica (QGIS), integrando y validando los insumos georreferenciados, consistentes principalmente en:

- **Áreas de vigilancia de la NSCA**: se utilizaron 2 capas que contienen información sobre áreas de vigilancia: una corresponde a los segmentos de los ríos y cauces monitoreados, y otra contiene los polígonos de las áreas de vigilancia de la cuenca, ambas entregadas y validadas por la contraparte técnica (ver Figura 10).
- **Usos/coberturas de suelo:** se utiliza la capa de usos de suelo de CONAF como insumo principal, homologando clases cuando sea necesario a categorías funcionales relevantes para exportación difusa (p.ej., agrícola, pecuario, forestal/natural, urbano/inmobiliario, industrial/infraestructura) (ver Figura 29 en la sección 4.1).
- **Inventario de fuentes del estudio GORE/AquaExpert modificado:** se incorpora el catastro georreferenciado como “capa de presión” para reforzar la priorización de combinatorias asociadas a exportación difusa (actividades agropecuarias, inmobiliarias/urbanas, residuos, etc.), realizando modificaciones con respecto a las fuentes difusas mencionadas en la sección anterior (ver Figura 11 más abajo y Anexo 3).

- **Geología/zonas relevantes para calidad de aguas:** se incorporan polígonos o unidades geológicas de interés (zonas con potencial geogénico para sales/sulfatos u otros aportes), con foco en su capacidad de influir sobre Cl^- y SO_4^{2-} en agua (ver Figura 33 en la sección 4.2.3).

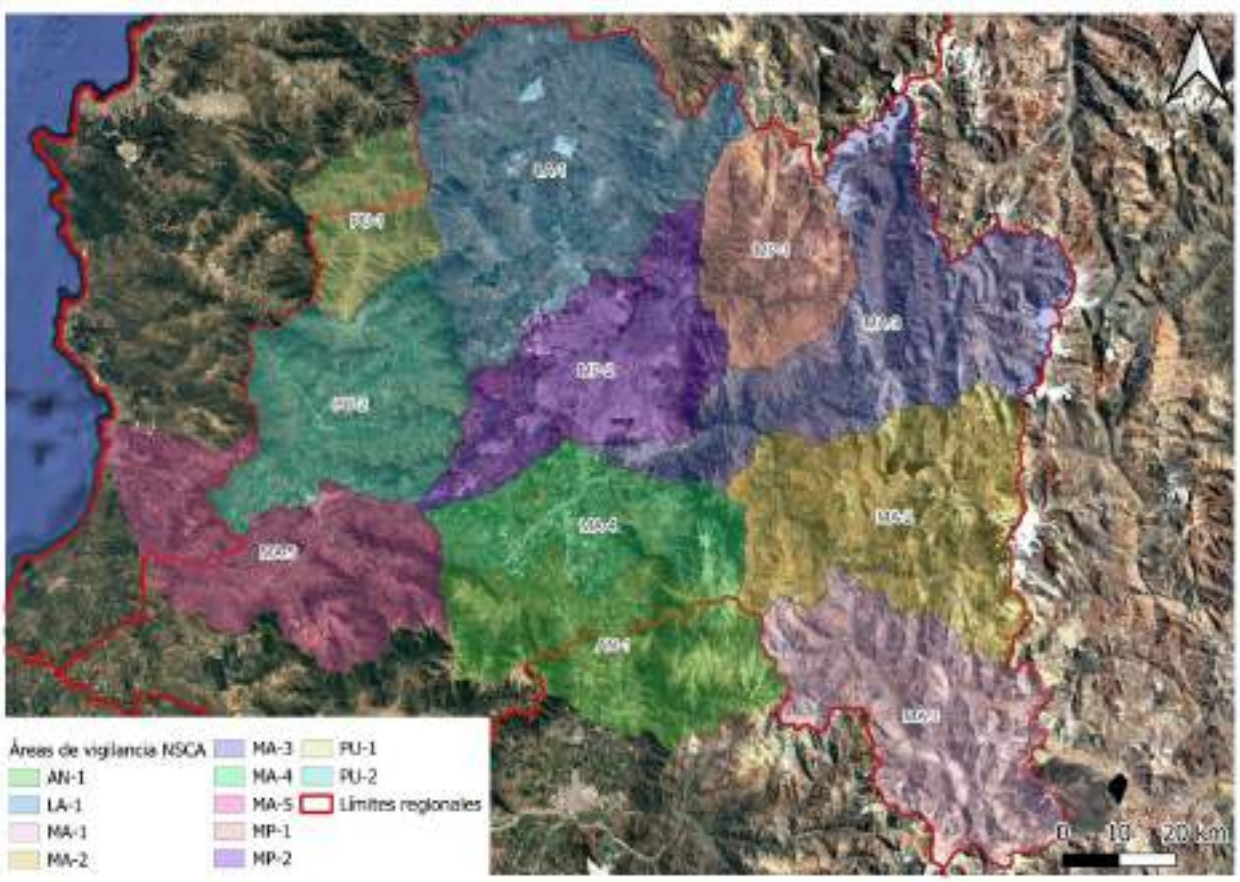


Figura 10 – Áreas de vigilancia de la norma
Fuente: Elaboración propia

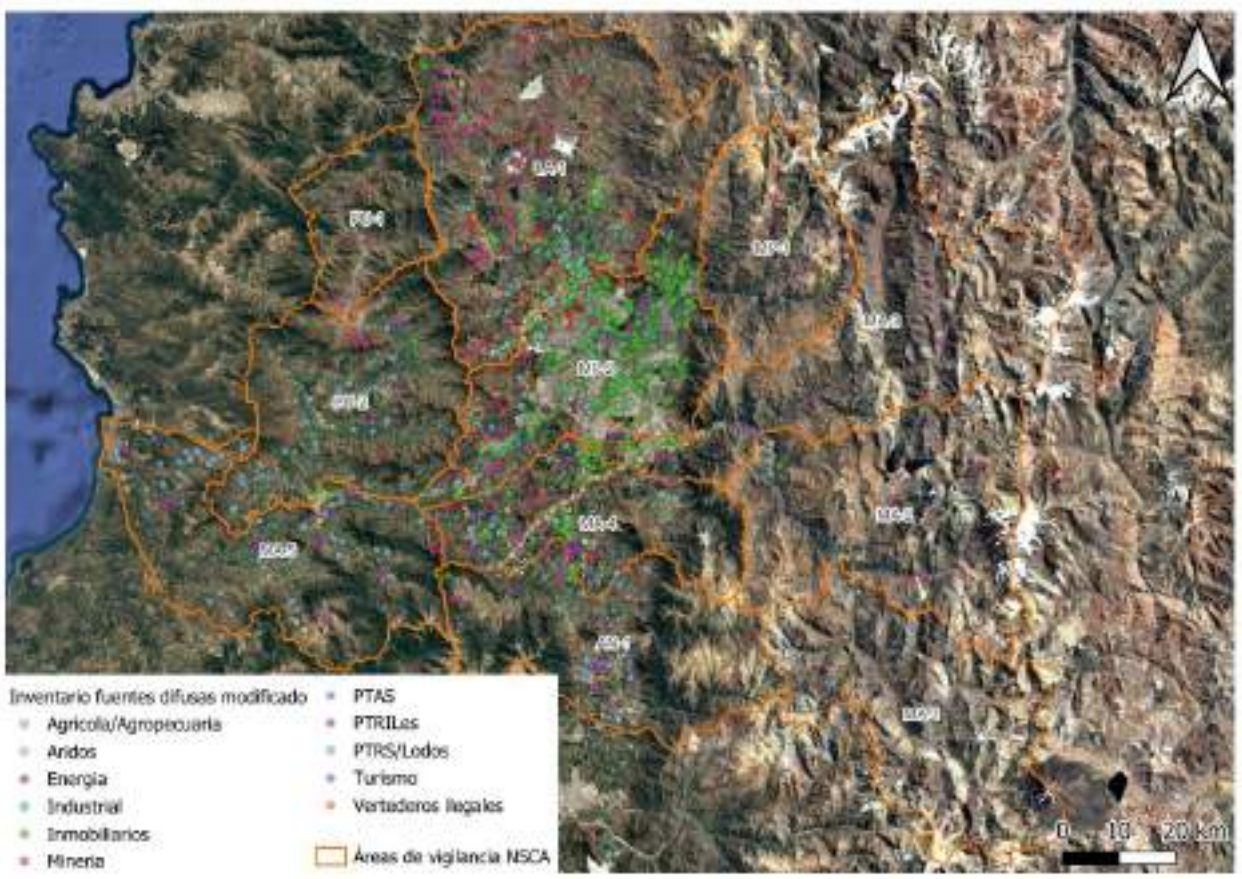


Figura 11 – Fuentes difusas
Fuente: Elaboración propia

La validación de la metodología se realizó en coordinación con la Contraparte Técnica mediante revisión conjunta en reuniones online, asegurando que las capas utilizadas y la manera en que fueron utilizadas quedasen formalmente acordadas.

A continuación, se presenta la metodología y pasos seguidos para el trabajo con las capas de información geográfica.

- En primer lugar, se revisó y modificó la base de datos de inventario de fuentes del estudio de GORE-AquaExpert (2024). Esto consistió en la revisión de ciertos campos de información de la planilla, en particular la descripción y la normativa asociada a cada fuente, con lo cual se pudo hacer una diferenciación entre agrícola y pecuario (incluyendo nuevas subcategorías), y además se identificaron fuentes categorizadas originalmente como "sin emisión" que corresponderían realmente a fuentes difusas, en que plantas de tratamiento de residuos líquidos y sólidos utilizan los riles tratados para riego o infiltración, o la disposición de lodos en suelos. Del mismo modo, aquellas actividades asociadas a plantas de tratamiento (PTAS, PTRILes, PTRS) cuyos residuos fueran dispuestos directamente a cuerpos de agua o alcantarillado se consideraron como fuentes puntuales. Por otro lado, las actividades mineras (a excepción de aquellas asociadas a exploración o prospección) y de extracción de áridos fueron consideradas fuentes difusas. Para efectos de la metodología para el diseño del plan de muestreo no se consideró el estado de la actividades, por lo tanto, se incluyeron en el análisis las fuentes activas e inactivas.

- En base a lo anterior, estas fuentes fueron recategorizadas, modificando el número de fuentes difusas de 1141 a 1207.
- Por otro lado, se consideró que las fuentes asociadas a los tipos de actividad "energía" y "turismo" no debiesen incluirse para el análisis, ya que no es clara la vía en que aportarían contaminantes a los cursos de agua y/o porque su potencial aporte sería marginal. Descontando estas actividades, se tiene una cantidad de 1114 fuentes difusas. Lo anterior se presenta en la Tabla 16 y Figura 12.

Tabla 16 – Fuentes del inventario reclasificadas

Actividad	Subactividad	N° fuentes
Agrícola/Agropecuaria	Agrícola	73
	Pecuaria	35
	Pecuaria, riego con riles	2
Áridos	Áridos	89
Industrial	Industrial	176
Inmobiliarios	Inmobiliarios	523
Minería	Minería	66
PTAS	Infiltración y riego	19
PTRILes	Infiltración y riego	70
	Lodos	2
PTRS/Lodos	Lodos	4
Vertederos ilegales	Vertederos ilegales	55
Subtotal fuentes difusas	-	**1114**
Energía	Energía	60
Turismo	Turismo	33
Subtotal fuentes difusas no consideradas	-	**93**
Otras fuentes no difusas	-	**975**
Total fuentes catastradas por GORE-AquaExpert (2024)	-	**2182**

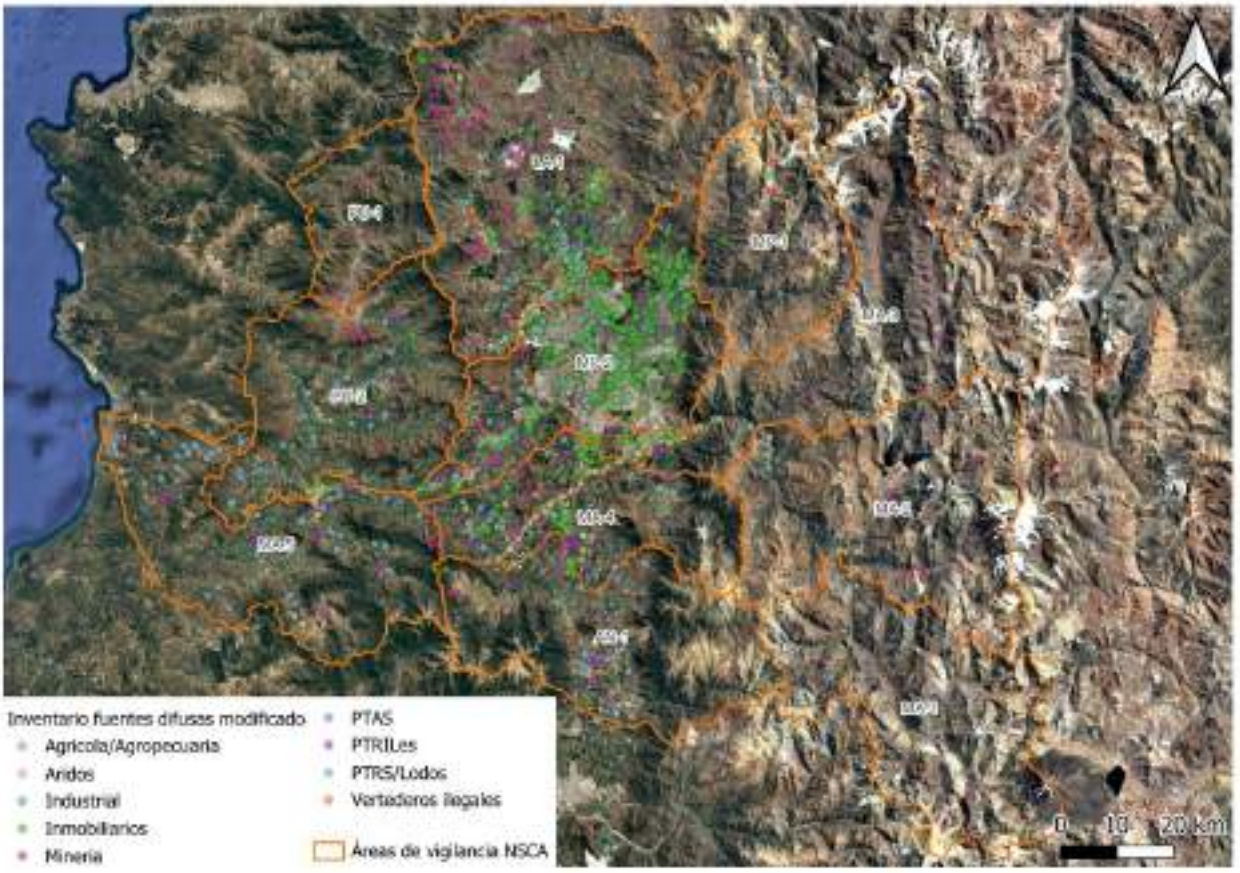


Figura 12 – Fuentes difusas consideradas
Fuente: Elaboración propia

- Luego se realizó un trabajo con herramientas SIG para la complementación de la planilla de fuentes, en particular, mediante cruce de capas, se asoció a cada fuente información sobre el área de vigilancia donde se ubica, el uso de suelo según CONAF y la unidad geológica según Sernageomin.
- Posteriormente, con la planilla actualizada, se realizó un análisis de cuáles son los tipos de actividades más presentes en cada área de vigilancia y cuál es el uso de suelo principal asociado a estas actividades. El objetivo de este análisis es definir los sectores más representativos de cada área de vigilancia con respecto a las fuentes difusas existentes, para distribuir los puntos de muestreo. En la Tabla 17 se presentan las principales actividades asociadas a fuentes difusas por área de vigilancia, en términos de cantidad de fuentes. Se marcan en verde las 2 o 3 actividades que más fuentes posee por área de vigilancia, a excepción de las áreas MA-1 que solo tiene una fuente, por lo que no se considera.

Tabla 17 – Actividades asociadas a fuentes difusas por área de vigilancia

Área de vigilancia	Subactividad	N° fuentes difusas
AN-1	Pecuaria	9
	PTRILes	8
	Agrícola	4
	PTAS	5
	Inmobiliarios	5
	Áridos	3
	Industrial	2
	Vertederos ilegales	1
	Minería	1
LA-1	Industrial	106
	Inmobiliarios	56
	Minería	35
	Vertederos ilegales	24
	Áridos	20
	PTRILes	7
	PTAS	6
	Agrícola	5
	Pecuaria	3
	PTRS/Lodos	2
MA-1	Minería	1
MA-2	Minería	5
	Agrícola	4
	Áridos	3
	Inmobiliarios	1
MA-3	Inmobiliarios	19
	Áridos	13
	Vertederos ilegales	4
	PTRILes	4
	Minería	2
	Agrícola	1
	Pecuaria	1
	Industrial	1
MA-4	Inmobiliarios	46
	Áridos	29
	PTRILes	22
	Agrícola	12
	PTAS	5
	Vertederos ilegales	5
	Pecuaria	4
	Minería	3
	Industrial	1
MA-5	Agrícola	22
	Pecuaria	13
	PTRILes	10
	Áridos	7
	Minería	3
	Inmobiliarios	3
	Industrial	2
	PTAS	1
MP-1	Minería	4
	Inmobiliarios	3
	Agrícola	2
MP-2	Inmobiliarios	383
	Industrial	63
	Vertederos ilegales	19
	PTRILes	15
	Áridos	12
	Agrícola	6
	Minería	3
	PTAS	2
	Pecuaria	1
PU-1	Minería	4
	PTRILes	2
	Agrícola	1
	Áridos	1
PU-2	Agrícola	16
	Inmobiliarios	7
	Pecuaria	6
	Minería	5
	PTRILes	4
	Vertederos ilegales	2
	PTRS/Lodos	2
	Industrial	1
	Áridos	1
Total		**1114**

- En base a lo anterior, se identificó cuáles son los usos de suelos asociados a los tipos de fuentes difusas principales por área de vigilancia. En la Figura 13 se muestran las fuentes difusas consideradas y los polígonos de la capa de usos de suelo que corresponden a esas fuentes.

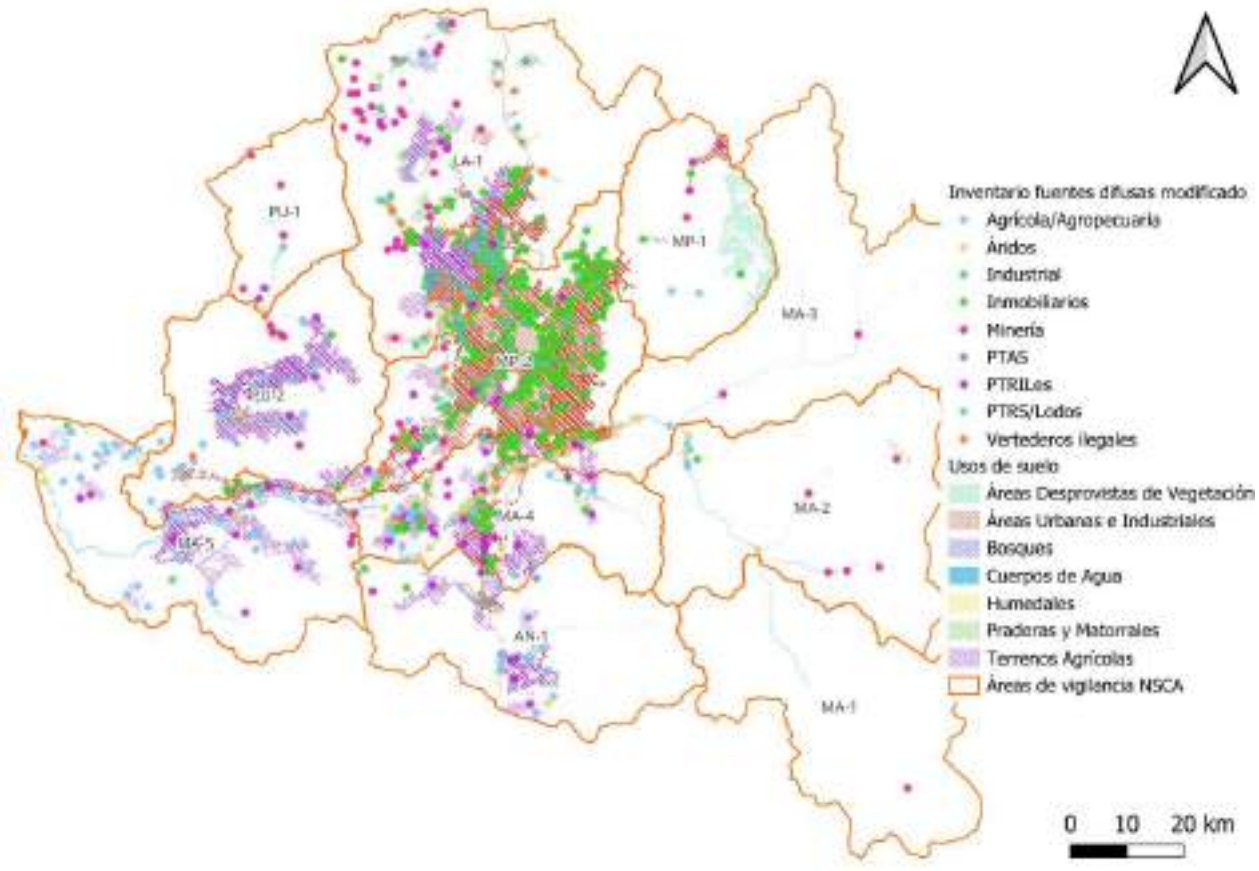


Figura 13 – Fuentes difusas consideradas y usos de suelo asociados
Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Definición de número de muestras

A partir del análisis anterior, se asignó la cantidad de muestras de suelo a colectar en cada área de vigilancia por tipo de actividad, buscando cubrir, dentro de lo posible, las principales fuentes difusas de cada área y de la cuenca en general, y los usos de suelo asociados. Se consideraron en promedio 3 muestras por área de vigilancia con el objetivo de caracterizar las fuentes difusas, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18 – Muestras consideradas por área de vigilancia y tipo de fuente difusa

Área de vigilancia	Subactividad	Uso de suelo	Muestras propuestas
AN-1	Pecuaria	Áreas Urbanas e Industriales	2
	PTRILes	Terrenos Agrícolas	2
LA-1	Industrial	Áreas Urbanas e Industriales	2
	Inmobiliarios	Áreas Urbanas e Industriales	0
	Minería	Praderas y Matorrales	1
MA-1	Minería	Áreas Desprovistas de Vegetación	0

Área de vigilancia	Subactividad	Uso de suelo	Muestras propuestas
MA-2	Minería	Áreas Desprovistas de Vegetación	2
	Agrícola	Terrenos Agrícolas	2
MA-3	Inmobiliarios	Áreas Urbanas e Industriales	2
	Áridos	Cuerpos de Agua	0
MA-4	Inmobiliarios	Áreas Urbanas e Industriales	1
	Áridos	Cuerpos de Agua	2
	PTRILes	Áreas Urbanas e Industriales	1
MA-5	Agrícola	Terrenos Agrícolas	2
	Pecuaria	Terrenos Agrícolas	1
	PTRILes	Terrenos Agrícolas	1
MP-1	Minería	Áreas Urbanas e Industriales	1
	Inmobiliarios	Áreas Urbanas e Industriales	1
MP-2	Inmobiliarios	Áreas Urbanas e Industriales	2
	Industrial	Áreas Urbanas e Industriales	1
	Vertederos ilegales	Áreas Urbanas e Industriales	2
PU-1	Minería	Praderas y Matorrales	1
	PTRILes	Praderas y Matorrales	1
PU-2	Agrícola	Terrenos Agrícolas	1
	Inmobiliarios	Áreas Urbanas e Industriales	1
	Pecuaria	Terrenos Agrícolas	1
Total			33

Finalmente, con el objetivo de caracterizar de manera general los aportes a los cursos de agua, no solo considerando fuentes contaminantes, sino que también el aporte natural que podría haber de elementos o iones desde los suelos, se consideró relevante la colección de muestras “background” o niveles basales, en sectores no intervenidos, que representen de manera general la cuenca. Para esto, se planteó la toma de 2 muestras por área de vigilancia, dando un total de 22 muestras de suelo en la cuenca para caracterizar niveles basales. Lo anterior, sumado a las 33 muestras para caracterizar fuentes difusas, da un total de 55 muestras de suelo en la cuenca que fueron inicialmente propuestas para el plan de muestreo.

3.1.3 Tipos de muestras

En resumen, considerando lo expuesto anteriormente, se propuso realizar un diseño de muestreo de dos componentes. Esto incluyó:

- Estratos “predominantes” (representatividad): Para las combinaciones de actividad y uso de suelo de mayor superficie, se recomienda muestrear al menos 2 sitios por combinación (replicación espacial), con el objetivo de capturar variabilidad intraclase.
- Estratos “background” y “geología relevante”: Se incorporan puntos de referencia en sectores de menor intervención y, en paralelo, puntos en unidades geológicas clave que puedan explicar aportes naturales de sales/sulfatos, independientemente del uso de suelo.

Además, de acuerdo a hallazgos en terreno, se evaluó considerar estratos "relevantes por exportación" (hotspots), para sectores asociados a altas presiones de fuentes difusas (agropecuario intensivo, periurbano/inmobiliario), que pudiesen influir significativamente en parámetros latentes/saturados.

3.1.4 Consideraciones para el muestreo

La definición de coordenadas para el muestreo se realizó tomando en cuenta los criterios establecidos. Adicionalmente, se hizo necesario tomar las siguientes consideraciones para la ejecución en terreno del muestreo.

- Se establecieron puntos dentro de los polígonos definidos según los criterios de representatividad evitando bordes.
- Se evitaron microambientes no representativos del uso, fuente difusa o área de vigilancia en general, tales como caminos, taludes, rellenos, residuos, zonas recién removidas.
- Se priorizaron sitios con conectividad hidrológica representativa del polígono muestreado considerando pendiente, cercanía a líneas de drenaje, o evidencia de escorrentía.
- Finalmente, se consideraron aspectos logísticos como accesibilidad, permisos, condiciones climáticas, etc. En este respecto, los puntos indicados en el plan de muestreo pudiesen variar para acomodar estos factores (u otros metodológicos).

3.2 Ejecución del muestreo

3.2.1 Planificación del muestreo

La ejecución del muestreo se realizó en base al plan aprobado previamente por la contraparte técnica en diciembre del 2025, que fue incluido en el primer informe de avance y se presenta también en el Anexo 4. El muestreo ejecutado varió levemente con respecto al propuesto en el plan, debido a aspectos logísticos, solicitudes posteriores de la contraparte y complementación de la información mediante muestreo de otras matrices y análisis de otros parámetros, lo que se describe en la sección 3.2.4.

Para el correcto y expedito desarrollo del muestreo, se pidió a la contraparte la generación de una carta por parte de la Seremi del Medio Ambiente para presentar el estudio y la consultora, y solicitar acceso a los predios para la toma de muestras. La carta fue renovada posteriormente debido al cambio de autoridades de marzo de 2026. Estos documentos se presentan en el Anexo 5.

Los trabajos de muestreo se realizaron durante los meses de diciembre de 2025 y mayo de 2026, con una duración total de 14 días de terreno.

3.2.2 Metodología general

Como indicado anteriormente, el muestreo consistió en la toma de muestras de suelo superficial en todas las áreas de vigilancia de la cuenca, principalmente en cercanías de cursos de agua, considerando además la toma de polvo superficial en algunas muestras en zona urbana. Además, como será detallado en la sección 3.2.4, se incluyó la toma de algunas muestras de agua superficial y sedimentos en cursos de agua.

Para suelo, se consideró la toma de muestras superficiales (de 0 a 10 cm de profundidad), que es la capa más vinculada a la exportación de iones por escorrentía/erosión, nutrientes disponibles y sorción superficial. Este muestreo se realizó con herramientas manuales (pala pequeña de jardinería y martillo geológico),

descartando la capa superior de vegetación. Se escogieron puntos que pudieran representar de mejor manera el sector, en cuanto a tipo de suelo, vegetación, uso, entre otras.

Las muestras de polvo superficiales se consideraron en sectores donde la cobertura es esencialmente impermeable (uso urbano), para capturar el aporte que representan estos sectores a los cursos de agua por "lavado" de superficies posterior a eventos de lluvia. Este muestreo se realizó mediante el barrido de polvo sedimentado en áreas definidas, en que se utilizó herramientas manuales (escobilla y pala) y materiales preparados para este fin (cuadrado de madera de 50x50cm). Se colectaron submuestras (3 a 5 submuestras, generalmente dentro de un radio de 100 a 300 metros) para luego generar una muestra compuesta de polvo representativa del sector para ser enviada al laboratorio.

En algunos puntos donde fue posible acceder a cursos de agua (en particular en las zonas altas de la cuenca), se decidió tomar muestras de sedimentos, es decir, el suelo que se encuentra en contacto con el agua y por lo tanto donde se produce el intercambio de contaminantes entre ambos medios. Las muestras de sedimento se colectaron con herramientas manuales (pala de jardinería).

En la mayoría de los puntos anteriores (donde se muestreó sedimentos), además se colectaron muestras de agua y/o se midieron parámetros fisicoquímicos in situ (pH, conductividad eléctrica y temperatura).

Todas las herramientas utilizadas para el muestreo fueron limpiadas con agua desmineralizada luego del muestreo de cada punto, para evitar contaminación cruzada entre muestras.

Todas las muestras de suelo, polvo y sedimento se envasaron en bolsas plásticas herméticas, se etiquetaron con el nombre de la muestra, fecha y hora de muestreo, y se guardaron en cajas de plumavit para ser enviadas al laboratorio para su análisis. Cabe notar que por los análisis indicados no se requiere que las muestras sean refrigeradas ni preservadas de manera especial.

Las muestras de agua fueron conservadas en frío, y en envases adecuados proporcionados por el laboratorio, sin preservar ni filtrar en terreno (excepto en muestras en que se analizó amonio y NTK, que requirió preservación con H_2SO_4), etiquetadas con nombre de la muestra, fecha y hora de muestreo, y se guardaron en cajas de plumavit para ser enviadas al laboratorio para su análisis.

Los puntos de muestreo y áreas circundantes fueron registrados fotográficamente, además de detallar su descripción en un registro, indicando sus características, prestando especial atención a cualquier posible anomalía (ej. descoloración u olor inusual), como también el código del punto, fecha y hora de muestreo y ubicación exacta (coordenadas geográficas).

A continuación, en la Figura 14 se presentan algunas fotografías de las actividades de muestreo. Mayor detalle fotográfico de cada punto de muestreo se presenta en el Anexo 6.



Muestreo de polvo en zona urbana



Muestreo de polvo en zona urbana



Muestreo de sedimento en cauce de río



Muestreo de suelo superficial



Muestreo de suelo en zona rural



Muestreo de suelo en zona urbana



Muestreo de suelo en sectores background



Muestreo en sectores de uso agrícola



Identificación de textura de suelos



Registro de muestras en terreno



Etiquetado y envasado de muestras



Materiales utilizados para muestreo de suelos



Envasado de muestras de agua y sedimento



Medición de parámetros físicoquímicos en agua



Materiales utilizados para muestreo de polvo



Materiales utilizados para muestreo de sedimentos

Figura 14 – Fotografías de trabajos en terreno
Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Hallazgos y dificultades

Durante los trabajos de muestreo se presentaron algunas situaciones no previstas e inconvenientes operacionales, lo que implicó realizar ciertas medidas alternativas. El detalle se presenta a continuación en la Tabla 19 las desviaciones respecto del plan de muestreo. En particular:

Tabla 19 – Inconvenientes y medidas alternativas adoptadas

Inconveniente	Medida adoptada
Se observó que gran parte de los terrenos se encontraban cercados y sin presencia de personas a quienes solicitar autorización de ingreso.	En ciertos casos, se modificó la ubicación del punto de muestreo, manteniendo los criterios por los cuales se definió tal punto (uso de suelo, área de vigilancia, tipo de fuente, etc.), o de ser posible se tomó la muestra justo en límite del predio (al costado de cercos, etc.).
En algunos casos, era necesario gestionar permisos de acceso con anticipación para ingresar a predios	En casos puntuales, se conversó con personas en el acceso para solicitar permisos e ingresar en el

Inconveniente	Medida adoptada
pertenecientes a empresas; sin embargo, no se contaba con contactos directos para efectuar dichas solicitudes.	mismo momento. En otros casos, donde no se permitió el acceso inmediato y/o se podía identificar el titular del predio (por ejemplo, minera, industria, etc.), se intentó contactar por correo electrónico para solicitar el ingreso. Sin embargo, no se obtuvo respuesta a ninguno de estos o los contactos obtenidos ya no estaban vigentes. En el Anexo 5 se presentan los respaldos de las solicitudes realizadas.
En algunos sectores altos del río Maipo (en AV MA-1 y MA-2), se identificaron dificultades de acceso a ríos y esteros, donde se proponía tomar muestras de sedimentos, debido principalmente a que estos se encuentran encajonados y con alta pendiente.	Se intentó mover la ubicación del punto de muestreo de sedimento/suelo y, en caso de que hubiera otro punto propuesto muy cerca, se reemplazó por una muestra de agua. Por ejemplo, no se pudo acceder a puntos P13 y P17, por lo que se agregó una muestra de agua en los puntos P16 y P18 (P16w y P18w), no consideradas originalmente en el plan de muestreo.
Para la toma de muestras de agua y sedimento, se identificaron dificultades de acceso a ríos y esteros, ya sea debido a que estos se encuentran encajonados y con alta pendiente, o por la presencia de actividades industriales y residenciales que restringían el ingreso.	Se modificó la ubicación del punto de muestreo, moviéndolo a un sitio con un acceso más expedito y seguro, manteniendo los criterios por los cuales se definió tal punto (uso de suelo, área de vigilancia, tipo de fuente, etc.).

En la Figura 16 se presentan algunas fotografías que ejemplifican lo indicado anteriormente.



Dificultad de acceso a predios



Dificultad de acceso a predios



Dificultad de acceso a cauces



Dificultad de acceso a cauces



Dificultad de acceso a cauces



Actividades industriales en acceso a cauces

Figura 15 – Fotografías de trabajos en terreno
Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Ajustes realizados al plan de muestreo propuesto

En base a las situaciones e inconvenientes descritos anteriormente, se realizaron ajustes al plan de muestreo propuesto, en particular de la ubicación de ciertos puntos debido a la dificultad de acceso.

Por otro lado, se incluyó el análisis de plomo a algunas muestras ubicadas en sectores urbanos y en las áreas de vigilancia MA-2 y MA-3 por solicitud de la contraparte técnica, debido al aumento de las concentraciones de este parámetro en monitoreos asociados a la norma.

Por último, se consideró adicionalmente el muestreo de sedimentos y aguas superficiales en ríos y esteros de cuenca, en particular en sectores altos del río Maipo, y en sector de extracción de áridos del mismo.

En la Tabla 20 a continuación se presenta una comparación entre el plan de muestreo propuesto y el muestreo efectivamente realizado, considerando diferencias en cantidad de muestras, matrices,

representatividad de áreas de vigilancia, usos de suelo y fuentes difusas. En el Anexo 9 se presenta en formato *shapefile* y *kmz* las capas de información geográfica de los puntos originales y los puntos realizados.

Tabla 20 – Comparación plan de muestreo propuesto y realizado

Componente		Plan de muestreo propuesto	Muestreo realizado
Número de muestras totales		55 muestras	56 muestras
Matrices analizadas		Suelo (53 muestras) Polvo (2 muestras)	Suelo (40 muestras) Polvo (2 muestras) Sedimento (10 muestras) Agua superficial (4 muestras)
Número de muestras por área de vigilancia	AN-1	6	6
	LA-1	5	5
	MA-1	2	1
	MA-2	6	4
	MA-3	4	6
	MA-4	6	8
	MA-5	6	6
	MP-1	4	4
	MP-2	7	7
	PU-1	4	4
	PU-2	5	5
Número de muestras por fuente difusa (no considera muestras de agua)	Agricultura	5	4
	Pecuario	4	3
	Background	22	23
	Extracción áridos	2	2
	Industrial	3	3
	Inmobiliario/urbano	6	7
	Minería	6	2
	Riego con riles	5	6
	Vertederos	2	2
Número de muestras por uso de suelo (no considera muestras de agua)	Áreas Desprovistas de Vegetación	0	3
	Áreas Urbanas e Industriales	9	10
	Bosques	13	7
	Extracción Áridos	2	2
	Minería Industrial	1	1
	Praderas y Matorrales	14	14
	Pecuario	0	1
	Terrenos Agrícolas	5	4
	Terrenos Agrícolas riego riles	9	8
	Vertedero Ilegal	2	2

Componente		Plan de muestreo propuesto	Muestreo realizado
Cantidad de combinaciones (no considera muestras de agua)	Área de vigilancia y fuente difusa	33 combinaciones (1-2 muestras por combinación)	31 combinaciones (1-3 muestras por combinación)
	Área de vigilancia y fuente difusa (sin considerar muestras background)	22 combinaciones (1-2 muestras por combinación)	20 combinaciones (1-2 muestras por combinación)
	Área de vigilancia, fuente difusa y uso de suelo	42 combinaciones (1-2 muestras por combinación)	40 combinaciones (1-2 muestras por combinación)
	Área de vigilancia, fuente difusa y uso de suelo (sin considerar muestras background)	24 combinaciones (1-2 muestras por combinación)	23 combinaciones (1-2 muestras por combinación)
Comunas, regiones		22 comunas, 3 regiones	22 comunas, 3 regiones

Nota: se resalta en verde donde se aumenta el número de muestras con respecto al propuesta, y en amarillo, donde se disminuye.

De la tabla anterior se desprende que se realizó un mayor de número de muestras totales, aumentando la cantidad de matrices ambientales a analizar. El número de muestras por área de vigilancia fue similar, notándose que se muestrearon todas las AV de la cuenca. Por fuente difusa, si bien el número de muestras varió, esta diferencia fue pequeña (±1 muestra), a excepción de la fuente asociada a minería (-4 muestras), donde como indicado anteriormente no fue posible ingresar a las faenas mineras mismas. Con respecto a los usos de suelo, no hay mayores diferencias, a excepción del uso "bosques" y "áreas desprovistas de vegetación", donde se notan mayores diferencias (±6 y ±3 muestras, respectivamente), pero todas corresponden a muestras asociadas a background.

Con respecto la cantidad de combinaciones de área de vigilancia/fuente difusa/uso de suelo, considerando muestras background, se observa que disminuye levemente la cantidad de combinaciones realizadas, pero se mantiene o aumenta el número de muestras por combinación, lo que permite mantener una cobertura similar a la propuesta.

Por último, se nota que se mantiene la representatividad en las comunas de las 3 regiones, existiendo diferencias mínimas en la cantidad por comuna (±3 muestras), además de concretando una muestra en Cerrillos en lugar de Maipú como fue propuesto.

Cabe notar que los cambios indicados no modifican el rol del muestreo dentro del estudio, que corresponde a una línea de evidencia complementaria (ver Sección 3.1). Tampoco afectan la estimación de los coeficientes de exportación ni de las cargas de contaminantes, debido a que el proceso de modelación se realizó utilizando datos de monitoreo históricos de caudales y calidad de aguas (Secciones 4 y 5), y no los resultados del presente muestreo.

3.2.5 Ubicación de puntos de muestreo

La ubicación de los puntos efectivamente muestreados se presenta en la Figura 16 y Tabla 21. Además, se presenta en el Anexo 9 los archivos en formato *shapefile* y *kmz* para su visualización en SIG.

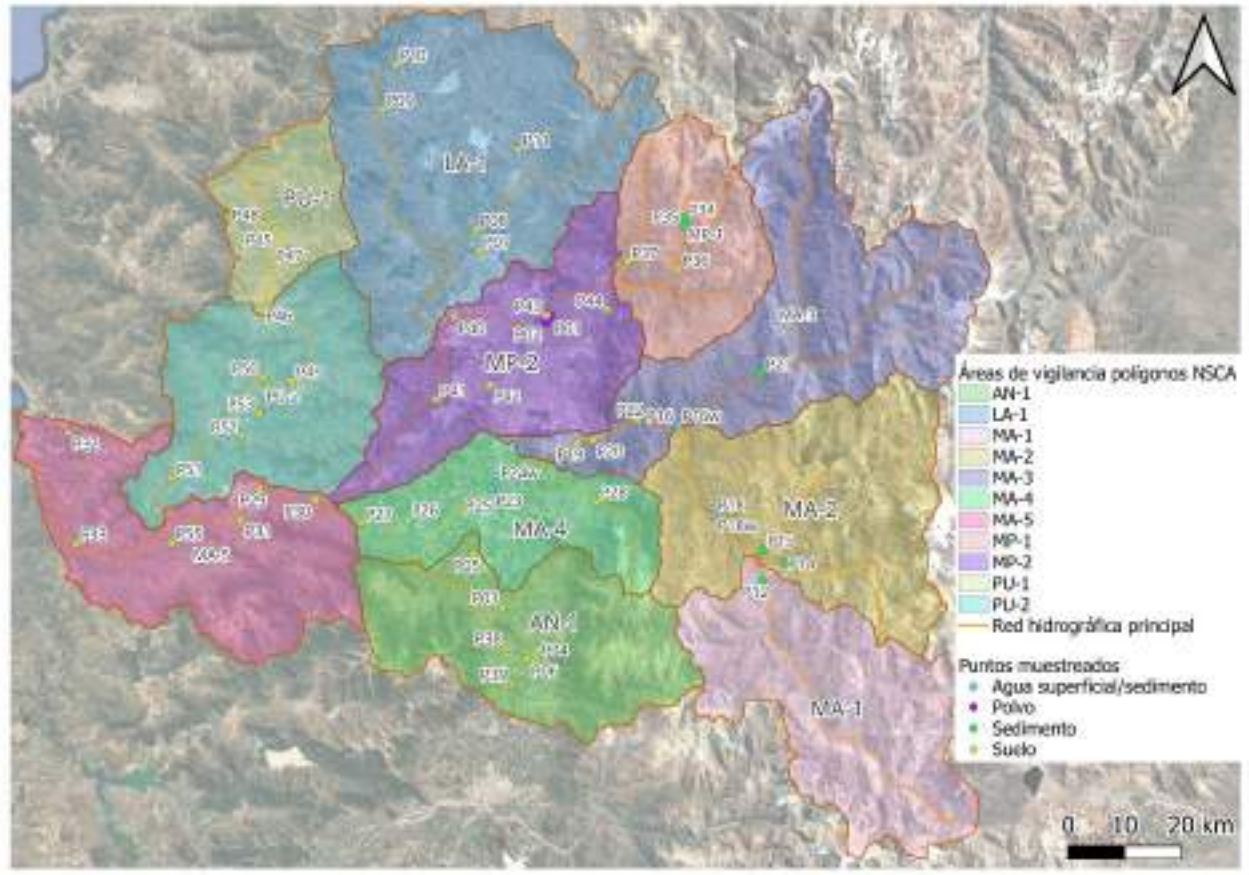


Figura 16 – Puntos de muestreo realizado
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 – Puntos de muestreo realizado

N°	Matriz	Área de vigilancia	Fuente difusa asociada	Uso de suelo asociado	Coord Este	Coord Norte	Comuna
P01	Polvo	MP-2	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	350638	6301439	Las Condes
P02	Polvo	MP-2	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	349694	6300405	Providencia
P03	Suelo	AN-1	Background	Praderas y Matorrales	342080	6250108	Paine
P04	Suelo	AN-1	Background	Praderas y Matorrales	348254	6242610	Mostazal
P05	Suelo	AN-1	Riego con riles	Terrenos Agrícolas riego riles	336980	6259462	Buin
P06	Suelo	AN-1	Pecuario	Terrenos Agrícolas riego riles	346416	6240735	Mostazal
P07	Suelo	LA-1	Industrial	Áreas Urbanas e Industriales	337954	6313212	Lampa
P08	Suelo	LA-1	Industrial	Áreas Urbanas e Industriales	337407	6316881	Lampa
P09	Suelo	LA-1	Background	Praderas y Matorrales	320820	6338187	Tiltil

N°	Matriz	Área de vigilancia	Fuente difusa asociada	Uso de suelo asociado	Coord Este	Coord Norte	Comuna
P10	Suelo	LA-1	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	323116	6346155	Tiltil
P11	Suelo	LA-1	Background	Praderas y Matorrales	344994	6331063	Colina
P12	Sedimento	MA-1	Background	Praderas y Matorrales	388085	6254794	San José de Maipo
P14	Sedimento	MA-2	Background	Praderas y Matorrales	391929	6257858	San José de Maipo
P15	Sedimento	MA-2	Background	Áreas Desprovistas de Vegetación	388141	6260190	San José de Maipo
P16	Sedimento	MA-3	Background	Praderas y Matorrales	373069	6282329	San José de Maipo
P16w	Agua superficial	MA-3	Background	Praderas y Matorrales	373069	6282329	San José de Maipo
P18	Sedimento	MA-2	Background	Praderas y Matorrales	379451	6266533	San José de Maipo
P18w	Agua superficial	MA-2	Background	Praderas y Matorrales	379451	6266533	San José de Maipo
P19	Suelo	MA-3	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	355223	6279086	Puente Alto
P20	Suelo	MA-3	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	357987	6279603	Puente Alto
P21	Sedimento	MA-3	Background	Áreas Desprovistas de Vegetación	387975	6291455	San José de Maipo
P22	Suelo	MA-3	Background	Bosques	365860	6283317	Pirque
P23	Sedimento	MA-4	Extracción áridos	Extracción áridos	340053	6270899	San Bernardo
P23w	Agua superficial	MA-4	Extracción áridos	Extracción áridos	340053	6270899	San Bernardo
P24	Sedimento	MA-4	Extracción áridos	Extracción áridos	340918	6272267	San Bernardo
P24w	Agua superficial	MA-4	Extracción áridos	Extracción áridos	340918	6272267	San Bernardo
P25	Suelo	MA-4	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	334729	6266484	Buin
P26	Suelo	MA-4	Riego con riles	Terrenos Agrícolas riego riles	325247	6265673	Isla de Maipo
P27	Suelo	MA-4	Background	Praderas y Matorrales	317098	6264960	Isla de Maipo
P28	Suelo	MA-4	Background	Bosques	358678	6268734	Pirque
P29	Suelo	MA-5	Riego con riles	Terrenos Agrícolas riego riles	298960	6270996	Melipilla
P30	Suelo	MA-5	Agricultura	Terrenos Agrícolas	308839	6269024	El Monte
P31	Suelo	MA-5	Riego con riles	Terrenos Agrícolas riego riles	295743	6265559	Melipilla
P32	Suelo	MA-5	Background	Bosques	265176	6280931	San Antonio
P33	Suelo	MA-5	Background	Praderas y Matorrales	266543	6261293	San Antonio

N°	Matriz	Área de vigilancia	Fuente difusa asociada	Uso de suelo asociado	Coord Este	Coord Norte	Comuna
P34	Sedimento	MP-1	Minería	Minería Industrial	374301	6318810	Lo Barnechea
P35	Sedimento	MP-1	Minería	Praderas y Matorrales	374097	6317487	Lo Barnechea
P36	Suelo	MP-1	Background	Bosques	373288	6309777	Lo Barnechea
P37	Suelo	MP-1	Background	Bosques	364114	6311167	Lo Barnechea
P38	Suelo	AN-1	Pecuario	Terrenos Agrícolas	342635	6242870	Mostazal
P39	Suelo	AN-1	Agricultura	Terrenos Agrícolas	343616	6236443	Mostazal
P40	Suelo	MP-2	Vertederos	Vertedero Ilegal	333537	6301433	Pudahuel
P41	Suelo	MP-2	Vertederos	Vertedero Ilegal	330244	6286770	Padre Hurtado
P42	Suelo	MP-2	Industrial	Áreas Urbanas e Industriales	339827	6289448	Cerrillos
P43	Suelo	MP-2	Background	Bosques	349738	6301700	Providencia
P44	Suelo	MP-2	Background	Bosques	360510	6302659	Las Condes
P45	Suelo	PU-1	Agricultura	Terrenos Agrícolas	301944	6317101	Curacaví
P46	Suelo	PU-1	Riego con riles	Terrenos Agrícolas riego riles	299423	6303634	Curacaví
P47	Suelo	PU-1	Background	Áreas Desprovistas de Vegetación	301216	6310689	Curacaví
P48	Suelo	PU-1	Background	Praderas y Matorrales	299671	6317899	Curacaví
P49	Suelo	PU-2	Riego con riles	Terrenos Agrícolas riego riles	304738	6290114	María Pinto
P50	Suelo	PU-2	Pecuario	Pecuario	299596	6290751	María Pinto
P51	Suelo	PU-2	Inmobiliario/ urbano	Áreas Urbanas e Industriales	283499	6272876	Melipilla
P52	Suelo	PU-2	Background	Praderas y Matorrales	295909	6280372	Melipilla
P53	Suelo	PU-2	Background	Praderas y Matorrales	298792	6284372	Melipilla
P55	Suelo	MA-5	Agricultura	Terrenos Agrícolas riego riles	283482	6261411	Melipilla

Nota: Coordenadas en UTM Datum WGS84, huso 19; NA: no aplica.

3.2.6 Descripción de las muestras

En la Tabla 22 se presenta el registro de las muestras, que incluye la fecha y hora de muestreo, la descripción, ubicación y observaciones de estas. En la Tabla 23 se presentan los valores de los parámetros medidos en terreno en agua superficial.

Tabla 22 – Descripción de muestras

Muestra	Fecha y hora	Matriz	Descripción	Color	Humedad	Ubicación
P01	12/12/2025 12:40	Polvo	Polvo superficial en veredas y entrada de vehículos, con basura	Café oscuro	Seco	Sector comercial
P02	12/12/2025 13:30	Polvo	Polvo superficial en veredas	Café medio	Seco	Calle residencial, Padre Mariano
P03	07/05/2026 17:40	Suelo	Limo, con raíces chicas	Café oscuro	Húmedo	Ladera de cerro
P04	25/03/2026 13:55	Suelo	Limo apelotonado, bajo zarzas	Café claro	Seco	Costado de camino en entrada a empresa privada (Imaco?), ladera pendiente.
P05	07/05/2026 17:00	Suelo	Limo, con raíces	Café medio	Húmedo	Terreno agrícola, ahora sin cultivos
P06	25/03/2026 13:20	Suelo	Limo, vegetación seca	Café claro	Levemente húmedo	Terreno de uso pecuario posiblemente, aledaño a Agrosuper al parecer inactivo. Orilla de carretera
P07	18/03/2026 15:10	Suelo	Arena fina a gruesa con gravilla, vegetación	Café claro	Seco	Orilla de camino pavimentado, sector industrial, bodegaje
P08	18/03/2026 14:30	Suelo	Arcilla arenosa, gravas de todos los tamaños, vegetación seca	Café grisáseo	Seco	Sitio eriazo de sector industrial de Lampa
P09	18/03/2026 12:30	Suelo	Arcilla arenosa, gravas angulares, vegetación amarilla	Café rojizo	Seco	Cerros de Tiltil, a orilla del camino
P10	18/03/2026 11:50	Suelo	Arena limosa, gravas angulares, vegetación seca	Café	Seco	Cerca de estero Rungue. Al lado de ex central y vías de tren
P11	18/03/2026 14:00	Suelo	Arcilla arenosa (franca/*loam*), vegetación seca, raíces	Café	Seco	Entrada SSC Space, cercano a terreno de Tranque Tórtolas
P12	12/05/2026 15:30	Sedimento	Sedimento. Arena media a fina	Café	Mojado	Río Maipo, sector Las Melosas
P14	12/05/2026 14:20	Sedimento	Sedimento. Arena fina a media con limo	Café	Saturado	Río Volcán
P15	12/05/2026 13:30	Sedimento	Sedimento. Arena fina con limo	Plomizo	Mojado	Río Yeso (acceso más arriba encontrado, río encajonado)
P16	24/05/2026 16:15	Sedimento	Arena con limo	Gris oscuro	Mojado	Río Colorado, poco antes de confluencia con río Maipo
P16w	24/05/2026 16:15	Agua superficial	Agua superficial	Levemente turbia	-	Río Colorado, poco antes de confluencia con río Maipo
P18	12/05/2026 17:00	Sedimento	Sedimento. Arena fina	Café	Mojado	Río Maipo, sector San Alfonso. Aguas abajo de confluencias con río Volcán, Yeso, San Gabriel y Manzanito. Justo aguas arriba de estero San Alfonso
P18w	12/05/2026 17:00	Agua superficial	Agua superficial	Levemente turbia	-	Río Maipo, sector San Alfonso. Aguas abajo de confluencias con río Volcán, Yeso, San Gabriel y Manzanito. Justo aguas arriba de estero San Alfonso

Muestra	Fecha y hora	Matriz	Descripción	Color	Humedad	Ubicación
P19	24/05/2026 14:30	Suelo	Limo con gravas angulares	Café claro	Seco	Ladera de cerro, cercano río Maipo
P20	24/05/2026 15:00	Suelo	Limo con gravas angulares	Café grisáseo claro	Seco	Ladera de cerro, cercano río Maipo
P21	25/05/2026 14:40	Sedimento	Sedimento. Arena media a gruesa	Café	Mojado	Río Colorado, aguas debajo de embalse El Alfalfal de AES Gener
P22	25/05/2026 17:20	Suelo	Limo con arcilla	Café	Seco	Ladera cerro, costado camino El Toyo
P23	11/05/2026 16:20	Sedimento	Sedimento. Arena fina y limo	Café	Mojado	Río Maipo. Aguas abajo de puente de Ruta 5, sector extracción de áridos
P23 w	11/05/2026 16:20	Agua superficial	Agua superficial	Transparente	-	Río Maipo. Aguas abajo de puente de Ruta 5, sector extracción de áridos
P24	11/05/2026 17:00	Sedimento	Sedimento. Arena fina y limo	Café	Mojado	Río Maipo. Aguas arriba de puente de Ruta 5, sector extracción de áridos
P24 w	11/05/2026 17:00	Agua superficial	Agua superficial	Levemente turbia	-	Río Maipo. Aguas arriba de puente de Ruta 5, sector extracción de áridos
P25	11/05/2026 14:30	Suelo	Limo, vegetación seca	Café claro	Seco	Ladera en pequeño cerro, al límite de sector urbano
P26	07/05/2026 14:30	Suelo	Limo con algo de arcilla	Café oscuro	Húmedo	Costado de viñedo (entrada Viña de Martino)
P27	07/05/2026 13:40	Suelo	Limo arcilloso, con raíces y vegetación seca, rocas angulares, en ladera (perfil)	Café rojizo	Húmedo	Ladera de cerro, sector natural
P28	26/05/2026 12:10	Suelo	Limo, con raíces	Café claro	Húmedo	Parque Nacional Río Clarillo, bajo árbol
P29	05/05/2026 14:20	Suelo	Limo, con raíces secas	Café	Levemente húmedo	Costado terreno agrícola
P30	05/05/2026 14:50	Suelo	Limo	Café oscuro	Húmedo	Costado terreno agrícola
P31	05/05/2026 13:40	Suelo	Limo, con raíces	Café claro	Levemente húmedo	Costado de plantación de naranjos
P32	04/05/2026 14:50	Suelo	Limo arcilloso, con raíces y vegetación seca, rocas angulares, en ladera (perfil)	Anaranjado	Húmedo	Orilla de camino que va hacia puente de estero El Sauce
P33	04/05/2026 17:10	Suelo	Limo arcilloso, con raíces	Café oscuro	Levemente húmedo	Sector de parcelas, cercano a cultivos
P34	16/03/2026 11:50	Sedimento	Sedimento. Limo con arena, sin vegetación, gravas angulares distintos tamaños	Café claro-grisáseo	Seco	Río San Francisco, entrada Mina Los Bronces, sedimento seco
P35	16/03/2026 12:10	Sedimento	Sedimento. Arena fina con limo, gravas angulares distintos tamaños	Café claro-grisáseo	Seco	Río San Francisco, camino hacia Mina Los Bronces, sedimento seco
P36	16/03/2026 12:50	Suelo	Limo arcilloso con gravas angulares, vegetación seca	Café rojizo	Seco	Ladera estero Yerbaloca

Muestra	Fecha y hora	Matriz	Descripción	Color	Humedad	Ubicación
P37	16/03/2026 15:50	Suelo	Arena limosa con gravas angulares y redondeadas, sin vegetación	Café	Húmedo	Estero Arrayán, orilla
P38	25/03/2026 15:50	Suelo	Limo con arcilla, con materia orgánica	Café oscuro	Levemente húmedo	Entrada a terreno con caballos
P39	25/03/2026 15:30	Suelo	Limo arcilloso, sin vegetación	Café claro	Seco	Terreno agrícola de Garces Fruit
P40	17/03/2026 17:00	Suelo	Limo arenoso, con vegetación seca, raíces	Café claro	Seco	Borde de depósito de escombros/basural
P41	05/05/2026 15:50	Suelo	Limo arenoso, raíces secas, gravas	Café plomizo	Seco	Costado de camino en sector residencial (campamento al parecer) al lado de vertedero, cerca de Planta El Trebal
P42	26/05/2026 15:10	Suelo	Limo, con gravas angulares	Gris	Seco	Sector eriazo Maipú, cerca de reja
P43	26/05/2026 11:00	Suelo	Limo, aglomerado, vegetación seca	Café oscuro	Levemente húmedo	Ladera cerro San Cristóbal, Providencia
P44	16/03/2026 17:20	Suelo	Limo, vegetación seca	Café oscuro	Seco	Parque Apoquindo La Plaza, sin curso de agua cerca
P45	17/03/2026 12:55	Suelo	Limo arenoso con gravillas, vegetación seca	Café claro	Seco	Orilla camino, sector agrícola
P46	17/03/2026 14:20	Suelo	Limo arenoso, con vegetación seca	Café claro	Seco	Orilla camino y campo agrícola en rotación
P47	17/03/2026 13:20	Suelo	Limo con arcilla, vegetación seca	Café claro	Seco	Lecho del estero Puangue, seco, bajo puente
P48	17/03/2026 12:00	Suelo	Limo arenoso, con vegetación seca	Café claro	Seco	Estero Puangue, cauce seco
P49	24/03/2026 14:30	Suelo	Arcilla con limo, vegetación seca	Café oscuro	Seco	Terreno agrícola al parecer no cultivado actualmente
P50	24/03/2026 13:50	Suelo	Limo orgánico, vegetación seca	Café claro	Seco	Terreno agrícola aledaño a industria de pollos; a orilla de camino (cerco)
P51	04/05/2026 18:10	Suelo	Limo con arena, algo de vegetación	Café claro	Seco	Orilla escuela Puangue y cercanía estero Puangue
P52	24/03/2026 16:00	Suelo	Limo arenoso, vegetación seca	Café claro	Seco	Sector natural en la falda del cerro, a orilla del camino
P53	24/03/2026 16:40	Suelo	Limo. Posiblemente iluviasión (horizonte más claro)	Café claro amarillento	Seco	Sector natural en la ladera del cerro (perfil visible), a orilla del camino
P55	05/05/2026 12:40	Suelo	Limo, con pocas raíces	Café claro	Seco	Orilla de camino, área agrícola

Tabla 23 – Parámetros fisicoquímicos de terreno en agua

Punto	pH	CE (µS/cm)	T (°C)
P12	7,93	2230	10,22
P14	7,81	1404	10,34
P15	8,15	1047	11,45
P18	7,99	1803	9,7
P21	8,23	1302	6,74

Punto	pH	CE (µS/cm)	T (°C)
P23	8,22	1589	13,2
P24	8,09	1599	13,16

3.2.7 Análisis en laboratorio de muestras

Los análisis fisicoquímicos de las muestras se realizaron en el laboratorio ALS, que se encuentra acreditado por el organismo internacional de acreditación IAS, según ISO/IEC 17025:2017 para los ensayos.

A continuación, se presentan los análisis realizados a cada muestra de suelo/sedimento/polvo y agua superficial en la Tabla 24 y la Tabla 25, respectivamente (la "X" indica que se realizó el análisis indicado a la muestra). Las cadenas de custodia de las muestras ingresadas al laboratorio se presentan en el Anexo 6.

Tabla 24 – Parámetros analizados para muestras de suelo/sedimento/polvo

Muestra	Matriz	Aniones + especies nitrógeno	Zinc + pH + CE	Plomo	Carbono orgánico + Granulometría
P01	Polvo			X	
P02	Polvo			X	
P03	Suelo	X	X		
P04	Suelo	X	X		
P05	Suelo	X	X		
P06	Suelo	X	X		
P07	Suelo	X	X		
P08	Suelo	X	X		
P09	Suelo	X	X		
P10	Suelo	X	X		
P11	Suelo	X	X		X
P12	Sedimento	X	X	X	X
P14	Sedimento	X	X	X	
P15	Sedimento	X	X	X	
P16	Sedimento	X	X	X	
P18	Sedimento	X	X	X	X
P19	Suelo	X	X		
P20	Suelo	X	X	X	X
P21	Sedimento	X	X	X	
P22	Suelo	X	X	X	X
P23	Sedimento	X	X	X	
P24	Sedimento	X	X	X	
P25	Suelo	X	X		
P26	Suelo	X	X		
P27	Suelo	X	X		X
P28	Suelo	X	X	X	
P29	Suelo	X	X		
P30	Suelo	X	X		
P31	Suelo	X	X		

Muestra	Matriz	Aniones + especies nitrógeno	Zinc + pH + CE	Plomo	Carbono orgánico + Granulometría
P32	Suelo	X	X		X
P33	Suelo	X	X		
P34	Sedimento	X	X	X	
P35	Sedimento	X	X	X	X
P36	Suelo	X	X	X	
P37	Suelo	X	X	X	
P38	Suelo	X	X		
P39	Suelo	X	X		X
P40	Suelo	X	X		
P41	Suelo	X	X		
P42	Suelo	X	X	X	
P43	Suelo	X	X	X	X
P44	Suelo	X	X		
P45	Suelo	X	X		
P46	Suelo	X	X		X
P47	Suelo	X	X		
P48	Suelo	X	X		
P49	Suelo	X	X		
P50	Suelo	X	X		X
P51	Suelo	X	X		
P52	Suelo	X	X		
P53	Suelo	X	X		
P55	Suelo	X	X		X

Tabla 25 – Parámetros analizados para muestras de agua superficial

Muestra	Matriz	Aniones	Metales disueltos	pH + CE	NTK + amonio
P16w	Agua superficial	X	X	X	X
P18w	Agua superficial	X	X	X	X
P23w	Agua superficial	X	X	X	X
P24w	Agua superficial	X	X	X	

Por último, en la Tabla 26 y Tabla 27 se presentan los métodos y límites analíticos para cada parámetro analizado en el laboratorio.

Tabla 26 – Métodos y límites analíticos indicados por el laboratorio (suelos)

Parámetro	Código	Matriz	Método	LD	LQ	Unidad
Fosfato	PO_4^{-3}	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	5	14,8	mg/kg
Fosfato-P	$P\text{-}PO_4^{-3}$	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	1	4,8	mg/kg

Parámetro	Código	Matriz	Método	LD	LQ	Unidad
Nitrato	NO_3^-	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	2,0	4,3	mg/kg
Nitrógeno-Nitrato	$N\text{-}NO_3^-$	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	0,5	1,00	mg/kg
Nitrito	NO_2^-	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	1,00	2,00	mg/kg
Nitrógeno-Nitrito	$N\text{-}NO_2^-$	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	0,10	0,60	mg/kg
Sulfato	SO_4^{-2}	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	2,00	6,90	mg/kg
Fluoruro	F^-	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	1,00	2,20	mg/kg
Bromuro	Br^-	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	2,00	5,20	mg/kg
Cloruro	Cl^-	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	0,5	1,40	mg/kg
Clorato	ClO_3^-	Suelo	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8). QWI-IO-LIXI-01 (Issue B Modification 4).	1,00	2,00	mg/kg
pH	pH	Suelo	QWI-IO-pH-01 Emisión B mod. 4 QWI-IO-LIXI-01 Emisión B mod. 4	–	–	–
Conductividad eléctrica	CE	Suelo	QWI-IO-CE-01 Emisión B mod. 6 QWI-IO-LIXI-01 Emisión B mod. 3	1,0	1,5	µS/cm
Zinc	Zn	Suelo	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modif 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modif 6).	0,1	1,5	mg/kg
Plomo	Pb	Suelo	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modif 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modif 6).	0,10	1,00	mg/kg
Nitrógeno amoniacal	$N\text{-}NH_4^+$	Suelo	SM 4500 NH3-D Ed 23, 2017	3,9	10,0	mg/kg
Amonio	NH_4^+	Suelo	SM 4500 NH3-D Ed 23, 2017	5,0	10,0	mg/kg
Nitrógeno Total Kjeldahl	NTK	Suelo	Standard Methods Ed 23, 2017; 4500 N-B	10	50	mg/Kg
Carbono orgánico	COT	Suelo	QWI-IO-CO-02 (Issue A Modification 0)	0,3	--	%
Granulometría	Gran	Suelo	QWI-IO-GRANULO-01 (Issue A Modif 2).	–	–	%

Nota: se indican como "suelo" también las matrices de sedimento y polvo; LD: límite de detección; LQ: límite de cuantificación.

Tabla 27 – Métodos y límites analíticos indicados por el laboratorio (aguas)

Parámetro	Código	Matriz	Método	LD	LQ	Unidad
Conductividad eléctrica	CE	Agua	QWI-IO-CE-01 (Issue B Modification 7).	1	1,5	µS/cm
pH	pH	Agua	QWI-IO-pH-01 Emisión B mod. 4	---	---	---
Fósforo Disuelto	P	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,001	0,005	mg/L
Nitrógeno amoniacal	$N\text{-}NH_4^+$	Agua	QWI-IO-N-NH3-02 (Issue A Modification 3)	0,03	0,1	mg/L
Nitrógeno Kjeldahl	NTK	Agua	QWI-IO-TKN-02 (Issue A Modification 5).	0,5	1	mg/L

Parámetro	Código	Matriz	Método	LD	LQ	Unidad
Amonio	NH_4^+	Agua	SM 4500-NH3-D, Ed.23 2017	0,03	0,1	mg/L
Fluoruro	F^-	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,01	0,06	mg/L
Nitrito	$NO2^-$	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,1	0,3	mg/L
Fosfato	$P\text{-}PO_4^{-3}$	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,1	0,35	mg/L
Bromuro	Br^-	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,05	0,1	mg/L
Nitrato	NO_3^-	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,1	0,22	mg/L
Cloruro	Cl^-	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,05	0,08	mg/L
Sulfato	SO_4^{-2}	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,05	0,12	mg/L
Clorato	ClO_3^-	Agua	QWI-IO-ANA-01 (Issue B Modification 8) QWI-IO-EXT-01 (Issue B Modification 4)	0,1	0,11	mg/L
Hierro Disuelto	Fe dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,001	0,006	mg/L
Aluminio Disuelto	Al dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,005	0,01	mg/L
Bario Disuelto	Ba dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0003	mg/L
Berilio Disuelto	Be dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00001	0,00002	mg/L
Cadmio Disuelto	Cd dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00001	0,00002	mg/L
Calcio Disuelto	Ca dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,01	0,06	mg/L
Cobalto Disuelto	Co dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00005	0,0001	mg/L
Cobre Disuelto	Cu dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L
Cromo Disuelto	Cr dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00005	0,0001	mg/L
Estaño Disuelto	Sn dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L
Estroncio Disuelto	Sr dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0006	mg/L

Parámetro	Código	Matriz	Método	LD	LQ	Unidad
Magnesio Disuelto	Mg dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,001	0,005	mg/L
Manganeso Disuelto	Mn dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00005	0,0001	mg/L
Molibdeno Disuelto	Mo dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0002	mg/L
Plata Disuelta	Ag dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00001	0,00002	mg/L
Plomo Disuelto	Pb dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0004	mg/L
Silicio Disuelto	Si dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,01	0,03	mg/L
Vanadio Disuelto	Va dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0003	mg/L
Potasio Disuelto	K dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,001	0,009	mg/L
Litio Disuelto	Li dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0003	mg/L
Sodio Disuelto	Na dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,005	0,01	mg/L
Zinc Disuelto	Zn dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0007	mg/L
Arsénico Disuelto	As dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0003	mg/L
Selenio Disuelto	Se dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0003	mg/L
Antimonio Disuelto	Sb dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0002	mg/L
Bismuto Disuelto	Bi dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00001	0,00002	mg/L
Boro Disuelto	Bo dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,001	0,002	mg/L
Talio Disuelto	Tl dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0002	mg/L

Parámetro	Código	Matriz	Método	LD	LQ	Unidad
Titanio Disuelto	Ti dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0002	mg/L
Uranio Disuelto	U dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00001	0,00006	mg/L
Mercurio Disuelto	Hg dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00005	0,0001	mg/L
Cesio Disuelto	Cs dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L
Oro Disuelto	Au dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L
Torio Disuelto	Th dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L
Níquel Disuelto	Ni dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,00005	0,0001	mg/L
Wolframio Disuelto	W dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L
Telurio Disuelto	Te dis	Agua	QWI-IO-ANA-02 ICPMS (Issue B Modification 3), QWI-IO-EXT-02 (Issue B Modification 6).	0,0001	0,0005	mg/L

Notas: LD: límite de detección; LQ: límite de cuantificación.

Como se indicó previamente, los análisis de suelo constituyeron una línea de evidencia complementaria y no fueron utilizados como insumo directo para la estimación de los coeficientes de exportación. Esto responde a que el número y distribución de las muestras, aun siendo adecuados para una caracterización exploratoria, no permiten representar directamente la heterogeneidad de usos de suelo, tipos de suelo y condiciones geológicas de áreas de vigilancia de gran extensión. Por esta razón, las propiedades de suelo requeridas para la parametrización del modelo se obtuvieron a partir de bases espaciales disponibles a escala de cuenca, tales como CLSoilMaps y el mapa nacional de carbono orgánico del suelo, mientras que los CE se estimaron a partir de concentraciones observadas en agua, caudales y superficies de uso de suelo. En este contexto, el conjunto de análisis de laboratorio se definió de manera diferenciada, priorizando los parámetros de mayor pertinencia para los objetivos del estudio y aplicando criterios de costo-eficiencia dentro del presupuesto disponible.

En particular, el plomo correspondió a un análisis complementario incorporado posteriormente y de manera dirigida. Tal como se señala en la 3.2.4, su análisis se agregó en determinadas muestras de sectores urbanos y de las áreas MA-2 y MA-3 a solicitud de la contraparte técnica, debido al aumento de concentraciones observado en monitoreos asociados a la norma. Por lo tanto, no se planteó como un parámetro necesario para todas las muestras y, además de no estar declarado en condición de saturación o latencia. De manera similar, la granulometría se utilizó como antecedente complementario de caracterización física en un subconjunto de muestras y no como base para construir individualmente los perfiles de suelo del modelo, parametrizándose estos a partir de información espacial de escala de cuenca. En consecuencia, repetir este análisis en todas las muestras habría aumentado el costo sin modificar directamente la parametrización utilizada ni la estimación de los coeficientes de exportación.

Respecto del carbono orgánico, su determinación aporta información útil para la caracterización del suelo y para interpretar procesos asociados a materia orgánica, pero no existe una relación directa que permita convertir el carbono orgánico del suelo en DBO_5 exportada (que sería el parámetro monitoreado más relacionado). La DBO_5 representa demanda de oxígeno asociada a materia orgánica biodegradable y también puede incorporar consumo de oxígeno por otros procesos, como la nitrificación. Por ello, medir carbono orgánico en todas las muestras no habría permitido estimar directamente los coeficientes de exportación de DBO_5, los cuales fueron obtenidos a partir de información de calidad de agua, caudal y superficie de usos de suelo.

3.3 Resultados de análisis de laboratorio

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de las muestras de suelo, polvo y sedimento. Los informes de laboratorio se encuentran en el Anexo 7 y la base de datos con los resultados consolidados y sistematizados se incluye en el Anexo 8. Por otro lado, los resultados se pueden visualizar en sistemas de información geográfica mediante los archivos *shapefile* incluidos en el Anexo 9.

3.3.1 Resultados de muestras de suelo, sedimentos y polvo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en muestras de suelo, sedimentos y polvo, junto con estadísticos básicos de los datos. Cabe notar que la media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD).

Tabla 28 – Resultados de muestras de suelo, sedimentos y polvo

Muestra	Cl^-	SO_4^{-2}	PO_4^{-3}	$P\text{-}PO_4^{-3}$	F^-	Br^-	ClO_3^-
P01	-	-	-	-	-	-	-
P02	-	-	-	-	-	-	-
P03	5,5	8,31	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P04	30,12	37,55	30,97	10,1	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P05	12,2	31,32	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P06	30,44	29,94	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P07	16,02	30,85	31,07	10,13	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P08	53,74	76,64	32,97	10,75	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P09	33,17	34,74	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P10	26,54	42,5	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P11	28,74	26,87	34,51	11,26	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P12	178,2	263,1	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P14	26,12	15,38	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P15	21,66	71,23	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P16	56,71	289,5	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P18	735,3	483,5	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P19	30,61	62,39	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P20	39,7	38,78	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P21	55,18	184,2	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P22	16,05	18,71	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P23	115	297	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P24	51,18	123,3	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00

Muestra	Cl^-	SO_4^{-2}	PO_4^{-3}	$P\text{-}PO_4^{-3}$	F^-	Br^-	ClO_3^-
P25	34,89	283,5	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P26	23,81	26,92	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P27	22,04	42,97	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P28	12,46	18,81	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P29	558,5	621,6	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P30	107,9	112,7	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P31	66,59	94,06	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P32	21,61	8,85	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P33	21,26	11,13	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P34	79,6	83,22	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P35	233,8	158,2	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P36	47,79	58,56	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P37	15,14	46,21	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P38	7003	7709	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P39	31,93	85,5	32,49	10,6	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P40	87,54	87,47	48,38	15,78	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P41	139,1	623	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P42	54,55	166,6	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P43	42,35	46,92	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P44	20,08	33,31	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P45	64,51	51,2	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P46	203,4	67,62	47,38	15,45	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P47	24,46	43,53	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P48	16,08	28,01	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P49	130,9	47,72	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P50	628	125,7	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P51	38,1	28,88	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P52	32,53	27,74	30,78	10,04	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P53	1126	43,72	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
P55	56,49	112,4	< 5,00	< 1,00	< 1,00	< 2,00	< 1,00
LD	0,5	2	5	1	1	2	1
Min	5,5	8,31	<5	<1	<1	<2	<1
Max	7003	7709	48,38	15,78	<1	<2	<1
Media	250,1	261,2	36,1	11,8	<1	<2	<1
Desv Est	996,7	1084	7,4	2,4	-	-	-

Notas: Concentraciones en mg/kg; media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD); "-" donde no hay valores.

Muestra	NTK	NH_4^+	$N\text{-}NH_4^+$	NO_3^-	$N\text{-}NO_3^-$	NO_2^-	$N\text{-}NO_2^-$
P01	-	-	-	-	-	-	-
P02	-	-	-	-	-	-	-
P03	124	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10

Muestra	NTK	NH_4^+	$N\text{-}NH_4^+$	NO_3^-	$N\text{-}NO_3^-$	NO_2^-	$N\text{-}NO_2^-$
P04	811	< 5,0	< 3,9	41,92	9,47	< 1,00	< 0,10
P05	125	< 5,0	< 3,9	29,22	6,6	< 1,00	< 0,10
P06	683	< 5,0	< 3,9	67,92	15,34	< 1,00	< 0,10
P07	430	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P08	1404	< 5,0	< 3,9	50,08	11,31	16,89	5,14
P09	885	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P10	578	< 5,0	< 3,9	54,85	12,38	10,86	3,3
P11	458	< 5,0	< 3,9	18,36	4,15	< 1,00	< 0,10
P12	74	5,6	4,4	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P14	86	< 5,0	< 3,9	51,65	11,66	< 1,00	< 0,10
P15	120	6	4,7	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P16	1229	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P18	120	8,4	6,5	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P19	423	5,5	4,3	49,92	11,27	< 1,00	< 0,10
P20	484	< 5,0	< 3,9	72,23	16,31	< 1,00	< 0,10
P21	910	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P22	946	< 5,0	< 3,9	68,16	15,39	< 1,00	< 0,10
P23	138	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P24	132	5	3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P25	133	< 5,0	< 3,9	46,72	10,55	< 1,00	< 0,10
P26	119	< 5,0	< 3,9	128,7	29,06	< 1,00	< 0,10
P27	175	< 5,0	< 3,9	101,5	22,93	< 1,00	< 0,10
P28	503	< 5,0	< 3,9	52,14	11,77	< 1,00	< 0,10
P29	79	< 5,0	< 3,9	141,1	31,85	< 1,00	< 0,10
P30	180	< 5,0	< 3,9	1428	322,5	< 1,00	< 0,10
P31	231	< 5,0	< 3,9	282,1	63,69	< 1,00	< 0,10
P32	404	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P33	393	< 5,0	< 3,9	28,29	6,39	< 1,00	< 0,10
P34	4920	< 5,0	< 3,9	24,72	5,58	< 1,00	< 0,10
P35	536	< 5,0	< 3,9	21,74	4,91	< 1,00	< 0,10
P36	2373	< 5,0	< 3,9	145,3	32,81	< 1,00	< 0,10
P37	526	< 5,0	< 3,9	27,27	6,16	< 1,00	< 0,10
P38	5229	< 5,0	< 3,9	1061	239,6	< 1,00	< 0,10
P39	249	< 5,0	< 3,9	221,6	50,03	< 1,00	< 0,10
P40	2084	9,1	7,1	126,2	28,5	34,93	10,63
P41	136	< 5,0	< 3,9	151,7	34,25	< 1,00	< 0,10
P42	789	< 5,0	< 3,9	250,6	56,58	< 1,00	< 0,10
P43	499	< 5,0	< 3,9	88	19,87	< 1,00	< 0,10
P44	4445	< 5,0	< 3,9	102,6	23,17	< 1,00	< 0,10
P45	5494	10,8	8,4	72,62	16,4	11,45	3,48
P46	4905	13,2	10,3	988,4	223,2	57,92	17,63
P47	691	< 5,0	< 3,9	49,68	11,22	12,37	3,76

Muestra	NTK	NH_4^+	$N\text{-}NH_4^+$	NO_3^-	$N\text{-}NO_3^-$	NO_2^-	$N\text{-}NO_2^-$
P48	1252	< 5,0	< 3,9	20,83	4,7	< 1,00	< 0,10
P49	1571	< 5,0	< 3,9	57,35	12,95	< 1,00	< 0,10
P50	1709	< 5,0	< 3,9	47,2	10,66	< 1,00	< 0,10
P51	319	< 5,0	< 3,9	101,6	22,94	< 1,00	< 0,10
P52	286	< 5,0	< 3,9	< 2,00	< 0,50	< 1,00	< 0,10
P53	579	< 5,0	< 3,9	174,9	39,49	< 1,00	< 0,10
P55	265	< 5,0	< 3,9	366,4	82,73	< 1,00	< 0,10
LD	10	5	3,9	2	0,5	1	0,1
Min	74	<5	<3,9	<2	<0,5	<1	<0,1
Max	5494	13,2	10,3	1428	322,5	57,92	17,63
Media	1024,7	8	6,2	179,3	40,5	24,1	7,3
Desv Est	1440,3	3	2,3	305,9	69,1	18,9	5,8

Notas: Concentraciones en mg/kg; media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD); "-" donde no hay valores.

Muestra	Zn	Pb	pH (-)	CE (µS/cm)	CO (%)
P01	373,5	119,5	-	-	-
P02	261,1	274,9	-	-	-
P03	49,41	-	8,2	50,6	-
P04	79,47	-	8,1	80,9	-
P05	87,89	-	8,3	85,2	-
P06	127,3	-	8,5	31,7	-
P07	97,25	-	7,8	129	-
P08	266,3	-	7,3	105,1	-
P09	115	-	6,7	114	-
P10	191,7	-	6,9	129	-
P11	72,05	-	8	830	3,3
P12	51,55	7,9	8	261	< 0,3
P14	94,32	24,05	7,9	446	-
P15	77,13	4,35	8,3	139,3	-
P16	82,36	7,03	8,4	213	-
P18	53,14	4,34	7	880	< 0,3
P19	69,72	-	8,5	116,7	-
P20	73,41	11,57	8,7	93,1	1,1
P21	52,83	5,53	8,5	295	-
P22	66,12	5,27	8,4	71,1	0,9
P23	96,01	7,91	8,2	173,1	-
P24	85,91	5,35	8,1	248	-
P25	97,55	-	7,8	110,8	-
P26	112,9	-	8,1	136,1	-
P27	190,4	-	8	173,3	1,5
P28	64,92	9,4	7,6	67,8	-

Muestra	Zn	Pb	pH (-)	CE (µS/cm)	CO (%)
P29	71,74	-	7,8	620	-
P30	126	-	7,7	736	-
P31	85,23	-	7,4	198	-
P32	89,29	-	7,6	225	0,5
P33	40,76	-	7,8	38,6	-
P34	332,4	103,2	8	51	-
P35	148,4	90,48	6,7	152	0,4
P36	80,48	13,66	7	100	-
P37	86,6	12,91	7,3	20	-
P38	91,5	-	7,8	2260	-
P39	86,42	-	8,1	157	1,2
P40	87,59	-	6,7	256	-
P41	99,08	-	8,1	411	-
P42	190,7	26,32	8	90,6	-
P43	85,91	34,26	7,1	87,4	1
P44	129,6	-	6,5	78	-
P45	41,43	-	6,3	163	-
P46	70,36	-	6,2	657	2,5
P47	99,93	-	6,4	116	-
P48	42,94	-	6,5	47	-
P49	79,32	-	8,1	116,5	-
P50	83,5	-	7,8	282	2,9
P51	82,96	-	7,6	71	-
P52	61,83	-	8	102,2	-
P53	84,36	-	8,6	25,3	-
P55	128,7	-	7,4	196,5	2,9
LD	0,1	0,1	-	1	0,3
Min	40,76	4,34	6,2	20	<0,3
Max	373,5	274,9	20	2260	3,3
Media	107,6	40,4	-	244,7	1,7
Desv Est	68,9	67,1	-	356	1

Notas: Concentraciones en mg/kg, excepto donde se indique otra unidad; media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD); "-" donde no hay valores.

	Malla / Porcentaje retenido (% masa/masa)									
Muestra	N° 5	N° 10	N° 18	N° 20	N° 35	N° 60	N° 100	N° 140	N° 200	Fino
	4 mm	2 mm	1 mm	850 µm	500 µm	250 µm	150 µm	106 µm	75 µm	< 75 µm
P11	0	0	0	0	15,1	18,3	19	18,6	16	13,3
P12	0	0	0	5,2	11	13,7	18,3	20,7	17,5	14,6
P18	0	0	0	4	13,9	14,7	15,9	17,8	17,7	15,8
P20	0	0	0	0	0	18,1	21,2	23	21	17,2
P22	0	0	0	0	13,5	15	17,2	19,8	18,4	16,4

Muestra	Malla / Porcentaje retenido (% masa/masa)									
	N° 5	N° 10	N° 18	N° 20	N° 35	N° 60	N° 100	N° 140	N° 200	Fino
	4 mm	2 mm	1 mm	850 µm	500 µm	250 µm	150 µm	106 µm	75 µm	< 75 µm
P27	0	0	0	8,1	11,2	12,8	16,3	16,8	18,6	16,4
P32	0	0	0	8,9	13,6	14,6	15	15,9	17,8	14,8
P35	0	0	0	0	15,2	17,6	15,5	18,4	19,2	14,3
P39	0	0	0	0	11,8	17,4	17,7	19,2	18	15,7
P43	0	0	0	0	11,3	13,8	17,7	20,7	20	16,6
P46	0	0	0	0	9,9	15,3	18,3	20,1	18,3	17,3
P50	0	0	0	0	14	13,1	17,6	21,5	18,1	16,3
P55	0	0	0	0	14,1	15,6	16,1	19,2	18,1	16,6

3.3.2 Resultados de muestras de agua

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos en muestras de agua, junto con estadísticos básicos de los datos. Cabe notar que la media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD).

Tabla 29 – Resultados de muestras de agua

Muestra	Cl^-	SO_4^{-2}	PO_4^{-3}	F^-	Br^-	ClO_3^-
P18w	360,67	276,58	< 0,10	< 0,01	< 0,05	< 0,10
P23w	268,68	465,39	< 0,10	< 0,01	< 0,05	< 0,10
P24w	283,84	492,28	< 0,10	< 0,01	< 0,05	< 0,10
P16w	273,79	216,23	< 0,10	< 0,01	< 0,05	< 0,10
LD	0,05	0,05	0,1	0,01	0,05	0,1
Min	268,68	216,23	<0,1	<0,01	<0,05	<0,1
Max	360,67	492,28	<0,1	<0,01	<0,05	<0,1
Media	296,7	362,6	<0,1	<0,01	<0,05	<0,1
Desv Est	43,1	136,9	-	-	-	-

Notas: Concentraciones en mg/L; media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD).

Muestra	NTK	NH_4^+	$N\text{-}NH_4^+$	NO_3^-	NO_2^-
P16w	-	-	-	< 0,10	< 0,10
P18w	< 0,5	0,05	0,04	< 0,10	< 0,10
P23w	< 0,5	0,04	0,03	< 0,10	< 0,10
P24w	-	-	-	< 0,10	< 0,10
LD	0,5	0,03	0,03	0,1	0,1
Min	<0,5	0,04	0,03	<0,1	<0,1
Max	<0,5	0,05	0,04	<0,1	<0,1
Media	<0,5	0,05	0,04	<0,1	<0,1
Desv Est	-	0,01	0,01	-	-

Notas: Concentraciones en mg/L; media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD); "-" donde no hay valores.

Muestra	Zn dis	Pb dis	pH (-)	CE (µS/cm)
P16w	0,00793	< 0,00010	7,4	1435
P18w	0,00632	< 0,00010	7,9	1922
P23w	0,00957	< 0,00010	8	1730
P24w	0,00542	< 0,00010	8	1686
LD	0,0001	0,0001	-	1
Min	0,00542	<0,0001	7,4	1435
Max	0,00957	<0,0001	8	1922
Media	0,00731	<0,0001	-	1693
Desv Est	0,00183	-	-	200

Notas: Concentraciones en mg/L, excepto donde se indique otra unidad; media y desviación estándar se calcularon sin considerar los valores indetectables (<LD).

3.4 Discusión de resultados de muestreo

3.4.1 Análisis estadístico de muestras de suelo

Con el propósito de complementar la presentación de resultados de laboratorio de la Sección 3.3, se realizó un análisis estadístico exploratorio de las 52 muestras de suelo, sedimento y polvo recolectadas en las 11 áreas de vigilancia (AV) de la cuenca, orientado a identificar diferencias de concentración según tres variables: (i) la fuente difusa asociada a cada punto de muestreo; (ii) el uso de suelo asociado a cada punto de muestreo, y (iii) el AV en que este se ubica.

Este análisis constituye una primera aproximación exploratoria a la relación entre fuentes difusas y calidad físico-química del suelo. Dado el número de muestras por grupo y la heterogeneidad de la cuenca, los resultados de este análisis deben interpretarse como indicativos y no como una caracterización representativa de cada uso de suelo, fuente difusa o área de vigilancia.

El análisis integral, en conjunto con los coeficientes de exportación obtenidos mediante modelación, se desarrolla en la Sección 7.1.

3.4.2 Metodología del análisis estadístico

Previo al análisis, los valores no detectados (reportados como menores al límite de detección, "<LD") fueron imputados como LD/2, criterio conservador estándar para el tratamiento de datos censurados en química ambiental. Las diferencias de concentración entre grupos (usos de suelo y AV) se evaluaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (α=0,05), apropiada dado el tamaño muestral reducido por grupo y la ausencia de normalidad esperable en datos de concentración ambiental. Se consideraron únicamente los grupos con al menos dos muestras válidas para cada parámetro.

La prueba de Kruskal-Wallis es un método estadístico no paramétrico utilizado para comparar si tres o más grupos independientes provienen de la misma distribución, evaluando diferencias en sus medianas sin asumir que los datos siguen una distribución normal. Es la extensión, para más de dos grupos, de la prueba de Mann-Whitney, y constituye la alternativa no paramétrica al análisis de varianza (ANOVA) de un factor, resultando especialmente apropiada cuando el tamaño muestral por grupo es reducido o cuando no puede garantizarse el supuesto de normalidad, como ocurre habitualmente en datos de concentración ambiental.

El procedimiento consiste en, primero, ordenar (rankear) todas las observaciones de todos los grupos en conjunto, de menor a mayor, asignando rangos independientemente de a qué grupo pertenece cada dato; luego, se calcula la suma de rangos correspondiente a cada grupo; y finalmente, se obtiene el estadístico H, que compara la dispersión de estas sumas de rangos entre grupos frente a la dispersión esperada bajo la hipótesis nula de que todos los grupos provienen de la misma población. El estadístico H se distribuye aproximadamente como una Chi-cuadrado con k–1 grados de libertad (donde k es el número de grupos comparados), lo que permite obtener un valor p asociado. Un valor p menor al nivel de significancia establecido (habitualmente α=0,05) indica que existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, concluyendo que al menos uno de los grupos presenta una distribución de concentraciones significativamente distinta a la de los demás; cabe destacar que la prueba no identifica por sí sola cuál o cuáles grupos difieren entre sí.

3.4.3 Diferencias de concentración según uso de suelo

De los 17 parámetros físico-químicos evaluados, el NO_3^--N (nitrato) fue el único que mostró una diferencia estadísticamente significativa según uso de suelo (p=0,0006). Los Terrenos Agrícolas presentaron la concentración media más alta de la campaña (696 mg/kg), seguidos por Terrenos Agrícolas con riego con riles (258 mg/kg) y Vertedero Ilegal (139 mg/kg), mientras que Extracción de Áridos (1 mg/kg) y Áreas Desprovistas de Vegetación (17 mg/kg) presentaron los valores más bajos. Este patrón es consistente con el uso de fertilizantes nitrogenados propio de la actividad agrícola y pecuaria. Cloruro (p=0,090) y sulfato (p=0,066) mostraron diferencias cercanas al umbral de significancia, sin alcanzarlo; el resto de los parámetros (pH, zinc, plomo, especies de fósforo y de nitrógeno amoniacal, carbono orgánico) no mostró diferencias significativas según uso de suelo, lo que sugiere que, salvo para el nitrato, el uso de suelo por sí solo no constituye un buen predictor de la concentración físico-química del suelo en esta cuenca.

3.4.4 Diferencias de concentración según fuente difusa

A diferencia del uso de suelo, que describe la cobertura o clasificación general del terreno, la variable fuente difusa (FD) identifica la actividad específica asociada a cada punto de muestreo (por ejemplo, minería, actividad inmobiliaria, riego con residuos industriales líquidos, entre otras), lo que en algunos casos permite una discriminación más precisa que el uso de suelo por sí solo. Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis agrupando por FD, se identifican tres parámetros con resultados significativos según FD: Zn^{2+} (p=0,048), Pb (p=0,045, este último con cobertura analítica parcial de 19 de 52 muestras) y nitrato (p=0,0049).

3.4.5 Diferencias de concentración según área de vigilancia

Al agrupar por AV, cuatro parámetros mostraron diferencias estadísticamente significativas: pH (p=0,0002), nitrógeno total Kjeldahl (p=0,0016), zinc (p=0,014) y plomo (p=0,018, este último con cobertura analítica parcial de 19 de 52 muestras). El pH no mostró una tendencia progresiva desde la cabecera de la subcuenca del río Maipo: las AV MA-1 y MA-3 presentaron los valores más alcalinos (pH 8,0–8,5), mientras que MA-2, MA-4 y MA-5 se mantuvieron en un rango más neutro (pH 7,6–7,97), y el valor mínimo se registró en PU-1 (pH 6,35), en la subcuenca del río Puangue. El nitrógeno total Kjeldahl y el zinc presentaron sus valores más altos en las AV MP-1 y MP-2 (subcuenca del río Mapocho) y en PU-1, coincidiendo con sectores de mayor densidad de fuentes difusas urbano-industriales, mientras que cloruro y sulfato no mostraron diferencias significativas entre AV (p=0,563 y p=0,797, respectivamente), ni un patrón espacial monótono entre cabecera y sectores bajos de la cuenca.

La Tabla 30 resume los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el conjunto de parámetros evaluados. Lo anterior también se puede visualizar en las Figura 17 a la Figura 22, que presentan gráficos *boxplot* de

concentración de parámetros para distintas fuentes difusas, usos y suelo y áreas de vigilancia (para aquellas combinaciones con significancia estadística).

Luego, la Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33 presentan las concentraciones medias por fuente difusa, uso de suelo y AV, respectivamente, para los parámetros de mayor relevancia para la NSCA de la cuenca.

Tabla 30 – Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis por parámetro, según fuente difusa, uso de suelo y área de vigilancia

Parámetro	p (fuente difusa)	Sig.	p (uso de suelo)	Sig.	p (AV)	Sig.
pH	0,85	No	0,691	No	0,0002	Sí
Nitrógeno Total Kjeldahl	0,31	No	0,466	No	0,0016	Sí
Zinc	0,05	Sí	0,248	No	0,014	Sí
Plomo (n=19)	0,05	Sí	0,114	No	0,018	Sí
Nitrato / N-Nitrato	0,00	Sí	0,0006	Sí	0,115	No
Amonio / N-Amoniacal	0,75	No	0,625	No	0,132	No
Fosfato / Fosfato-P	0,24	No	0,624	No	0,167	No
Conductividad	0,28	No	0,055	No	0,285	No
Cloruro	0,09	No	0,090	No	0,563	No
Sulfato	0,12	No	0,066	No	0,797	No
Carbono Orgánico (n=13)	0,24	No	0,286	No	1,000	No

Nota: p = valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para cada parámetro. Sig. = significancia estadística de la diferencia entre grupos, considerando α=0,05 (Sí = p<0,05, diferencia significativa, marcado en verde; No = p≥0,05, sin evidencia de diferencia significativa). n = número de observaciones.

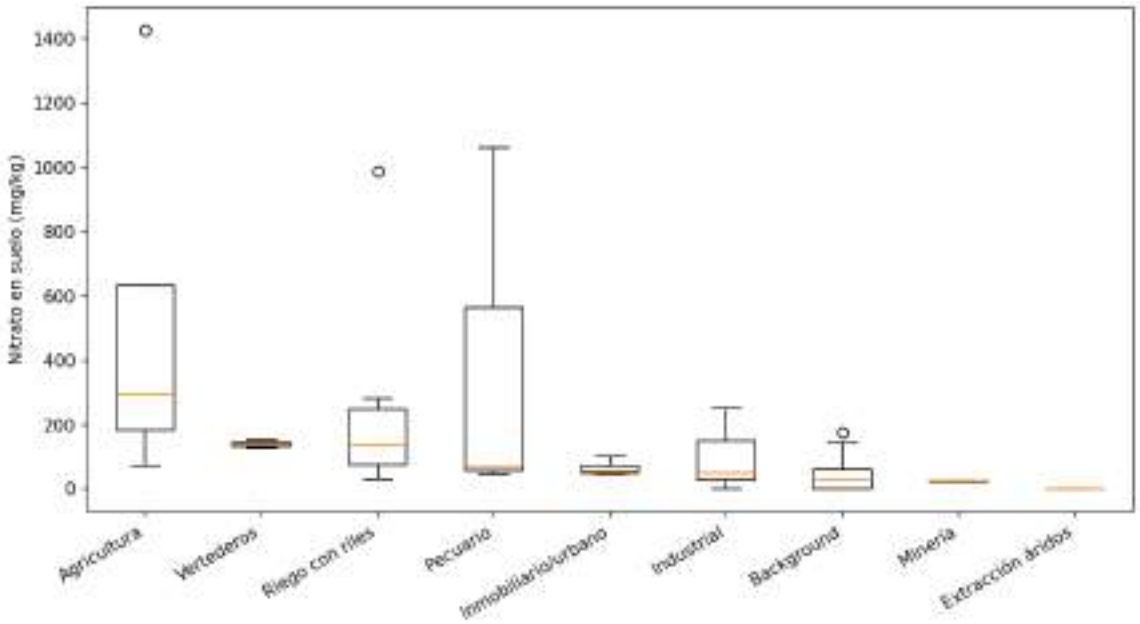


Figura 17 – Concentraciones de nitrato según fuente difusa (p=0,005)

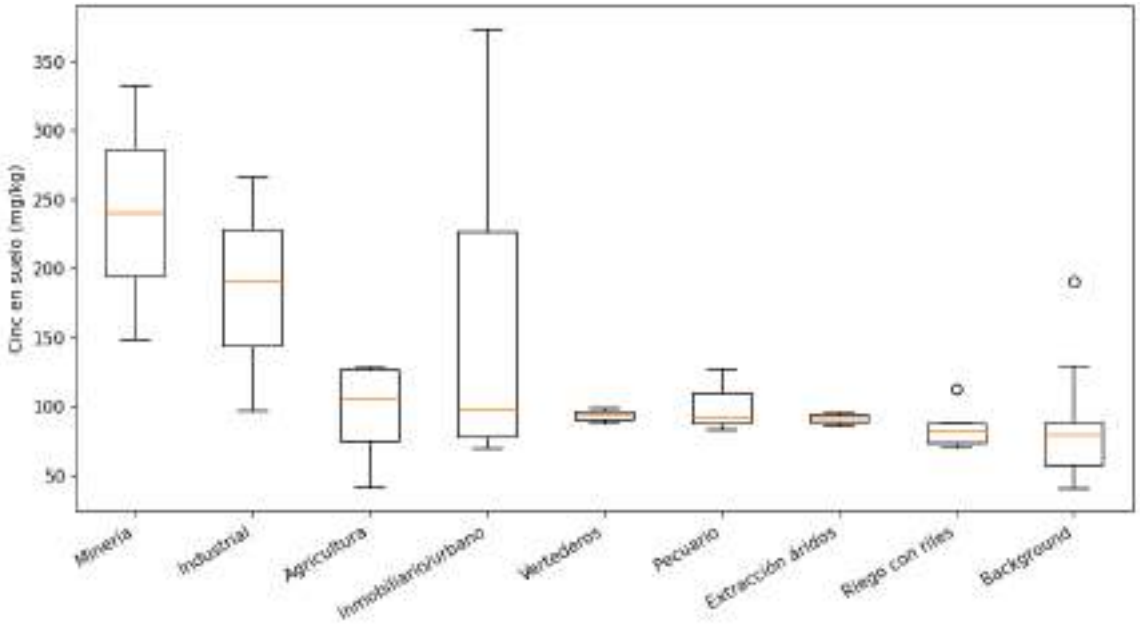


Figura 18 – Concentraciones de zinc según fuente difusa (p=0,048)

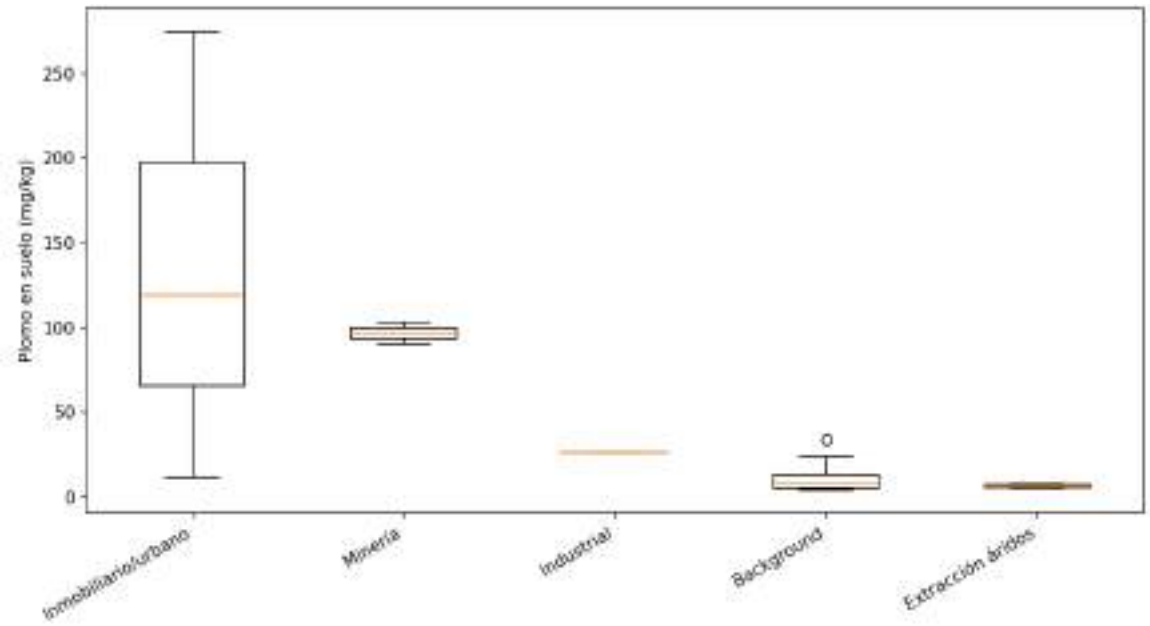


Figura 19 – Concentraciones de plomo según fuente difusa (p=0,045)

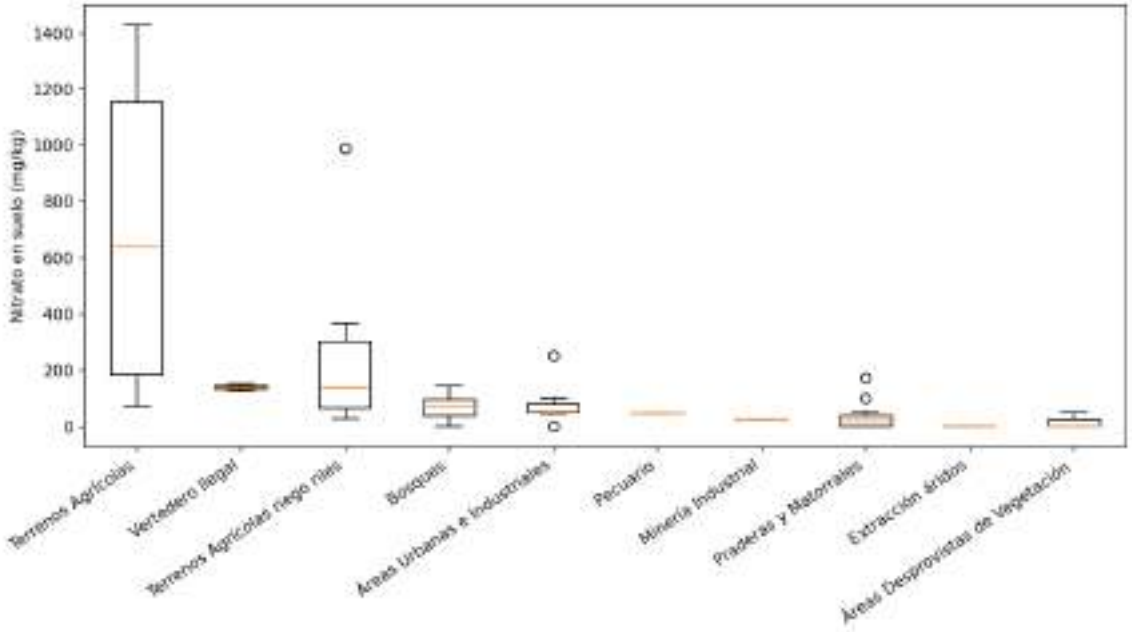


Figura 20 – Concentraciones de nitrato según uso de suelo (p=0,0006)

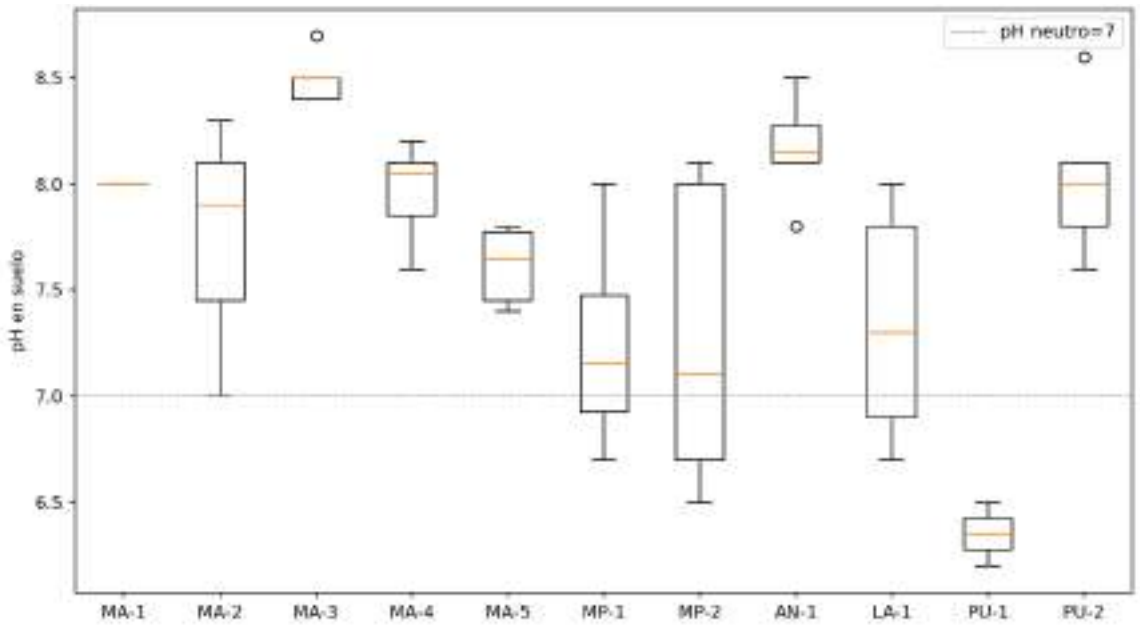


Figura 21 – pH según área de vigilancia (p=0,0002)

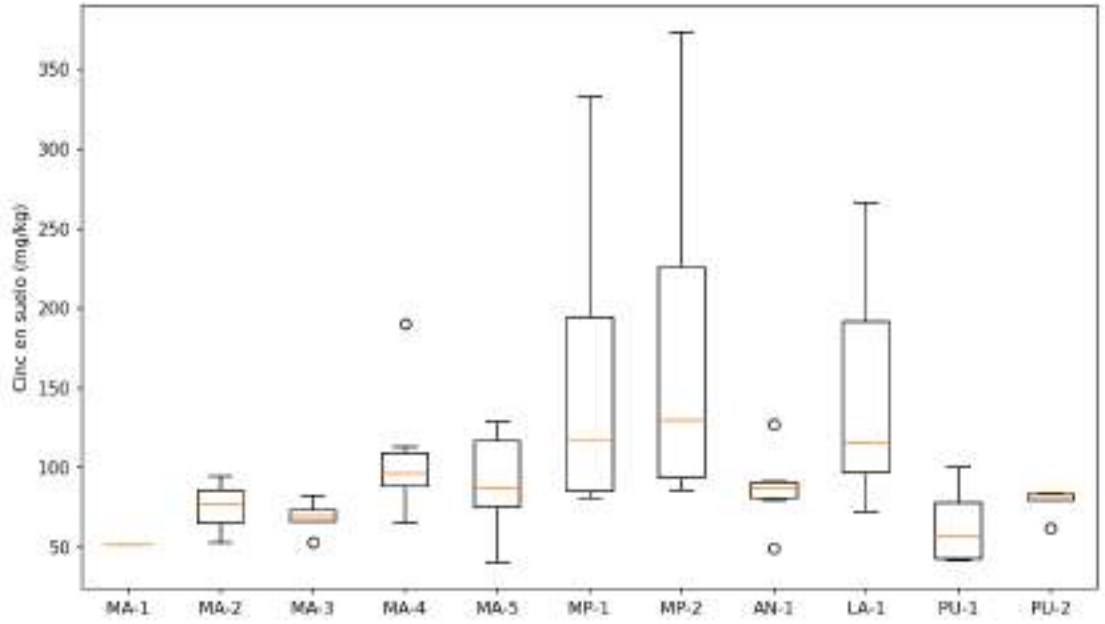


Figura 22 – Concentraciones de zinc según área de vigilancia (p=0,014)

Tabla 31 – Concentración media por fuente difusa para parámetros de mayor relevancia

Fuente difusa	N	pH	Cl^-	SO_4^{-2}	Zn^{+2}	Pb	NO_3^--N
Background/Cond. Natural	23	7,65	112,55	80,12	80,45	11,70	9,63
Agrícola	4	7,38	65,21	90,45	95,64	-	117,92
RILES	6	7,65	165,90	148,21	84,57	-	61,22
Pecuario	3	8,03	2553,81	2621,55	100,77	-	88,53
Inmobiliario	7	7,90	33,97	91,21	164,28	135,32	14,69
Industrial	3	7,70	41,44	91,36	184,75	26,32	22,71
Extracción Áridos	2	8,15	83,09	210,15	90,96	6,63	0,25
Minería	2	7,35	156,70	120,71	240,40	96,84	5,24
Vertedero Ilegal	2	7,40	113,32	355,24	93,34	-	31,38

Nota: N = número de muestras (el N de Pb puede ser distinto para algunos usos de suelo); "-" donde no hay valores. Concentraciones en mg/kg, excepto pH. Se marcan en verde las dos mayores concentraciones medias de cada parámetro.

Tabla 32 – Concentración media por uso de suelo para parámetros de mayor relevancia

Uso de suelo	N	pH	Cl^-	SO_4^{-2}	Zn^{+2}	Pb	NO_3^--N
Bosques	7	7,36	25,07	33,05	86,13	15,10	15,63
Extracción Áridos	2	8,15	83,09	210,15	90,96	6,63	0,25
Minería Industrial	1	8,00	79,60	83,22	332,40	103,20	5,58
Pecuario	1	7,80	628,00	125,70	83,50	-	10,66
Praderas y Matorrales	14	7,71	181,83	105,05	83,28	26,76	7,51
Terrenos Agrícolas	4	7,48	1801,83	1989,60	86,34	-	157,13
Terrenos Agrícolas (riego riles)	8	7,72	135,29	128,95	95,43	-	58,18
Vertedero Ilegal	2	7,40	113,32	355,24	93,34	-	31,38
Áreas Desprovistas de Vegetación	3	7,73	33,77	99,65	76,63	4,94	3,91
Áreas Urbanas e Industriales	10	7,82	36,77	91,27	170,42	108,07	17,70

Nota: N = número de muestras (el N de Pb puede ser distinto para algunos usos de suelo); "-" donde no hay valores. Concentraciones en mg/kg, excepto pH. Se marcan en verde las dos mayores concentraciones medias de cada parámetro.

Tabla 33 – Concentración media por área de vigilancia para parámetros de mayor relevancia

AV	N	pH	Cl^-	SO_4^{-2}	Zn^{+2}	Pb	NO_3^--N
MA-1	1	8,00	178,2	263,1	51,6	7,9	1,0
MA-2	3	7,73	261,0	190,0	74,9	10,9	17,9
MA-3	5	8,50	39,7	118,7	68,9	7,4	38,5
MA-4	6	7,97	43,2	132,1	108,0	7,6	55,2
MA-5	6	7,62	138,7	160,1	90,3	-	374,5
MP-1	4	7,25	94,1	86,6	162,0	55,1	54,8
MP-2	7	7,28	68,7	191,5	175,4	113,7	143,8
AN-1	6	8,17	1.185,5	1.316,9	87,0	-	237,1

AV	N	pH	Cl^-	SO_4^{-2}	Zn^{+2}	Pb	NO_3^--N
LA-1	5	7,34	31,6	42,3	148,5	-	25,1
PU-1	4	6,35	77,1	47,6	63,7	-	282,9
PU-2	5	8,02	391,1	54,8	78,4	-	76,4

Nota: N = número de muestras (el N de Pb puede ser distinto para algunas AV); "-" donde no hay valores. Concentraciones en mg/kg, excepto pH. Se marcan en verde las dos mayores concentraciones medias de cada parámetro.

A partir de los resultados, presentados particularmente en los gráficos y tablas anteriores se puede señalar lo siguiente:

- Los suelos asociados a fuentes difusas agropecuarias poseen, en general, las mayores concentraciones (medias) de cloruros, sulfatos y nitratos. También resalta la fuente difusa agrícola para nitratos y riles para cloruros.
- La fuente difusa industrial se asocia a altas concentraciones de zinc en suelos.
- La fuente difusa inmobiliaria se asocia a las mayores concentraciones de plomo en suelos.
- Los suelos asociados a minería presentan altas concentraciones de zinc y plomo, principalmente.
- Los suelos asociados a vertederos ilegales presentan altas concentraciones de sulfato.
- Con respecto a los usos de suelo, se destaca que los terrenos agrícolas presentan las mayores concentraciones de cloruros, sulfatos y nitratos; y las áreas urbanas e industriales poseen las mayores concentraciones de zinc y plomo, consistente con el análisis por fuentes difusas.
- Con respecto a las áreas de vigilancia, se observa que en MA-5 se presentan las mayores concentraciones de nitratos; en MP-1 y MP-2 las mayores concentraciones de zinc y plomo; y en AN-1 las más altas concentraciones de cloruros y sulfatos, entre 3 a 4 veces mayor que el resto en promedio. Se debe notar que esto se debe a concentraciones muy altas puntualmente en la muestra P38 (ubicada en terreno agrícola) para cloruro (7003 mg/kg), sulfato (7709 mg/kg), además de NKT de 5529 mg/kg, nitrato de 239,6 mg/kg (como N) y una conductividad eléctrica de 2260 µS/cm.
- Se nota, por otra parte, que los suelos cuyos usos fueron asignados como "agrícolas con riego de riles" y sus fuentes asociadas a "riles" no presentaron mayores concentraciones que aquellos identificados como "terreno agrícolas" como uso, y "agrícola" o "agropecuario" como fuente difusa, contrario a lo esperado. Sin embargo, esto podría deberse a una sobre estimación de la superficie de terrenos regados con riles debido a la metodología utilizada (ver consideraciones en la Sección 4.2.3).

3.4.6 Análisis espacial de muestras de suelo

A continuación, de la Figura 23 a la Figura 28, se presentan los resultados del muestreo de suelos de manera espacial (pH y concentraciones de zinc, plomo, cloruro, nitrato y sulfato).

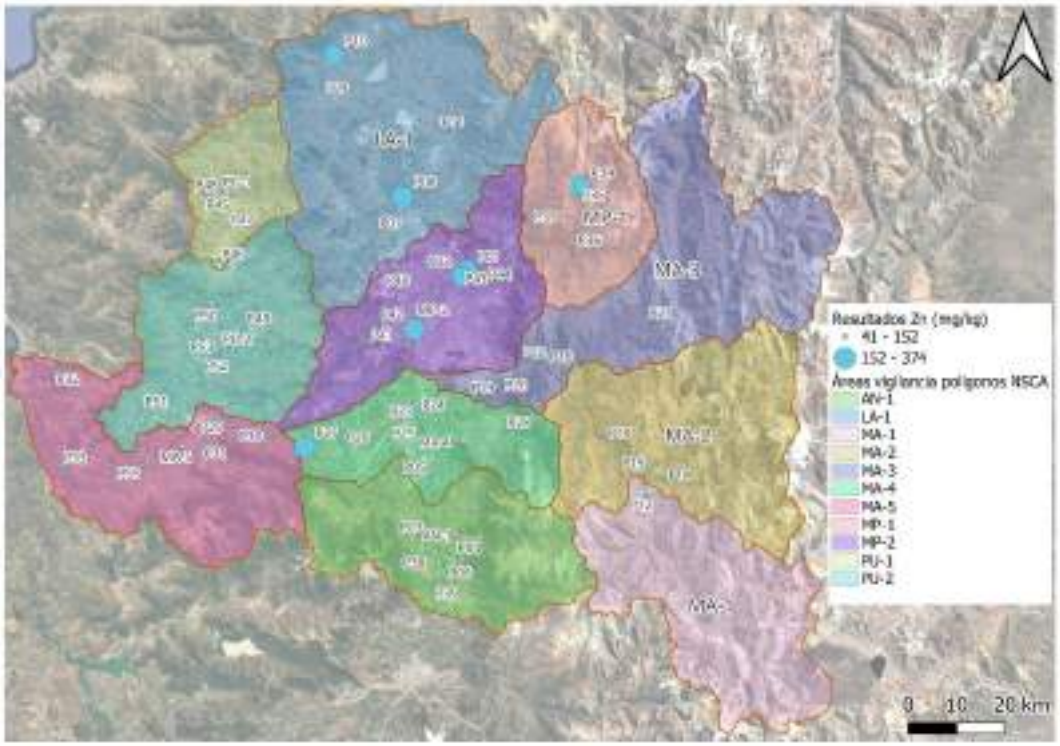


Figura 23 – Concentraciones de zinc en suelos

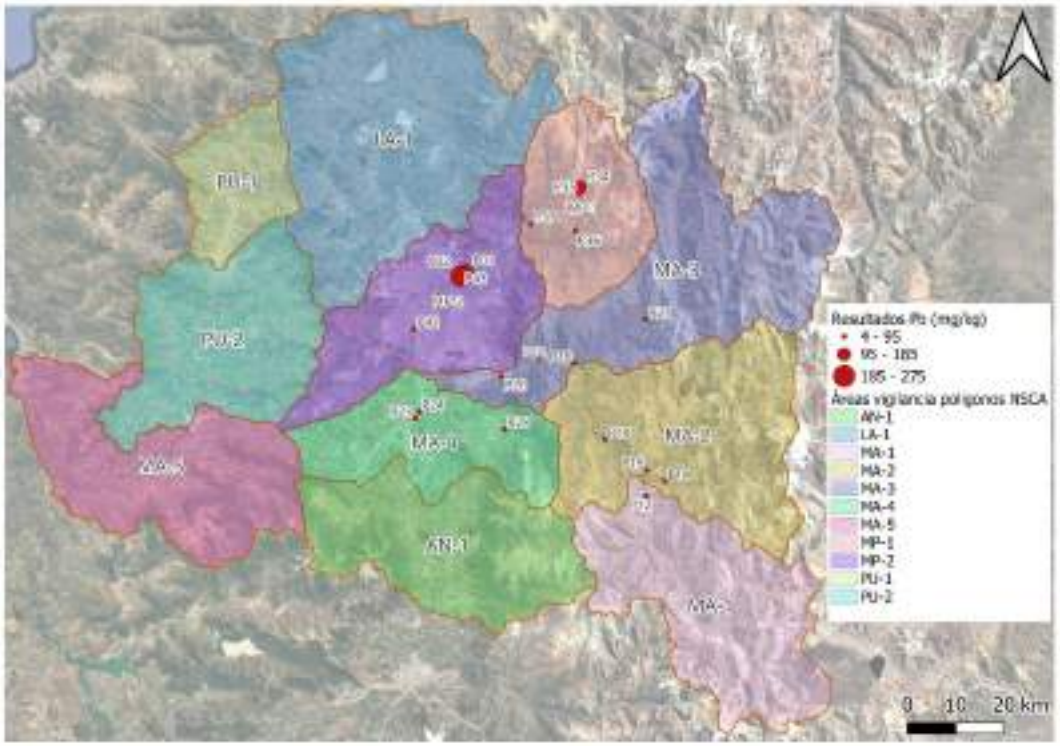


Figura 24 – Concentraciones de plomo en suelos

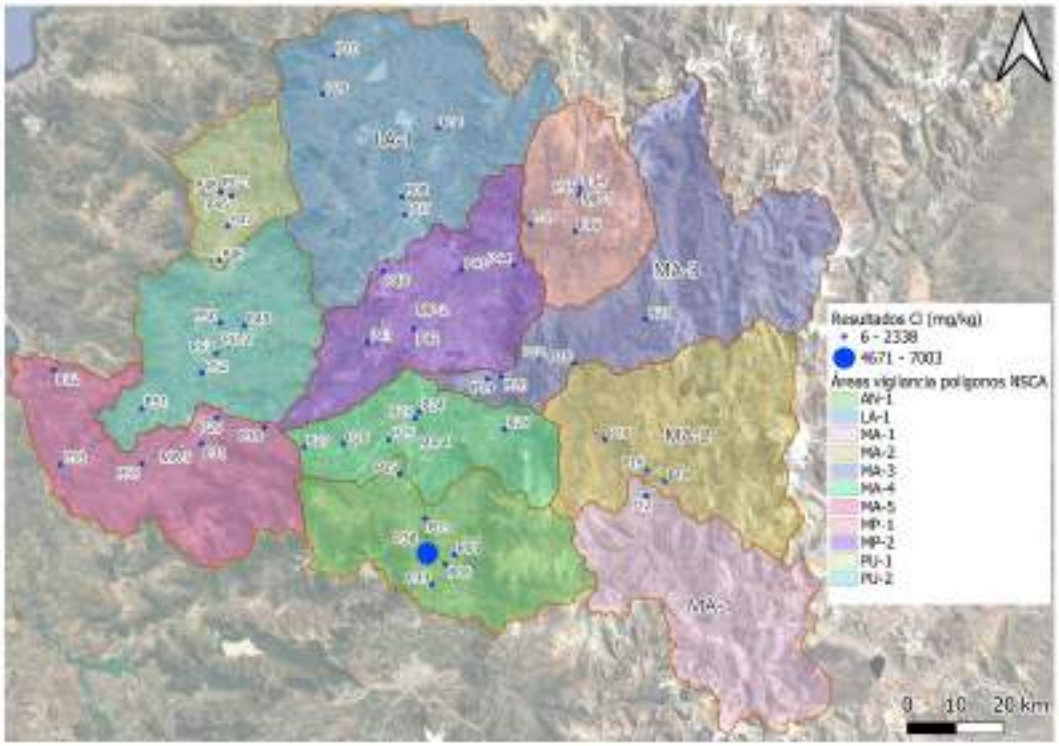


Figura 25 – Concentraciones de cloruro en suelos

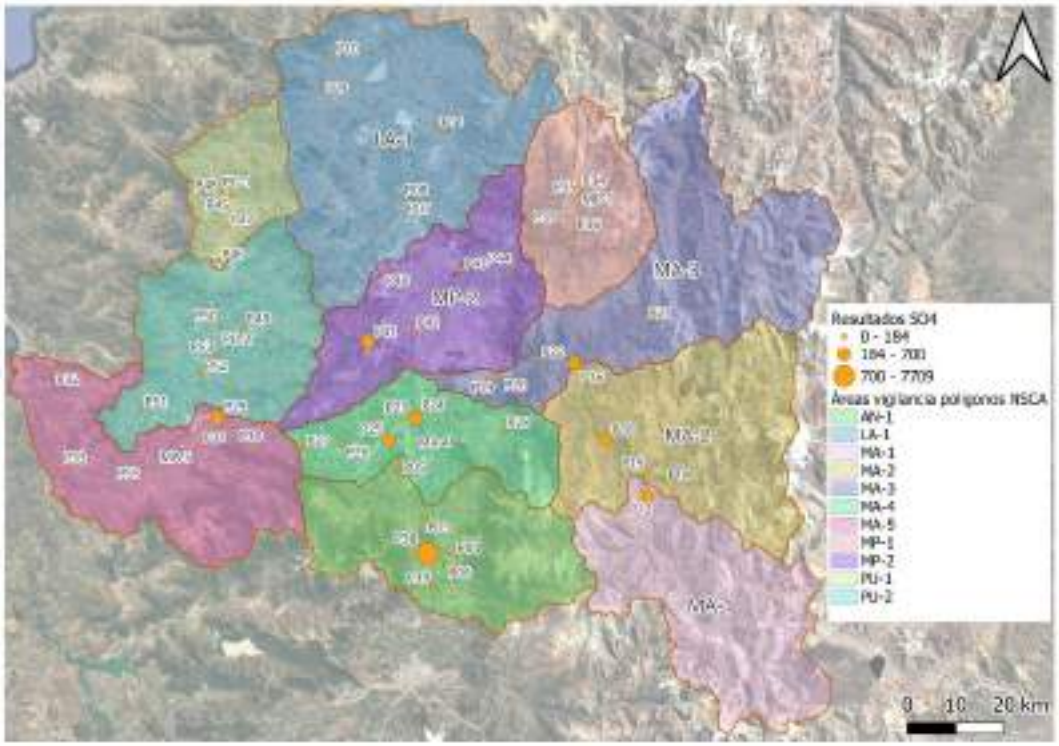


Figura 26 – Concentraciones de sulfato en suelos

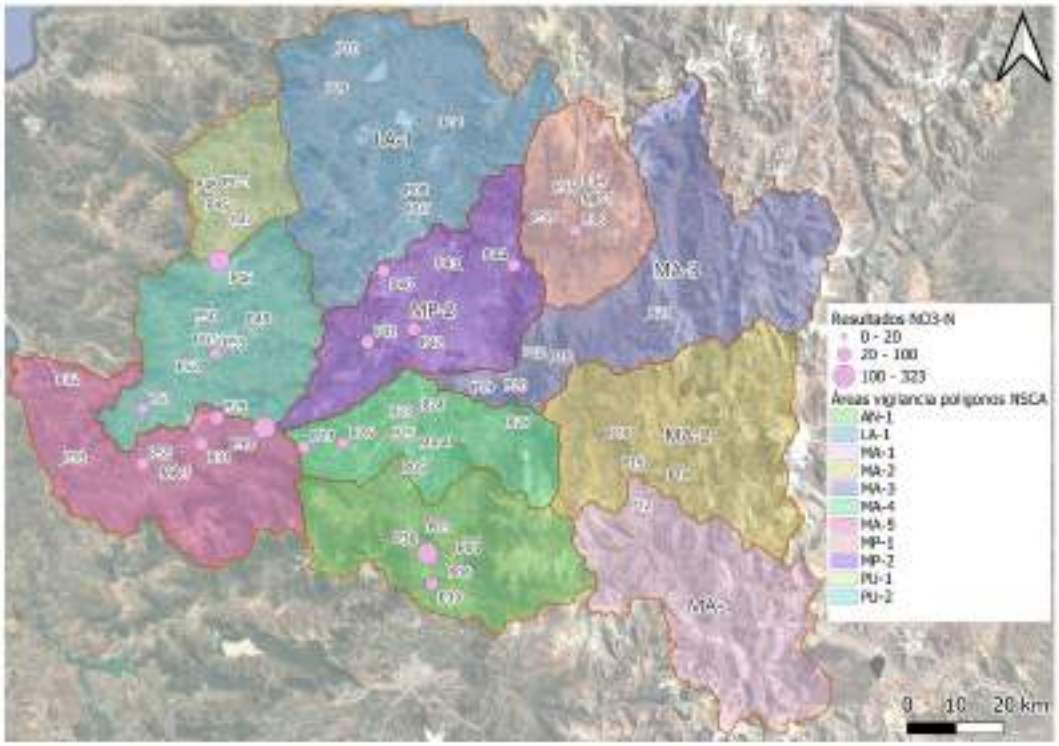


Figura 27 – Concentraciones de nitrato-N en suelos

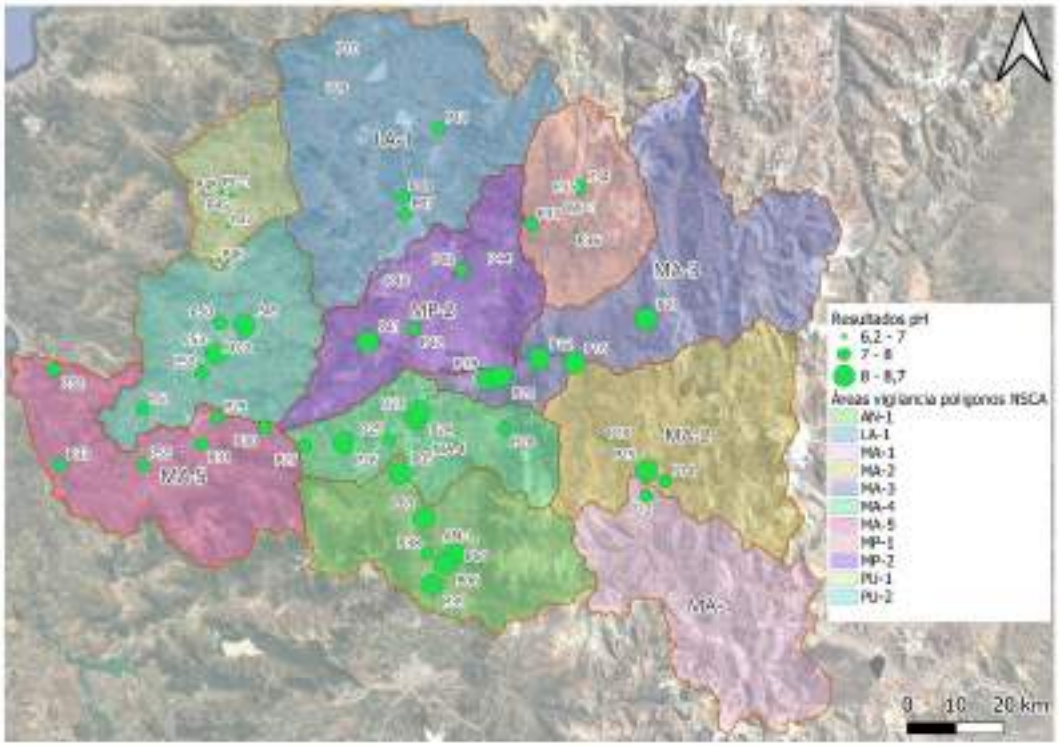


Figura 28 – pH en suelos

3.4.7 Análisis de muestras de agua

Las cuatro muestras de agua de la campaña (P16w, P18w, P23w y P24w) corresponden a puntos pareados espacialmente con muestras de sedimento. La Tabla 34 resume la información base de cada muestra (AV, uso de suelo y fuente difusa asociada por su ubicación espacial) junto con los resultados para los parámetros pH, conductividad eléctrica (CE), zinc y plomo disueltos, cloruro, sulfato, nitrato y ortofosfato. El plomo se incluye adicionalmente por ser un parámetro de interés para el análisis, aunque cabe notar que no se encuentra actualmente en estado de saturación ni latencia en la cuenca según la NSCA vigente (a diferencia del zinc).

Tabla 34 – Resultados de muestras de agua e información base

Muestra	AV	Uso de suelo	Fuente difusa	pH	CE (µS/cm)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{-2} (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	Zn^{+2} (mg/L)
P16w	MA-3	Praderas y Matorrales	Background/ Cond. Nat.	7,4	1435	273,8	216,2	< 0,10	0,00793
P18w	MA-2	Praderas y Matorrales	Background/ Cond. Nat.	7,9	1922	360,7	276,6	< 0,10	0,00632
P23w	MA-4	Extracción Áridos	Extracción Áridos	8,0	1730	268,7	465,4	< 0,10	0,00957
P24w	MA-4	Extracción Áridos	Extracción Áridos	8,0	1686	283,8	492,3	< 0,10	0,00542

Nota: ortofosfato (PO_4^{-3}) y plomo disuelto no detectados (< LD) en las 4 muestras, por lo que se omiten de la tabla por no aportar variabilidad. LD Plomo disuelto = 0,0001 mg/L; LD Ortofosfato = 0,10 mg/L.

La química del agua en los cuatro puntos está dominada por aniones mayores de origen geogénico (sulfato y cloruro, ambos sobre 200 mg/L en todos los casos), con conductividades eléctricas altas y relativamente homogéneas (1.435–1.922 µS/cm), y pH ligeramente alcalino en los cuatro puntos (7,4–8,0), consistente con la matriz volcánico-andina de la cuenca. El nitrato y el ortofosfato no se detectaron en ninguna de las cuatro muestras, lo que indica ausencia de niveles relevantes de nutrientes de origen antrópico en estos puntos particulares. El zinc disuelto se detectó en las cuatro muestras, aunque en concentraciones bajas (0,0054–0,0096 mg/L) sin un patrón evidente entre puntos; el plomo disuelto no se detectó en ninguna muestra. Dado el reducido número de puntos (n=4) y su distribución en solo tres AV (MA-2, MA-3 y MA-4, esta última con dos puntos), estos resultados deben interpretarse como una fotografía puntual y no como representativos de la condición general de calidad de agua de dichas AV, la cual se aborda de forma más robusta a partir de la modelación de la Sección 5 con base en la serie histórica de monitoreo DGA.

3.4.8 Análisis de resultados particulares

3.4.8.1 Potencial aporte de la fuente extracción de áridos

De las cuatro muestras de agua disponibles, dos (P23w y P24w, ambas en AV MA-4) están ubicadas en puntos de muestreo de sedimentos también, cuya fuente difusa fue clasificada como Extracción de Áridos, mientras que las otras dos (P16w en AV MA-3 y P18w en AV MA-2) corresponden a puntos de Background/Condición Natural. Si bien se trata de un contraste con un número de muestras limitado (n=2 en cada grupo, y sin compartir una misma AV entre los puntos de background), la comparación directa entre ambos grupos entrega una indicación exploratoria sobre el aporte potencial de esta actividad a la calidad del agua.

Tabla 35 – Comparación de parámetros de agua entre puntos de Extracción de Áridos (MA-4) y puntos de Background/Cond. Natural (MA-2, MA-3)

Parámetro	Media Áridos (P23w+P24w)	Media Background (P16w+P18w)	Razón Áridos/BG
Sulfato (mg/L)	478,8	246,4	1,94x
pH	8,0	7,65	1,05x
Conductividad (µS/cm)	1.708	1.679	1,02x
Zinc disuelto (mg/L)	0,00750	0,00713	1,05x
Cloruro (mg/L)	276,3	317,2	0,87x

El sulfato es el parámetro que muestra la diferencia más marcada: los puntos de extracción de áridos presentan, en promedio, prácticamente el doble de sulfato disuelto que los puntos de background (478,8 frente a 246,4 mg/L). Esta diferencia no parece explicarse por un rasgo geológico general del AV MA-4, es decir, la concentración elevada de sulfato en el agua de los puntos de extracción de áridos no está acompañada de una concentración proporcionalmente más alta en el suelo circundante o sedimentos, lo que sugiere que podría tratarse de un efecto localizado de la actividad, posiblemente asociado a la exposición de material aluvial fresco y su meteorización acelerada, liberando sulfatos hacia el agua, más que de una condición geológica regional de fondo. El resto de los parámetros (pH, conductividad, zinc) no muestra diferencias relevantes entre ambos grupos, y el cloruro incluso resulta levemente menor en los puntos de extracción de áridos.

Lo anterior es consistente con lo señalado en la Sección 5.3 respecto de la extracción de áridos, donde no fue posible estimar coeficientes de exportación robustos para esta fuente por falta de información representativa.

3.4.8.2 Depositación de metales en zona urbana

Como indicado anteriormente en la Sección 3.2, se tomaron dos muestras de polvo depositado en la ciudad de Santiago, en el área de vigilancia MP-2, para evaluar el contenido de metales (plomo y zinc) asociados a la fuente difusa “inmobiliario/urbano”. Además, durante el muestreo se colectó información sobre el peso de la muestra y el área muestreada (superficie dura que se barrió para tomar la muestra).

Con esta información, es posible calcular la cantidad en masa de cada elemento “i” por unidad de área que se puede encontrar depositada en la ciudad, con la siguiente fórmula.

$$Carga\ superficial_{\ i}\left[\frac{mg}{m^2}\right] = \frac{Concentración_{\ i}\left[\frac{mg}{kg}\right] * Masa\ muestra\ [kg]}{Área\ muestreada\ [m^2]}$$

Tabla 36 – Caracterización de muestras de polvo urbanas

Muestra	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Masa muestra (kg)	Área muestreada (m^2)	Carga superficial Zn (mg/m^2)	Carga superficial Pb (mg/m^2)
P01	373,5	119,5	0,2041	12	6,4	2,0
P02	261,1	274,9	0,0339	6	1,5	1,6

Se tiene entonces que la carga de Zn varía entre 1,5 a 6,4 mg/m^2 y la de Pb varía entre 1,6 a 2,0 mg/m^2, de acuerdo con la metodología y resultados del muestreo de polvo.

4 Metodología de modelación

En esta sección se presenta la primera parte de los resultados de la actividad OE3, correspondiente al objetivo específico c) "Proponer una metodología para seleccionar las herramientas de modelación matemática que permitan determinar los coeficientes de exportación de los parámetros latentes y saturados en distintos escenarios de precipitación, según los usos o coberturas de suelo relevantes en la cuenca del río Maipo", que se relaciona con la metodología de modelación.

4.1 Introducción a la modelación hidrológica y de transporte de solutos

El principal objetivo del presente estudio es modelar matemáticamente las fuentes difusas de contaminación de cuerpos de agua dulce a escala de cuenca del río Maipo. Esto involucra la estimación de la carga contaminante de parámetros saturados y latentes definidos en el D.S. N°21/2023, específicamente de nitrógeno de nitrato (NO_3^-), ortofosfatos ($P\text{-}PO_4^{-3}$), zinc disuelto, DBO_5, cloruro y sulfato, y de acuerdo a las condiciones de excedencia establecidas en el D.S. N°53/2013.

Estos contaminantes son generados por fuentes difusas y puntuales de contaminación, catastradas por GORE RM-AquaExpert (2024) o mapeadas por CONAF (2013). Las fuentes activas de contaminación se presentan en la Figura 29. Las fuentes difusas de contaminación se concentran principalmente en la zona media-baja de la cuenca, las cuales incluyen tanto **fuentes antropogénicas** (industria agropecuaria, plantas de tratamiento de RILes, sólidos y aguas servidas, minería, energía, turismo, extracción de áridos, zonas urbanas e industriales) (GORE RM-AquaExpert, 2024), así como **fuentes naturales**, donde la actividad hidrotermal, la erosión de suelo y residuos orgánicos de la vegetación pueden representar un aporte considerable de contaminantes al río.

Las fuentes de contaminación impactan el suelo y cuerpos de agua dulce, arriesgando la estabilidad de los ecosistemas asociados. La implementación de soluciones y medidas sustentables para estas cirscunstancias se basan en predicciones, las cuales requieren **modelos integrales a escala de cuenca** con un amplio entendimiento del sistema y una fuente de datos suficiente para describir el movimiento y almacenamiento de agua y consecuente transporte de solutos. El último incluye el movimiento de agua y solutos a través de la superficie del suelo, red hídrica y suelo poroso/rocas (Hrachowitz et. al., 2016). Muchos solutos no son conservativos y sufren procesos fisicoquímicos (e.g. sorción a superficie de medio poroso que tiene efectos de retardo), reactivos (e.g. degradación o decaimiento radioactivo), y/o biofísicos (absorción por plantas y microorganismos).

La modelación hidrológica y transporte de solutos a escala de cuenca se puede realizar a través de i) **modelos hidrológicos de base física**, ii) **modelos hidrológicos conceptuales** o iii) **modelos de calidad del agua**, los cuales presentan diferentes limitaciones (Hrachowitz et. al., 2016). El desafío está en representar adecuadamente el ciclo del agua y su desplazamiento a lo largo de la cuenca, la compleja interacción entre la no linealidad del modelo, la variabilidad de los parámetros y la heterogeneidad inherente de las propiedades y usos del suelo, que constituyen las principales fuentes de incertidumbre en la generación de contaminantes como nitratos y fosfatos.

En esta sección se presenta primero la información recopilada para la construcción del modelo hidrológico y de transporte, seguido por un análisis crítico de los modelos disponibles y luego una descripción del modelo SWAT+, la herramienta de modelación seleccionada. Se termina con la construcción, y validación del modelo, y los resultados finales. El modelo y los archivos utilizados para este se incluyen en el Anexo 10.

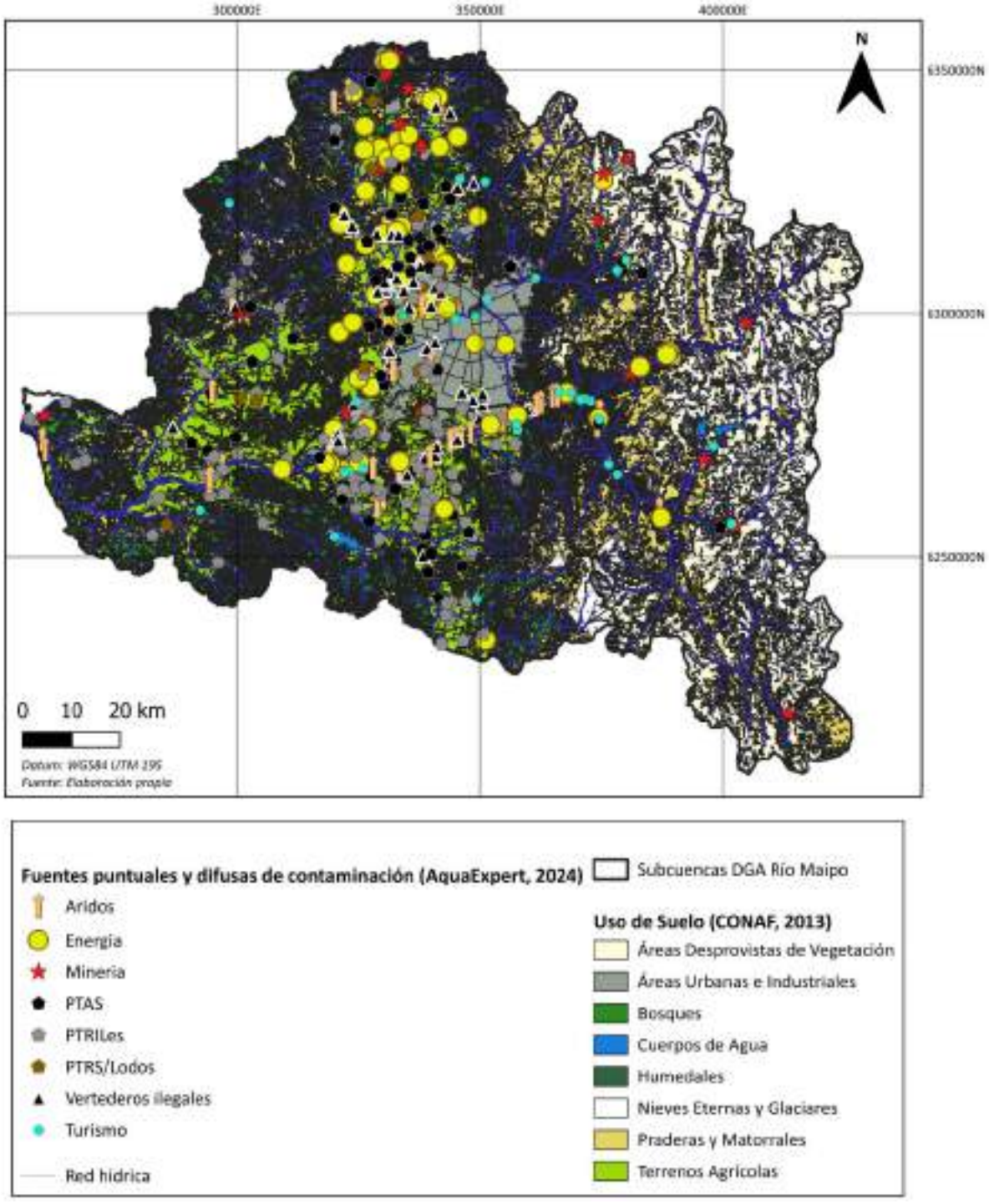


Figura 29 – Fuentes puntuales y difusas de contaminación en la cuenca del Río Maipo, en estado activo.

4.2 Recopilación de información para el modelo

Se recopiló la información necesaria para la construcción y validación del modelo hidrológico y de transporte de contaminantes, consistentes en topografía de la cuenca, mapas de uso de suelo y tipo de suelos, datos hidrometeorológicos, datos de calidad del agua y fuentes de contaminación difusa y puntual. **El periodo seleccionado de información para la modelación es desde el 01/01/2014 al 31/12/2024,** correspondiente a 4018 días (11 años).

4.2.1 Topografía

La topografía de la cuenca del río Maipo se derivó a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) del USGS EROS, utilizando específicamente el producto SRTM Void Filled (Shuttle Radar Topography Mission, DOI:10.5066/F7F76B1X), con una resolución espacial nominal de 30 m (3 arc-seconds) (USGS, 2017). El MDE fue sometido a un proceso de acondicionamiento hidrológico, incluyendo la filtración y el relleno de depresiones (*sink filling*), con el fin de obtener una superficie topográfica hidrológicamente coherente para la modelación (Figura 30).

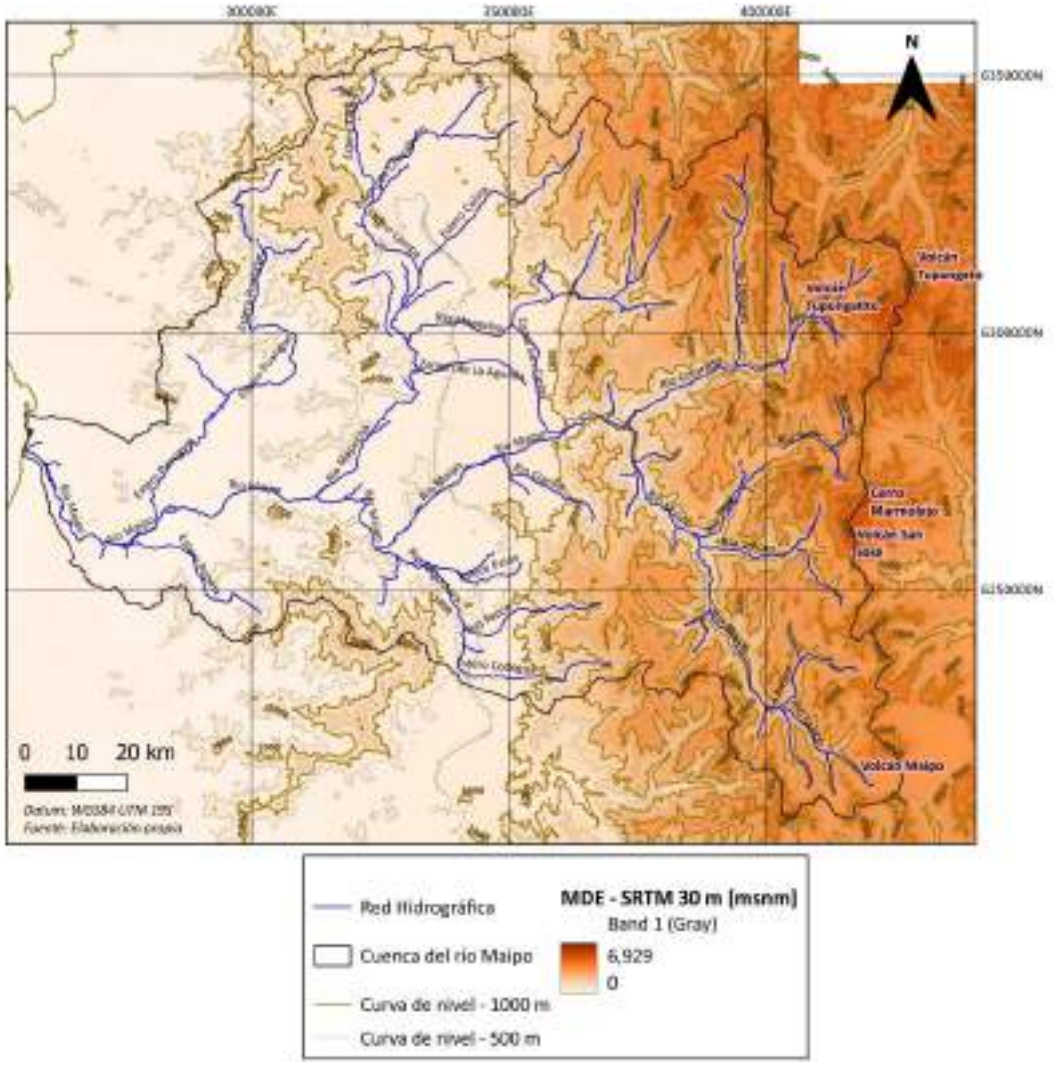


Figura 30 – Topografía de la cuenca del río Maipo, a partir del MDE de SRTM (USGS, 2017).

Según la información del MDE SRTM 30 m, la elevación promedio de la cuenca es de 1.656 msnm. Los valores máximos se encuentran al este de la zona de estudio, alcanzando valores máximos de 6.559 msnm en volcán Tupungato. Otros puntos de interés son cerro Marmolejo (6109 msnm), Cerro San Juan (6198 msnm), y los volcanes activos Tupungatito (5603 msnm), Volcán San José (5856 msnm) y Volcán Maipo (5323 msnm).

4.2.2 Tipo de suelo

Las propiedades físicas e hidráulicas del suelo fueron derivadas del producto CLSoilMaps (Galleguillos et al., 2022), con resolución espacial de 100 m. El producto CLSoilMaps contiene datos de textura de suelo, porcentajes de limo, arena y arcilla, conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, entre otros, para los horizontes 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm, 100-200 cm. El contenido de carbono orgánico fue derivado del mapa nacional de carbono orgánico del suelo SAG (Padarian et al., 2017), el cual contiene información para tres horizontes de suelo: 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm. Cabe precisar que las propiedades de suelo utilizadas en el modelo provienen de estos productos, y no de la campaña de muestreo descrita en la Sección 3, cuyos resultados se utilizaron como evidencia complementaria (ver Secciones 3.1 y 7.1).

Para obtener categorías de suelo, se realizó un agrupamiento o *clustering* (k-means) de información entre los 0-5 cm de 6 propiedades del suelo: porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, carbono orgánico, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y capacidad de campo. Se obtuvieron 6 categorías de suelo con propiedades físicas e hidráulicas similares. Finalmente se agregaron las propiedades de los seis horizontes para representar dos bandas: 0-30 cm, donde está la mayor parte de la materia orgánica, y 30-200 cm. Los valores representativos se ponderaron por espesor usando media aritmética, excepto para la conductividad hidráulica saturada, donde se usó media geométrica ponderada, para evitar sesgos por valores extremos. Los resultados se presentan en la Tabla 37 y Figura 31.

El suelo Tipo 1 cubre la mayor parte del valle de Maipo en zonas planas, son suelos francos relativamente densos con contenido de materia orgánica bajo. La conductividad hidráulica saturada es baja, representa un suelo estable con capacidad de infiltración limitada.

El suelo Tipo 2 se presenta en las zonas altas de la cuenca, es un suelo suelto de textura franco-arenosa con un alto contenido de materia orgánica. Posee una buena retención y moderada conductividad hidráulica saturada.

El suelo Tipo 3 se observa también en las zonas cordilleranas donde existen conos aluviales y morrenas. Son suelos con alto contenido de materia orgánica y arenosos, lo que les confiere una alta permeabilidad y capacidad de infiltración y escasa retención de agua. Los suelos Tipo 5 son muy similares al Tipo 3, pero poseen una mejor retención y aún mayor contenido de materia orgánica.

Los suelos Tipo 4 son el segundo tipo de suelo predominante en la cuenca, tienen una textura franca, son suelos compactos y de contenido moderado de materia orgánica. El drenaje es lento, pero con adecuado almacenamiento hídricos. Finalmente, los suelos Tipo 6 son suelos franco arenosos, estables y con buena infiltración. Poseen un alto contenido de materia orgánica y generalmente se ubican a lo largo de la red hídrica en la zona alta de la cuenca.

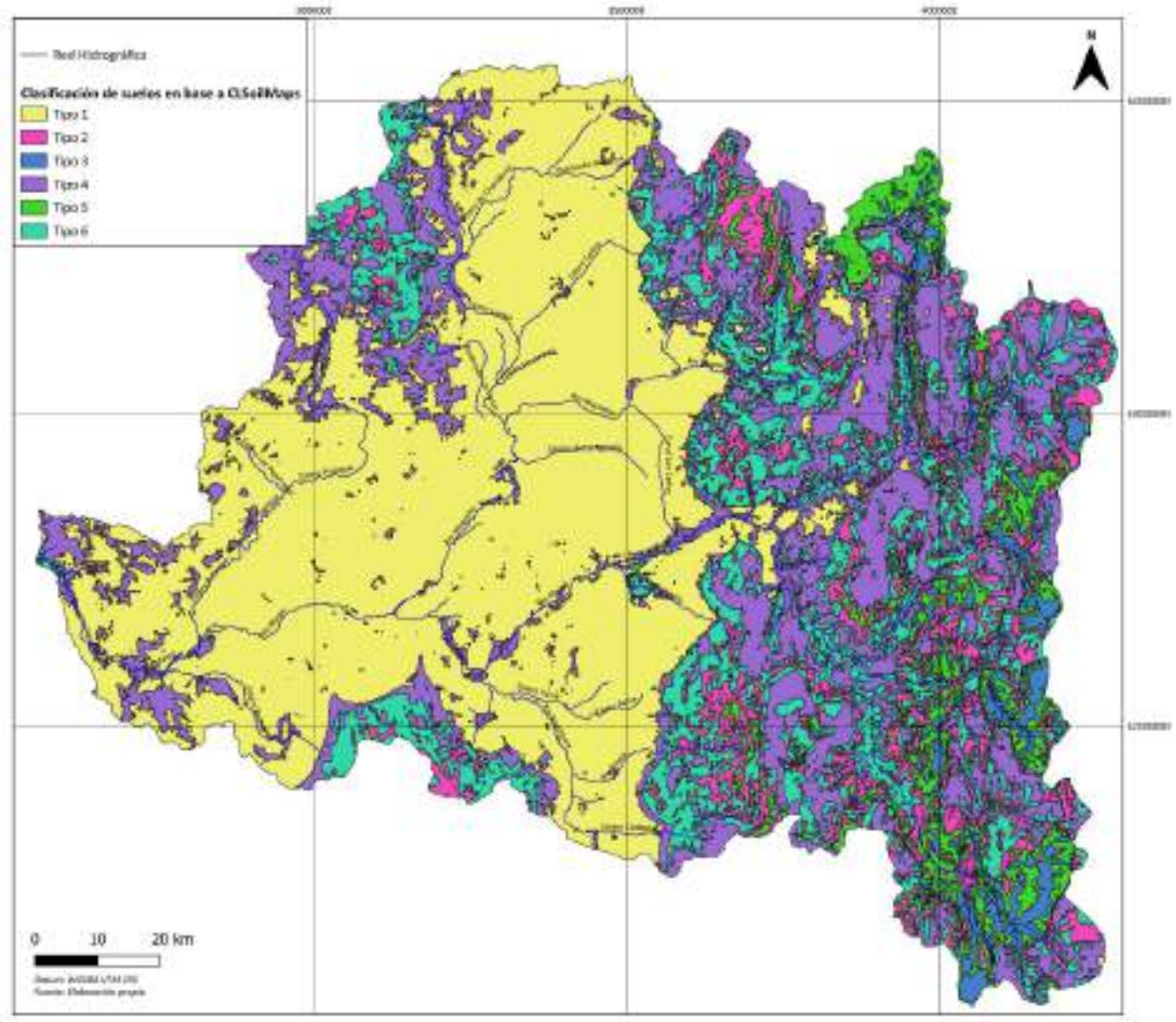


Figura 31 – Clasificación de tipo de suelo en la cuenca del Río Maipo, en base a propiedades de suelo de CLSoilMaps (Galleguillos et al., 2022) y carbono orgánico (Padarian et al., 2017).

Tabla 37 – Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos de la cuenca del Río Maipo, para dos bandas de profundidad: 0-30 cm y 30-200 cm

Propiedad	Banda	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6
% Arcilla	0-30 cm	23.14	20.39	17.87	21.49	20.36	21.18
	30-200 cm	25.42	22.82	19.78	24.08	22.49	24.12
% Limo	0-30 cm	33.47	17.86	16.20	24.10	16.42	22.40
	30-200 cm	31.56	16.15	14.64	22.40	14.85	20.53
% Arena	0-30 cm	43.39	61.75	65.94	54.41	63.23	56.43
	30-200 cm	43.02	61.04	65.58	53.52	62.66	55.36

Propiedad	Banda	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6
Carbono Orgánico (%)	0-30 cm	1.58	5.13	5.38	3.98	5.62	4.63
	30-200 cm	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Densidad aparente (g/cm^3)	0-30 cm	1.54	1.16	0.91	1.43	1.02	1.26
	30-200 cm	1.54	1.34	1.19	1.45	1.28	1.36
Capacidad de campo (cm^3/cm^3)	0-30 cm	0.28	0.30	0.34	0.27	0.33	0.29
	30-200 cm	0.28	0.28	0.29	0.28	0.29	0.29
Punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3)	0-30 cm	0.14	0.13	0.14	0.13	0.14	0.13
	30-200 cm	0.15	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14
Available water capacity (mm)	0-30 cm	15.85	19.13	22.29	16.52	20.98	18.55
	30-200 cm	98.14	104.58	111.87	101.03	107.63	106.74
Humedad de saturación θ_s (cm^3/cm^3)	0-30 cm	0.38	0.48	0.54	0.41	0.51	0.45
	30-200 cm	0.38	0.44	0.47	0.41	0.45	0.43
Humedad residual θr (cm^3/cm^3)	0-30 cm	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	30-200 cm	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
K_s Conductividad hidráulica saturada (cm/día)	0-30 cm	9.06	81.96	186.05	22.44	129.66	47.78
	30-200 cm	8.70	39.39	77.68	18.76	51.31	29.03

4.2.3 Uso de suelo

El mapa de uso de suelo para su aplicación en la modelación hidrológica fue construido a partir de: i) información del mapa de uso de suelo CONAF (2013), ii) información geológica de la Hoja Santiago de SERNAGEOMIN (1980), iii) información del catastro de fuentes puntuales y difusas de contaminación realizado por GORE RM-AquaExpert (2024) (ver Figura 29), y iv) imágenes satelitales.

Las fuentes difusas de contaminación catastradas por GORE RM–AquaExpert (2024) que fueron incorporadas al mapa final de usos de suelo incluyen la **extracción de áridos**, **vertederos ilegales y rellenos sanitarios**, **faenas mineras** y **plantas de tratamiento de RILes y residuos sólidos** únicamente cuando sus descargas se utilizan para riego o se infiltran en el suelo, constituyendo así fuentes difusas de contaminación (se consideró un radio de influencia de 200 m sobre terrenos agrícolas). En este contexto, no se incorporaron aquellas plantas de tratamiento de RILes y lodos cuyas descargas se realizan directamente a canales o ríos, ya que estas corresponden a fuentes puntuales de contaminación, ni tampoco cuando descargan al alcantarillado, ya que son tratadas posteriormente por plantas de tratamiento de aguas servidas. Se agregaron a la categoría vertederos los rellenos sanitarios Santa Marta (Talagante), Loma Los Colorados (Til-Til) y Santiago Poniente (Maipú), junto con otras PTRS catastradas por GORE RM-AquaExpert (2024) que funcionan como rellenos sanitarios y vertederos ilegales.

Con respecto a la minería, se presentan en la cuenca minería de tipo metálica (cobre y plata) y minería no metálica (caliza [$CaCO_3$] y yeso [$CaSO_4^{-2}H_2O$]) (Secretaría Regional de Planificación y Coordinación Región Metropolitana, 1980; SERNAGEOMIN, 1980; Vergara, 2022). Existen además yacimientos metálicos de cobre, molibdeno, plomo, plata y zinc (Figura 32), los cuales están relacionados con plutonismo

granodiorítico y dacítico (SERNAGEOMIN, 1980; SERPLAC RM, 1980). El zinc fue declarado por como parámetro saturado en el D.S. N°21/2023.

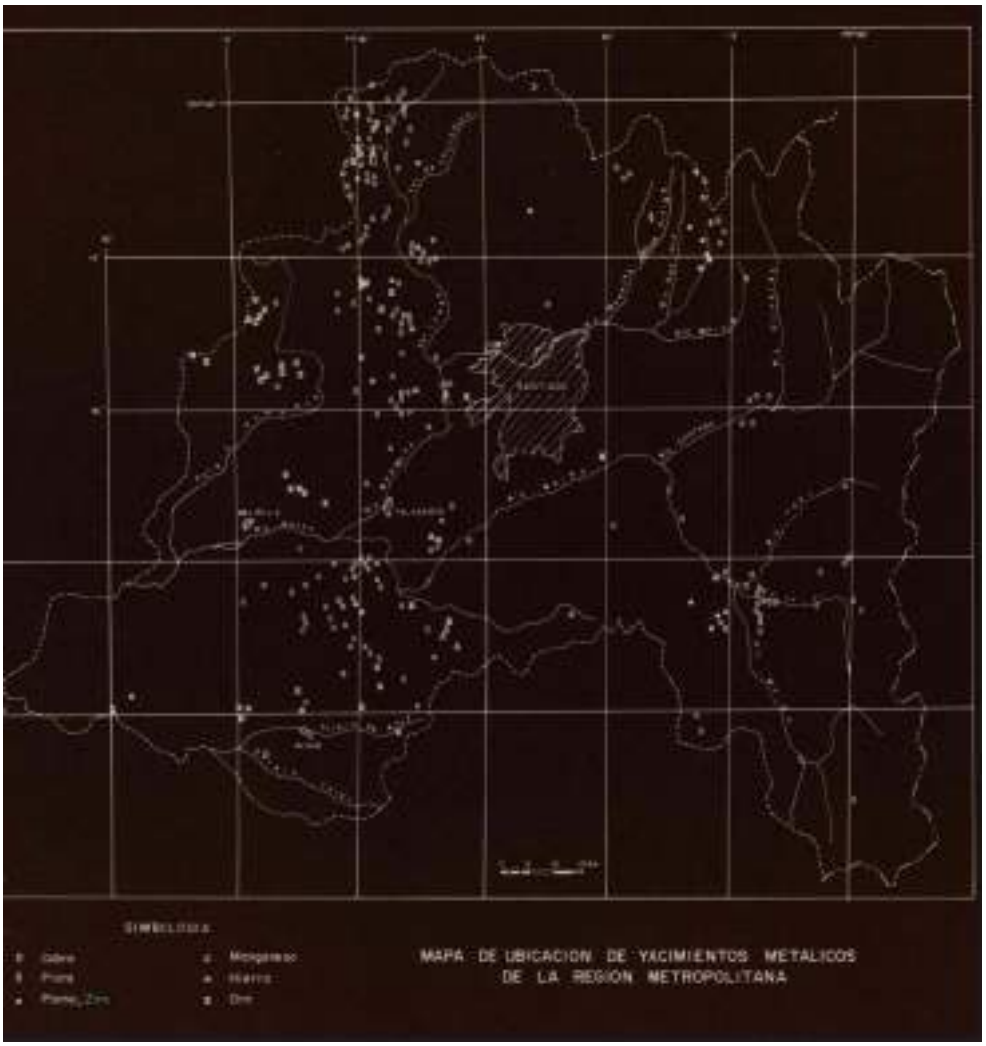


Figura 32 – Mapa de ubicación de yacimientos metálicos de la Región Metropolitana.
Fuente: SERPLAC RM (1980)

La Tabla 38 presenta las faenas mineras incluidas en el mapa de uso de suelo, considerando proyectos que se encuentran en estado activo. En el caso de faenas inactivas, se incluyeron aquellos proyectos que presentan una cobertura de área significativa y/o que cuentan con botaderos de estériles o tranques de relaves, los cuales representarían potenciales fuentes de contaminación difusa.

Tabla 38 – Faenas mineras que fueron incluidas en el mapa de uso de suelo.

Nombre Faena	Titular	Mineral	Estado
Recuperacion De Cobre De Mineral De Baja Ley Minera Los Bronces	Anglo American Sur S.A.	Cobre	Activo
Planta Sulfato De Cobre Mina Los Bronces	Anglo American Sur S.A.	Sulfatos	Activo
Depositos y rajo Mina El Guindo	Cemento Polpaico S.A.	Caolin	Activo

Nombre Faena	Titular	Mineral	Estado
Planta Cerro Blanco	Cemento Polpaico S.A.	Cemento y óxido de calcio	Activo
Desmonte Mina Lo Aguirre Rajo	Nueva Pudahuel S.A.	Cobre	Inactivo
Mineras Aurora 1-14	Minera Entre Tierras Ltda	Oro	Activo
Botadero Mina El Yal	Suc. Jorge Lailhacar Escoffier	Caolín	Irregular
Tranque de Relaves Las Tortolas Los Broces	Anglo American Sur S.A.	Cobre	Activo
Tranque Ovejeria. Sistema De Disposicion De Relaves A Largo Plazo	Codelco Division Andina	Cobre	Activo
Mina Tejas 1ª De Tilti	Jose Guillermo Aballay Aballay	Sulfuros de Cobre	Abandonada
La Dominga 1 Botadero, Botadero Principal La Dominga 2	Luis Horacio Jimenez Ramos	Silíceos	Inactivo
Botadero Cantera Consuelo - Perla	Jerman David Salinas Rivano	Arcillas	Inactivo
Mina desconocida en Cerro La Obra	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Mina desconocida al norte de Lampaag	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Mina desconocida al oeste de Lampa	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Mina desconocida al sur de Lampa	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Deposito Lavadero Lampa (Canoa de lavadero de oro)	Desconocido	Oro	Inactivo
Mina al norte de Rungue	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Mina Reserva	Compania Minera Lo Valdes Ltda.	Carbonato de Calcio	Inactivo
Mina Lo Valdes Planta Lo Valdes (Chancado y Acopio)	Minera Lo Valdes Ltda	Carbonato de Calcio	Activo
Faena Minera Planta Los Maitenes (Minera La Perla)	Minera Rio Colorado S.A. y Knauf de Chile Ltda	Yeso y Caliza	Activo
Botadero Cantera Consuelo - Perla	Jerman David Salinas Rivano	Arcillas	Inactivo
La Africana (Faena detenida)	Nueva Pudahuel S.A.	Cobre	Inactivo
Agrominera Estero De Los Valles	Agrominera S.A.	Carbón	Activo
Mina desconocida Cuesta Barriga	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Mina desconocida al sur de Chacabuco	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Mina desconocida al sur de Humedal Urbano Río Maipo de Melipilla	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Cantera de Puzolana Genova	Sociedad de inversiones y asesorias Genova LTDA.	Pumicita	Inactivo
Mina Los Bronces	Anglo American Sur S.A.	Cobre	Activo
Mina La Perla	Knauf de Chile Ltda	Yeso	Activo
Cantera Santa Gloria	Hormigones y Aridos Santa Gloria S.A.	Aridos	Activo
Stock Llano Largo Empresas Etex (Sector Emblase del Yeso)	Sociedad Industrial Romeral S.A.	Yeso	Activo

Nombre Faena	Titular	Mineral	Estado
Minera Javiera Chancado Y Transporte De Mineral De Caliza	Sociedad Legal Minera Javiera De San Jose De Maipo	Caliza	Proyecto
Minera San Pedro	Minera San Pedro S.A.	Cobre y Plata	Activo
Planta de relaves Codelco Division Andina	Codelco Division Andina	Cobre y Molibdeno	Activo
Cantera Chacabuco	Canteras Chacabuco S.A	Rocas	Activo
Minera y Planta Lo Aguila	Luis Valdez Valle y Luis Ramirez Valle	Oro y Cobre	Inactivo

La geología, volcanismo y manantiales termales de tipo clorurado-sódico (Vergara, 2022) juegan un rol importante en la generación de cargas de contaminante en la cuenca por solubilidad de iones. Según Dirección General de Aguas (2004), las siguientes formaciones geológicas impactan la calidad del agua (Figura 33):

- Estratovolcanes y complejos volcánicos del Cuaternario (**Q3i**) en las cabeceras de Río Olivares, Río Colorado, estero del Plomo (tributario río Yeso), y esteros Colina y La Engorda (tributarios del río Volcán). Se incluyen los volcanes activos Tupungatito, San José y Maipo.
- Rocas volcanosedimentarias del Cretácico Inferior (**Ki2m**), de origen marino y volcánico con presencia de calizas. Ubicadas principalmente en la junta de los ríos Mapocho y Maipo.
- Rocas sedimentarias del Jurásico Superior-Cretácico (era Mesozoica), de origen marino, en la cabecera del río Maipo. Se incluyen Formación Río Colina (**Jsrc,** sedimentaria, marina y volcánica, con intercalaciones potentes de evaporitas (yeso) y Formación Lo Valdés (**Kilv,** sedimentaria, marina y volcánica, con secuencias de caliza y pequeñas capas lenticulares de de yeso).
- Rocas plutónicas granodioríticas o dacíticas, donde se presentan yacimientos metálicos (**Unidades Intrusivas I y II**), las cuales cortan las Formaciones Abanico y Farellones. Se presenta generalmente una fuerte alteración hidrotermal.
- Por otra parte, los esteros Yerba Loca, Arrayán, Colina y Puangue no presentan una influencia significativa de formaciones geológicas sobre la calidad del agua (Dirección General de Aguas, 2004).

Las unidades geológicas **Q3i, Ki2m, Jsrc, Kilv y las unidades intrusivas (I y II)** fueron incorporadas al mapa de uso de suelos mediante su intersección con la cobertura “Áreas desprovistas de vegetación”, con el objetivo de identificar zonas de suelo desnudo donde la roca aflorante influye en la calidad del agua de la cuenca.

Las áreas resultantes fueron clasificadas como “Rocas desnudas con impacto en la calidad del agua”, las cuales, al encontrarse expuestas, son más propensas a procesos de erosión (Figura 33).

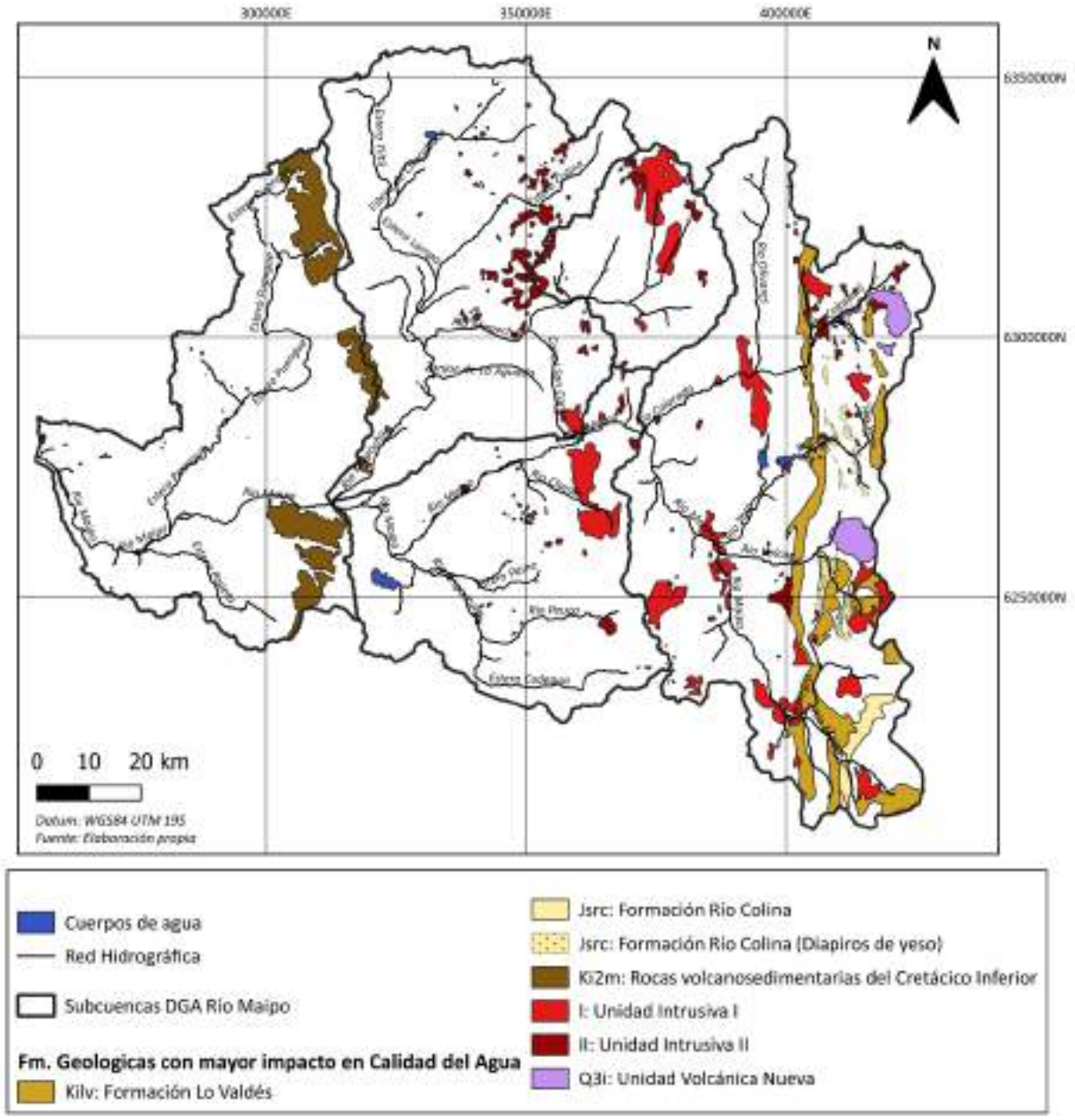


Figura 33 – Formaciones geológicas definidas por SERNAGEOMIN (1980) que tienen un mayor impacto en la calidad del agua.

Como resultado, el mapa final de uso de suelo se presenta en la Figura 34. Los usos de suelo que se incluyen se presentan en la Tabla 39, clasificados según zona de vigilancia. El uso de suelo que predomina en la cuenca son las praderas y matorrales (4,293 km^2), seguido por bosques (3,534 km^2), suelo y rocas desnudas (2,567 km^2) y terrenos agrícolas con diferentes fuentes de agua de riego (2,191 km^2).

Tabla 39 – Usos de suelo y cobertura en la cuenca del río Maipo (km2 y % de la zona).

Zona	Cobertura de uso de suelo (km^2)														TOTAL
	BSVG	URBN	FRST	WATR	SWRN	WETW	MINE	SNOW	RNGE	AGRL	AGWW	LDFL	ROCK	ANML	
MA-1	489.1	0.1	9.5	2.4	0.00	26.5	0.00	236.1	524.1	0.8	0.0	0.00	215.9	0.00	1504.6
MA-2	381.4	9.6	65.0	17.8	0.30	36.2	1.39	404.9	563.6	7.0	0.0	0.00	196.5	0.00	1683.7
MA-3	712.0	49.4	121.6	4.6	2.51	18.8	0.90	337.9	516.8	34.4	10.8	1.25	162.1	0.00	1973.0
AN-1	20.8	54.6	521.9	14.0	0.00	12.6	0.10	78.2	345.6	144.8	143.2	0.02	0.1	1.38	1337.3
MA-4	24.8	109.5	244.3	16.8	9.39	3.6	0.44	1.4	134.3	226.0	159.5	1.08	2.2	0.66	933.8
MP-1	206.6	8.4	130.9	1.6	0.00	24.5	16.04	34.2	414.2	0.7	0.0	0.00	46.7	0.00	883.8
MP-2	23.5	701.0	197.5	8.8	3.27	0.6	0.45	0.0	170.9	172.0	39.1	1.51	0.5	0.16	1319.2
LA-1	57.4	183.8	852.2	2.4	1.13	13.5	35.90	0.4	766.4	228.3	128.6	3.51	1.2	0.18	2274.8
PU-1	7.6	8.0	281.0	0.2	0.23	0.0	0.00	0.0	233.4	14.8	6.5	0.01	0.0	0.17	551.9
PU-2	4.8	74.4	406.0	1.5	0.07	0.0	0.00	0.0	336.3	354.8	161.3	0.04	0.0	4.75	1344.0
MA-5	13.9	76.0	704.8	19.9	0.83	0.0	0.24	0.0	287.0	234.0	124.4	0.08	0.1	5.97	1467.1
Cuenca	1941.9	1274.7	3534.6	90.0	17.73	136.2	55.47	1093.0	4292.6	1417.5	773.3	7.49	625.3	13.26	15273.1

Zona	Cobertura de uso de suelo (%)													
	BSVG	URBN	FRST	WATR	SWRN	WETW	MINE	SNOW	RNGE	AGRL	AGWW	LDFL	ROCK	ANML
MA-1	32.5%	0.0%	0.6%	0.2%	0.0%	1.8%	0.0%	15.7%	34.8%	0.1%	0.0%	0.0%	14.3%	0.0%
MA-2	22.7%	0.6%	3.9%	1.1%	0.0%	2.1%	0.1%	24.0%	33.5%	0.4%	0.0%	0.0%	11.7%	0.0%
MA-3	36.1%	2.5%	6.2%	0.2%	0.1%	1.0%	0.0%	17.1%	26.2%	1.7%	0.5%	0.1%	8.2%	0.0%
AN-1	1.6%	4.1%	39.0%	1.0%	0.0%	0.9%	0.0%	5.8%	25.8%	10.8%	10.7%	0.0%	0.0%	0.1%
MA-4	2.7%	11.7%	26.2%	1.8%	1.0%	0.4%	0.0%	0.1%	14.4%	24.2%	17.1%	0.1%	0.2%	0.1%
MP-1	23.4%	1.0%	14.8%	0.2%	0.0%	2.8%	1.8%	3.9%	46.9%	0.1%	0.0%	0.0%	5.3%	0.0%
MP-2	1.8%	53.1%	15.0%	0.7%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	13.0%	13.0%	3.0%	0.1%	0.0%	0.0%
LA-1	2.5%	8.1%	37.5%	0.1%	0.0%	0.6%	1.6%	0.0%	33.7%	10.0%	5.7%	0.2%	0.1%	0.0%
PU-1	1.4%	1.4%	50.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42.3%	2.7%	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%
PU-2	0.4%	5.5%	30.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.0%	26.4%	12.0%	0.0%	0.0%	0.4%
MA-5	0.9%	5.2%	48.0%	1.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	19.6%	16.0%	8.5%	0.0%	0.0%	0.4%
Cuenca	12.7%	8.3%	23.1%	0.6%	0.1%	0.9%	0.4%	7.2%	28.1%	9.3%	5.1%	0.0%	4.1%	0.1%

Nota: Se resaltan en gris los usos de suelo asociados a actividades antrópicas.

Código	Descripción
BSVG	Áreas desprovistas de vegetación
URBN	Áreas urbanas e industriales
FRST	Bosques
WATR	Cuerpos de agua
SWRN	Extracción de áridos

Código	Descripción
WETW	Humedales
MINE	Minería industrial
SNOW	Nieve y hielo
RNGE	Praderas y matorrales
AGRL	Terrenos agrícolas
AGWW	Agricultura con riego de aguas tratadas
LDFL	Vertederos y rellenos sanitarios
ROCK	Rocas desnudas con impacto en calidad del agua
ANML	Producción pecuaria intensiva

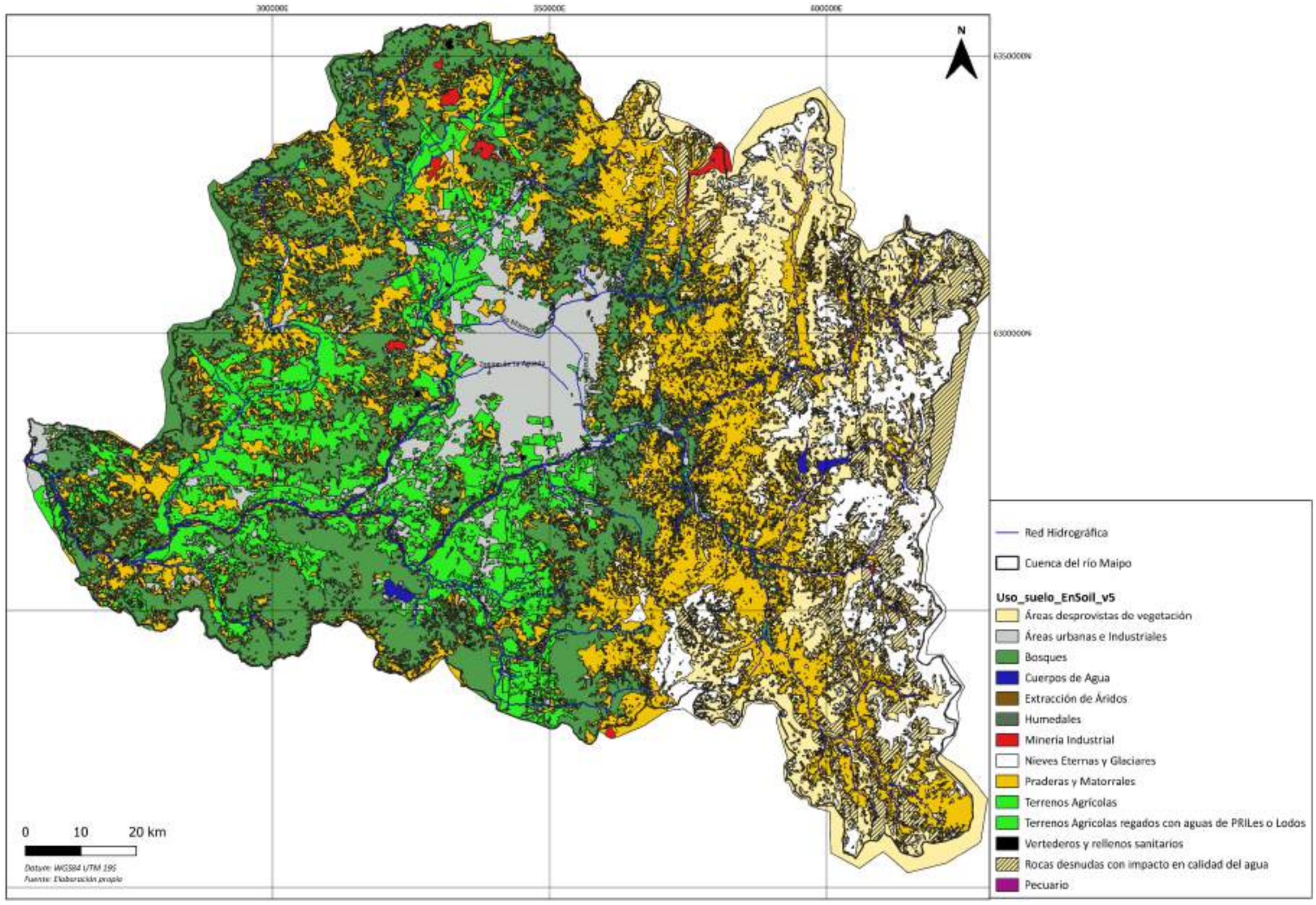


Figura 34 – Mapa de uso de suelos en la cuenca del río Maipo.

4.2.4 Datos fluviométricos

Se recopilaron datos de caudal para el periodo 2014-2024 para toda la cuenca del Río Maipo desde estaciones DGA y memorias anuales de la Sociedad de Canal del Maipo (SCM), las cuales se presentan en la Tabla 40 y Figura 35.

Tabla 40 – Estaciones fluviométricas con datos para el periodo de modelación. El promedio anual en m3/s corresponde para el periodo 2014-2024

Nombre	Fuente	Código	Altitud (msnm)	WGS 84 UTM 19S		Promedio anual (m^3/s)
				Norte (m)	Este (m)	
Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca	DGA	5721016	1535	6313676	373641	0.2
Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	DGA	5721001	1350	6309689	373072	0.5
Rio Molina Antes Junta San Francisco	DGA	5720001	1158	6306418	370093	1.8
Rio Mapocho En Los Almendros	DGA	5722002	966	6306678	365020	2.9
Estero Arrayan En La Montosa	DGA	5722001	880	6311297	364170	0.7
Quebrada Ramon En Recinto Emos	DGA	5730008	845	6299663	359226	0.1
Rio Colina En Peldehue	DGA	5735001	860	6325196	351984	0.9
Rio Mapocho En El Trebal	DGA	5737019	429	6286970	331460	8.6
Canal Las Mercedes	DGA	5737028	434	6289942	330505	6.0
Rio Yeso Entrada Embalse El Yeso	DGA	5703020	2630	6279842	407426	5.4
Rio Yeso	DGA	5703015	2335	6271477	397096	1.8
Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares	DGA	5705001	1550	6293256	394359	3.9
Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado	DGA	5706001	1580	6293456	394336	2.1
Rio Maipo En Las Hualtatas	DGA	5701001	1820	6239628	394176	23.2
Canal Queltehue	DGA	5705002	3080	6250719	389226	13.3
Rio Maipo En Las Melosas	DGA	5701002	1527	6253617	389152	11.8
Rio Volcan En Queltehues	DGA	5702001	1365	6258289	387971	4.2
Rio Maipo En Queltehues	DGA	5701009	1317	6257467	386757	11.4
Rio Colorado	DGA	5707005	1059	6287174	380060	17.9
Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo	DGA	5707002	880	6282122	372846	19.0
Rio Maipo En El Manzano	DGA	5710001	850	6281632	372019	73.9
Rio Maipo Aguas Arriba Descarga Las Lajas	DGA	5704014	828	6282749	369105	66.67
Rio Maipo Aguas Abajo Descarga Las Lajas	DGA	5710012	815	6283685	367700	83.4
Rio Maipo En La Obra	SCM	101	761	6281825	361981	63.4
Estero Pintue En Puente Pintue	DGA	5716003	371	6250016	326050	0.3
Rio Angostura En Valdivia De Paine	DGA	5716001	342	6257179	325664	6.3

Nombre	Fuente	Código	Altitud (msnm)	WGS 84 UTM 19S		Promedio anual (m^3/s)
				Norte (m)	Este (m)	
Estero Puangue En Ruta 78	DGA	5746001	93	6272931	283301	11.76

Las series de caudales mensuales para el río Maipo y sus tributarios se presenta en la Figura 36. Se observa un aumento gradual de los caudales entre 2014 y 2016, para luego disminuir hasta valores mínimos en 2022/2023. La temporada 2023/2024 fue la más lluviosa del periodo 2014-2024.

Los caudales del río Maipo Bajo (en Cabimbao) son de régimen mixto, con gran intervención antropogénica debido a uso agrícola, consumo humano y de riego, alimentándose de deshielos durante el verano (régimen nival) y de lluvias durante el invierno (régimen pluvial). En Río Maipo Medio y Alto y en sus tributarios en la zona alta de la cuenca, el régimen es principalmente nival, con mayores caudales en diciembre y enero. El caudal medio (temporada 2014-2024) en Río Maipo en El Manzano es de 73.9 m^3/s y su mayor tributario es el río Colorado, con un caudal medio de 19 m^3/s.

La Figura 37 presenta los caudales medidos en distintas ubicaciones del río Maipo, para julio y diciembre de 2022 (año seco) y 2024 (año húmedo). Los caudales en Maipo Alto alcanzan sus máximos anuales en diciembre. Sin embargo, debido a la alta demanda hídrica de los cultivos en el valle, el caudal registrado en Maipo Bajo (Cabimbao) durante diciembre es menor en comparación a meses de invierno, donde se producen las lluvias.

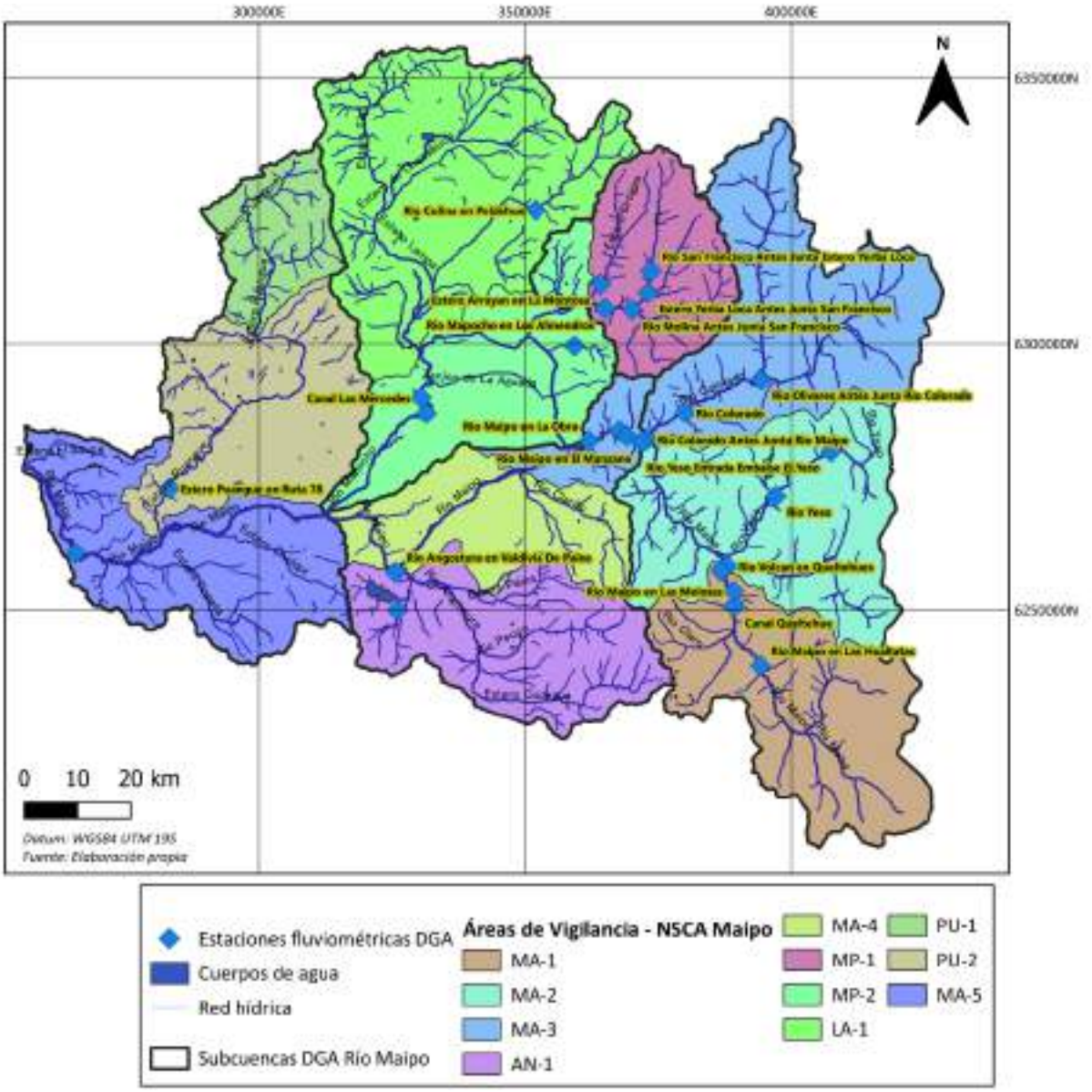


Figura 35 – Estaciones fluviométricas DGA con disponibilidad de datos para el periodo 2014-2024.

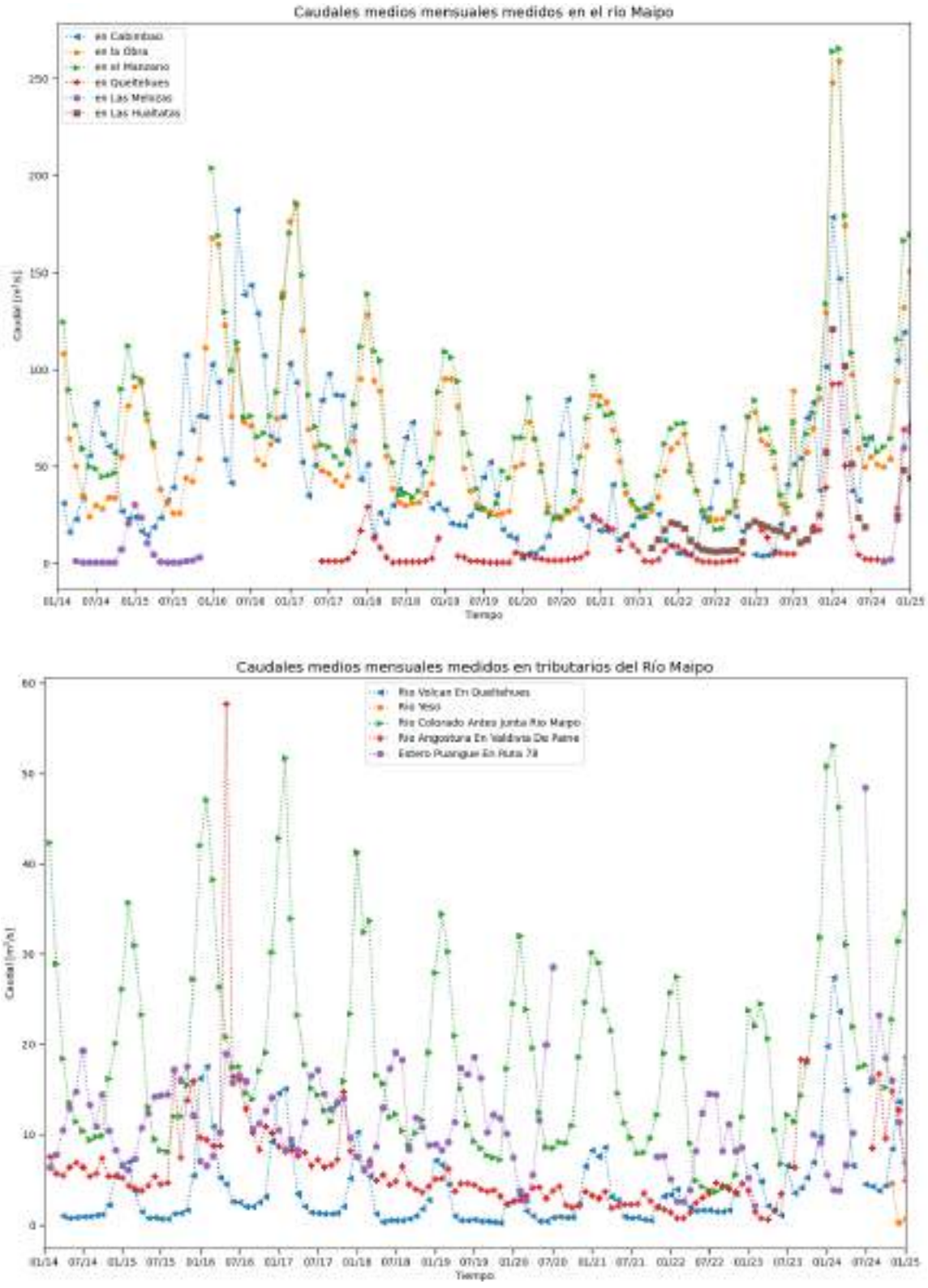


Figura 36 – Serie de caudales medios mensuales en el Río Maipo (en m^3/s) [panel superior] y sus tributarios [panel inferior] para el periodo 2014-2024.

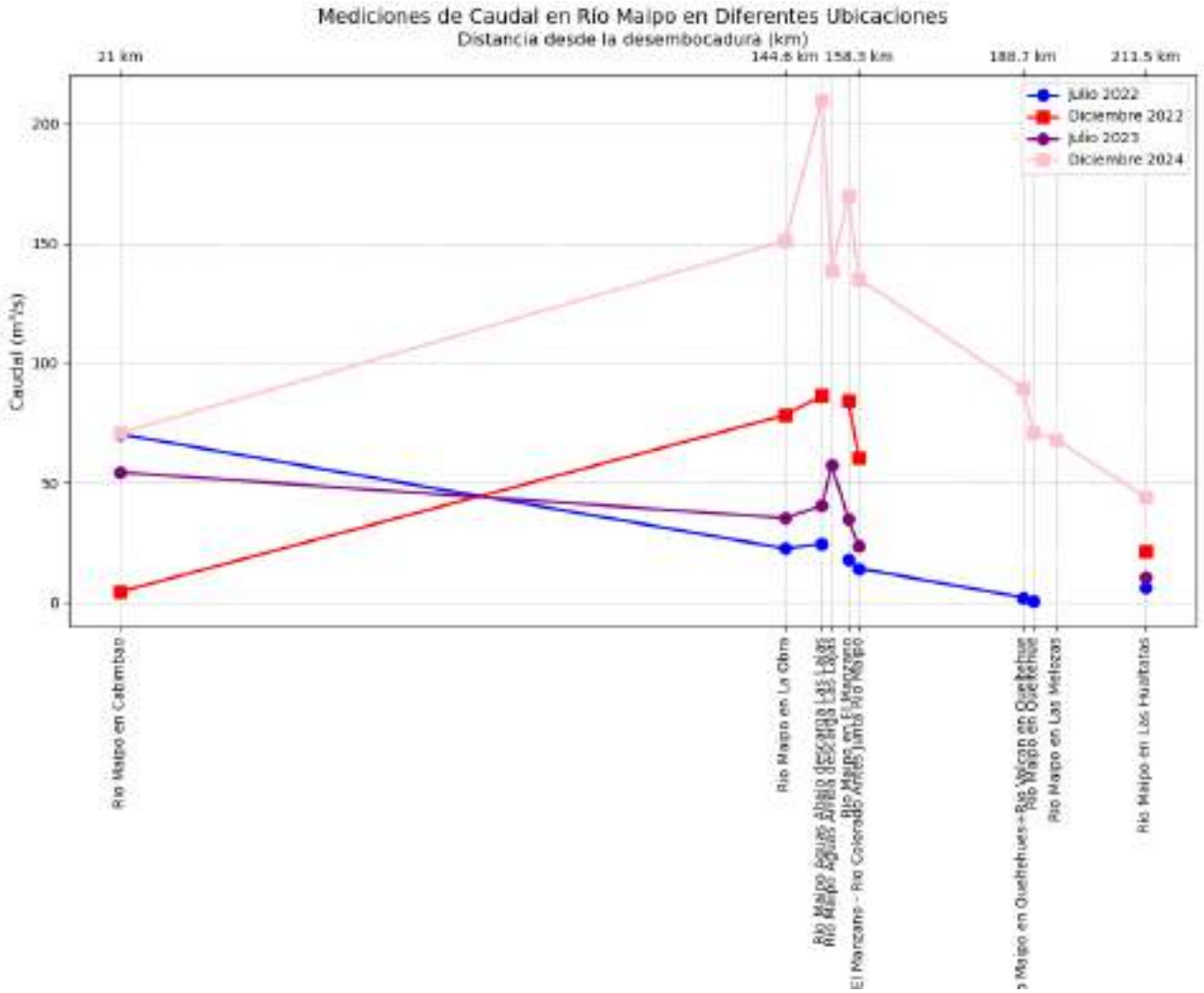


Figura 37 – Caudales medidos en distintas ubicaciones del río Maipo en julio 2022, diciembre 2022, julio 2023 y diciembre 2024.

La Figura 38 presenta los caudales medios mensuales registrados en el río Mapocho y sus tributarios, donde se observa un régimen mixto. Los tributarios ubicados en la parte alta de la cuenca presentan un régimen mixto con un mayor predominio de régimen nival. El caudal medio para el periodo 2014-2024 en Río Mapocho en Los Almendros es de 2.9 m3/s y el río Molina alcanza un caudal medio de 1.8 m3/s, siendo su principal tributario.

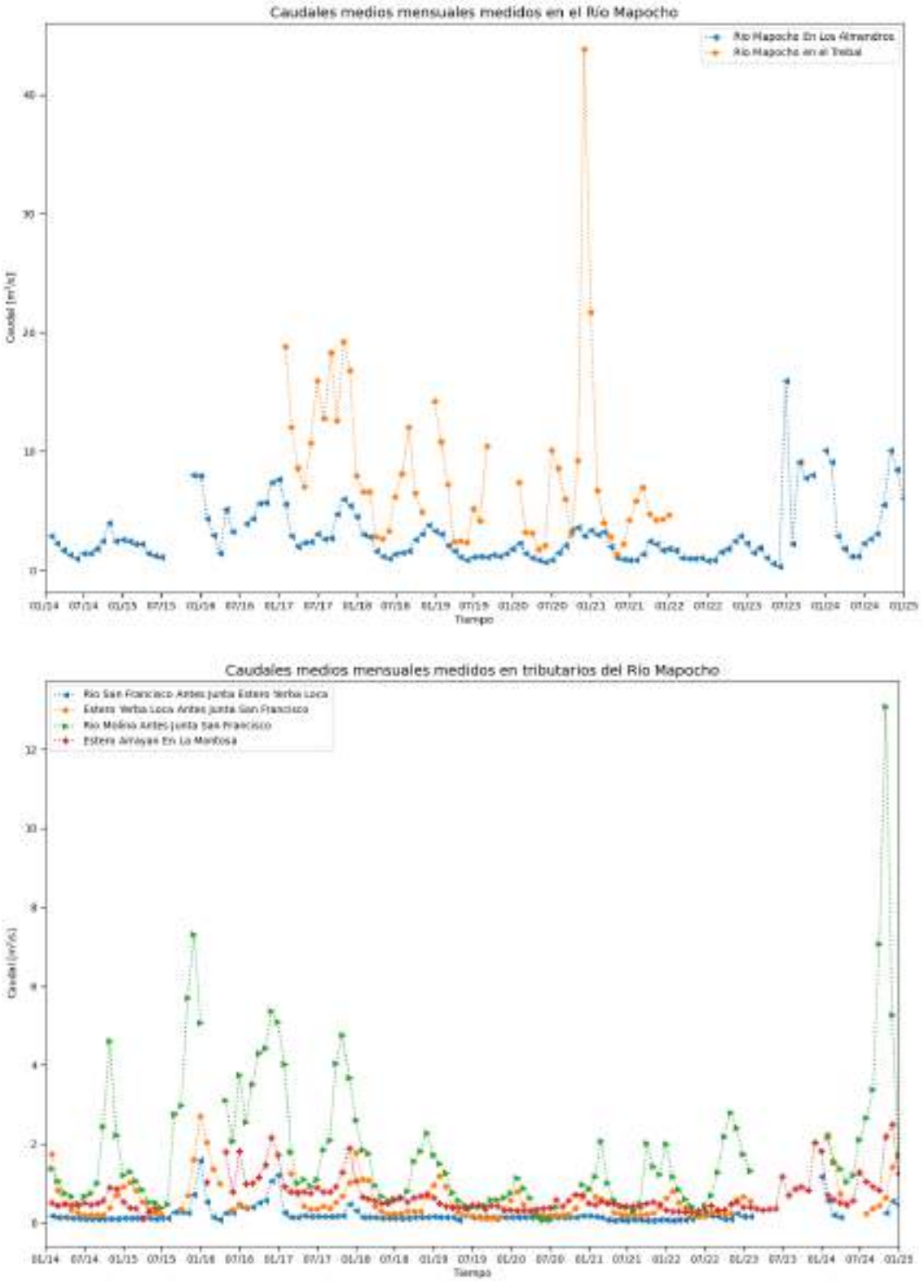


Figura 38 – Serie de caudales medios mensuales en el Río Mapocho (en m^3/s) [panel superior] y sus tributarios [panel inferior] para el periodo 2014-2024.

4.2.5 Datos meteorológicos

La mayor parte de la cuenca presenta un *Clima Templado Mediterráneo con estación seca prolongada*, con inviernos marcados, mayores precipitaciones y temperaturas bajo cero, mientras que en verano las temperaturas alcanzan valores sobre los 30°C. La precipitación media anual aumenta desde 404 mm en la costa hasta valores cercanos a 600 mm en sectores precordilleranos (Figura 39), donde la zona centro presenta los valores mínimos (300 mm/año) por efectos de relieve (DGA, 2004). Sobre los 3.000 msnm se presenta el *Clima Frío de Altura*, el cual permite la acumulación de nieve y presencia de glaciares (DGA, 2004). Para el periodo 1988-2018 y a partir de datos de precipitación y temperatura media diaria del CR2 (https://www.cr2.cl), se estimó el gradiente de precipitación con respecto a la altitud en **150 mm/km** (R^2=0.84) (ver Figura 39) y el gradiente de temperatura se estimó en -4.0°C/km (R^2=0.95) (Figura 39).

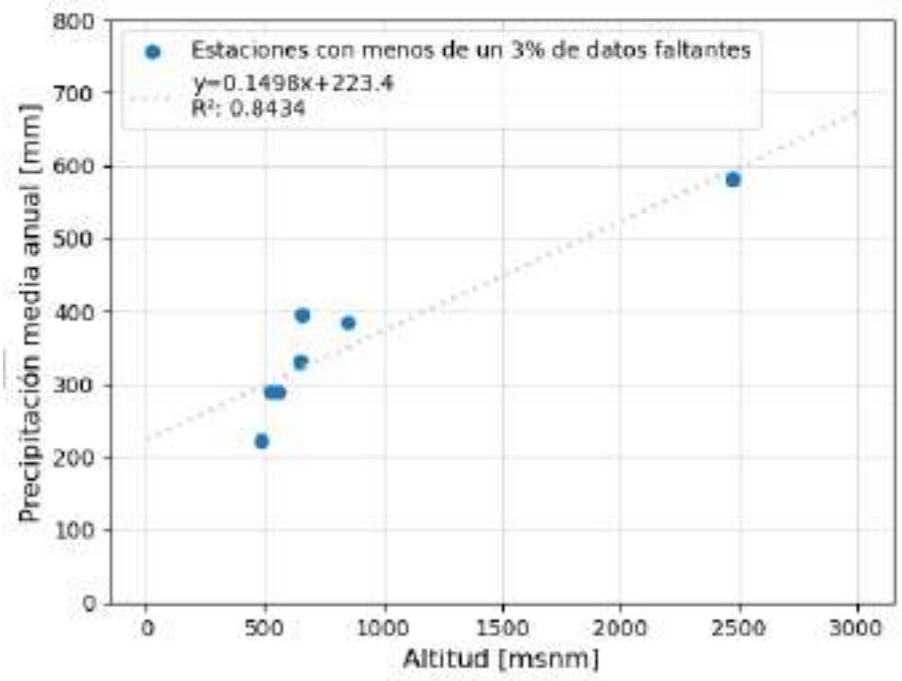


Figura 39 – Precipitación media anual con respecto a la altitud en la cuenca del Río Maipo para el periodo 1988-2018. Solo se presenta información para estaciones con menos de un 3% de datos faltantes. El gradiente de precipitación se estima en 150 mm/km.

La Tabla 41 presenta las estaciones meteorológicas en la cuenca del río Maipo con datos para el periodo 2014-2024, mientras que la Figura 41 muestra la ubicación espacial de estas. El relleno de datos faltantes se realizó a partir de la estación meteorológica más cercana con disponibilidad de datos. La caracterización de las áreas de vigilancia y zonas cordilleranas sin estaciones meteorológicas se realizó a partir de datos satelitales diarios de precipitación (CHIRPS) y de temperaturas máxima y mínima (ERA5-Land). CHIRPS (*Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data*) es un dataset mundial de resolución 0.05° (aproximadamente 5 km), con datos desde 1981. Realiza estimaciones de precipitación a partir de datos satelitales infrarrojos y mediciones in situ meteorológicas (Funk et al., 2015). ERA5-Land (del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) es un dataset de reanálisis de resolución 0.1° (aproximadamente 9 km) (Muñoz-Sabater et al., 2021). La ubicación de los puntos donde se extrajo información meteorológica satelital en el modelo se presenta en la Figura 41.

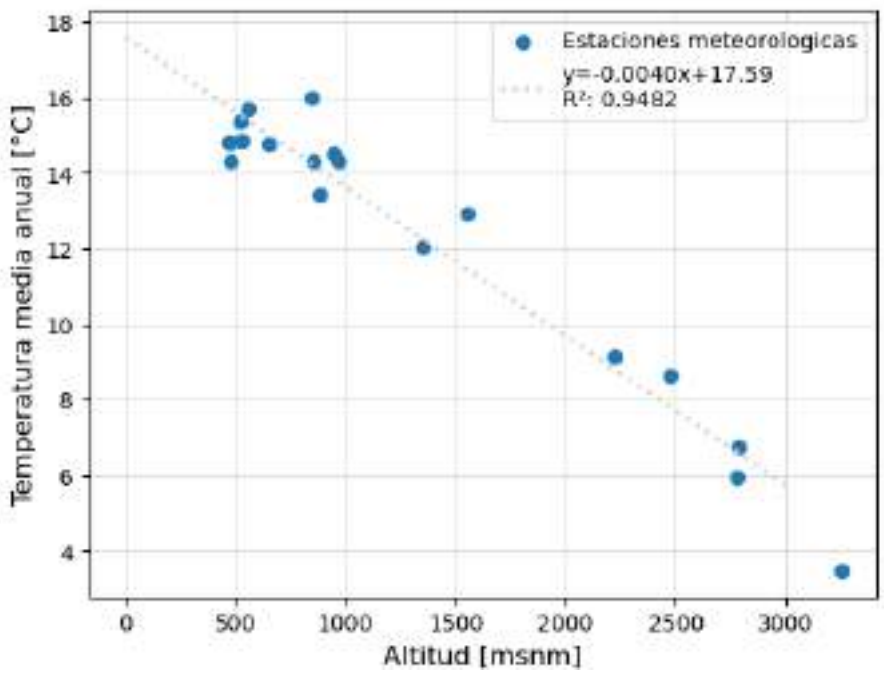


Figura 40 – Temperatura media anual con respecto a la altitud en la cuenca del Río Maipo para el periodo 1990-2018. El gradiente de temperatura se estima en -4°C/km.

Tabla 41 – Estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación de la cuenca del río Maipo, con información diaria para el periodo 2014-2024 de precipitación (Pr), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), humedad relativa (HR), velocidad del viento (Vv) y radiación total (Rad).

Código estación	Institución	Nombre	Altitud (msnm)	WGS84		Variables
				Latitud	Longitud	
330019	DMC	Eulogio Sanchez Tobalaba Ad.	650	-33.45	-70.55	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv
330020	DMC	Quinta Normal Santiago	527	-33.45	-70.68	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv
330021	DMC	Pudahuel Santiago	482	-33.39	-70.79	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv
330030	DMC	Santo Domingo, Ad.	75	-33.66	-71.61	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv
330111	DMC	Lo Prado Cerro San Francisco	1068	-33.46	-70.95	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv
330113	DMC	El Paico	275	-33.71	-71.01	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv
AG162	AGROMET	La Platina	620	-33.57	-70.63	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv, Rad
AG267	AGROMET	San Antonio de Naltahua	242	-33.73	-71.04	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv, Rad
AG268	AGROMET	San Pedro de Melipilla	143	-33.90	-71.45	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv, Rad
AG285	AGROMET	Los Tilos	535	-33.70	-70.70	Pr, Tmax, Tmin, HR, Vv, Rad

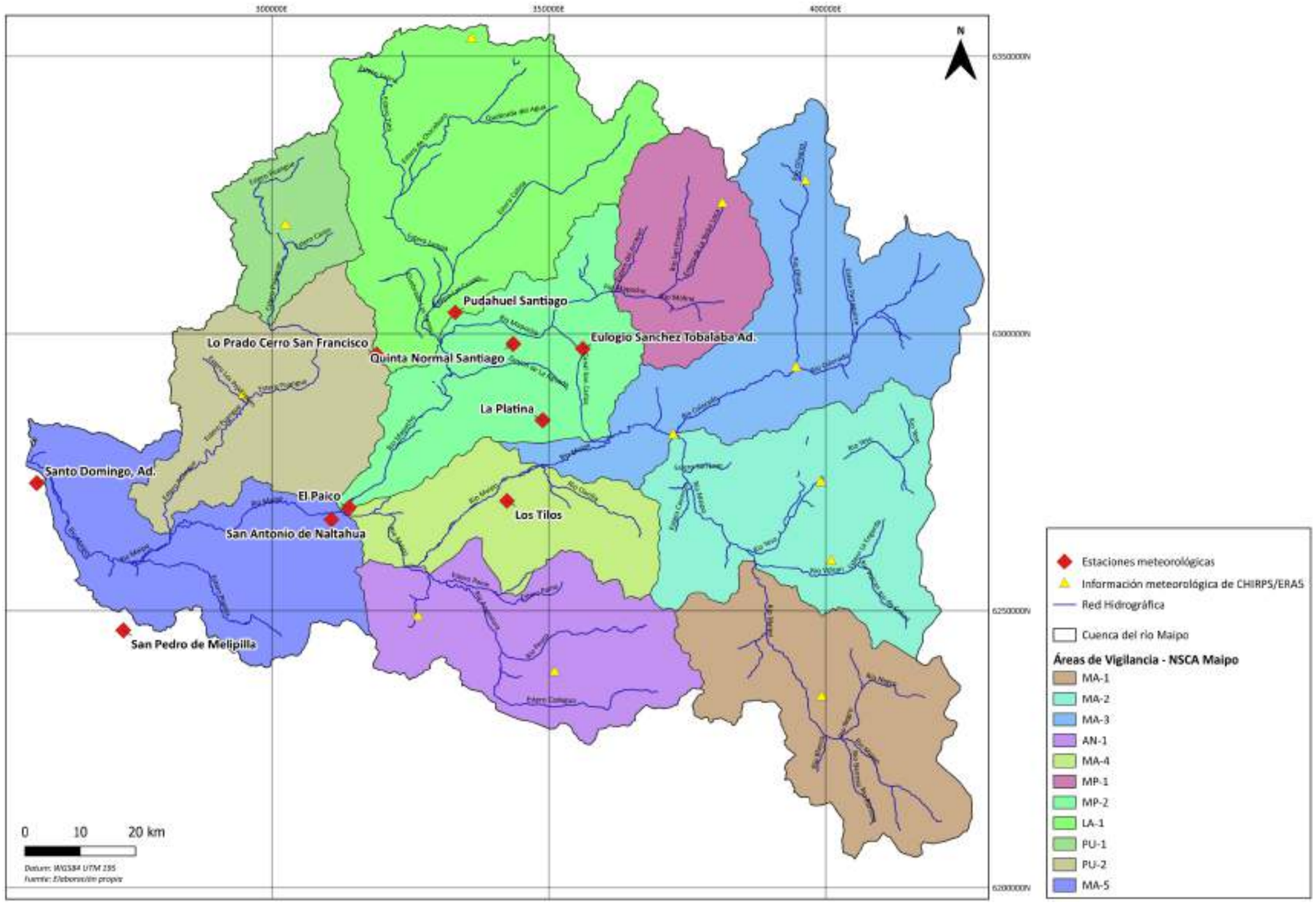


Figura 41 – Estaciones meteorológicas en la cuenca del Río Maipo, con datos para el periodo 2014-2024.

Como ejemplo, en la Figura 42 y Figura 43 se presenta la información meteorológica diaria registrada en la estación AGROMET La Platina (AG162) y Los Tilos (AG285), respectivamente, para el periodo 2014-2024, y para las variables precipitación diaria [mm], temperatura máxima y mínima [°C], radiación solar [mJ/m2], humedad relativa [%] y velocidad del viento [km/h].

En la estación Lo Prado Cerro San Francisco se presentan las mayores velocidades del viento (16.7 km/h en promedio para el periodo) y la mayor temperatura mínima promedio (9.23 °C). La estación Santo Domingo Aeródromo registra la mayor humedad relativa promedio (83%) y la menor temperatura máxima promedio (17.1°C). Finalmente, la menor humedad relativa se presenta en la estación Eulogio Sánchez (54%).

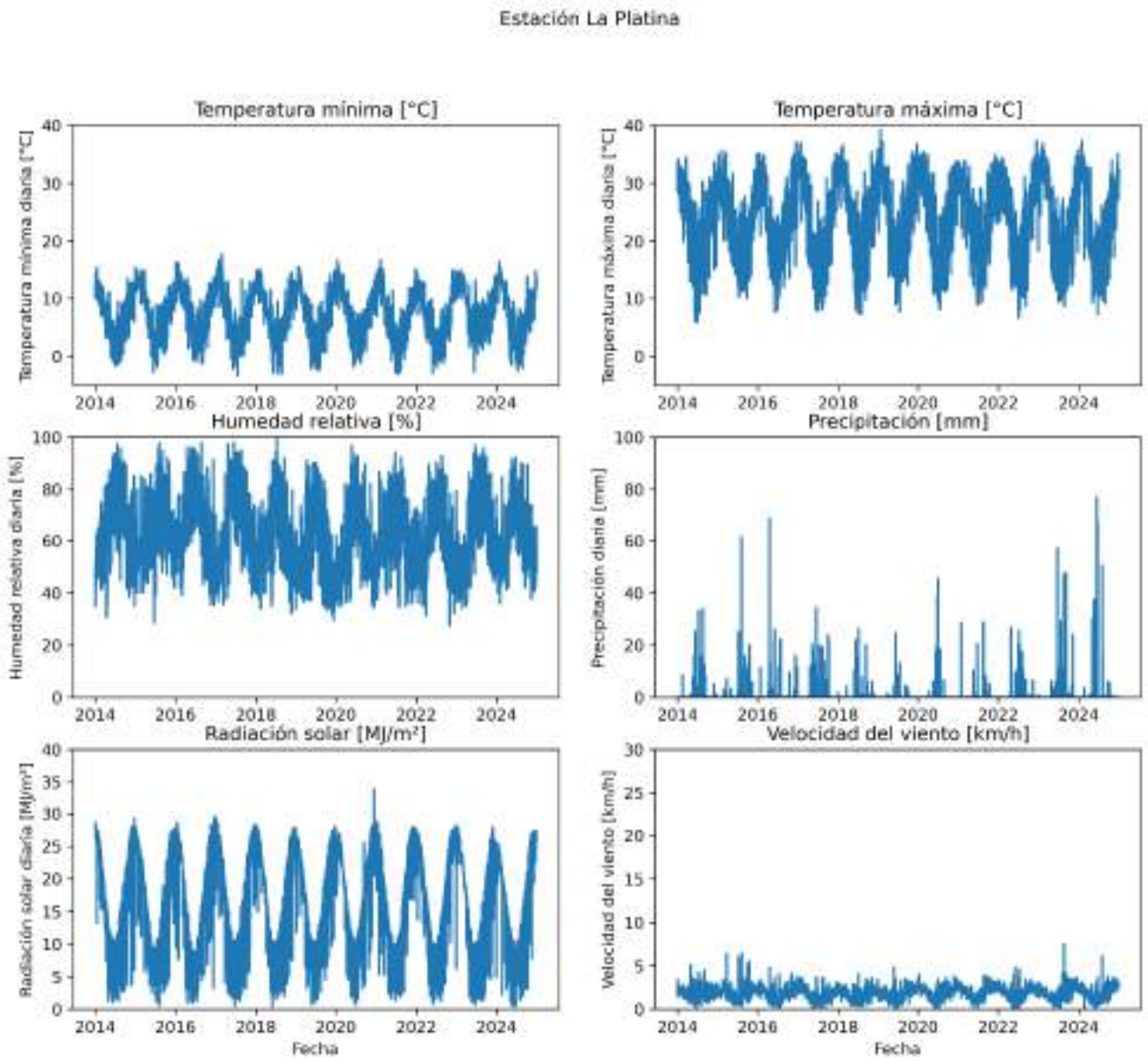


Figura 42 – Información meteorológica diaria en la estación AGROMET La Platina (AG162) para el periodo 2014-2024.

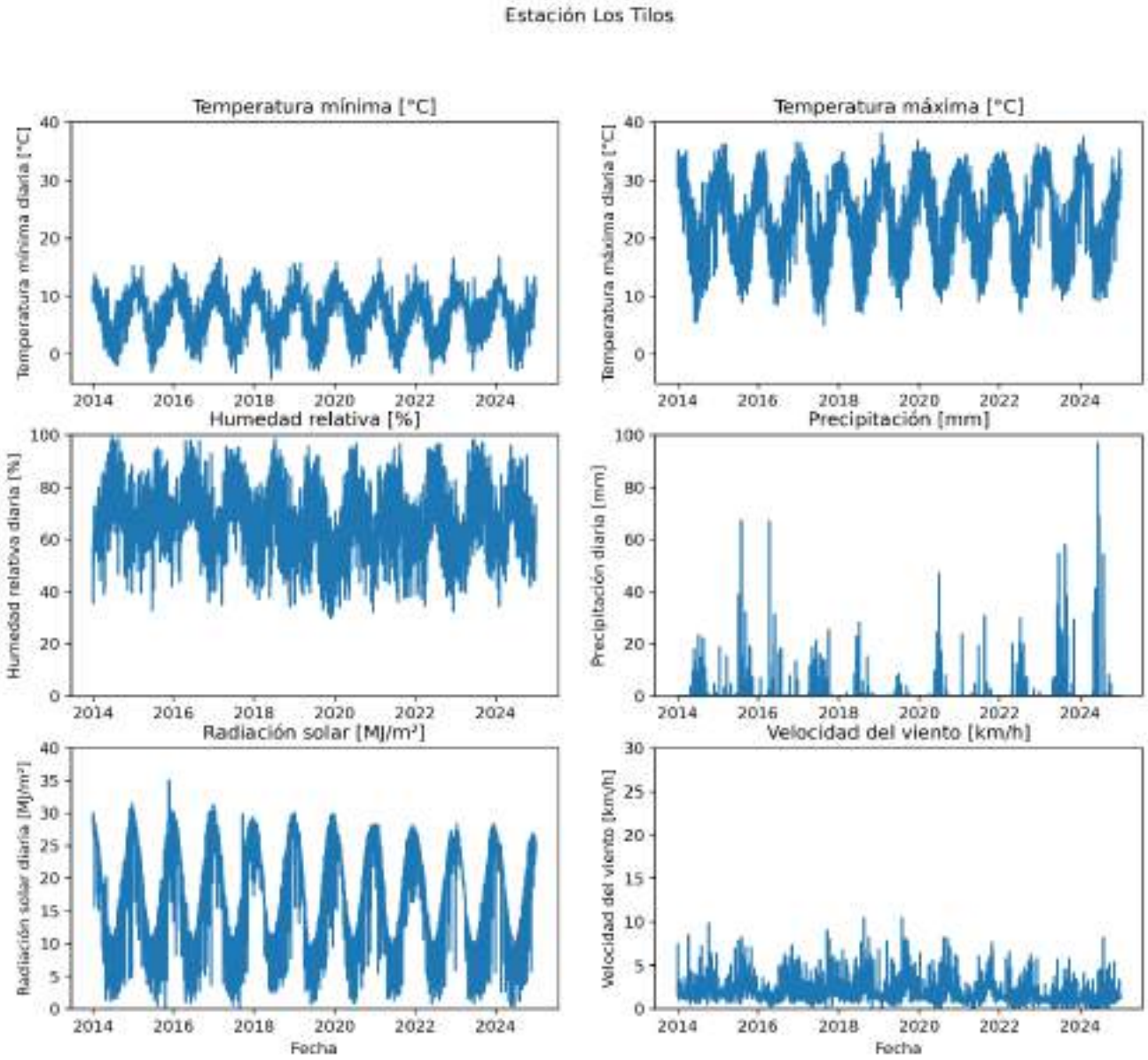


Figura 43 – Información meteorológica diaria en la estación AGROMET Los Tilos (AG285) para el periodo 2014-2024.

En la Figura 44 se presenta las series anuales de precipitaciones en la cuenca del Río Maipo. Las mayores precipitaciones se registran en la estación San Pedro de Melipilla (350 mm para el periodo 2014-2024) y las menores en Pudahuel (161 mm para el periodo 2014-2024). Se observa un descenso en los montos de precipitación anual desde el año 2016, hasta alcanzar un mínimo en 2019, donde la precipitación anual estuvo bajo los 100 mm en varias estaciones. El año más húmedo corresponde al año 2024, con precipitaciones sobre 400 mm en gran parte de las estaciones. La Figura 45 muestra las precipitaciones medias mensuales en la cuenca, donde los máximos se alcanzan durante el invierno, con valores de hasta 100 mm/mes y mínimos durante el verano austral, con valores cercanos a cero.

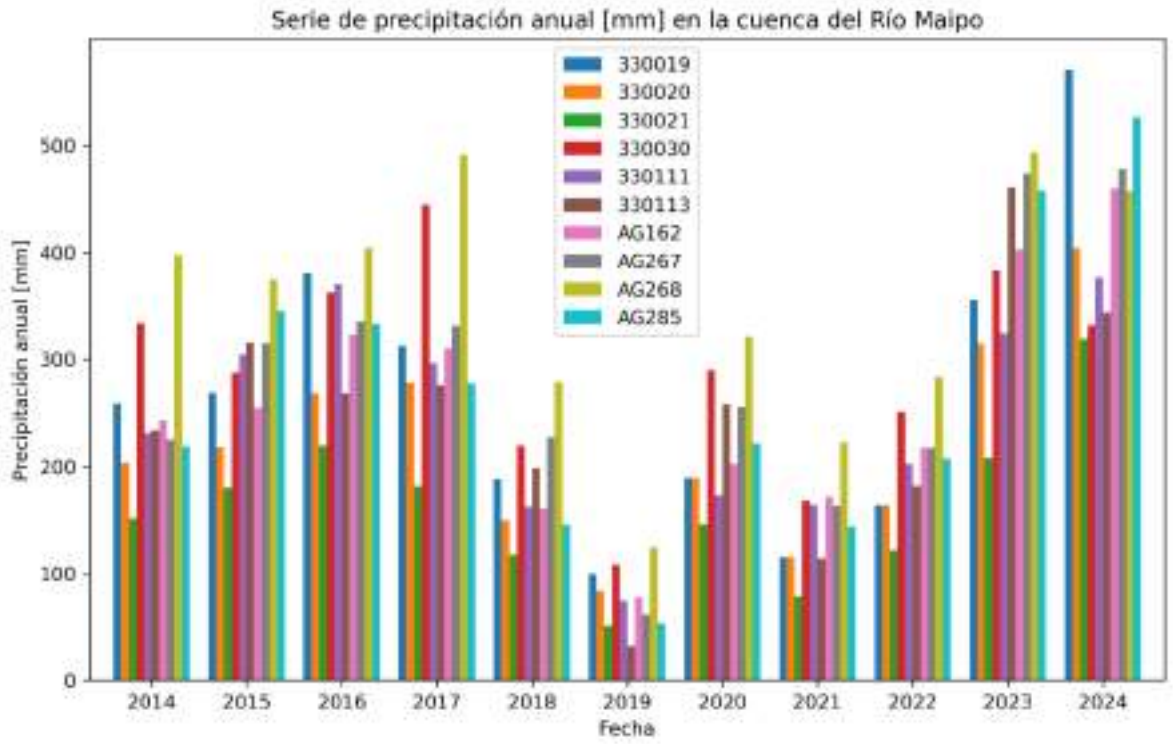


Figura 44 – Series de precipitación anual registrada en la cuenca del Río Maipo para el periodo 2014-2024.

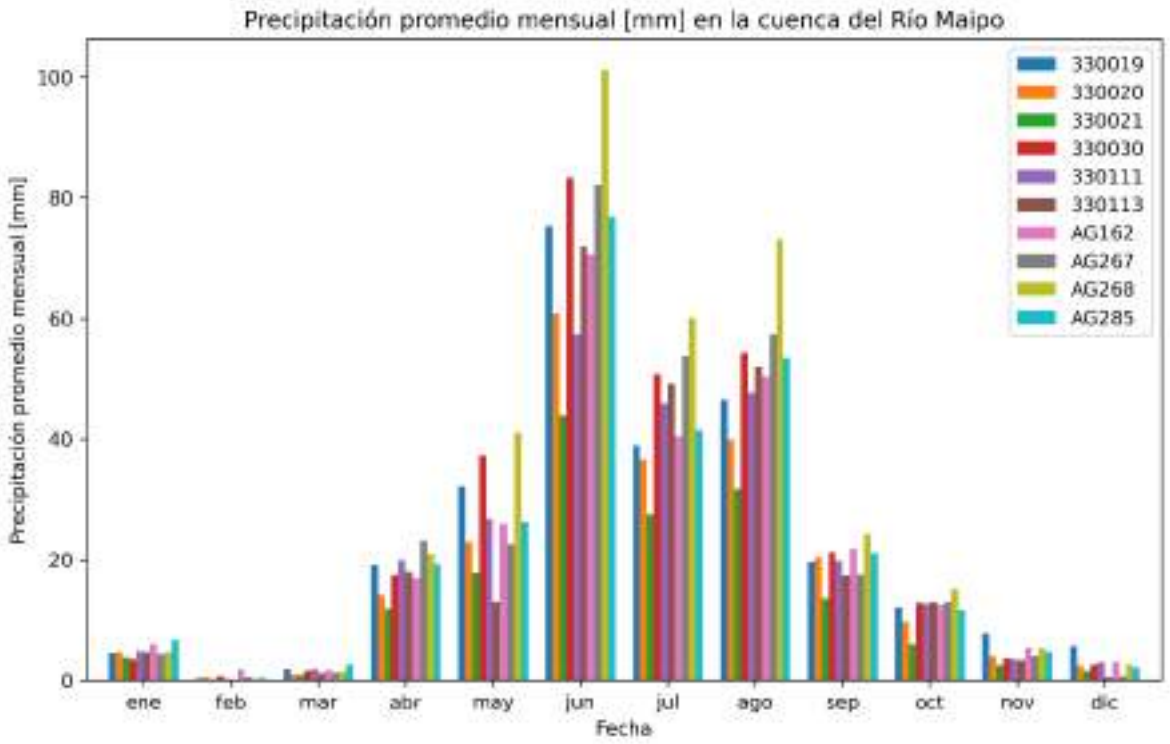


Figura 45 – Precipitación media mensual en la cuenca del Río Maipo para el periodo 2014-2024.

4.2.6 Datos de calidad del agua

El control de los parámetros definidos en la NSCA del río Maipo se realiza a través de Programa de Medición y Control de Calidad Ambiental (**PMCCA**), elaborado por la SMA, y ejecutado en colaboración con el MMA, la DGA y el SAG. El PMCCA define una **Red de Control**, donde los parámetros se miden mensualmente por la DGA, y una **Red de Observación**, con un monitoreo menos frecuente de otras variables que apoyan el proceso de revisión de normas y la gestión de calidad del agua y ecosistemas. Los datos están disponibles a través de la DGA: Estadística Oficial Red Hidrométrica (https://dga.mop.gob.cl/estadisticas-estaciones-dga/). Los parámetros medidos por DGA que fueron extraídos son cloruro, conductividad eléctrica, DBO_5, Fósforo de ortofosfato, Fósforo total, Nitrógeno de amonio, Nitrógeno de nitrato, Nitrógeno de nitrito, Nitrógeno de nitrito y nitrato, Oxígeno Disuelto, Sólidos Disueltos Totales, Sulfato, Turbiedad, Zinc disuelto, Zinc Total.

Además, se cuenta con mediciones de parámetros de calidad del agua con frecuencia mensual en la zona alta del río Maipo, las cuales están disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (Snifa/Seguimiento Ambiental) dado el ingreso del proyecto hidroeléctrico Alto Maipo al Sistema de Evaluación Ambiental (EIA), el cual calificó favorablemente a través de RCA N°256/09 COREMA RM. Los parámetros extraídos son Cloruro, Conductividad Eléctrica, DBO_5, Fósforo Total, Nitrato, Nitrito, Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno Total, Ortofosfatos, Sólidos Totales Suspendidos, Sulfato, Turbiedad, Zinc Disuelto, Zinc Total.

Para la validación de los datos de calidad del agua recopilados se basó en los criterios del D.S. N°21/2023 MM. Los criterios de validación para este estudio corresponden a:

1. Si el valor de un parámetro es menor al límite de detección (LD), los datos se consideran válidos si el LD< AL 80% del límite normativo mínimo establecido en el D.S. N°53/2013 MMA (ver Tabla 42).
2. Los parámetros que consideren la suma de sus fracciones orgánicas, inorgánicas, o disueltas, se consideran válidos si la suma de las fracciones es menor o igual al valor total del parámetro.

La Tabla 42 y Tabla 43 presenta el listado de estaciones de calidad del agua en la cuenca del Río Maipo con medición de parámetros saturados y latentes, mientras que la Figura 46 muestra la ubicación de las estaciones de calidad del agua.

Tabla 42 – Criterio de validación de información de calidad ambiental: Umbral de validez para valores menores al límite de detección (LD)

Parámetro	80% del menor límite normativo D.S. N° 53/2013
Oxígeno Disuelto	4 mg/L
Conductividad Eléctrica	320 µS/cm
Cloruro	24 mg/L
Sulfato	120 mg/L
DBO_5	4 mg/L
Nitrato	0.4 mg/L $N\text{-}NO_3^-$
Ortofosfato	0.064 mg/L $P\text{-}PO_4^{-3}$
Zinc disuelto	0.024 mg/L

Tabla 43 – Estaciones de medición de calidad del agua para el periodo 2014-2024

Nombre Estación	Fuente	Código	WGS84 UTM 19S		NSCA
			Norte (m)	Este (m)	
Rio Angostura Aguas Arriba Puente Champa	DGA	05715006-8	6252367	336704	Observación AN-1
Rio Angostura En Valdivia De Paine	DGA	05716001-2	6257179	325664	Control AN-1
Rio Clarillo Entre Qda Encanado Y Qda La Tinaja	DGA	05711005-8	6267171	363573	Observación CLAR-1
Rio Clarillo Antes Junta Rio Maipo	DGA	05711001-5	6275780	348796	Observación CLAR-2
Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares	DGA	05707004-8	6293240	394342	Observación COL-1
Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo	DGA	05707002-1	6282122	372846	Observación COL-2
Estero Arrayan En La Montosa	DGA	05722001-5	6311297	364170	Observación EA
Canal Colina En Compuerta Vargas	DGA	05735002-4	6327791	346242	Observación ECO
Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	DGA	05721001-K	6309689	373072	Observación EYL
Rio San Francisco Antes Estero Yerba Loca	DGA	05721002-8	6310094	373088	Observación FRA
Estero Lampa Antes Rio Mapocho (Ca)	DGA	05736001-1	6298814	329996	Control LA-1
Rio Maipo En Las Melosas	DGA	05701002-9	6253617	389152	Control MA-1
Rio Maipo Después De Estero Manzanito	DGA	05704012-2	6265859	379837	ObservaciónMA-2
Rio Maipo En San Jose De Maipo	DGA	05704008-4	6277834	374493	Control MA-2
Rio Mapocho Desp De Junta Con Estero Hualtatas	DGA	05730060-4	6306550	358523	Observación MA-2
Rio Maipo Antes De Canal San Carlos	DGA	05710011-7	6282182	363606	Observación MA-3
Rio Maipo Antes De Junta Rio Clarillo	DGA	05710009-5	6276361	349206	Control MA-3
Rio Maipo En Naltahua	DGA	05717005-0	6266193	322281	Control MA-4
Rio Maipo Después De Junta E.Cholqui	DGA	05740010-2	6264633	290354	Observación MA-5
Rio Maipo En Cabimbao	DGA	05748001-7	6260738	265651	Control MA-5
Rio Molina Antes Junta San Francisco	DGA	05720001-4	6306418	370093	Observación MOL
Rio Mapocho En Los Almendros	DGA	05722002-3	6306678	365020	Control MP-1
Rio Mapocho Después De Junta E.Colina	DGA	05730058-2	6297644	330490	Observación MP-2
Rio Mapocho En El Monte	DGA	05737005-K	6271394	316955	Control MP-2

Nombre Estación	Fuente	Código	WGS84 UTM 19S		NSCA
			Norte (m)	Este (m)	
Estero Manzanito En Puente Manzanito	DGA	05721018-4	6309383	376206	ObservaciónMZ
Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado	DGA	05706001-8	6293456	394336	Observación OL
Estero Puangue Antes De Junta Q.Las Lajas	DGA	05741003-5	6318374	299511	Observación PU-1
Estero Puangue Antes Pte Curacavi Nueva	DGA	05742002-2	6303097	299556	Control PU-1
Estero Puangue En Ruta 78	DGA	05746001-6	6272931	283301	Control PU-2
Rio Volcán Antes Rio Maipo (Ca)	DGA	05702006-7	6258421	387638	Observación VOL
Rio Yeso Antes Junta Rio Maipo	DGA	05703003-8	6260379	388655	Observación YESO
Canal San Carlos En Desembocadura Rio Mapocho	DGA	05730003-5	6301401	350598	NA
Estero Puangue En Curacaví (Ca	DGA	05742001-4	6303097	299556	NA
Pozo Agricola Hermanos Poblete	DGA	05737017-3	6283888	330891	NA
Pozo Asentamiento Central Lo Vargas	DGA	05736006-2	6316297	325599	NA
Pozo Asentamiento Malloco	DGA	05737018-1	6281599	329009	NA
Pozo Casas De Colo Colo	DGA	05730048-5	6307141	335768	NA
Pozo Cementerio Metropolitano	DGA	05730043-4	6288934	343941	NA
Pozo Chacra El Olivo	DGA	05730046-9	6294314	335395	NA
Pozo Club De Golf	DGA	05730040-K	6302697	352223	NA
Pozo Complejo Angostura	DGA	05715005-K	6247511	339475	NA
Pozo Crucero Peralillo	DGA	05736007-0	6306435	327998	NA
Pozo Estadio Corfo (Las Condes)	DGA	05730042-6	6305797	358329	NA
Pozo Fundo Cachantun	DGA	05714003-8	6258325	346582	NA
Pozo Fundo El Algarrobal	DGA	05736005-4	6317221	341096	NA
Pozo Inia	DGA	05730045-0	6284157	349038	NA
Pozo Parque O'Higgins	DGA	05730044-2	6295817	345670	NA
Rio Maipo En Puente Los Morros (Ca)	DGA	05712001-0	6274997	346805	NA
Rio Maipo En Puente San Ramon (Ca)	DGA	05710005-2	6278134	353918	NA
Rio Mapocho En Pte Pudahuel	DGA	05730011-6	6298767	330928	NA
Rio Mapocho Rinconada De Maipú	DGA	05737002-5	6291803	331049	NA
Zanjón De La Aguada En Pajaritos	DGA	05730006-K	6293828	339432	NA
Rio Maipo En El Manzano	DGA	05710001-K	6281632	372019	NA
Rio Maipo Aguas Arriba Descarga Las Lajas	AM	R1	6283612	367974	NA
Rio Maipo Aguas Abajo Descarga Las Lajas	AM	R2	6283673	367780	NA
Rio Yeso Aguas Arriba Bocatoma Yeso	AM	R3	6273863	399471	NA
Rio Yeso Aguas Abajo Bocatoma Yeso	AM	R4	6273521	399505	NA
Estero Morado Aguas Arriba Bocatoma El Morado	AM	R5	6260993	405535	NA
Estero Morado Aguas Abajo Bocatoma El Morado	AM	R6	6260415	405774	NA
Estero Las Placas Aguas Arriba Bocatoma Las Placas	AM	R7	6260551	406709	NA
Estero Las Placas Aguas Abajo Bocatoma Las Placas	AM	R8	6260352	406463	NA
Estero Colina Aguas Arriba Bocatoma Colina	AM	R9	6259728	407190	NA
Estero Colina Aguas Abajo Bocatoma Colina	AM	R10	6259739	406813	NA
Estero La Engorda Aguas Arriba Bocatoma La Engorda	AM	R11	6259398	407455	NA
Estero La Engorda Aguas Abajo Bocatoma La Engorda	AM	R12	6259442	407120	NA
Rio Colorado Aguas Arriba Camara De Carga Las Lajas	AM	R13	6292172	388861	NA
Rio Colorado Aguas Abajo Camara De Carga Las Lajas	AM	R14	6291926	388659	NA
Rio Yeso Aguas Arriba Sifón El Yeso	AM	R15	6272550	397733	NA
Rio Yeso Aguas Abajo Sifón El Yeso	AM	R16	6272330	397598	NA
Rio Colorado Aguas Abajo De Puente Alfalfal	AM	PHAM-01	6291888	388715	NA
Rio Colorado, Antes Centrales Maitenes Y Estero Aucayes	AM	PHAM-02	6289221	383391	NA

Nombre Estación	Fuente	Código	WGS84 UTM 19S		NSCA
			Norte (m)	Este (m)	
Estero Aucayes, Aguas Arriba Desembocadura Al Colorado (Bajo El Puente)	AM	PHAM-03	6288499	382535	NA
Rio Colorado, Bajo Central Maitenes	AM	PHAM-04	6287213	380443	NA
Rio Colorado, Bajo Bosque Pinos Casi En Desembocadura Al Rio Maipo	AM	PHAM-05	6282313	373089	NA
Rio Maipo, Antes Descarga Las Lajas, Aguas Abajo Desembocadura Colorado	AM	PHAM-06	6283634	368066	NA
Rio Maipo, Después Descarga Las Lajas, Aguas Abajo Desembocadura Colorado	AM	PHAM-07	6283701	367812	NA
Rio Maipo, Antes De Desembocadura Rio Colorado	AM	PHAM-08	6281800	372982	NA
Rio Maipo, Lado Pueblo San Jose De Maipo	AM	PHAM-09	6278201	374337	NA
Rio Maipo, Aguas Abajo Puente El Toyo	AM	PHAM-10	6272719	375469	NA
Rio Yeso, Al Llegar A La Desembocadura En El Maipo	AM	PHAM-11	6260865	386099	NA
Rio Yeso, Parte Baja Del Rio Yeso	AM	PHAM-12	6260211	388095	NA
Rio Yeso, Parte Media Del Rio Yeso	AM	PHAM-13	6262346	391479	NA
Rio Yeso, Parte Alta, Bajo Muro Embalse El Yeso	AM	PHAM-14	6273297	399177	NA
Estero Colina, Al Llegar A La Junta Con El Estero Morado	AM	PHAM-15	6259459	406184	NA
Estero Morado, Al Llegar A La Junta Con El Estero Colina	AM	PHAM-16	6259449	406160	NA
Estero La Engorda	AM	PHAM-17	6259480	407094	NA
Estero La Engorda, Tramo Medio Sector Bocatoma	AM	PHAM-18	6259453	407128	NA
Rio Volcán Sur, Aguas Arriba Del Puente	AM	PHAM-19	6257784	407011	NA
Rio Volcán, En Zona Rio Donde Se Forma Una Pequeña Laguna Aguas Arriba Lo Valdes	AM	PHAM-20	6257108	404256	NA
Rio Volcán	AM	PHAM-21	6256625	402461	NA
Rio Volcán, Sector De Las Amarillas	AM	PHAM-22	6256505	400383	NA
Rio Maipo, Sector Las Melosas	AM	PHAM-23	6254786	388013	NA
Junta Esteros De Alta Montana, Puente La Engorda	AM	PHAM-24	6258743	405968	NA

Fuente: DGA y Alto Maipo (AM)

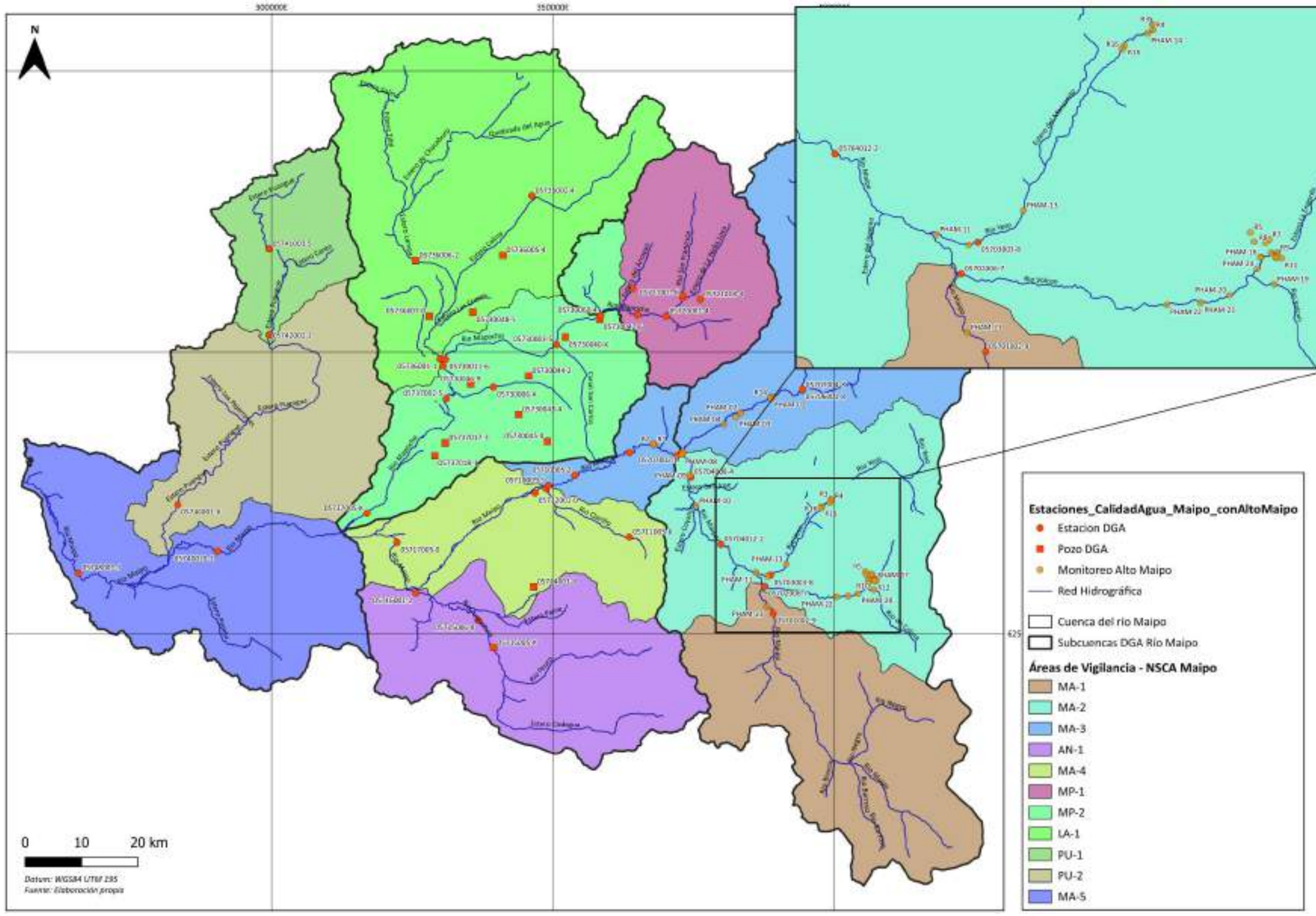


Figura 46 – Ubicación de estaciones de calidad de agua, clasificadas según fuente: agua superficial DGA, pozo DGA y agua superficial Alto Maipo.

A continuación, se presentan las series de parámetros de calidad del agua medidos mensualmente para el periodo 2014-2024 en el río Maipo y tributarios ubicados en la zona alta de la cuenca, donde las condiciones son principalmente naturales. Las series de cloruro, zinc disuelto, sulfato, nitrógeno de nitrato, fósforo de ortofosfato y DBO_5 se presentan en las Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52, respectivamente.

Las concentraciones más altas de cloruro se observan en la zona alta del Río Maipo, en Las Melozas y San José de Maipo, para luego diluirse aguas abajo en Cabimbao. De las series de cloruro graficadas de los tributarios del río Maipo se deduce que el río Colorado es uno de los tributarios que aporta más carga contaminante de cloruros al río Maipo.

Las concentraciones de zinc disuelto más altas se observan en Río Maipo antes de junta río Clarillo. Estero Morado y Quebrada la Engorda son de los tributarios estudiados que más aportan zinc disuelto al río Maipo. Los tributarios de la zona alta del río Maipo no aportan concentraciones significativas de nitratos y fosfatos, por lo que las concentraciones van aumentando aguas abajo, a medida que aumentan las actividades antropogénicas, especialmente agricultura y descargas de plantas de tratamiento de aguas servidas, RILes, lodos, sólidos.

Se detectó un importante aporte de sulfatos de los tributarios del río Maipo en la zona cordillerana, especialmente desde Quebrada La Engorda, Río Yeso y Río Colorado. No se observa una dilución de las concentraciones de sulfatos hacia aguas abajo.

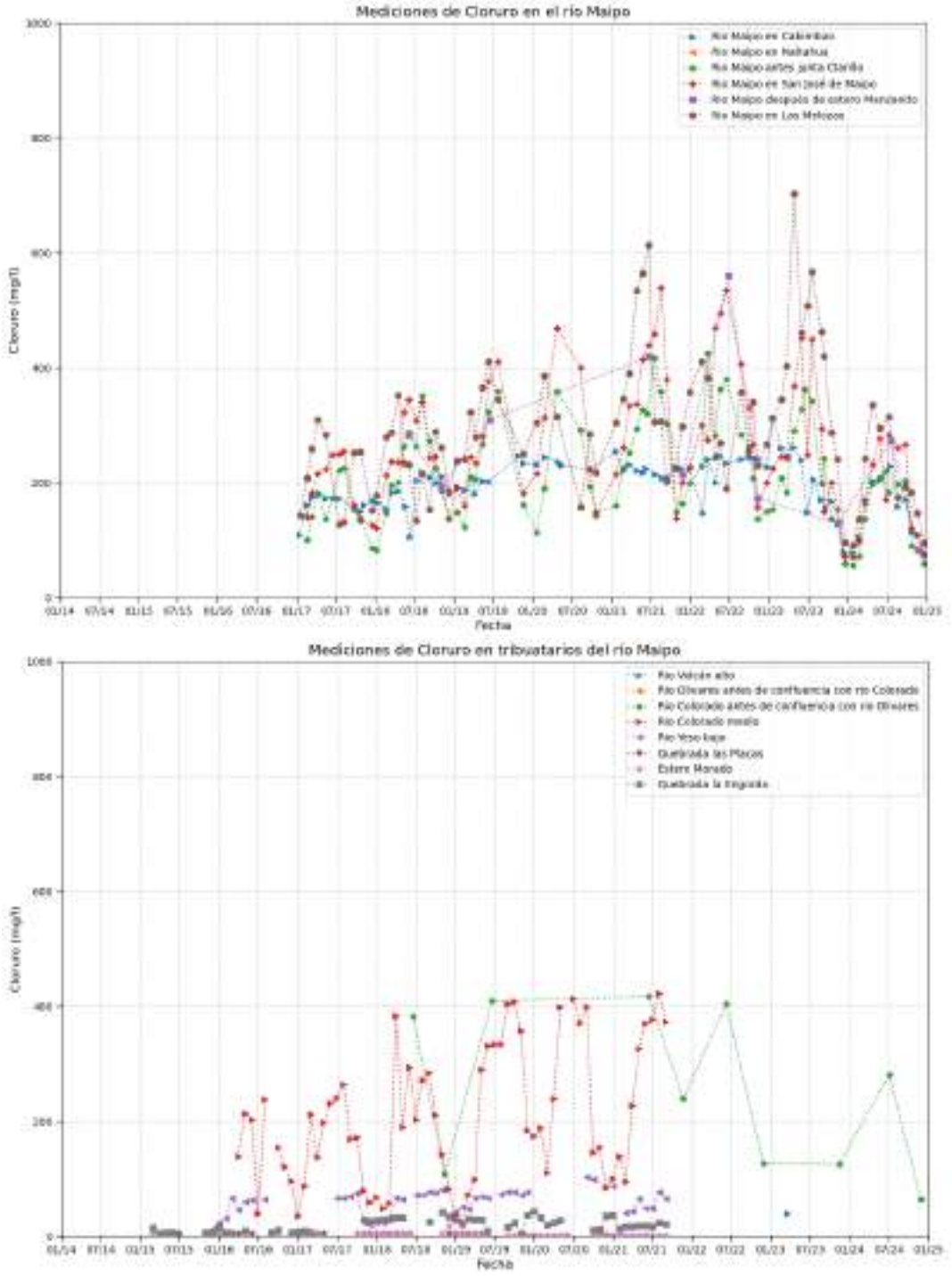


Figura 47 – Mediciones de Cloruro (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024.

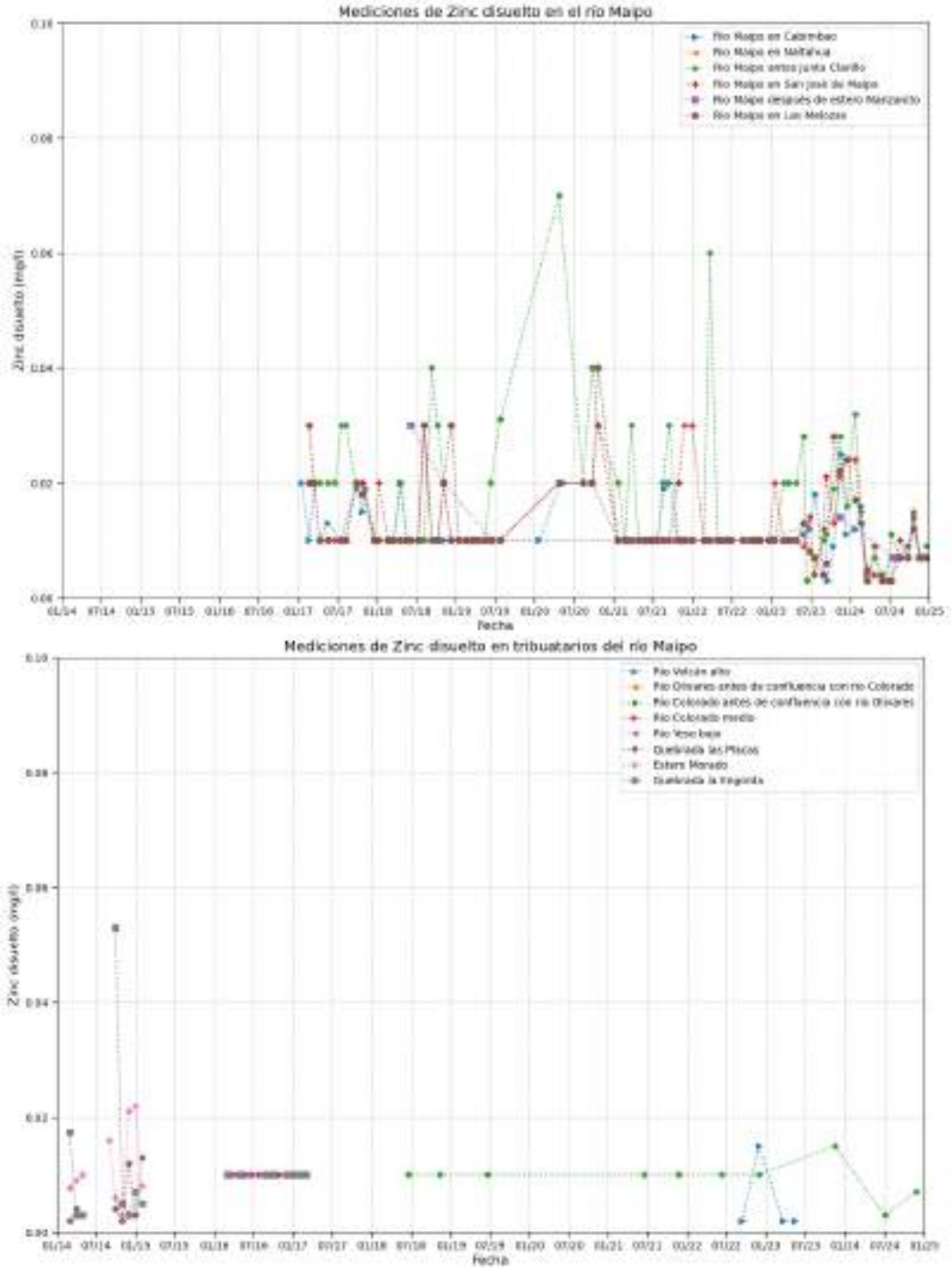


Figura 48 – Mediciones de zinc disuelto (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024.

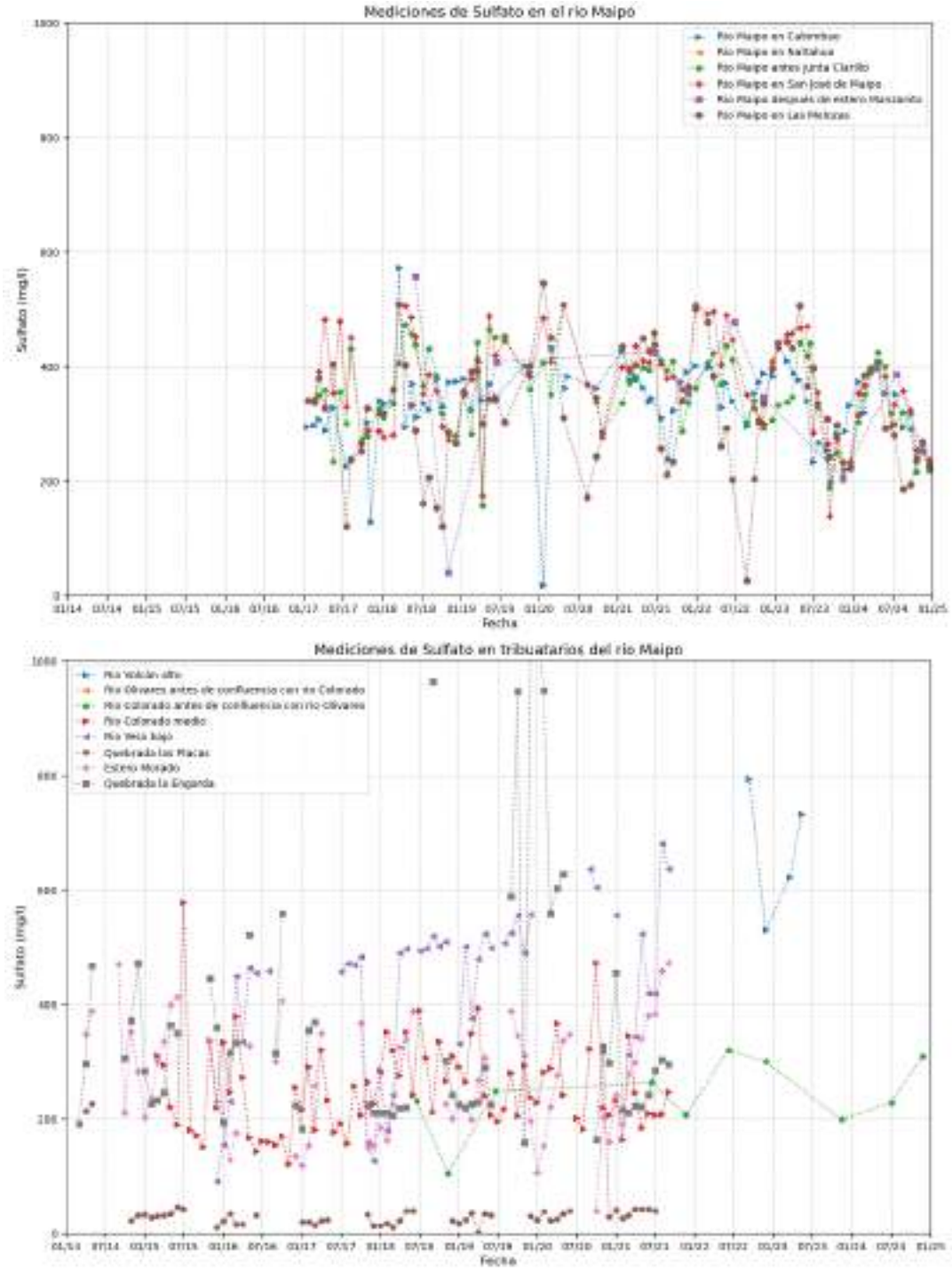


Figura 49 – Mediciones de Sulfato (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024.

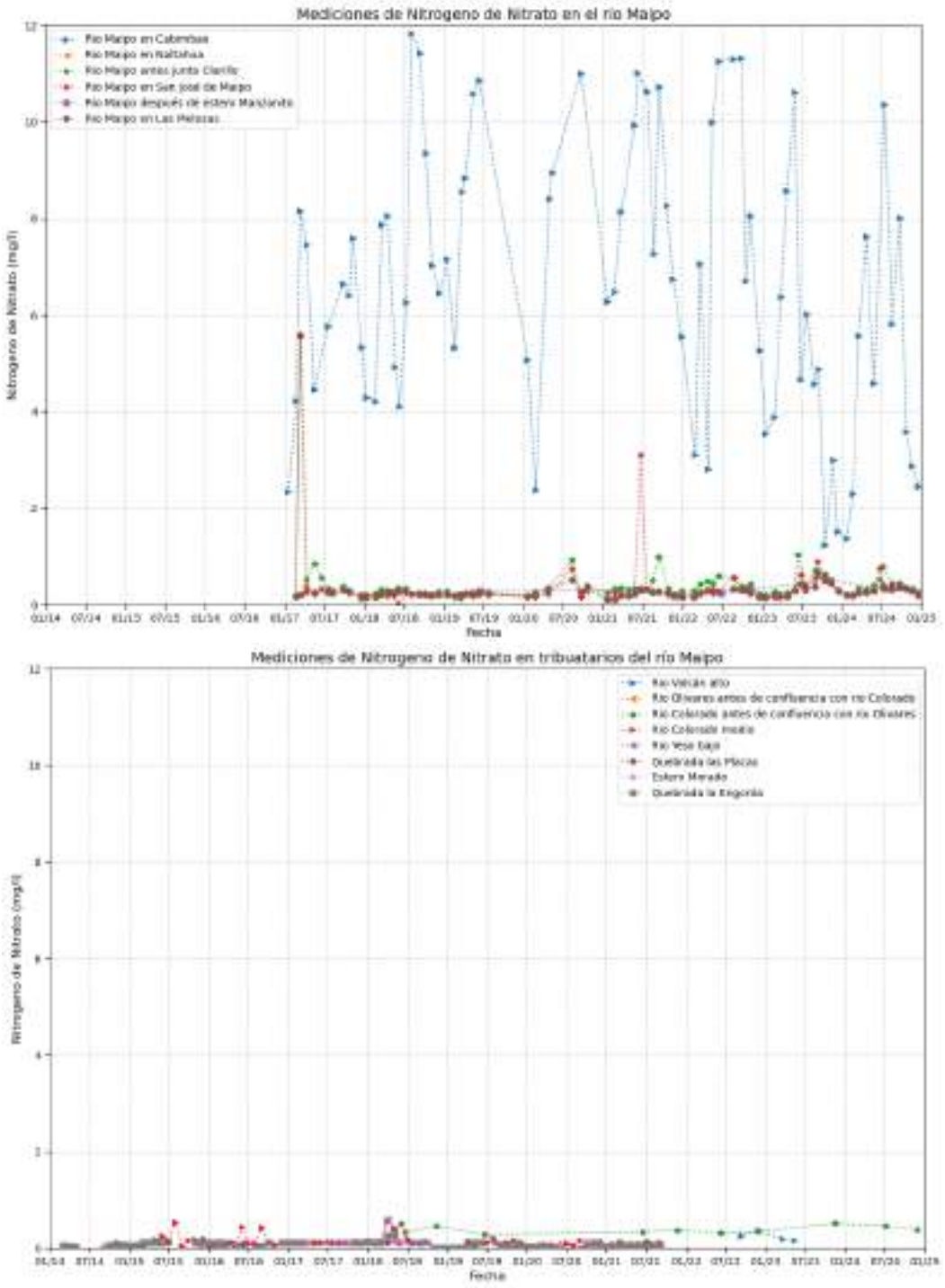


Figura 50 – Mediciones de Nitrógeno de Nitrato (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024.

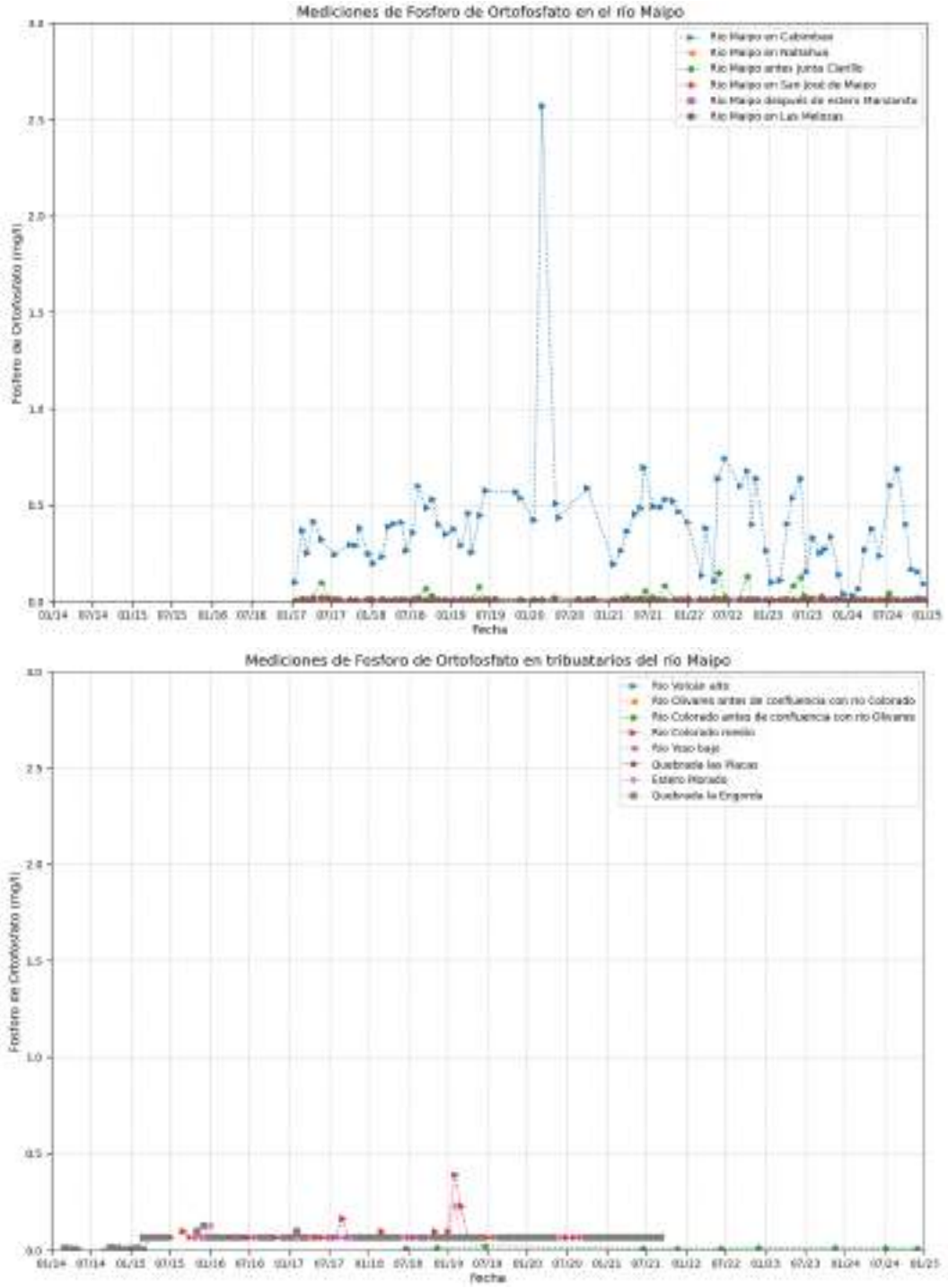


Figura 51 – Mediciones de Fósforo de Ortofosfato (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024.

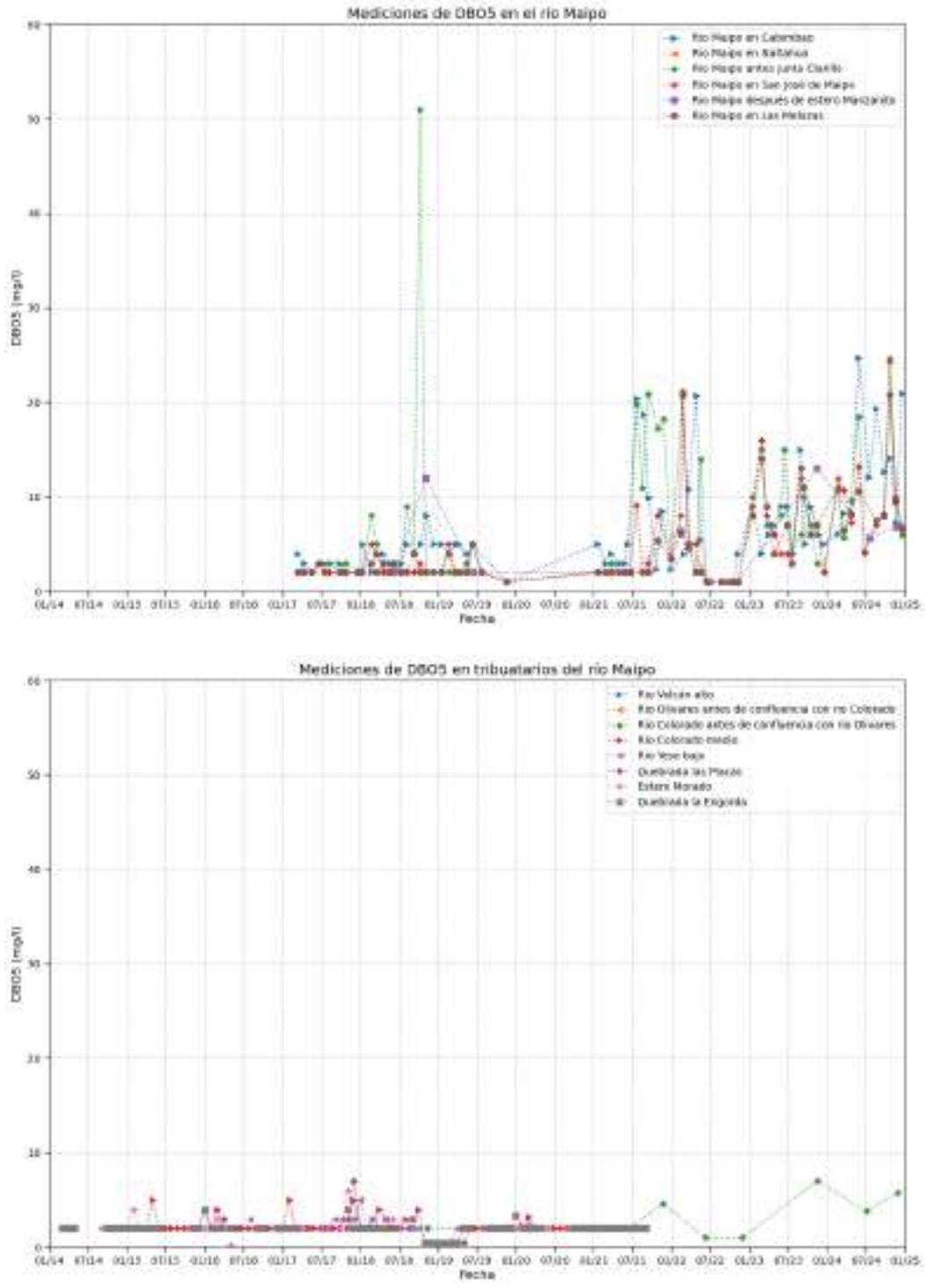


Figura 52 – Mediciones de DBO_5 (mg/L) en el río Maipo [Panel Superior] y sus tributarios [Panel Inferior] para el periodo 2014-2024.

Finalmente, se presentan mapas de la distribución espacial de concentraciones medias medidas en la cuenca del río Maipo para el periodo 2014-2024, y para los siguientes contaminantes: nitrógeno de nitrato (Figura 53), fósforo de ortofosfato (Figura 54), DBO_5 (Figura 55), zinc disuelto (Figura 56), sulfato (Figura 57) y cloruro (Figura 58).

La concentración media de nitrógeno de nitratos ($N\text{-}NO_3^-$) en la cuenca del río Maipo (Figura 53) alcanza sus valores máximos en MP-2: en los pozos Cementerio Metropolitano (16.9 mg/L) y pozo Chacra el Olivo (15.4 mg/L). Si bien los cursos de agua superficial en MP-2 presentan concentraciones de $N\text{-}NO_3^-$ menores a 10 mg/L, las mediciones de calidad del agua subterránea se encuentran con valores sobre los límites establecidos por la NSCA, lo que sugiere una contaminación persistente y difícil de gestionar, que podría tener efectos a largo plazo sobre la calidad de los cuerpos de agua superficiales. Por ejemplo, en Gran Bretaña, debido al uso intensivo de fertilizantes en la agricultura, los valores de nitratos en aguas subterráneas son alto. Aunque se han implementado medidas para reducir la contaminación por nitratos en aguas superficiales, la contaminación persiste dado dada la influencia de aguas subterráneas contaminadas, las cuales alimentan las aguas superficiales y mantienen altas concentraciones de nitratos (Macklin et al., 2006; Badr et al., 2012). En cuanto a las aguas superficiales, el estero Puangue, ubicado en la Ruta 78, muestra los niveles medios más altos de nitratos (10.7 mg/L), superando el límite normativo de 10 mg/L establecido por la NSCA en PU-2. A medida que los ríos Maipo y Mapocho fluyen aguas abajo, las concentraciones de nitratos aumentan, lo que coincide con la expansión de las áreas agrícolas en sus cuencas, intensificando así la carga de contaminantes de origen agrícola.

La concentración media de fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{-3}$) en la cuenca del río Maipo (Figura 54) generalmente no sobrepasa los 0.08 mg/L, el cual es el menor límite establecido para este contaminante en la NSCA. Los valores medios máximos de fósforo de ortofosfato se observan en río Mapocho en el Monte (0.87 mg/L), Estero Puangue en Ruta 78 (0.85 mg/L) y Estero Lampa antes del río Mapocho (0.65 mg/L). El último está sobre el límite establecido por la NSCA para LA-1 (0.6 mg/L). También se sobrepasa el límite de 0.08 mg/L en MA-2, específicamente en los esteros La Engorda, el Morado, el río Yeso en el sector salida del embalse y el río Colorado en ciertos tramos, los cuales registran concentraciones medias entre 0.15 y 0.2 mg/L, pero sin comprometer el valor medio en el río Maipo, el cual se mantiene bajo 0.08 mg/L.

La carga de contaminación orgánica, representada por DBO_5 (Figura 55), es baja en los tributarios del río Maipo en la zona de cordillera y precordillera (río Colorado, Yeso y Volcán), con valores promedio generalmente bajo los 3 mg/L. Río Clarillo y río Angostura presentan valores medios bajo los 5 mg/L. El río Maipo presenta valores de DBO_5 promedio bajo los 8 mg/L, el cual es el límite establecido por la NSCA en este sector. El río Mapocho presenta valores de DBO5 medio sobre 10 mg/L (límite de DBO_5 para MP-2) después de la junta con estero Colina, específicamente 13.2 mg/L. Además, en el sector MP-1, los esteros Manzanito en Puente Manzanito y Río Molina antes de junta con Río San Francisco, presentan valores medios de DBO_5 por sobre el límite de 5 mg/L establecido en la norma.

Los valores de zinc disuelto medio para el periodo 2014-2024 en la cuenca del río Maipo se presenta en la Figura 56. Los valores medios de zinc disuelto están generalmente bajo el límite establecido en la NSCA para toda la cuenca: 0.03 mg/L. Como excepción más importante se presenta el río San Francisco (aguas arriba se presenta la Mina Los Bronces), con una concentración media de 1.13 mg/L, impactando aguas abajo en la concentración del río Mapocho, el cual registra una concentración media de zinc disuelto de 0.08 mg/L en Los Almendros. Con condiciones más cercanas a lo natural, en las zonas MA-2 y MA-3 se observan valores medios sobre los 0.03 mg/L: estero La Engorda con hasta 0.059 mg/L y Río Colorado antes de Central Maitenes, con 0.035 mg/L.

La Figura 57 presenta el mapeo de las concentraciones medias de sulfatos para el periodo 2014-2024 en la cuenca del río Maipo. Los valores medios de sulfatos en los cursos de agua principales están bajo los límites establecidos en la NSCA para todos los sectores. Sin embargo, en el sector MA-2 y MA-3, las concentraciones medias de sulfatos en el río Yeso (494 mg/L), río Volcán (hasta 670 mg/L) y Río Colorado bajo (464 mg/L, Alto Maipo) están sobre el límite de 380 mg/L. Además, las concentraciones en el río San Francisco (225 mg/L) y Estero Yerba Loca (267 mg/L) también están sobre el límite de 150 mg/L establecido para MP-1. Cabe destacar que en MA-4, los valores medios de sulfatos en aguas superficiales están bajo el límite (380 mg/L), pero se registra en el pozo Fundo Cachantún un valor medio de sulfatos de 395 mg/L, el cual podría influir en las aguas superficiales.

Los valores medios de cloruro para el periodo 2014-2024 en la cuenca del río Maipo se grafican en la Figura 58. Los valores más altos de cloruro se observan en la cabecera del río Maipo, específicamente en el sector MA-1, en el tramo del río Maipo en Las Melosas, donde las concentraciones medias varían entre 289 mg/L (DGA) y 437 mg/L (Alto Maipo). Estos valores superan generalmente el límite normativo de 300 mg/L para este contaminante. A medida que se avanza aguas abajo, la concentración de cloruro disminuye ligeramente, pero en el sector MA-2, el valor medio sigue estando por encima del límite establecido de 240 mg/L en la NSCA. Más abajo, el río Colorado contribuye a la dilución de los cloruros del río Maipo, y en MA-3, las concentraciones medias caen por debajo del límite normativo de 240 mg/L. El valor medio de cloruro sigue disminuyendo a medida que el río Maipo se acerca a la confluencia con el estero Puangue, donde se registran concentraciones medias de 230 mg/L. Sin embargo, en Cabimbao (MA-5), el valor medio de cloruro es de 194 mg/L, por encima del límite establecido de 180 mg/L para este sector. En el estero Puangue, Lampa, Angostura y el río Mapocho, las concentraciones de cloruro se encuentran dentro de los límites normativos, excepto en el río San Francisco (MP-1), donde el valor medio alcanza los 115 mg/L, superando el límite de 30 mg/L para esa área.

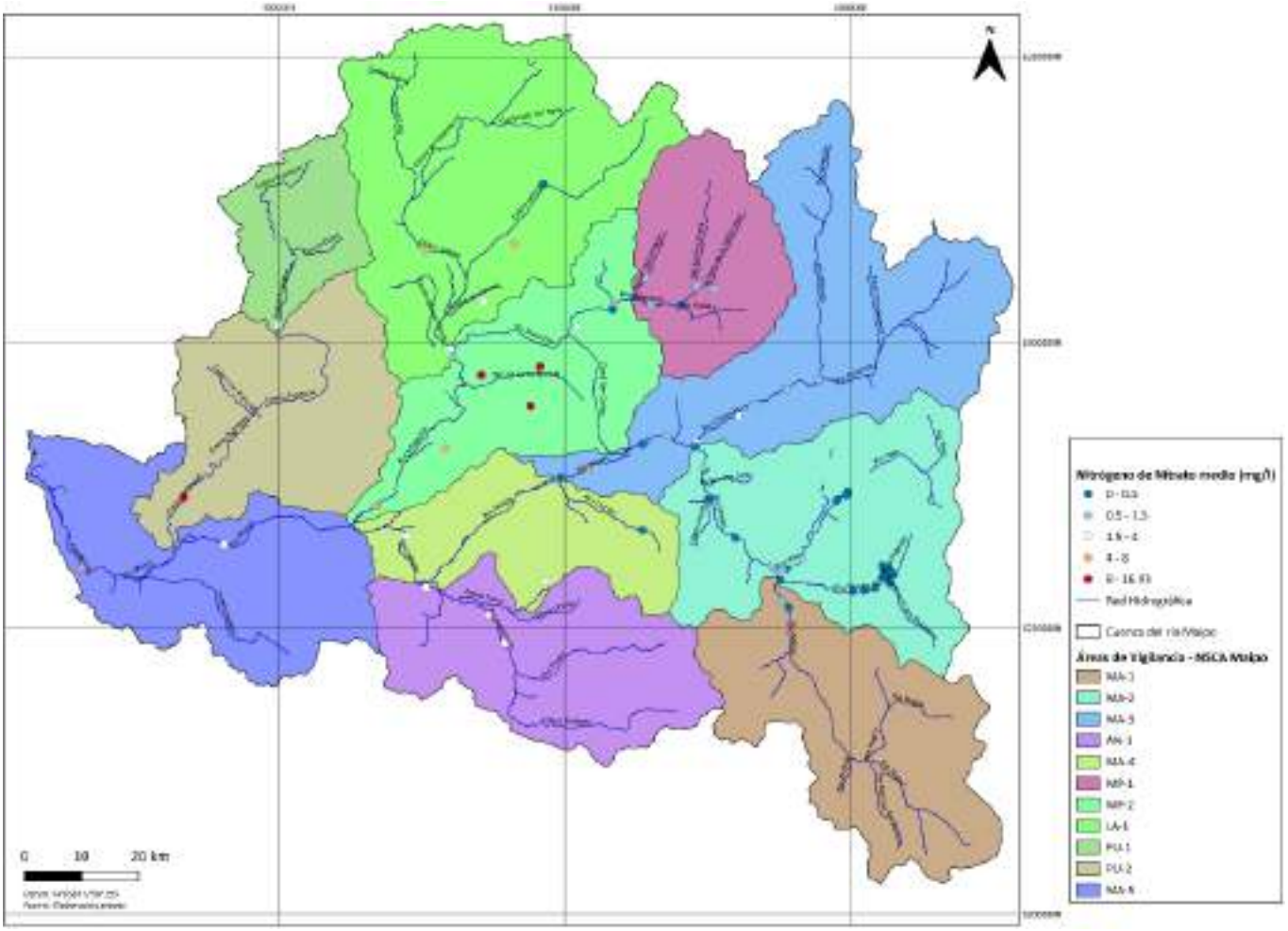


Figura 53 – Concentración media de nitrógeno de Nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo.

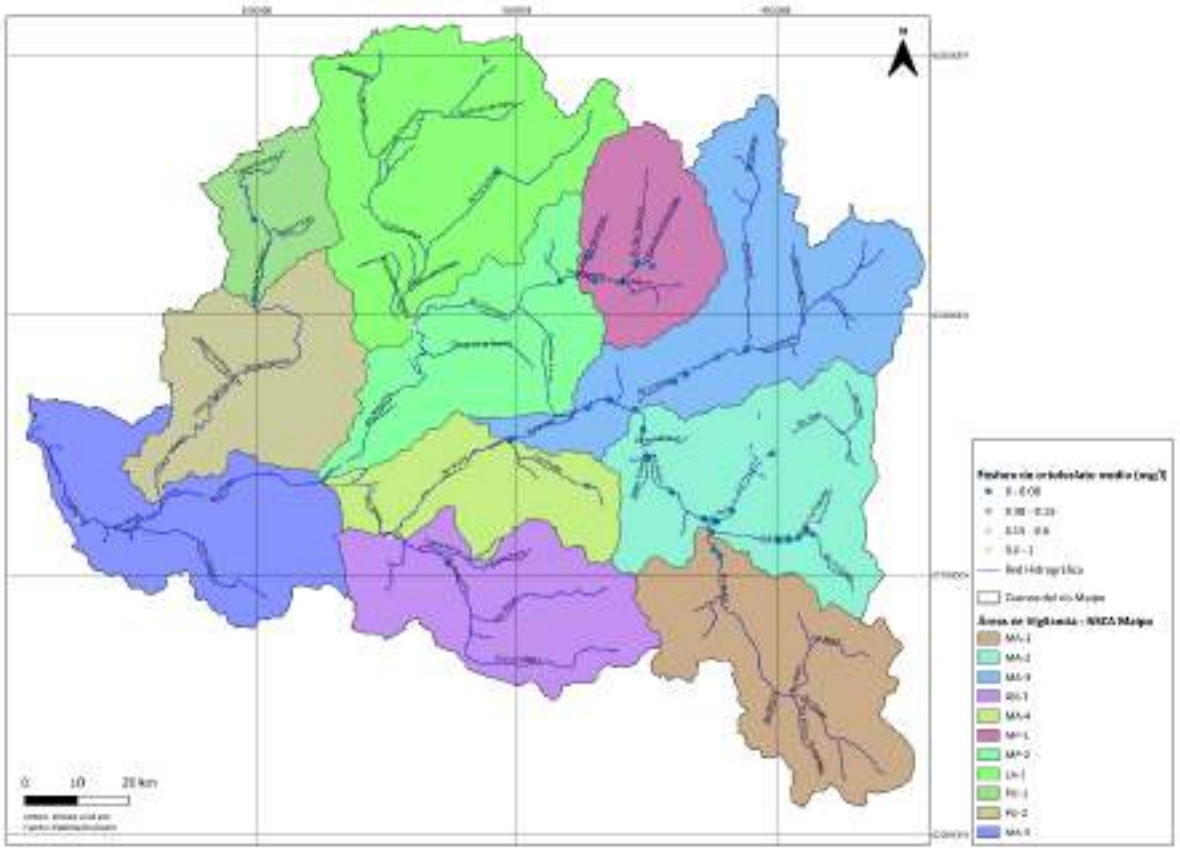


Figura 54 – Concentración media de fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{-3}$) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo.

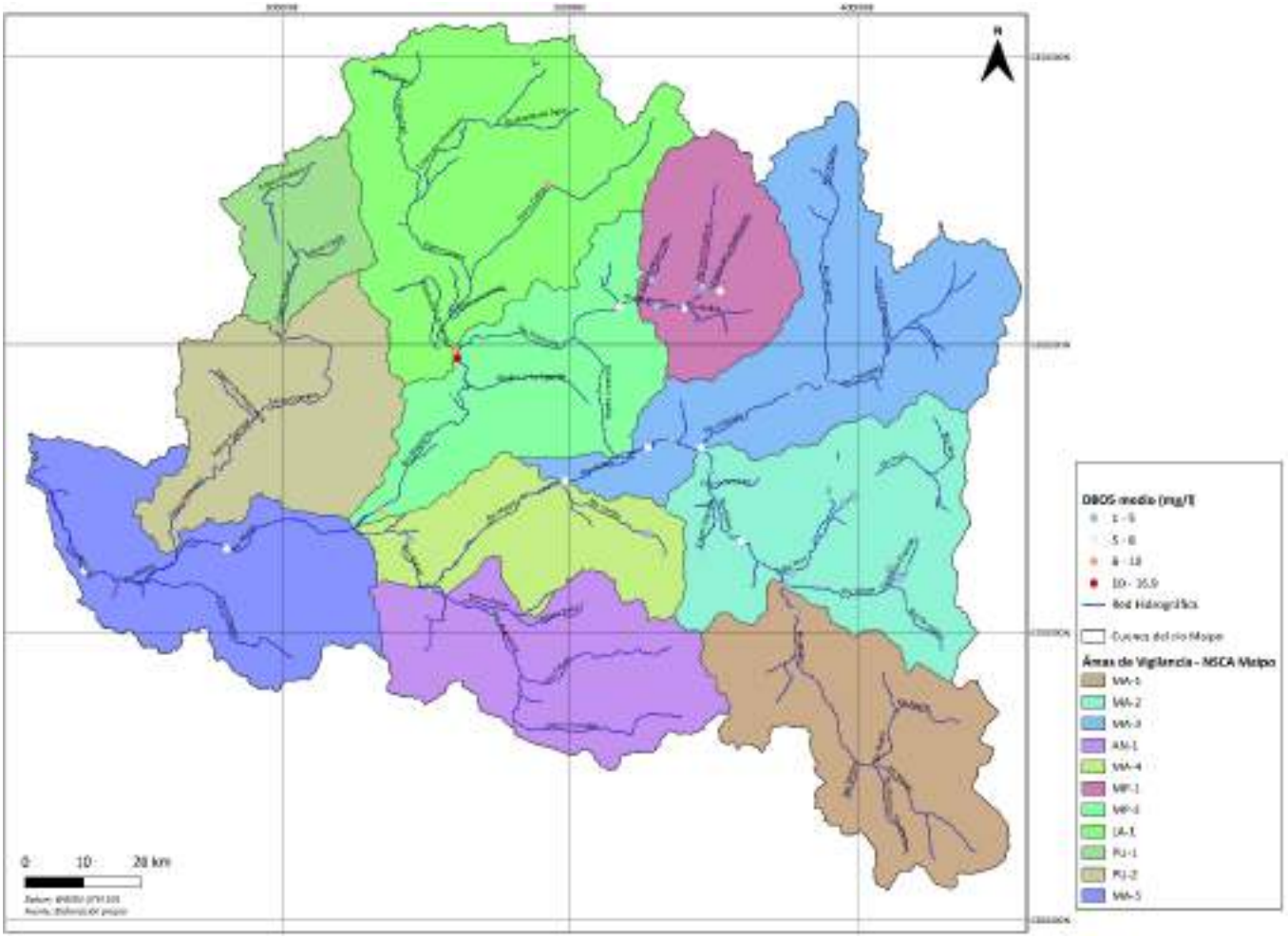


Figura 55 – Concentración media de DBO_5 en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo.

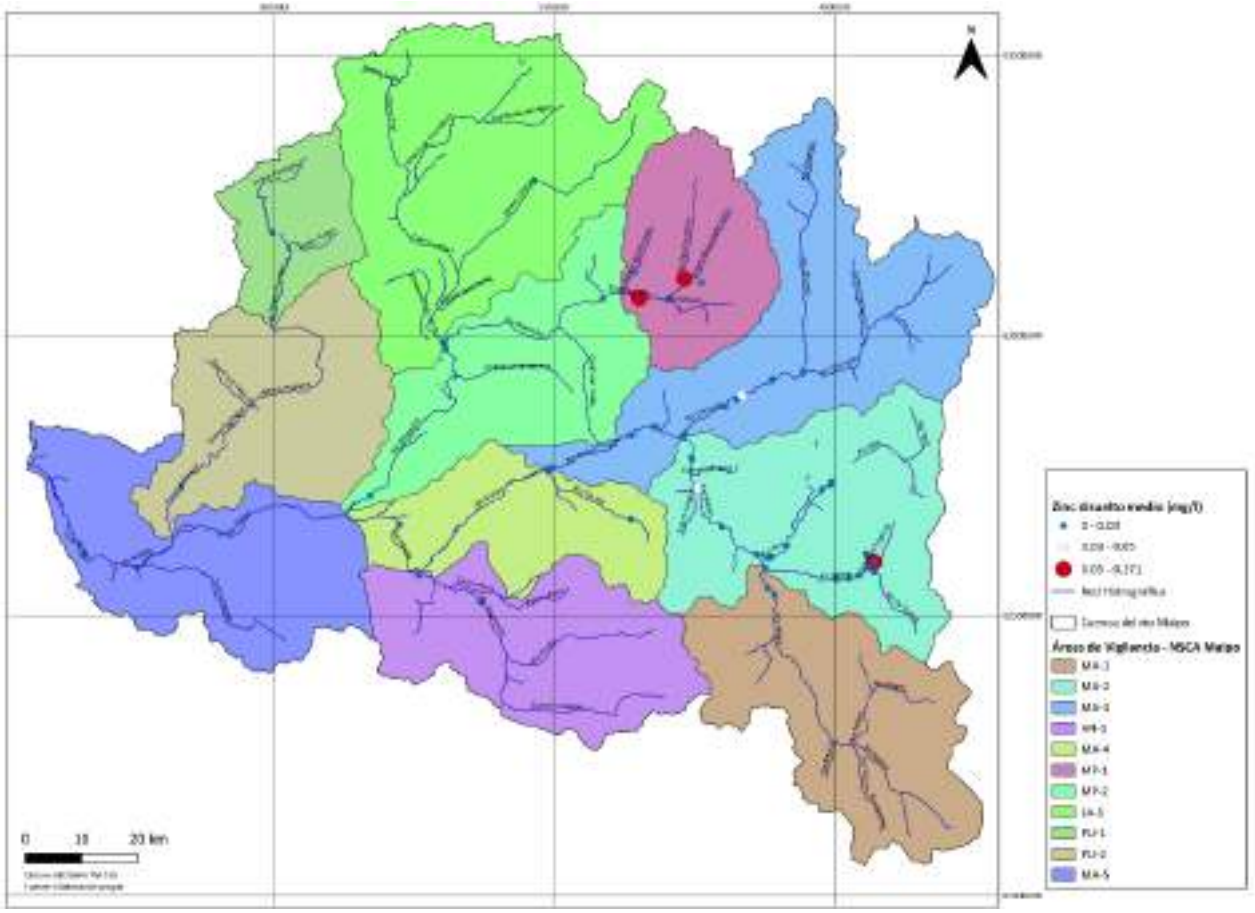


Figura 56 – Concentración media de zinc disuelto en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo.

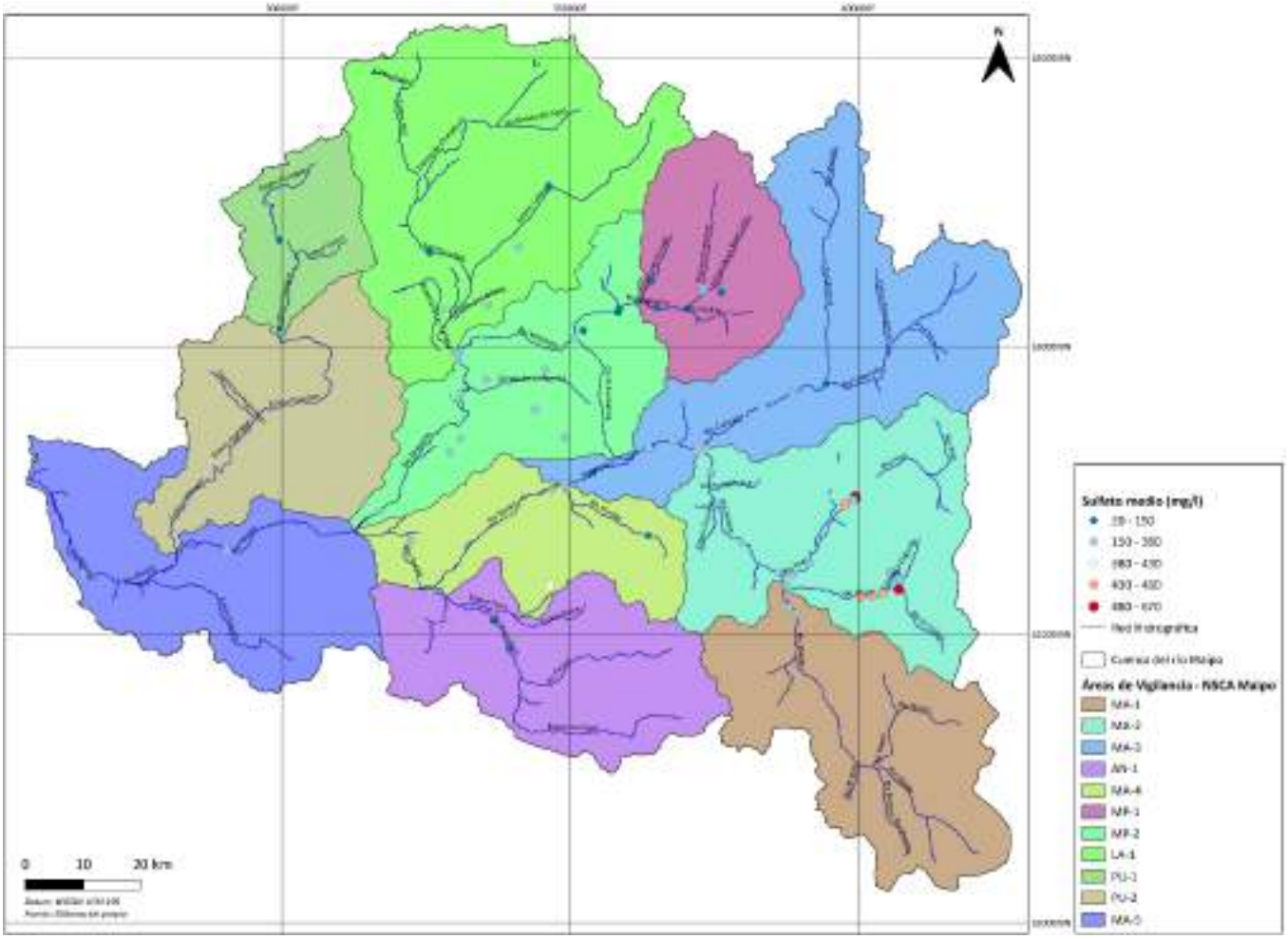


Figura 57 – Concentración media de Sulfatos (SO_4^{-2}) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo.

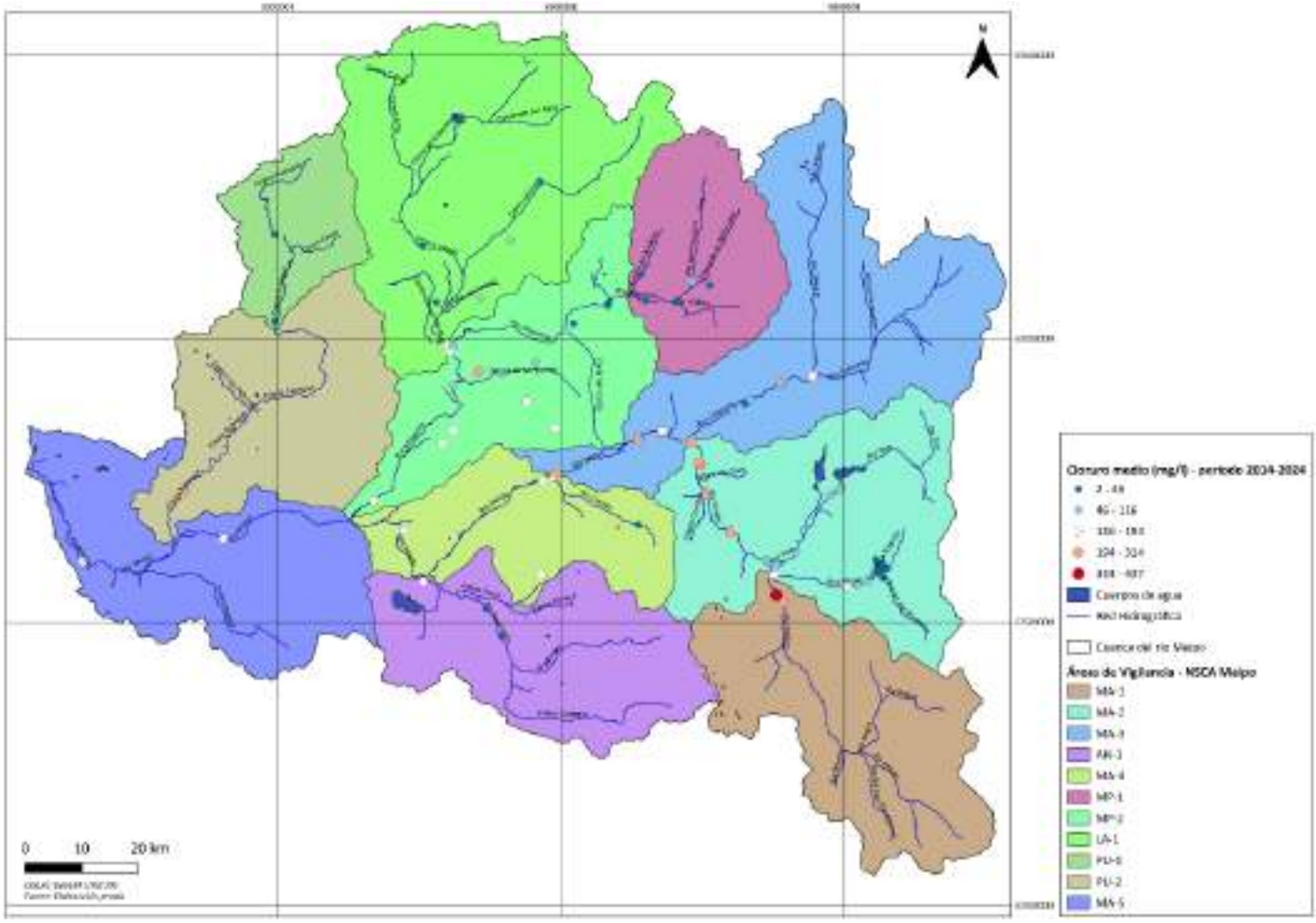


Figura 58 – Concentración media de cloruro (Cl^-) en mg/L para el periodo 2014-2024 en la cuenca del Río Maipo.

4.3 Herramienta de modelación

4.3.1 Análisis crítico de modelos para estimar coeficientes de exportación

La cuenca del río Maipo es desafiante de modelar, debido a la necesidad de representar los procesos de alta montaña en los Andes, la presencia de un acuífero profundo en el valle, existe también contaminación de cloruros y sulfatos en el agua por actividad geológica natural, y la alta actividad antropogénica aporta cantidades altas de otros contaminantes (cloruros, nitratos, fosfatos, zinc) a los cursos de agua.

Como se mencionó anteriormente, la implementación de medidas y soluciones a la contaminación de suelo y agua requiere de predicciones basadas en modelos integrales a escala de cuenca, con un amplio entendimiento del sistema y una fuente de datos suficiente para describir el movimiento y almacenamiento de agua y consecuente transporte de solutos. Existen múltiples modelos hidrológicos y de calidad del agua a escala de cuenca, clasificados en i) **modelos hidrológicos de base física**, ii) **modelos hidrológicos conceptuales** o iii) **modelos de calidad del agua**, los cuales presentan diferentes limitaciones (Hrachowitz et. al., 2016).

4.3.1.1 Modelos hidrológicos de base física

Estos modelos abordan de manera detallada los procesos hidrológicos mediante la formulación explícita de principios físicos fundamentales y reconocidos en la comunidad científica, tales como la conservación de masa, energía y momento. Debido a su alto nivel de complejidad, requieren una gran cantidad de información de entrada para generar predicciones confiables, además de un elevado costo computacional.

La representación detallada del sistema hidrológico (por ejemplo, a través de la ecuación de Richards para el flujo no saturado en medios porosos, o la ecuación de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración), es útil para modelos de escala más pequeña, pero también ayudan a resolver procesos hidrológicos a escala de cuenca de forma distribuida y consistente físicamente (Hrachowitz et al., 2016).

Sin embargo, aunque estos modelos pueden incorporar el transporte de contaminantes, su aplicación a escala de cuenca presenta limitaciones importantes. En particular, la gran cantidad de información requerida para representar adecuadamente la heterogeneidad espacial del sistema suele ser incompatible con la disponibilidad de datos de terreno. En consecuencia, estos modelos requieren procesos de calibración exhaustivos, lo que introduce incertidumbre en sus predicciones.

Entre los modelos 3-D a escala cuenca más importantes en esta categoría se encuentra:

HydroGeoSphere (HGS): Este modelo de elementos finitos integra de forma completamente acoplada el flujo de agua superficial y subterránea y el transporte reactivo de solutos (ideal para el zinc por procesos de sorción, y para el nitrato y sulfato por su degradación bioquímica). Incorpora procesos como la topografía, hidrogeología, derretimiento de nieve, evapotranspiración y transporte de solutos mediante la ecuación de advección-dispersión(Brunner & Simmons, 2012; Therrien et al., 2010). Debido a su complejidad, requiere una alta cantidad de datos de entrada, una caracterización hidrogeológica detallada y un proceso de calibración exhaustivo. Además, su uso puede verse limitado por su costo de licencia (del orden de USD 11.000/año).

MIKE-SHE (DHI): Este modelo totalmente distribuido es el estándar de la industria, el cual usa el enfoque de diferencias finitas para simular flujo en laderas, canales y flujo de agua subterránea en medios saturados y no saturados. Incorpora la caracterización analítica de intercepción, evapotranspiración y derretimiento de nieve (Abbott et al., 1986; Lagos et al., 2024). Las ecuaciones de transporte de solutos utilizadas permiten la sorción y degradación de estos (DHI, 2023). Entre las limitaciones se encuentran alto precio de la licencia (depende en los paquetes suscritos, pero ronda los USD 9.000-11.000/año y menor flexibilidad en el modelo químico.

ParFlow + EcoSLIM: ParFlow (parflow.org) es un modelo numérico paralelo e integrado que simula flujo superficial y subsuperficial espacialmente distribuido, integrando dinámicas de plantas, nieve, evaporación, flujo de agua subterránea y superficial a través de ecuaciones de base física (Ashby & Falgout, 1996). Dado que Parflow es diseñado para modelación paralela, es muy adecuado para cuencas grandes. El código es de uso abierto para la comunidad científica. Parflow puede ser acoplado a EcoSLIM para el seguimiento de partículas y transporte de solutos (Maxwell et al., 2015), pero no incorpora transporte reactivo, como sorción o degradación bioquímica. El modelo es altamente complejo y requiere conocimientos avanzados de programación y Linux.

Otros modelos importantes en esta categoría son CATFLOW, para modelación a escala de ladera o microcuenca y transporte no reactivo especializado (Zehe et al., 2001), HYDRUS-3D especializado en la zona vadosa a escala de ladera, con transporte reactivo de solutos y bioquímica avanzada (Simunek et al., 2008),

y CATHY (CATchment HYdrology), un modelo totalmente distribuido que acopla la simulación de flujo superficial-subsuperficial, a través de ecuaciones de Richards y Saint-Venant. El modelo se basa en ecuaciones de transporte no reactivo de solutos (Camporese et al., 2010; Weill et al., 2011).

4.3.1.2 Modelos hidrológicos conceptuales

Los modelos conceptuales hidrológicos a escala de cuenca son herramientas simples y útiles en la reproducción de respuestas hidrológicas de forma semi-distribuida de variadas cuencas a nivel mundial. A pesar de que la base física de estos modelos no siempre es completamente entendida, estos han estado bajo constante desarrollo para mejorar la consistencia hidrológica a escala de cuenca y su poder de predicción, apoyando en un proceso de calibración adecuado. Por ejemplo, el uso de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés "*Hydrological Response Units*"), permiten incorporar las características de topografía, uso de suelo y tipo de suelo en la zona de estudio. Según Hrachowitz et al. (2016), estos modelos tienen limitaciones en la simulación de calidad química en los cursos de agua, debido a diferencias de escala de tiempo entre la respuesta hidrológica y de calidad del agua, lo que puede ser abordado a través de incluir volumenes de mezcla bajo un umbral de almacenamiento. Generalmente, las ecuaciones de transporte de solutos de los modelos en esta categoría son conservativas y no incorporan procesos reactivos adicionales (decaimiento radioactivo, degradación biofísica por plantas, sorción a sedimento, etc.).

Entre los modelos dentro de esta categoría se encuentran INCA, HYPE, HSPF y SWAT+, detallados a continuación:

INCA (*Integrated Catchment Model*) es un modelo hidrológico semi-distribuido, el cual divide la cuenca en subcuencas, y está enfocado en la simulación de contaminantes de fuentes difusas y puntuales a la salida de la cuenca, específicamente nitrógeno, fósforo, sedimentos, cloruro, carbono y mercurio. Este modelo ha sido usado ampliamente en el Reino Unido y Europa y es de código abierto (Whitehead et al., 1998; 2009).

HYPE (*Hydrological Predictions for the Environment*) es un modelo de calidad del agua (fósforo y nitrato) para pequeña y gran escala desarollado por el Instituto meteorológico e hidrológico sueco. Este modelo de código abierto incorpora topografía, tipo de suelo y uso de suelo a través de HRUs y discretiza el suelo en 3 estratos. A pesar de que es excelente para N y P, es difícil de configurar para otros contaminantes como zinc (Lindström et al., 2010).

HSPF (*Hydrological Simulation Program -- Fortran*) es un modelo de simulación continua hidrológica y de calidad del agua a escala temporal muy pequeña (hasta minutos). Es accesible al público y requiere una gran cantidad de datos, específicamente, series de tiempo continuas de alta resolución. Aprender este modelo es complicado y requiere de expertos en programación (Fortran). Aparte de procesos hidrológicos como hidrología de nieve y flujos superficial y subsuperficial, incluye la simulación de procesos biogeoquímicos como oxígeno disuelto, BOD, temperatura, pH, amonio, nitrato-nitrito, ortofosfato, entre otros (Bicknell et al., 2001).

SWAT+ (Soil and Water Assesment Tool) se clasifica como un modelo hidrológico conceptual de base física, el cual es ampliamente usado en Chile. Su carácter semi-distribuido, mediante el uso de HRUs, lo posiciona como un modelo conceptual avanzado, capaz de reproducir las dinámicas hidrológicas con un buen equilibrio entre detalle y eficiencia. Esto lo hace especialmente adecuado para cuencas de gran tamaño, como la del Maipo, ya que optimiza el uso de recursos computacionales, así como el tiempo y la información requeridos para su implementación. Además, permite evaluar el impacto de actividades agrícolas y urbanas,

y simular procesos como los ciclos de nitrógeno y fósforo, la dinámica de sedimentos y el transporte no reactivo de otros contaminantes (Bieger et al., 2017).

4.3.1.3 Modelos de calidad del agua

Estos modelos también se clasifican en base física o conceptuales y pueden operar acoplados a escala de cuenca con modelos hidrológicos (por ejemplo, ParFlow + EcoSLIM). Si ambos componentes, tanto el hidrológico como el de calidad de agua, son de base física, la cantidad de parámetros a definir aumenta considerablemente, elevando la demanda de datos requeridos. En caso de no contar con un monitoreo extensivo, un enfoque conceptual permite simplificar el sistema para que los resultados se ajusten de mejor manera al comportamiento hidrológico. Resulta fundamental caracterizar correctamente las fuentes de contaminantes en el espacio y el tiempo, además de su transporte a través de zonas de la cuenca con diferentes funciones hidrológicas (laderas, humedales, pastizales) para obtener resultados coherentes con las observaciones en los cursos de agua (Hrachowitz et al., 2016).

Existen también modelos de calidad del agua de la red hídrica (*In-Stream models*) que simula el transporte y transformación química de contaminantes en el cauce principal y tributarios, sin incorporar los procesos hidrológicos en el resto de la cuenca (suelo, ladera, bioquímica de plantas, etc.). Estos modelos requieren generalmente de propiedades hidráulicas del río (dimensiones y velocidad del agua), datos meteorológicos, condiciones de borde (concentraciones iniciales) y descargas a lo largo del cauce. Utiliza ecuaciones de transporte de advección-dispersión, más decaimiento o reacciones.

Los modelos de calidad del agua de red hídrica más comunes son QUAL2K (Q2K), WASP (*Water Quality Analysis Simulation Program*) y MIKE-11 (Módulo ECO Lab).

QUAL2K es un modelo de código abierto desarrollado por USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), de régimen permanente, en una dimensión y escrito en Excel Se basa en ecuaciones de transporte de solutos simples (advección-dispersión, decaimiento) (Chapra et al., 2012). GORE RM-AquaExpert (2024) implementaron un modelo de calidad de agua a nivel de cuenca del Río Maipo basado en este modelo. WASP es más complejo, incluyendo hasta 3 dimensiones, y tanto la columna de agua como sedimentos de río (especial para sorción de metales) en la simulación de contaminantes convencionales (nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto, DBO, etc.), metales, mercurio, patógenos y temperatura. Puede ser acoplado a un modelo hidrológico para simulaciones multianuales, bajo diversas condiciones meteorológicas y ambientales (Wool et al., 2006; Ambrose & Wool, 2017). Finalmente, MIKE-11/ módulo ECO Lab (DHI) es una herramienta de modelación de ecosistemas acuáticos marinos, de agua fresca y estuarios, la cual incorpora ciclos de nutrientes, producción primaria y dinámicas de plankton. La plataforma tiene una interfaz amigable, sin embargo la licencia comercial es pagada y requiere de un alto grado de datos de entrada, incluyendo batimetría detallada del cauce (DHI, 2023).

4.3.2 Selección de herramienta de modelación óptima

Se seleccionó el modelo SWAT+ para la simulación hidrológica y de calidad del agua de la cuenca del río Maipo bajo un enfoque semi-distribuido. Esta elección se fundamenta en que es una herramienta de código abierto, ampliamente validada en el contexto nacional, que equilibra una robusta base física con la eficiencia computacional necesaria para cuencas de gran escala. El modelo permite representar el impacto de las actividades agrícolas y urbanas sobre el sistema ambiental, integrando ciclos biogeoquímicos de nitrógeno y fósforo, la dinámica de sedimentos y el transporte de contaminantes. Para la construcción del modelo, se dispone de una serie de datos diarios de 11 años, periodo suficiente para capturar la variabilidad climática de la zona central de Chile.

Entre las principales limitaciones se encuentra la simplificación en la representación de metales pesados, como el zinc, que se abordará mediante el uso de coeficientes de partición. Asimismo, el modelo simplifica la interacción río-acuífero, especialmente en sectores donde el río Maipo recibe aportes de aguas subterráneas.

No obstante, considerando las particularidades de la cuenca de estudio, como la presencia de zonas cordilleranas y una alta actividad antropogénica, principalmente agropecuaria y minera, la elección de SWAT resulta adecuada. Esto se debe a sus capacidades para modelar la operación de embalses y canales de riego, incorporar módulos de nieve y glaciares, y facilitar la evaluación de escenarios de cambio climático y variaciones en el uso del suelo.

A continuación, se presenta una caracterización breve del funcionamiento del modelo SWAT+, basado en la documentación oficial. Para mayor detalle de las ecuaciones y parámetros utilizados, ir a la página web https://swatplus.gitbook.io/io-docs.

4.3.2.1 Configuración de cuenca

La cuenca se divide en subcuencas, el primer nivel de división, y se relacionan entre ellas a través de los flujos de salida. Son definidas generalmente a partir de la topografía, pero también se pueden definir a partir de un *shapefile* externo, con riesgo que la red de drenaje y la división de subcuencas tengan incoherencias. Una subcuenca contiene al menos una Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU), un cauce tributario y uno principal. Dentro de esta se pueden definir también humedales y reservorios.

Las HRUs son porciones de subcuencas (puede ser áreas discontinuas) que poseen atributos únicos de uso de suelo, tipo de suelo y gestión. El transporte de solutos y sedimentos se calcula en cada HRU, para luego ser agregadas para determinar la carga total a la salida de cada subcuenca, lo que aumenta la precisión de su estimación. Además, el crecimiento y desarrollo de plantas de diferentes especies se puede agregar en el uso de suelo, lo que mejora la estimación de los flujos hidrológicos.

Cada canal principal está asociado a una subcuenca, el cual recibe carga de agua, nutrientes o sedimentos desde la subcuenca y del canal aguas arriba de la subcuenca. Además, se puede incorporar cargas puntuales a través de la opción "*Point Sources*", por ejemplo, para modelar descargas de plantas de tratamiento de aguas servidas.

El modelo necesita datos de entrada de clima, topografía, tipo de suelo y uso de suelo, además de propiedades de plantas, entradas puntuales o difusas de contaminantes, y prácticas de manejo agrícola/industrial.

4.3.2.2 Climatología

El modelo requiere **inputs meteorológicos diarios**, consistentes en **precipitación, radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa**. Los dos primeros permiten la entrada de agua y energía al sistema, respectivamente, y ejercen control en el movimiento de agua en el ciclo hidrológico, por ejemplo, en caída de nieve y su derretimiento y evaporación.

SWAT+ permite clasificar la precipitación como lluvia o nieve a partir de la temperatura media diaria. Parámetros como temperatura umbral para categorización de precipitación y contenido mínimo de equivalente agua nieve que corresponde al 100% de cobertura en la cuenca son definidos por el usuario. La nieve caída es almacenada en la capa de nieve y sufre procesos de sublimación y derretimiento. El

derretimiento de nieve es controlado a su vez por temperatura del aire y manto nival, y se incluye en los cálculos de escurrimiento y percolación.

4.3.2.3 Hidrología

En el modelo, el **escurrimiento superficial** ocurre cuando la tasa de agua ingresada a la superficie del suelo excede la tasa de infiltración, la cual depende de la humedad del suelo. Al exceder la infiltración, primero se llenan las depresiones de suelo y luego se genera el escurrimiento superficial, a través de dos métodos disponibles: SCS curva (USDA Soil Conservation Service, 1972)y método de infiltración de Green & Ampt (1911).

La evapotranspiración incluye evaporación desde follaje de las plantas, transpiración, sublimación y evaporación desde el suelo. **La evapotranspiración potencial** (ETp) se define como la cantidad de agua transpirada por un cultivo verde y bajo, que cubre totalmente el suelo, de altura uniforme y acceso ilimitado a agua (Penman, 1956). SWAT+ incorpora tres métodos para la estimación de evapotranspiración potencial: Penman-Monteith (Allen, 1986; Allen et al., 1989; Monteith, 1965), Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972) y Hargreaves (Hargreaves et al., 1985). SWAT+ también permite el ingreso de ETp como dato de entrada. Para la modelación del Maipo, se seleccionó el método de Penman-Monteith por su mayor robustez.

La **evapotranspiración real** (ETa) se calcula luego de estimar la ETp. Se evapora primero la precipitación interceptada por el follaje. Se estima la máxima transpiración, sublimación y evaporación de suelo siguiendo un enfoque similar a Ritchie (1972), el cual se basa en que la evaporación de suelo y transpiración de plantas ocurren a tasas distintas, dependiendo de la cobertura de follaje y disponibilidad de agua.

Una vez que el agua entra al suelo, **el contenido de agua del suelo** puede sufrir distintos transportes: ser capturada por las plantas o evaporada del suelo, puede percolar y recargar el acuífero, o moverse lateralmente en el perfil de suelo y contribuir aguas abajo al flujo superficial. Generalmente, las plantas capturan la mayor parte del agua que entra al perfil del suelo.

El **agua subterránea** es recargada a través de infiltración y percolación, aunque también puede haber infiltración desde cuerpos de agua superficial. El agua subterránea descarga a su vez a ríos y lagos. SWAT+ simula dos acuíferos en cada subcuenca. El acuífero superficial es un acuífero no confinado que contribuye al flujo superficial en esa subcuenca. El acuífero profundo es confinado, por lo que se asume que no descarga en la cuenca. El modelo permite la simulación de bombeos de agua subterránea en ambos acuíferos.

4.3.2.4 Nutrientes y contaminantes

Ciclo del nitrógeno

SWAT+ incluye la modelación del ciclo del nitrógeno, elemental en el crecimiento de plantas, y que incluye agua, atmósfera y suelo. El nitrógeno es modelado por SWAT+ en el perfil de suelo y en el acuífero superficial.

Ciclo de nitrógeno en el suelo

El nitrógeno en el suelo se presenta principalmente como nitrógeno orgánico (humus), nitrógeno mineral adherido a coloides del suelo y nitrógeno mineral disuelto. El nitrógeno se puede añadir al suelo como

fertilizante, residuos orgánicos (estiércol), fijación por bacterias y lluvia. El nitrógeno a su vez es removido del suelo por absorción de plantas, lixiviación, volatilización, desnitrificación y erosión (Figura 59).

SWAT+ incluye 5 reservas de nitrógeno en el suelo (Figura 60): dos inorgánicas (NH_4^+ y NO_3^-) y tres orgánicas. Estas últimas están asociadas a: 1) residuos de cultivos y biomasa microbiana (reservas frescas), 2) humus de reserva estable y 3) humus con reservas activas para mineralización.

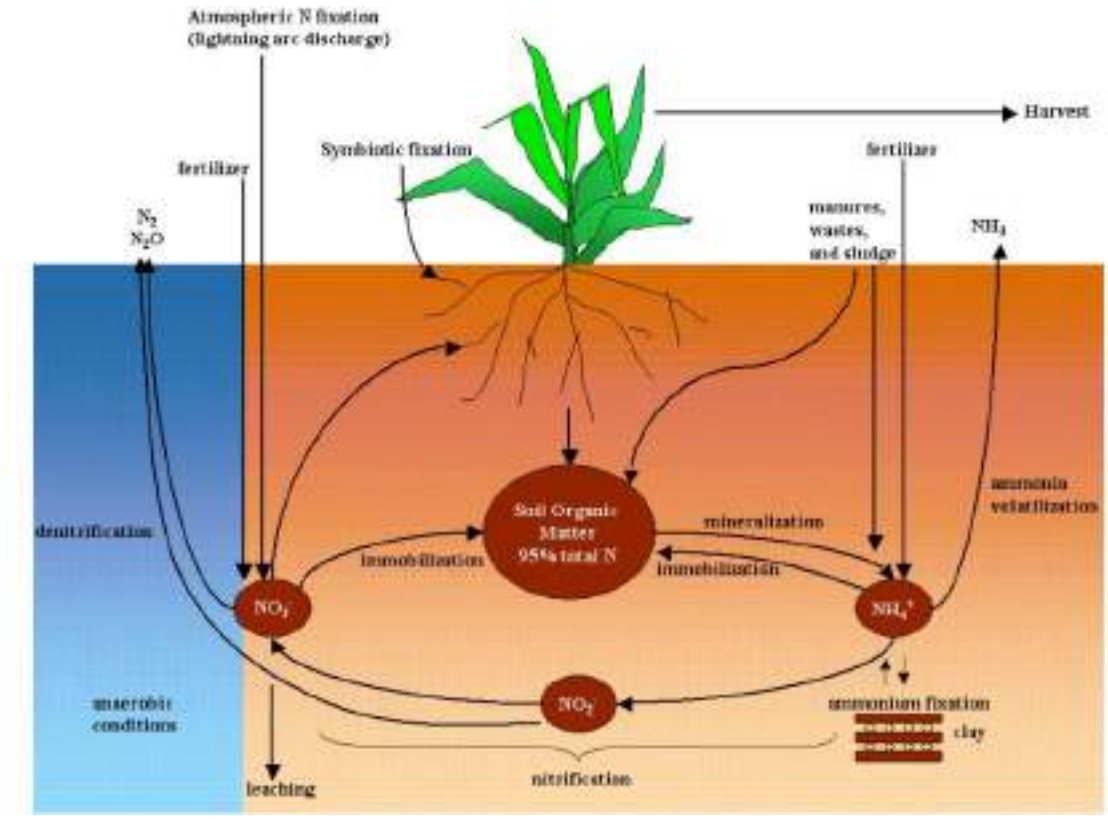


Figura 59 – El ciclo del nitrógeno

Nota. Tomada USDA Agricultural Research Service (n.d.-a), (https://swatplus.gitbook.io/io-docs/theoretical-documentation/section-3-nutrients-pesticides/chapter-3-1-nitrogen/3-1.1-nitrogen-cycle-in-the-soil).

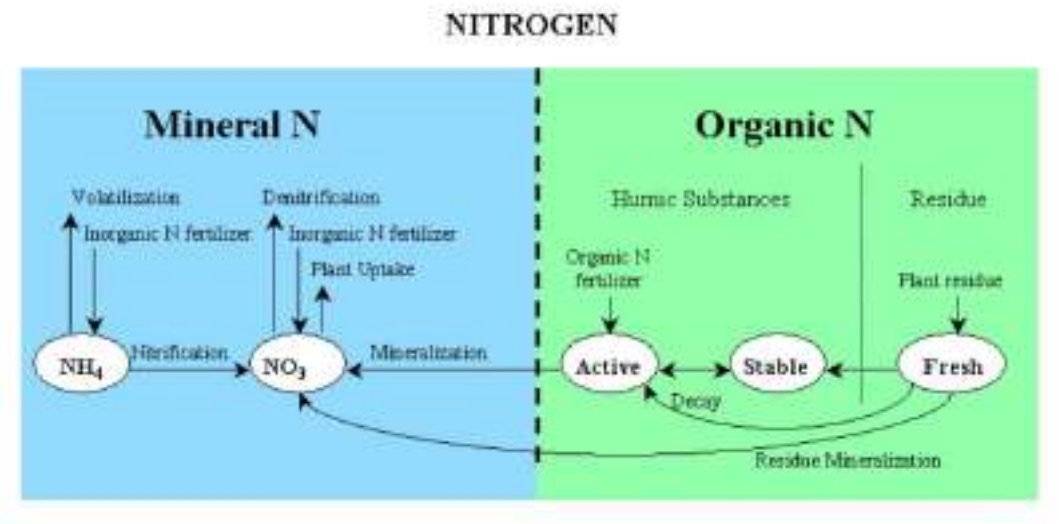


Figura 60 – Reservas de nitrógeno en SWAT+ y procesos que mueven el nitrógeno entre reservas.
Nota. Tomada de USDA Agricultural Research Service (n.d.-a) (https://swatplus.gitbook.io/io-docs/theoretical-documentation/section-3-nutrients-pesticides/chapter-3-1-nitrogen/3-1.1-nitrogen-cycle-in-the-soil).

La descomposición (*decay/decomposition*) es la desintegración de residuos orgánicos frescos en componentes orgánicos más simples. La mineralización es la conversión microbiana de N orgánico a N inorgánico, lo cual lo hace disponible para absorción de plantas. La inmovilización es la conversión microbiana de N inorgánico del suelo a N orgánico. Estos dos últimos procesos dependen de la relación Carbono a N (C:N), a menor C:N, más mineralización ocurre, debido a que el contenido de N en el suelo excede la demanda de N de bacterias, por lo que estas liberan el exceso en forma de amonio (NH_4^+). SWAT+ incluye el modelo de mineralización e inmovilización de PAPRAN (Seligman and van Keulen, 1981), donde estos procesos dependen de la humedad del suelo y temperatura, y ocurren solo cuando la temperatura del suelo sobrepasa los 0°C. La mineralización ocurre desde las reservas orgánicas frescas (*fresh*) y activas (*active*) en Figura 60.

La nitrificación es el proceso en dos pasos de la oxidación bacteriana de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-), pasando por nitrito (NO_2^-). La volatilización de amoniaco (NH_3) ocurre cuando el amonio se aplica a suelos calcáreos o cuando urea se aplica a cualquier suelo. Estos dos procesos son simulados por SWAT+ a partir de los métodos de Reddy et al. (1979) y Godwin et al. (1984). La nitrificación, al igual que la mineralización, depende de tasas de reacción basadas en temperatura y contenido de agua del suelo. En suelos muy fríos o saturados, la nitrificación se detiene. La volatilización de amoníaco depende de temperatura del suelo, profundidad y capacidad de intercambio catiónico.

La desnitrificación es la reducción bacteriana de nitrato a nitrógeno gaseoso en condiciones anaeróbicas (de reducción), y depende del contenido de agua, temperatura del suelo (ambos favorecen la desnitrificación al aumentar) y fuente de carbono y nitrato.

La deposición atmosférica de compuestos nitrogenados se presenta a través de mecanismos de deposición tanto húmeda como seca, siendo la primera más estudiada que la segunda. La húmeda (lluvia) ocurre por descargas eléctricas que convierten el nitrógeno atmosférico en ácido nítrico, el cual entra al suelo. En SWAT+, esta entrada se define a través de la concentración de nitrato en la lluvia (según García (2024), este valor oscila entre 0.068 a 0.203 mg-N/l para la zona Central de Chile) y la cantidad de precipitación. La deposición seca consiste en la adsorción en superficie de compuestos nitrogenados en el aire.

SWAT+ permite además el movimiento ascendente de nitrato en el suelo, a medida que el agua se evapora desde la superficie, en la primera capa de suelo definida por el usuario. El nitrato movido en la primera capa hacia la superficie depende de la concentración de nitrato en esa capa, la evaporación y el contenido de humedad del suelo. El movimiento descendente de nitrato en el suelo, o lixiviación, es calculado por SWAT+ junto a las pérdidas de nitrato por flujo superficial y lateral.

Ciclo del nitrógeno en el acuífero superficial

Las reservas de nitrato en el acuífero superficial son simuladas, por lo que el flujo base que entra al cauce desde el acuífero superficial puede contener nitratos. El nitrato entra al acuífero por recarga desde el perfil de suelo. Para simular el retraso temporal en la recarga del acuífero y en el movimiento de nitrato desde el perfil de suelo al acuífero, se usa una función de retardo, específicamente una función de ponderación de decaimiento exponencial propuesta por Venetis (1969) y Sangrey et al. (1984). El nitrato que entra al acuífero dependerá del tiempo de retraso de la recarga por geología, el nitrógeno total en el fondo del perfil del suelo y la concentración de nitrato de la recarga el día anterior.

El nitrato en la reserva del acuífero puede variar por recargas al acuífero profundo, flujo base al cauce o transporte ascendente hacia el perfil de suelo por escasez de agua en este. Además, se incluye la reacción de absorción de nitrato por bacterias o transformaciones redox de este en el acuífero a través del parámetro vida media del nitrato en el acuífero, que incluye el efecto neto de todas las reacciones que tienen lugar en el acuífero.

Ciclo del fósforo (P)

La Figura 61 presenta el ciclo del fósforo en el suelo simulado por SWAT+. Las tres formas más comunes de P en suelo son: 1) P orgánico asociado a humus, 2) P mineral insoluble, y 3) P disponible para plantas en solución. El fósforo puede ser agregado al suelo por uso de fertilizantes, estiércol o residuos. Su remoción del suelo depende de absorción de plantas y erosión. El fósforo es poco móvil y soluble, generalmente se combina con otros iones (Fe, Al, Ca, arcilla) para formar compuestos insolubles inorgánicos que precipitan fuera de la solución, lo que contribuye a la acumulación de P en la superficie, y su eventual transporte por escorrentía superficial.

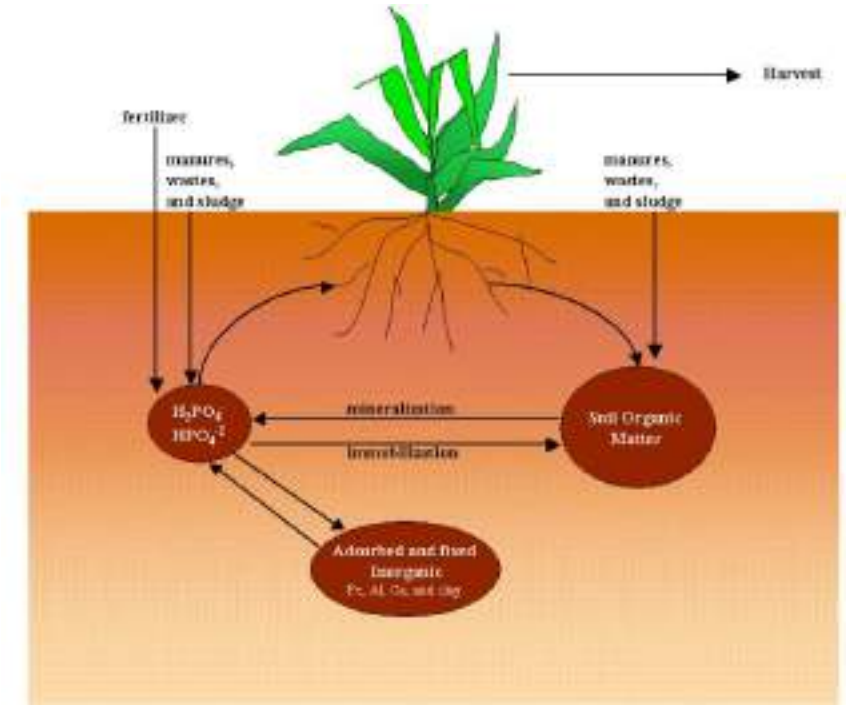


Figura 61 – El ciclo del fósforo

Nota. Tomada USDA Agricultural Research Service (n.d.-b)., (https://swatplus.gitbook.io/io-docs/theoretical-documentation/section-3-nutrients-pesticides/phosphorus/phosphorus-cycle).

La Figura 62 presenta la representación de seis reservas de fósforo por SWAT+: tres reservas son orgánicas y tres inorgánicas. Las reservas orgánicas frescas se generan por residuos de plantas y biomasa microbiana. Las reservas orgánicas activas y estables se asocian al humus del suelo, las cuales se diferencian por su capacidad de mineralización. Las reservas inorgánicas de P se dividen en solución, activa y estable. El P inorgánico en solución está en rápido equilibrio con la reserva orgánica activa.

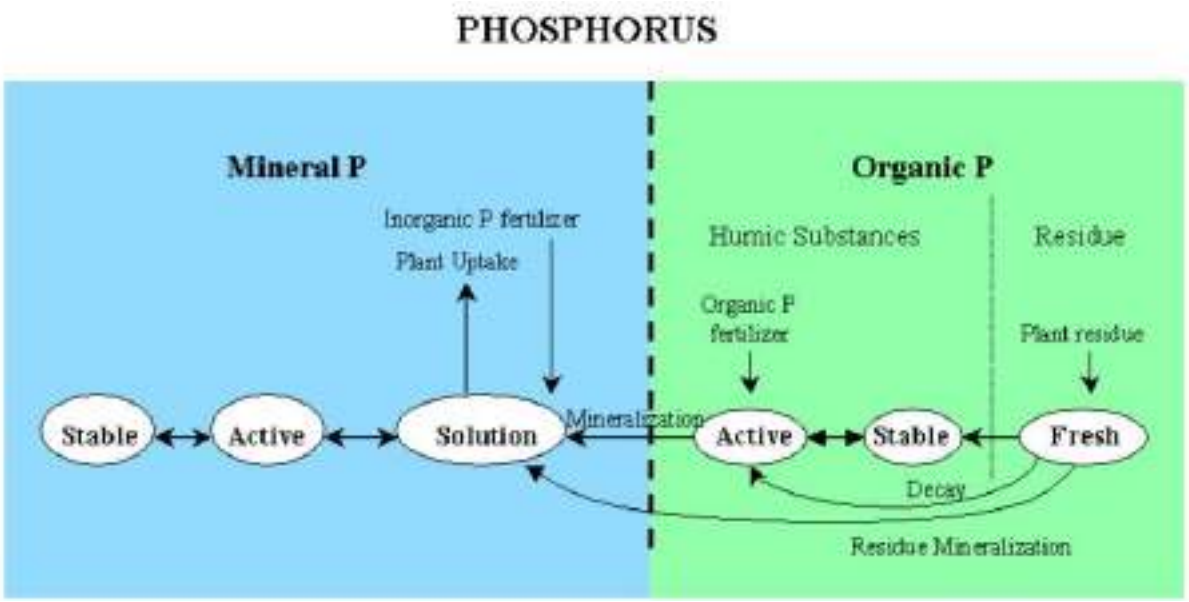


Figura 62 – Reservas de fósforo en SWAT+ y procesos de movimiento de P entre reservas

Nota. Tomada de USDA Agricultural Research Service (n.d.-b), (https://swatplus.gitbook.io/io-docs/theoretical-documentation/section-3-nutrients-pesticides/phosphorus/phosphorus-cycle).

Las reservas orgánicas frescas de P pueden sufrir descomposición a componentes orgánicos más simples. La mineralización es cuando los compuestos orgánicos de P se descomponen por acción microbiana a P inorgánico soluble y disponible para las plantas. La inmovilización es cuando microorganismos convierten P inorgánico soluble en P orgánico. SWAT+ usa una metodología para mineralización neta, que incorpora implícitamente la inmovilización, según Jones et al. (1984). Existen dos fuentes de mineralización: P fresco orgánico y P orgánico activo. La mineralización y descomposición ocurren solo a temperaturas sobre 0°C y dependen de la temperatura y contenido de humedad del suelo.

Las concentraciones de P inorgánico soluble generalmente decrecen rápidamente luego de aplicar fertilizantes, dada su reacción con el suelo, seguida luego por una disminución a tasas más bajas que pueden durar por varios años. Para simular la sorción de P inorgánico, SWAT+ utiliza las ecuaciones de Jones et al. (1984) y asume un rápido equilibrio entre P soluble inorgánico y la reserva activa mineral. El usuario puede especificar el parámetro Índice de Disponibilidad de Fósforo (*Phosphorus Availability Index*) para definir la fracción de P del fertilizante que se encuentra en solución después del periodo de reacción rápida luego de aplicarse el fertilizante. Para simular la reacción posterior más lenta, se asume un equilibrio lento entre las reservas activas y estable de P mineral.

El mecanismo principal de transporte de P soluble es difusión por gradientes de concentración, especialmente al ser absorbido por plantas. El fósforo, a pesar de ser poco móvil, puede sufrir lixiviación desde la superficie (primeros 10 mm del suelo) a la primera capa de suelo del modelo SWAT+.

SWAT+ no simula reservas de P soluble en el acuífero superficial, sin embargo, ser puede simular concentraciones de P en el flujo base entrando a los cauces superficiales, al especificar una concentración de P en el flujo de agua subterránea.

4.3.2.5 Erosión

SWAT+ simula los procesos de erosión en el tiempo causados por la precipitación y flujo superficial, especialmente en suelos desprotegidos de vegetación, a través del método MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) de Williams (1977). La carga de sedimento generada en un día depende del volumen de escorrentía, el caudal máximo diario, área de la HRU, factor de erosión del suelo (dependiente de textura, contenido de materia orgánica del suelo y permeabilidad del suelo), factor de cobertura y gestión del suelo (dependiente de la cantidad de residuos presentes en la superficie del suelo), factor de prácticas de apoyo, factor topográfico y factor de fragmentos gruesos.

Se incorpora una función de almacenamiento de escorrentía superficial para retrasar el drenaje al canal principal, por lo que afecta también el transporte de sedimentos. La carga de sedimentos descargada al cauce principal es calculada a partir de la cantidad de sedimento generada por la HRU en un día, el sedimento almacenado del día anterior, el coeficiente de retardo de la escorrentía superficial y el tiempo de concentración de la HRU.

SWAT+ permite que el flujo lateral y de agua subterránea aportantes al cauce principal contribuyan con sedimentos, a partir de un valor de concentración de sedimentos constante.

4.3.2.6 Procesos en el cauce principal

Los procesos de cauce principal modelados por SWAT+ incluyen el escurrimiento, transporte de sedimentos y otros componentes (por ejemplo, nutrientes y pesticidas) en la red fluvial y el ciclo de los nutrientes en el cauce. SWAT+ usa la ecuación de Manning para determinar el caudal y velocidad de flujo. La distribución de agua se puede realizar por dos métodos de onda cinemática: 1) método de distribución con almacenamiento variable o 2) método de Muskingum.

5 Modelación para determinar coeficientes de exportación

En esta sección se presenta la segunda parte de los resultados de la actividad OE3, correspondiente al objetivo específico c) “Proponer una metodología para seleccionar las herramientas de modelación matemática que permitan determinar los coeficientes de exportación de los parámetros latentes y saturados en distintos escenarios de precipitación, según los usos o coberturas de suelo relevantes en la cuenca del río Maipo”, que se relaciona con la modelación matemática, el análisis de los resultados obtenidos y la determinación de los coeficientes de exportación.

5.1 Modelación matemática para obtener coeficientes de exportación

A continuación, se presenta el detalle de la construcción del modelo, incluyendo la delimitación de la cuenca, la definición de las HRUs (Unidades de Respuesta Hidrológica), Datos climáticos, procesos de nutrientes y sedimentos y finalmente prácticas de manejo agrícola.

5.1.1 Configuración y delimitación de la cuenca

La base geométrica de la cuenca se basó en: 1) un modelo de elevación digital (DEM), 2) la selección de un punto de cierre (outlet) y 3) la generación de una red de drenaje.

Para la caracterización topográfica de la cuenca, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) proveniente del producto SRTM Void Filled (*Shuttle Radar Topography Mission*, DOI: 10.5066/F7F76B1X), el cual cuenta con una resolución espacial nominal de 30 metros. Las especificaciones sobre el procesamiento de este insumo y el análisis de pendientes derivado se detallan en la Sección 4.2.1 y se ilustran en la Figura 30.

El punto de cierre (*outlet*) del modelo se localizó en la desembocadura del Río Maipo (coordenadas 33.619° S, 71.633° W), posición estratégica para capturar la respuesta hidrológica total del sistema (ver Figura 63). El proceso de discretización resultó en la creación de 637 subcuencas, cuya delimitación se ajustó para coincidir con puntos críticos de interés, tales como áreas de vigilancia ambiental y la ubicación de estaciones de monitoreo de calidad del agua. Esto permite una calibración robusta tanto del flujo hídrico como de los parámetros de calidad del agua.

Finalmente, la red de drenaje se generó mediante un umbral de acumulación de área (*threshold*) de 15 km². Este valor se seleccionó deliberadamente pequeño para garantizar una representación detallada de la zona cordillerana y sus vertientes menores, facilitando así la caracterización precisa de las áreas naturales y la dinámica de escurrimiento en sectores de alta pendiente sin intervención antrópica. A partir de esta configuración, se crearon 718 canales.

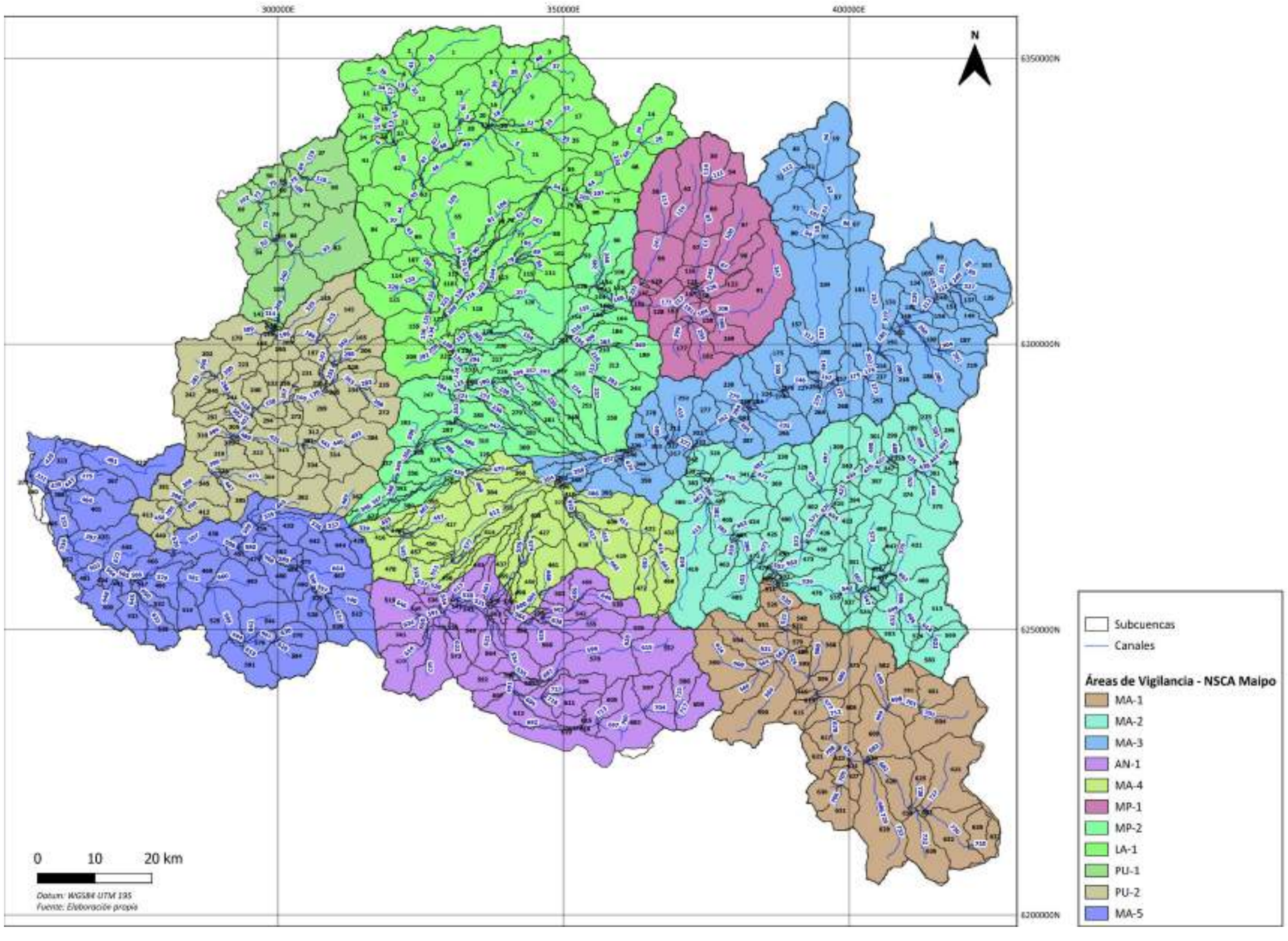


Figura 63 – Subcuencas del modelo SWAT+ y la red hidrográfica asociada. Los números de subcuenca se presentan en color negro y los números de cauces en azul.

5.1.2 Definición de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs)

Para la creación de las HRUs, se utilizaron tres fuentes de información: 1) mapa de uso de suelo (*Land Use*), 2) Mapa de tipo de suelo y 3) mapa de pendientes.

5.1.2.1 Mapa de uso de suelo

El mapa de uso de suelo en el que se basa la simulación y la metodología de construcción se presenta en la Sección 4.2.3, Figura 34, donde preliminarmente se definen 14 usos de suelo. Para efectos de modelación, se reclasificaron las áreas a simular a 12, debido a que nieves y cuerpos de agua son simulados internamente por el modelo SWAT+. La relación de la clasificación de usos de suelo original, el código aplicado en SWAT+ a usos de suelo y su cobertura en la cuenca se presenta en la Tabla 44. Los usos de suelo que más cubren la cuenca son praderas y matorrales (28,2%), bosques (23,1%), seguido por áreas desprovistas de vegetación (19,8%). Los terrenos agrícolas siguen en importancia de cobertura (14,3%), donde aquellos que son regados con aguas tratadas representan alrededor de un tercio del total de suelos agrícolas.

Las zonas urbanas e industriales son una de las mayores áreas con influencia antrópica en la cuenca, cubriendo un 8,3% del total de la cuenca. Otros usos de influencia antrópica con cobertura menor al 1% pero con impacto en la calidad del agua son producción pecuaria intensiva, minería industrial y vertederos y rellenos sanitarios.

Tabla 44 – Usos de suelo utilizados en la modelación de la cuenca del Río Maipo en SWAT+ y su cobertura en la cuenca.

ID uso suelo	Código SWAT	Área (ha)	% Cuenca	Descripción
9	RNGE	428736	28.22	Praderas y matorrales
3	FRST	350523	23.07	Bosques
6	WETW	22607	1.49	Humedales
1/4/8	BSVG	301480	19.84	Áreas desprovistas de vegetación
2	URBN	126681	8.34	Áreas urbanas e industriales
14	ANML	1294	0.09	Producción pecuaria intensiva
7	MINE	5675	0.37	Minería industrial
10	AGRL	141017	9.28	Terrenos agrícolas
12	LDFL	750	0.05	Vertederos y rellenos sanitarios
11	AGWW	76204	5.02	Agricultura con riego de aguas tratadas
13	ROCK	62702	4.13	Rocas desnudas con impacto en calidad del agua
5	SWRN	1744	0.11	Extracción de áridos

Los 12 usos de suelo definidos para la cuenca fueron caracterizados mediante la parametrización de coberturas vegetacionales y usos urbanos/antrópicos en los archivos plant y urban del modelo SWAT+. Para las coberturas vegetacionales, el archivo "**plant**" (un extracto del archivo se presenta en la Tabla 45) incorporó parámetros asociados al crecimiento y comportamiento hidrológico de cada cobertura, incluyendo índice de área foliar máximo (LAI, adimensional), profundidad máxima de raíces (m), altura máxima de vegetación (m), eficiencia de producción de biomasa (kg/ha), temperatura base de crecimiento (°C) y fracción de cobertura del suelo, entre otros parámetros utilizados por SWAT+ para simular evapotranspiración, infiltración, crecimiento vegetal y protección del suelo frente a erosión y escorrentía superficial. Estas parametrizaciones permitieron representar diferencias hidrológicas y biogeoquímicas entre coberturas tales como bosques, praderas y matorrales, humedales, agricultura, nieves eternas/glaciares y áreas desprovistas de vegetación.

Tabla 45 – Extracto de archivo de entrada "plant" para parametrización de coberturas vegetacionales

Nombre	days_mat	bm_e	harv_idx	lai_pot	frac_hu1	lai_max1	dlai_rate	can_ht_max	rt_dp_max	tmp_opt	tmp_base	frac_n_yld	frac_p_yld
AGWW	110	35	0,5	5	0,15	0,05	1	1	1,5	30	11	0,0199	0,0032
AGRL	110	35	0,5	5	0,15	0,05	1	1	1,5	30	11	0,0199	0,0032
FRST	0	30	0,02	6	0,05	0,05	1	6	2	30	10	0,0015	0,0003
RNGE	0	25	0,1	3	0,05	0,1	1	1	1,5	25	12	0,016	0,0022
WETW	0	20	0,1	4	0,1	0,2	1	2,5	1	25	12	0,016	0,0022
URBN	0	35	0,02	4	0,05	0,05	1	0,5	2	25	12	0,0234	0,0033
BSVG	0	34	0,02	1,5	0,05	0,1	1	1	2	25	12	0,016	0,0022
ROCK	0	34	0,02	1,5	0,05	0,1	1	1	2	25	12	0,016	0,0022
SWRN	0	34	0,02	1,5	0,05	0,1	1	1	2	25	12	0,016	0,0022
MINE	0	34	0,02	1,5	0,05	0,1	1	1	2	25	12	0,016	0,0022
LDFL	0	34	0,02	1,5	0,05	0,1	1	1	2	25	12	0,016	0,0022
ANML	0	34	0,02	1,5	0,05	0,1	1	1	2	25	12	0,016	0,0022

Por su parte, las categorías urbanas y usos antrópicos específicos fueron parametrizados mediante el archivo "**urban**" (Tabla 46), definiendo variables relacionadas con impermeabilización, generación de escorrentía y acumulación/lavado de contaminantes. Entre los principales parámetros utilizados destacan la fracción impermeable (frac_imp, adimensional), fracción hidráulicamente conectada (frac_dc_imp, adimensional), densidad de soleras (curb_den, km/ha), coeficiente de lavado urbano (urb_wash, adimensional), acumulación máxima de sedimentos superficiales (dirt_max, kg/curb km), tiempo de semisaturación de acumulación (t_halfmax, días), concentraciones de nitrógeno total en carga de sedimentos superficiales (conc_totn, mg/kg), fósforo total en sedimentos superficiales (conc_totp, mg/kg) y nitrato en sedimentos superficiales (conc_no3n, mg/kg), además del número de curva SCS (urb_cn, adimensional), utilizado para estimar generación de escorrentía superficial. Las categorías parametrizadas incluyeron áreas urbanas e industriales, extracción de áridos, minería, vertederos y actividad pecuaria intensiva. En particular, las áreas urbanas e industriales fueron representadas mediante altos porcentajes de impermeabilización y elevados valores de acumulación de contaminantes superficiales, mientras que vertederos y criaderos intensivos incorporaron mayores concentraciones de nitrógeno y fósforo asociadas a fuentes difusas de origen antrópico. La categoría minera fue parametrizada con una impermeabilización intermedia y menores concentraciones de nutrientes en comparación con vertederos y áreas pecuarias, representando principalmente generación de escorrentía desde superficies intervenidas y depósitos mineros.

Tabla 46 – Archivo de entrada "urban" para parametrización de usos de suelo antrópicos

Nombre	frac_imp	frac_dc_imp	curb_den	urb_wash	dirt_max	t_halfmax	conc_totn	conc_totp	conc_no3n	urb_cn	Descripción
URBN	0,65	0,55	0,7	0,45	150	12	490	163,5	6,4	92	Urbano industrial
SWRN	0,05	0,4	0,1	0,35	300	10	150	50	5	90	Áridos
MINE	0,1	0,4	0,2	0,35	300	10	150	50	5	92	Minería
LDFL	0,1	0,35	0,3	0,55	220	8	900	400	40	91	Vertedero
ANML	0,45	0,3	0,1	0,6	260	6	800	350	30	89	Criaderos

5.1.2.2 Mapa de suelos

Las propiedades físicas e hidráulicas del suelo fueron derivadas del producto CLSoilMaps (Galleguillos et al., 2022), con resolución espacial de 100 m, el cual contiene datos de textura de suelo, porcentajes de limo, arena y arcilla, conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, entre otros. El contenido de carbono orgánico fue derivado del mapa nacional de carbono orgánico del suelo SAG (Padarian et al., 2017). Se obtuvieron seis categorías de suelo a través de un agrupamiento o *clustering* (k-means) de información de 6 propiedades del suelo: porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, carbono orgánico, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y capacidad de campo. Los resultados y detalles de la metodología se presentan en la Sección 4.2.2.

Clasificación textural y grupos hidrológicos

Los suelos además fueron clasificados para fines de modelación según: 1) su textura (USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS), 2017) (% arena-limo- arcilla) en los primeros 30 cm de suelo; 2) contenido de carbono orgánico según (FAO & UNEP, 2021) y iii) Grupo hidrológico según ((NRCS), 2009)y iv) Curva número según USDA (1986). Los resultados finales se presentan en la Tabla 48.

Tabla 47 – Criterios de clasificación de contenido de carbono orgánico en el suelo (FAO, 2006)

Categoría de Carbono orgánico superficial	Criterio
Bajo	2%
Medio	2-4%
Alto	>5%.

Tabla 48 – Clasificación de los suelos de Maipo según su textura, contenido de carbono orgánico, grupo hidrológico NRCS (Hydrological Soil Group, HSG), y Curva Número (CN)

Tipo	Textura USDA (0–30 cm)	CO (%)	Nivel CO	HSG (NRCS)	CN
Tipo 1	Franco	1.58	Bajo	C	74
Tipo 2	Franco arcillo-arenoso	5.13	Alto	B	61
Tipo 3	Franco arenoso	5.38	Alto	A	39
Tipo 4	Franco arcillo-arenoso	3.98	Medio	B	61
Tipo 5	Franco arcillo-arenoso	5.62	Alto	A	39
Tipo 6	Franco arcillo-arenoso	4.63	Medio	B	61

Profundidad de raíces

El estudio CORFO (1964): *Suelos, descripciones proyecto aerofotogramétrico Chile* (CORFO, 1964) se utilizó como referencia para la determinación de profundidad de raíces de las seis categorías de suelo a utilizar en la cuenca. La serie Maipo se usó como referencia para el suelo Tipo 1, el cual cubre el Valle del Río Maipo, definiendo una profundidad de raíces de 2000 mm, consistente en términos de modelación con la profundidad del perfil de suelo obtenido del producto CLSoilMaps.

Albedo de suelo

La estimación del albedo de suelo se basó en el contenido de arena y carbono orgánico, siguiendo las relaciones establecidas por Baumgardner et al. (1985) y Idso et al. (1975): en términos generales, a mayor contenido de arena, mayor reflectancia, mientras que el contenido de carbono orgánico reduce el albedo.

Tabla 49 – Valores de albedo adoptados en el modelo para cada tipo de suelo

Tipo de suelo	Albedo (SOL_ALB)
1	0.18
2	0.14
3	0.19
4	0.15
5	0.14
6	0.14

Factor de erodibilidad del suelo (USLE_K)

El factor de erodibilidad del suelo (USLE_K) se estimó a partir de la ecuación de Wischmeier et al. (1971), que calcula este parámetro a partir de los contenidos de limo, arena, arcilla del suelo, contenido de materia orgánica, clase estructural y permeabilidad. Se asumió una clase estructural de tipo media o gruesa granular, apta para suelos agrícolas. Los valores estimados a partir de las propiedades inherentes de cada tipo de suelo se presentan a continuación.

Tabla 50 – Valores de factor de erodibilidad del suelo adoptados en el modelo para cada tipo de suelo

Tipo de suelo	USLE_K	Erodabilidad
1	0.23	Alta
2	0.06	Moderada-baja
3	0.05	Baja
4	0.12	Moderada-alta
5	0.05	Baja
6	0.10	Moderada

Se destaca que el suelo de tipo 1, el cual cubre gran parte del valle del Río Maipo, tiene la mayor erodabilidad, seguido por el suelo de tipo 4, el cual se encuentra en zonas a mayor altura, pero de pendientes más suaves.

5.1.2.3 Pendientes y landscape units (LSU)

SWAT+ permite la definición de *Landscape Units (LSU)* creadas a partir de la topografía y red de drenaje, donde se definen zonas de inundación (floodplain) y zonas de ladera (upslope) en una subcuenca. Las zonas de inundación de la cuenca del río Maipo (Figura 64) fueron creadas en QSWAT+ a través del método *DEM Inversion*. Además, se definieron dos rangos de pendientes para la creación de HRUs: 0-10% y pendientes mayores a 10%.

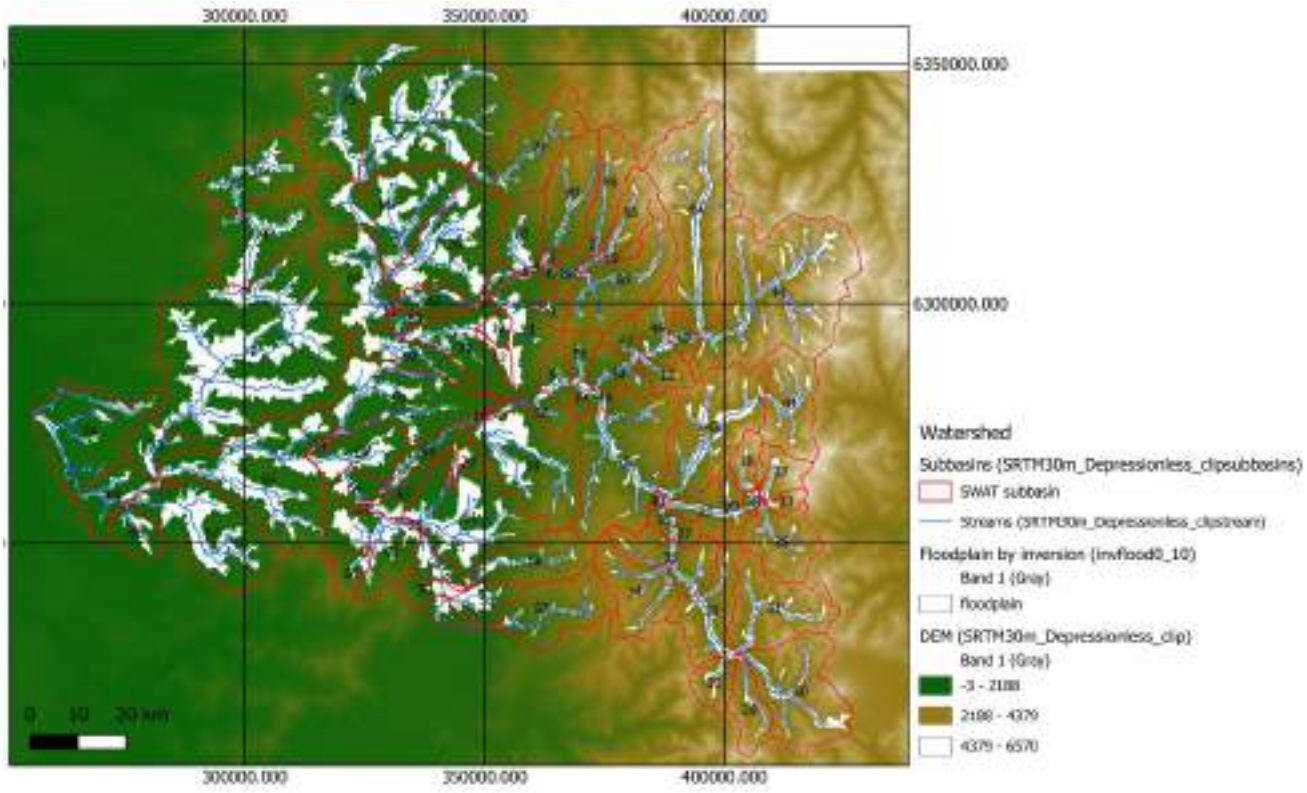


Figura 64 – Creación de la zona de inundación (floodplain) en QSWAT+

5.1.2.4 Umbrales de filtrado para la creación de HRUs

Cada celda en la cuenca ha sido clasificada por uso de suelo, tipo de suelo, LSU y rango de elevación. Puntos que comparten los mismos cuatro valores se agrupan en una potencial Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). Estas a su vez son filtradas por uso de suelo, suelo y pendiente, utilizando el método de porcentaje de subcuenca, para evitar crear HRUs que cubran un porcentaje muy bajo de la subcuenca y pueden ser ignoradas por el modelo SWAT+. Las HRUs pequeñas son eliminadas y su área es redistribuida en las HRUs más grandes. Los porcentajes de cobertura de subcuenca de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente utilizados fueron 5%, 10% y 15%, respectivamente. Se excluyeron del filtrado los usos de suelo extracción de áridos, vertederos, actividad pecuaria intensiva y minería.

Finalmente, se crearon **5.417 HRUs** con propiedades únicas de uso de suelo, tipo de suelo y topografía, agrupadas en **598 LSUs**, la cual considera drenaje, zonas de inundación y de laderas.

5.1.3 Datos climáticos y escenarios de precipitación

El periodo de registro de las estaciones meteorológicas corresponde desde 01/01/2014 hasta 31/12/2024, las cuales se presentan en la Figura 41. Las estaciones meteorológicas fueron seleccionadas por la completitud de sus registros, en caso de haber algún dato faltante, se rellenó a partir de información de la estación meteorológica más cercana. Para más detalle de los registros y metodología de relleno, ir a la Sección 4.2.5.

Como se indicó previamente, el modelo SWAT+ simula un periodo de 11 años comprendido entre 2014 y 2024. Para la estimación de cargas difusas y coeficientes de exportación, los escenarios de precipitación considerados corresponden a las condiciones meteorológicas efectivamente registradas durante dicho periodo de simulación, utilizando los mismos años para los cuales se dispone simultáneamente de antecedentes fisicoquímicos en cursos de agua y de información meteorológica representativa de la cuenca. En consecuencia, no se definieron escenarios sintéticos o hipotéticos, sino que cada año simulado constituye un escenario de precipitación específico asociado a una condición hidrológica observada.

La selección de este periodo y del criterio de análisis fue acordada y validada con la contraparte técnica durante la reunión realizada el 26 de septiembre de 2025, instancia en la que se estableció que el periodo 2014–2024 resultaba el más adecuado para la estimación de coeficientes de exportación, debido a la disponibilidad simultánea de mediciones fisicoquímicas de calidad de agua y datos meteorológicos. Asimismo, se acordó que los resultados obtenidos podrían clasificarse posteriormente según el tipo de año hidrológico (muy seco, seco, normal, húmedo o muy húmedo), con el objeto de evaluar la influencia de la variabilidad climática sobre las cargas difusas estimadas.

La clasificación hidrológica anual se realizó mediante un análisis de percentiles de precipitación utilizando los registros de la estación meteorológica Quinta Normal Santiago (Dirección Meteorológica de Chile, DMC, código 330020; ver Tabla 41 y Figura 41), adoptada como fuente de información pluviométrica de referencia para este análisis. Los parámetros estadísticos empleados para dicha clasificación se presentan en la Tabla 51 y fueron estimados a partir de la serie histórica correspondiente al periodo 1995–2024 (30 años de información, según recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, OMM). Esta longitud de registro se considera adecuada para caracterizar las condiciones climáticas de la zona de estudio, incorporando la variabilidad reciente asociada a los efectos del cambio climático. Asimismo, la determinación de los percentiles se efectuó mediante el ajuste de una distribución de Weibull a los datos discretos de precipitación anual.

Tabla 51 – Parámetros estadísticos de estación meteorológica Quinta Normal Santiago (DMC, 330020)

Parámetros (1995-2024)	Valor (mm)
Promedio	273
Desviación estándar	142
P_{10}	118
P_{25}	165
P_{50}	244
P_{75}	345
P_{90}	470

La clasificación por cuantiles aplica umbrales basados en percentiles, donde un **año muy seco** corresponde a precipitaciones inferiores o iguales al percentil 10 (P_{10}), un **año seco** presenta precipitaciones comprendidas entre los percentiles 10 y 25 (P_{10}–P_{25}), un **año normal** corresponde a precipitaciones entre los percentiles 25 y 75 (P_{25}–P_{75}), un **año húmedo** se ubica entre los percentiles 75 y 90 (P_{75}–P_{90}), mientras que un **año muy húmedo** presenta precipitaciones superiores al percentil 90 (P_{90}).

De esta forma, los coeficientes de exportación y las cargas difusas estimadas mediante el modelo SWAT+ pueden asociarse a distintos escenarios de precipitación observados durante el periodo de simulación, permitiendo interpretar los resultados bajo diferentes condiciones hidrológicas. Los 11 años simulados

fueron clasificados según la metodología descrita anteriormente, obteniéndose seis años normales, dos años secos, dos años muy secos y un año húmedo, según se presenta en la Tabla 52.

Tabla 52 – Escenarios de precipitación: Clasificación de cada año simulado según condiciones hidrológicas

Año	Quinta Normal: Precipitación anual (mm)	Clasificación año hidrológico
2014	203,4	Año normal
2015	217,5	Año normal
2016	268,7	Año normal
2017	278,4	Año normal
2018	149,8	Año seco
2019	83,5	Año muy seco
2020	189,7	Año normal
2021	115	Año muy seco
2022	163,8	Año seco
2023	314,9	Año normal
2024	404,4	Año húmedo

Por otro lado, el modelo SWAT+ requiere la construcción de un Generador de Clima (WGEN) para completar vacíos de datos en caso de existir. El Generador se construyó a partir de información de la estación meteorológica Los Tilos y se presenta en la Tabla 53. La leyenda de la tabla se presenta bajo esta.

Tabla 53 – Generados de Clima (WGEN) estación Los Tilos

month	tmp_max_ave	tmp_min_ave	tmp_max_sd	tmp_min_sd	pcp_ave	pcp_sd	pcp_skew	wet_dry	wet_wet	pcp_days	pcp_hhr	slr_ave	dew_ave	wnd_ave
1	31	10.5	2.5	1.87	0.4	0.1	0	0.03	0.00	1	0.14	27.5	0.592	0.57
2	29.8	9.3	3.19	1.13	14.5	1.9	2.1	0.18	0.40	5	2.38	24.3	0.654	0.42
3	29.1	8.3	3.39	2.72	42.1	4.3	2.8	0.16	0.40	5	7.7	20.3	0.655	0.48
4	24.3	4.6	4.41	3.25	13	2.4	4.6	0.07	0.00	2	3.82	13.4	0.74	0.81
5	19.1	6.4	4.88	2.55	54.4	5.8	1.8	0.13	0.50	4	8.51	10.4	0.791	0.53
6	16.6	1.2	3.55	2.45	41.5	5.4	2.5	0.17	0.60	5	7.95	6.2	0.871	0.52
7	13.5	1.9	3.56	3.42	44.5	5.3	2.2	0.19	0.20	6	7.35	7.4	0.823	0.59
8	15.6	3.5	3.51	2.87	39.8	4.9	2.7	0.16	0.40	5	7.46	11.2	0.765	0.64
9	17.2	5.4	4.75	2.56	18.2	2.1	1.9	0.13	0.25	4	3.08	15.6	0.718	0.67
10	21.8	4.7	4.28	1.63	12.4	1.8	3.1	0.10	0.33	3	3.15	20.4	0.695	0.72
11	24.5	5.2	2.76	1.7	35.6	4.2	2.9	0.13	0.50	4	7.67	25.1	0.662	0.84
12	27.2	8.1	4.19	2.41	1.1	0.3	0	0.06	0.00	2	0.35	28.6	0.624	0.69

Variable	Descripción
tmp_max_ave	Promedio de temperatura máxima (°C)
tmp_min_ave	Promedio de temperatura mínima (°C)
tmp_max_sd	Desviación Estándar de temperatura máxima (°C)
tmp_min_sd	Desviación Estándar de temperatura mínima (°C)
pcp_ave	Promedio de precipitación (mm)
pcp_sd	Desviación Estándar de precipitación (mm)
pcp_skew	Asimetría de precipitación (mm)

Variable	Descripción
wet_dry	Probabilidad que un día seco sea seguido por un día lluvioso
wet_wet	Probabilidad que un día lluvioso sea seguido por un día lluvioso
pcp_days	Número promedio de días con precipitación
pcp_hhr	Precipitación máxima de 30 minutos (mm)
slr_ave	Promedio de radiación solar (Mj/m^2/día)
dew_ave	Promedio Humedad relativa
wnd_ave	Promedio velocidad del viento (m/s)

Los métodos elegidos para representar la hidrología, procesos de transporte y climatología son:

- Evapotranspiración: Penman-Monteith (Monteith, 1965; Penman, 1948)
- Escurrimiento superficial: Método Muskingum (McCarthy, 1938)
- Ajuste de precipitación y temperatura por elevación
- Erosión en laderas: modelo MUSLE (Williams, 1977)
- Modelo de sedimento en cauce: Modelo de Bagnold (Bagnold, 1977)
- Infiltración: Curva Número (USDA Soil Conservation Service, 1972)

5.2 Validación de resultados de modelación

5.2.1 Validación hidrológica

La validación hidrológica del modelo SWAT+ se realizó en siete subcuencas de cabecera de la cuenca del río Maipo, de menor tamaño y baja intervención antrópica, lo que permite establecer una eficiencia generalizada a escala de cuenca (Addiscott & Mirza, 1998). El periodo de calibración corresponde a 2015-2024, para permitir un año de periodo de ajuste del modelo. Los puntos a calibrar se presentan en la Tabla 54 y Figura 65. Los parámetros que fueron ajustados en la calibración hidrológica (caudal mensual) fueron:

- *Cn2*: SCS Curva número Condición II.
- *Aquifer_K:* conductividad hidráulica saturada de la columna de suelo.
- *Alpha/Alpha_bf:* Factor Alpha (1/días) para la curva de recesión de agua subterránea. Valores más bajos indican una respuesta más lenta a la recarga.
- Parámetros de nieve: *melt_max* y *melt_min* (tasas máximas y mínimas de derretimiento de nieve en el año), *tmp_lag* (factor térmico de atraso), *snow_h2o* (contenido de agua nieve mínimo), *snow_init* (contenido de nieve inicial).

Tabla 54 – Puntos de calibración de modelo SWAT+ y estaciones fluviométricas con datos observados de caudal mensual correspondientes

N° de canal en SWAT+	Cauce	Área de vigilancia	Estación Fluviométrica DGA
165	Río Colorado	MA-2	5705001 – Río Colorado antes junta río Olivares
149	Río Olivares	MA-2	5706001 – Río Olivares antes junta río Colorado
528	Río Angostura	AN-1	5716001 – Río Angostura en Valdivia de Paine

N° de canal en SWAT+	Cauce	Área de vigilancia	Estación Fluviométrica DGA
616	Estero Pintué	AN-1	5716003 – Estero Pintué en Puente Pintué
181	Río Molina	MP-1	5720001 – Río Molina antes de Junta río San Francisco
245	Estero Yerba Loca	MP-1	5721001 – Estero Yerba Loca antes río Junta San Francisco
241	Estero Arrayán	MP-1	5722001 – Estero Arrayan en la Montosa

Los resultados de la calibración hidrológica se presentan en la Figura 66. La evaluación del desempeño hidrológico del modelo se realizó mediante las métricas Error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*), Error Absoluto Medio (MAE, Mean Absolute Error) y porcentaje de sesgo, PBIAS. Los indicadores RMSE y MAE permiten cuantificar la magnitud del error entre caudales simulados y observados, donde valores menores indican un mejor ajuste. Por su parte, el PBIAS mide la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar caudales; valores cercanos a 0 % indican menor sesgo. Los errores de calibración se presentan en la Tabla 55.

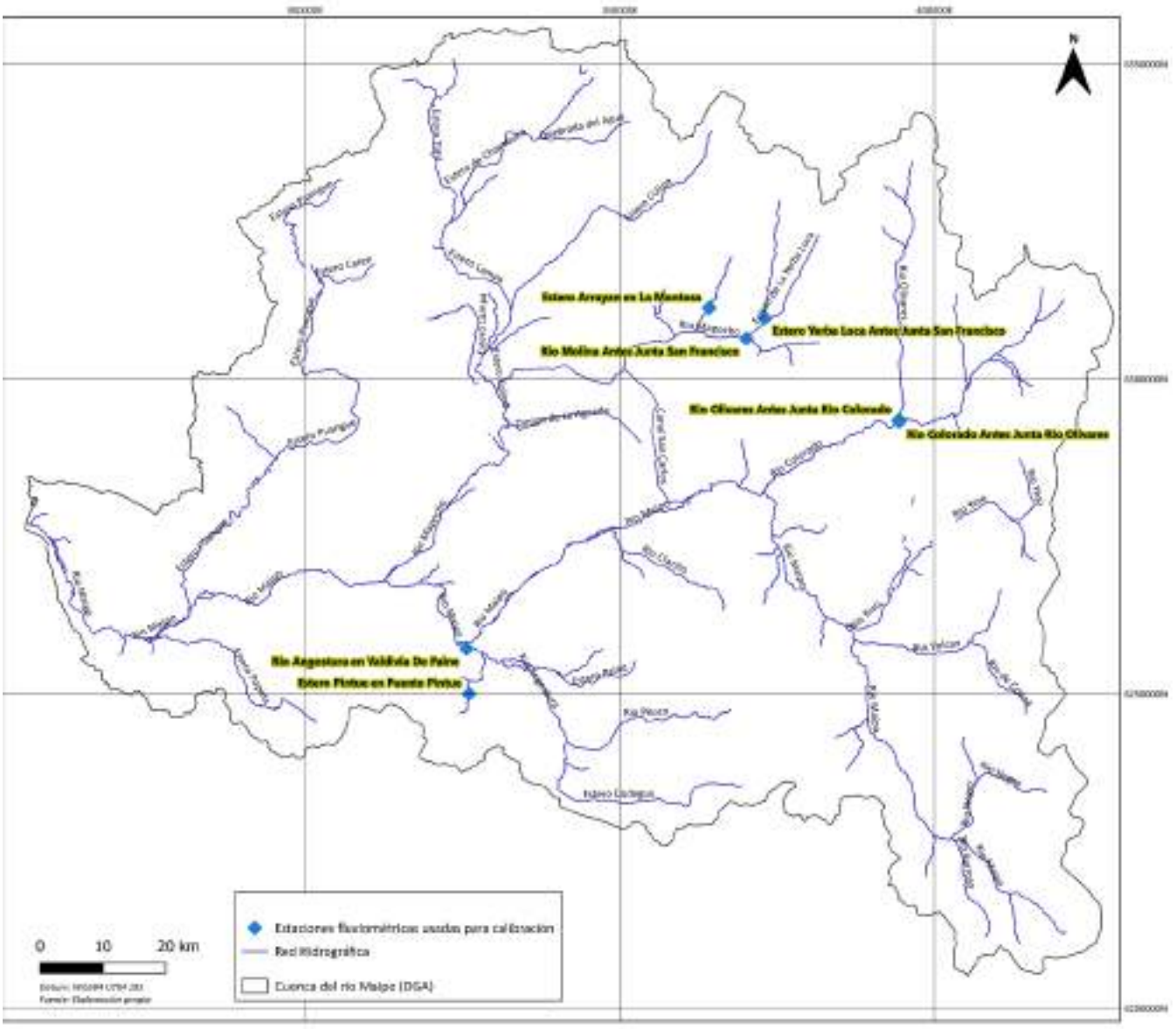


Figura 65 – Ubicación de estaciones fluviométricas utilizadas para la calibración de SWAT+.

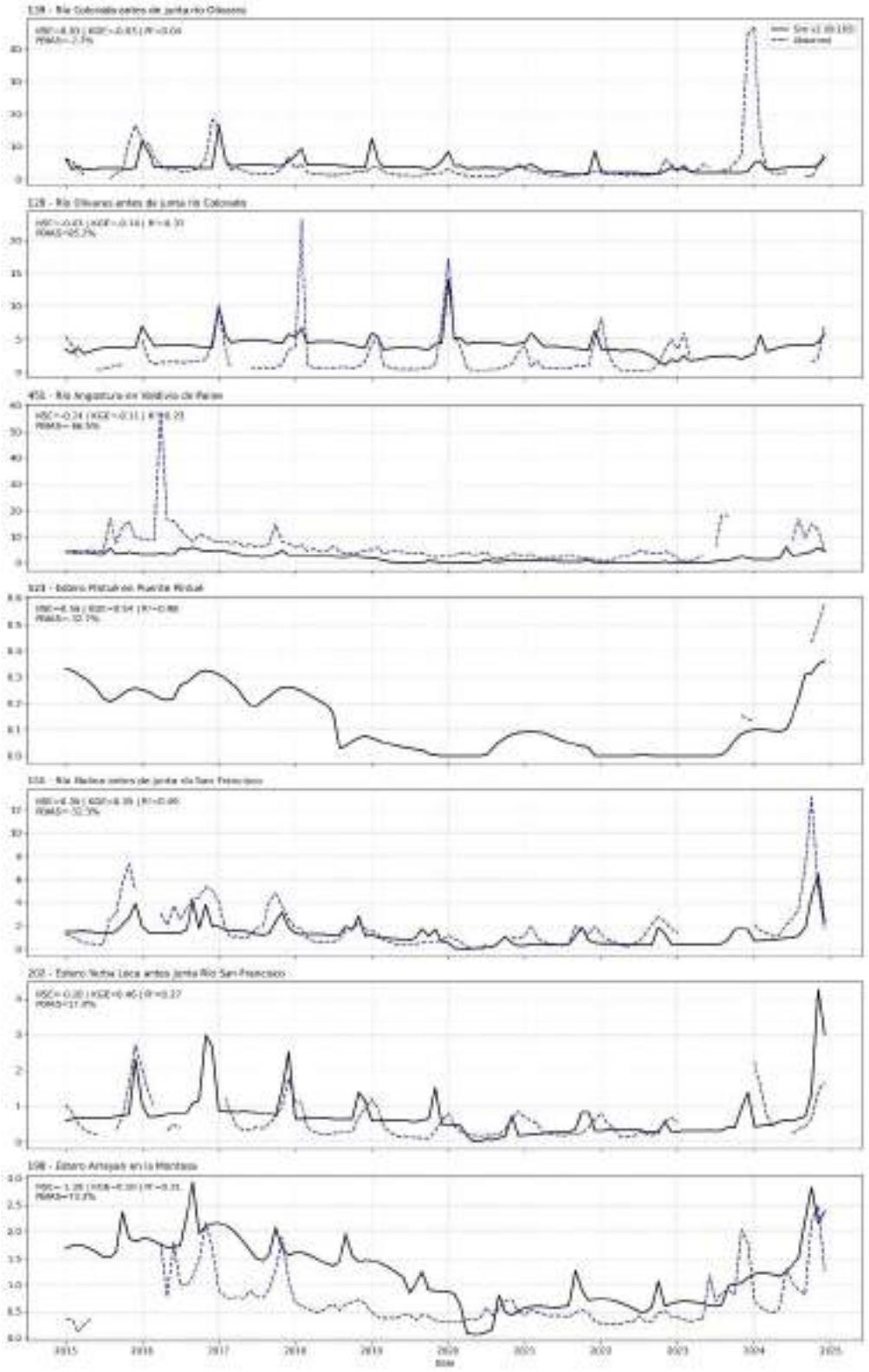


Figura 66 – Caudales mensuales simulados vs observados (m^3/s) en los ríos Colorado, Olivares, Angostura, Estero Pintué, río Molina, Estero Yerba Loca y Estero Arrayán.

Tabla 55 – Errores de calibración hidrológica

Canal	Código estación DGA	N° de observaciones Caudal mensual	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	PBIAS (%)
Rio Colorado	5705001	114	6.38	2.76	-2.70
Rio Olivares	5706001	96	3.38	2.90	98.36
Rio Angostura	5716001	110	7.19	4.27	-65.44
Estero Pintue	5716003	6	0.12	0.11	-36.06
Rio Molina	5720001	103	1.52	0.97	-34.05
Yerba Loca	5721001	98	0.54	0.38	17.05
Estero Arrayan	5722001	111	0.67	0.44	72.57

Los resultados muestran un desempeño variable entre estaciones, las cuales se agrupan en tres áreas de vigilancia: MA-2 (Río Maipo Alto), MP-1 (Río Mapocho Alto) y AN-1 (Río Angostura Alto). Rio Colorado en MA-2; Yerba Loca en MP-1 y Estero Pintué en AN-1 presentan los mejores ajustes relativos, además de errores absolutos bajos. En contraste, Río Olivares, en MA-2, y Río Angostura, en AN-1, evidencian mayores dificultades para reproducir adecuadamente los caudales observados. En este último caso, la presencia de una mayor intervención antrópica asociada al uso de agua para riego en zonas agrícolas podría contribuir a explicar parte de las discrepancias observadas entre caudales simulados y medidos.

En términos generales, los resultados indican que la capacidad predictiva del modelo no es uniforme entre subcuencas, situación esperable en cuencas de alta complejidad hidrológica y con distintos grados de intervención antrópica. No obstante, los errores absolutos obtenidos y el desempeño satisfactorio en varias de las estaciones analizadas permiten considerar que el modelo reproduce razonablemente la dinámica hidrológica general del sistema, constituyendo una base adecuada para la estimación de cargas difusas y coeficientes de exportación, siempre que estos resultados sean interpretados en conjunto con la incertidumbre derivada de la calibración.

En la zona MA-2, la estación Río Olivares presenta valores de PBIAS positivos, lo que indica una tendencia del modelo a sobreestimar los caudales. En consecuencia, las cargas contaminantes y los coeficientes de exportación derivados en estas subcuencas podrían estar sesgados hacia valores superiores a los reales. En la zona MP-1, Yerba Loca y Estero Arrayán también presentan sesgos positivos, mientras que Río Molina presenta un PBIAS negativo, indicando una subestimación del caudal y, por consiguiente, una posible subestimación de las cargas y una sobreestimación de los coeficientes de exportación asociados. Finalmente, en la zona AN-1, tanto Estero Pintué como Río Angostura presentan valores de PBIAS negativos, sugiriendo una subestimación de los caudales y, por ende, una potencial subestimación de las cargas exportadas y una sobreestimación de los coeficientes de exportación calculados.

Es importante señalar que estas diferencias en el desempeño hidrológico entre subcuencas se traducen en distintos niveles de incertidumbre en las cargas estimadas. Por ello, los coeficientes de exportación obtenidos deben interpretarse como **estimaciones representativas del comportamiento medio de cada uso de suelo a escala de cuenca**, más que como valores puntuales exentos de incertidumbre para cada subcuenca individual. En aquellas subcuencas con mejor ajuste hidrológico, la estimación de cargas y coeficientes presenta una mayor robustez y confiabilidad relativa; mientras que en sectores con mayores sesgos de calibración, los coeficientes deben entenderse dentro de un rango plausible de variación asociado al desempeño del modelo.

Sin perjuicio de lo anterior, la consistencia espacial observada en los resultados y la incorporación explícita de bandas de incertidumbre permiten utilizar los coeficientes obtenidos como herramientas útiles para identificar órdenes de magnitud, comparar aportes relativos entre usos de suelo y apoyar procesos de gestión y priorización ambiental a escala de cuenca. En este sentido, el enfoque adoptado resulta apropiado para los objetivos del estudio, considerando el carácter exploratorio y de apoyo a la toma de decisiones del análisis desarrollado.

Para abordar explícitamente esta incertidumbre, se definieron bandas de error porcentuales para los caudales simulados a partir de los valores de PBIAS (%) obtenidos durante la calibración, las cuales se transfieren a la estimación de los coeficientes de exportación desarrollada en el apartado siguiente, según las siguientes ecuaciones:

Banda de error porcentual superior:

$$\left(1 - \frac{PBIAS}{100}\right) + \frac{\delta}{100}$$

Banda de error porcentual inferior:

$$\max\left(0, \left(\left(1 - \frac{PBIAS}{100}\right) - \frac{\delta}{100}\right)\right)$$

Donde:

- $PBIAS$ corresponde al porcentaje de sesgo (%);
- $\left(1 - \frac{PBIAS}{100}\right)$ corresponde al factor de corrección asociado al sesgo del modelo;
- δ es el ancho de tolerancia porcentual. En hidrología se usa el valor absoluto de PBIAS.

Los resultados de las bandas porcentuales de error de caudales, y por consiguiente de los coeficientes de exportación, se presentan en la Tabla 56. En MA-2, las bandas de error de los caudales van desde 0% a 105%, por lo que los coeficientes de exportación estimados serán generalmente menores a los estimados en este informe. En AN-1, las bandas de error porcentuales de caudales y coeficientes de exportación van desde 100% a 231%, lo que sugiere que los coeficientes podrían alcanzar valores superiores a los estimados. En MP-1, las bandas varían entre 66 % y 165 %, excluyendo Estero Arrayán debido a la baja densidad de monitoreo de calidad del agua y coeficientes para dicha estación. Para el resto de la cuenca se adoptó un enfoque conservador, utilizando las bandas extremas observadas (0 %–233 %) como referencia para interpretar la incertidumbre asociada a los coeficientes de exportación estimados.

Tabla 56 – Bandas porcentuales de error superiores e inferiores por estación

Estación	Zona de Vigilancia	PBIAS (%)	Banda porcentual inferior	Banda porcentual superior
Rio Colorado	MA-2	-2.70	1.00	1.05
Rio Olivares	MA-2	98.36	0.00	1.00
Rio Angostura	AN-1	-65.44	1.00	2.33

Estación	Zona de Vigilancia	PBIAS (%)	Banda porcentual inferior	Banda porcentual superior
Estero Pintue	AN-1	-36.06	1.00	1.65
Rio Molina	MP-1	-34.05	1.00	1.65
Yerba Loca	MP-1	17.05	0.66	1.00
Estero Arrayan	MP-1	72.57	0.11	1.00

5.2.2 Validación de sedimentos

La calibración de sedimentos del modelo SWAT+ se realizó en seis puntos en la cabecera del río Maipo, específicamente en Estero El Morado, Río Colorado y río Volcán. El parámetro requerido para calibrar sedimentos es Sólidos totales suspendidos (STS), en mg/L, el cual representa el transporte y deposición de particulas minerales y orgánicas suspendidas en el agua (arcillas, limos, arenas). En el modelo SWAT+, la variable "sed_out" es simulada en los archivos de salida de "channel" y representa el tránsito de sedimentos que sale por el tramo de la red de drenaje en toneladas. Para comparar "sed_out" con STS, se convirtieron las simulaciones mensuales de masa (toneladas) a concentración (mg/L), dividiendo por el volumen mensual total de agua que circula por el canal (relacionado con el caudal medio mensual, flo_out) y aplicando los factores de conversión correspondientes, como se indica en la siguiente ecuación:

$$Concentración\ \left[\frac{mg}{l}\right] = \frac{Masa\ (mg)}{Volumen(l)} = \frac{sed_{out}\ x\ 10^9}{flo_{out}\ x\ días\ x\ 86400\ x\ 1000}$$

Los puntos a calibrar se presentan en la Tabla 57 y Figura 67. Los parámetros que fueron ajustados en la calibración hidrológica fueron:

- *Usle_K:* Factor de erosionabilidad del suelo, define qué tan fácil se desprenden las partículas de suelo por impacto de lluvia y escorrentía.
- *adj_pkrt:* Factor de ajuste del caudal máximo para el transporte de sedimentos en la subcuenca (cursos de los afluentes).
- *adj_pkrt_sed*: Factor de ajuste del caudal máximo para el transporte de sedimentos en el cauce principal.

Tabla 57 – Estaciones de monitoreo de sólidos suspendidos totales utilizadas para la calibración de sedimentos en SWAT+.

Estación	Cauce	ID Channel	N° Datos
R5	Estero El Morado	573	57
R14 / PHAM-01	Río Colorado aguas arriba	145	84
PHAM-02	Río Colorado medio	141	6
PHAM-04	Río Colorado aguas abajo	394	6
PHAM-19	Río Volcán aguas arriba	596	4
PHAM-20	Río Volcán aguas abajo	553	4

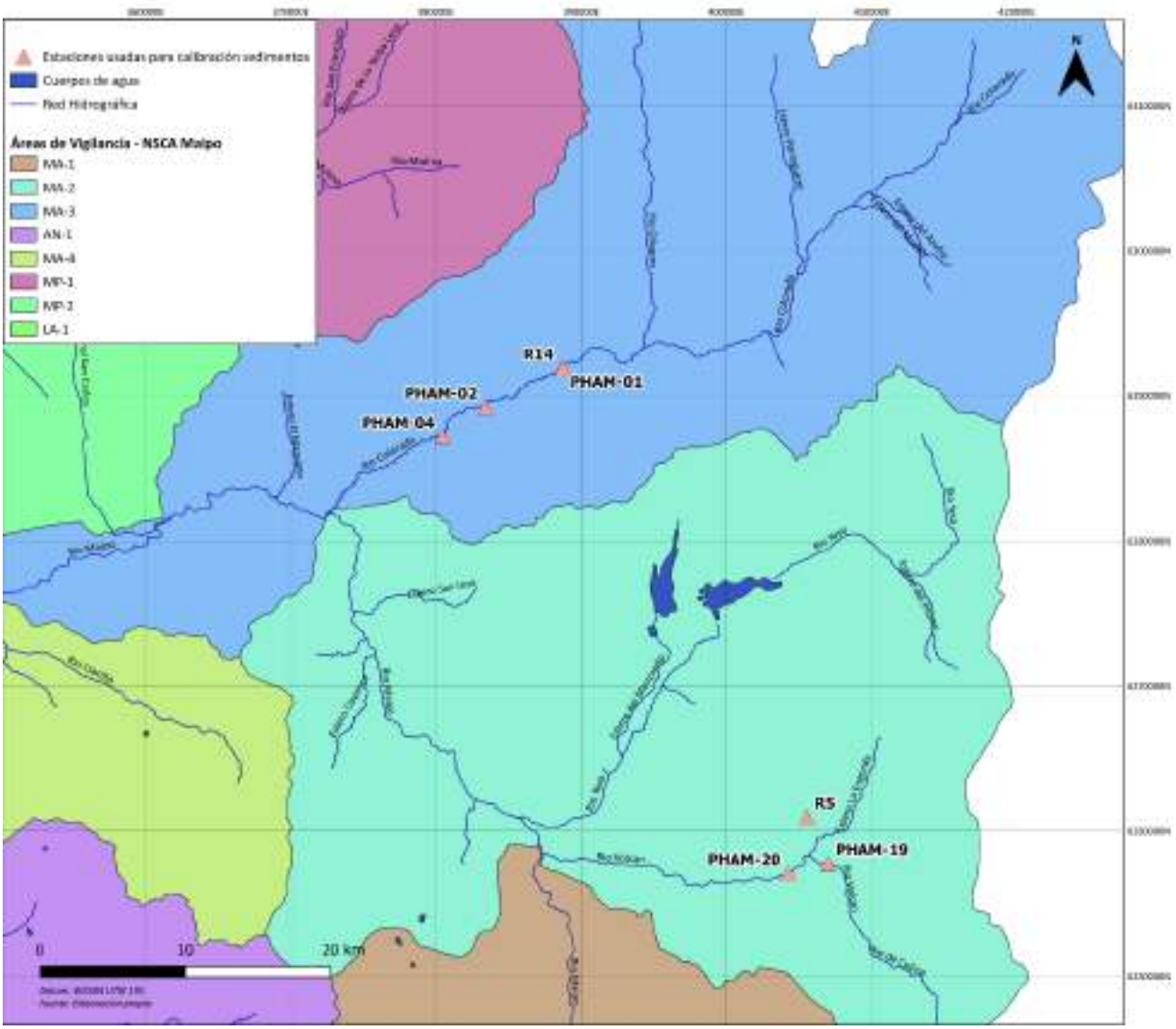


Figura 67 – Ubicación de estaciones de monitoreo de sólidos suspendidos totales utilizadas para la calbración de sedimentos en SWAT+.

Los resultados de la calibración de sedimentos se presentan en la Figura 68. La evaluación del desempeño hidrológico del modelo se realizó mediante las métricas Error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*), Error Absoluto Medio (MAE, Mean Absolute Error) y porcentaje de sesgo, PBIAS. Los errores de calibración se presentan en la Tabla 58. Se observa un mejor ajuste en Río Volcán, en sus dos estaciones, especialmente durante las temporadas húmedas, en comparación con Río Colorado. Estero Morado también logra una mejor representación de simulación de sedimentos, con un PBIAS de un 27%.

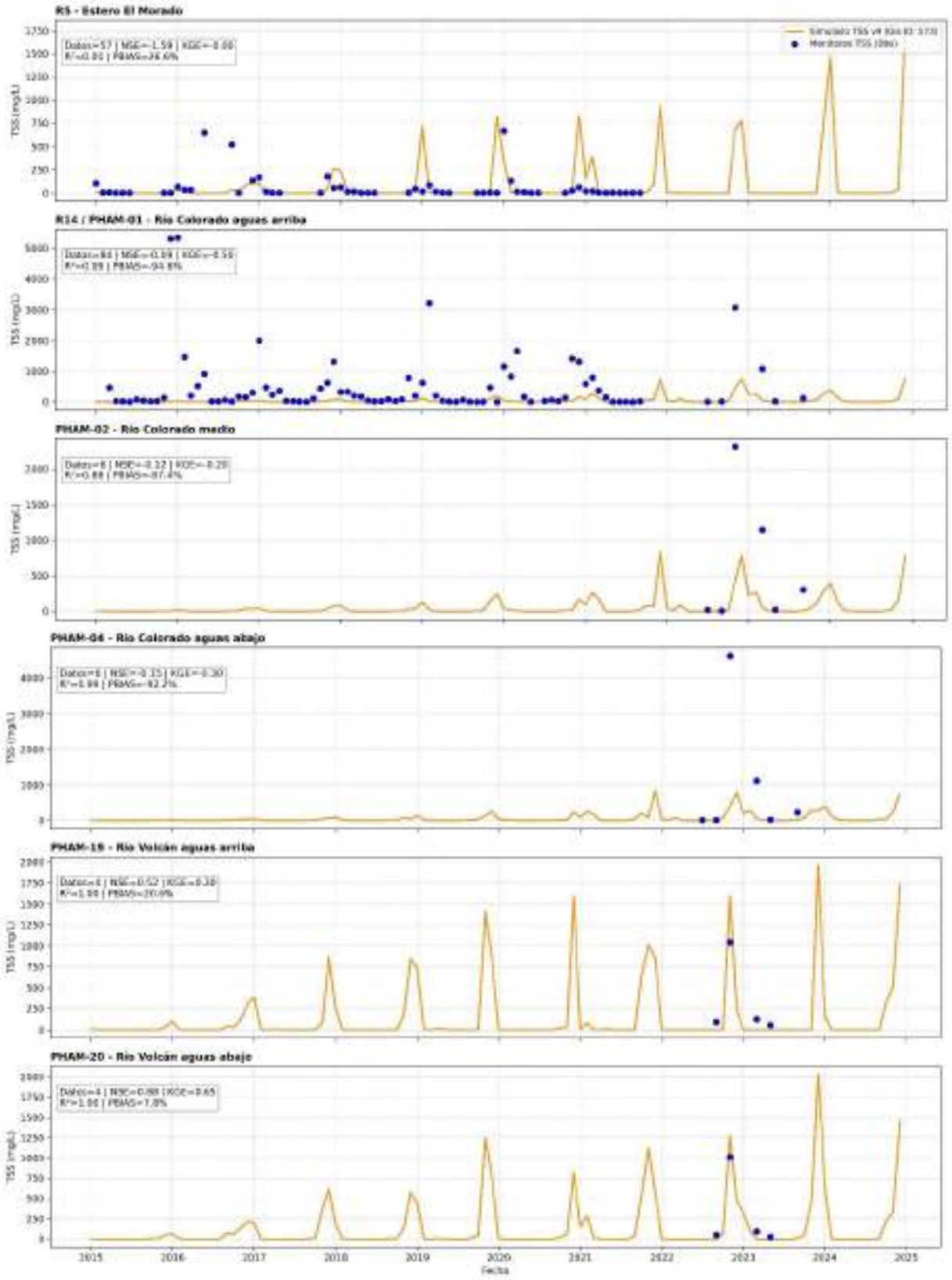


Figura 68 – SST simulados vs observados en los ríos Colorado y Volcán, y estero El Morado.

Tabla 58 – Errores de calibración de sedimentos

Estación	Cauce	Área de vigilancia	RMSE (mg/L)	MAE (mg/L)	PBIAS (%)
R5	Estero El Morado	MA-2	222	97	27
R14 / PHAM-01	Río Colorado aguas arriba	MA-3	1063	470	-95
PHAM-02	Río Colorado medio	MA-3	900	556	-87
PHAM-04	Río Colorado aguas abajo	MA-3	1792	929	-92
PHAM-19	Río Volcán aguas arriba	MA-2	287	207	21
PHAM-20	Río Volcán aguas abajo	MA-2	145	110	8

5.3 Determinación de coeficientes de exportación

Los coeficientes de exportación de los contaminantes nitrato, ortofosfato, cloruro, sulfato, DBO_5 y zinc disuelto fueron estimados a partir de información de calidad del agua proveniente de estaciones de monitoreo de la DGA y del proyecto Alto Maipo (ver Sección 4.2.6), antecedentes de monitoreo de calidad de agua de GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024), registro de caudales de la DGA (ver Sección 4.2.4) y resultados del modelo hidrológico SWAT+ implementado para la cuenca del río Maipo. Los puntos de monitoreo considerados para el cálculo de los coeficientes de exportación se presentan en la Figura 69, clasificados según su fuente de información: DGA, Alto Maipo o GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024). La información relativa a cada punto de monitoreo, correspondiente a concentración de contaminantes, caudal observado o estimado por modelo SWAT+, áreas de uso de suelo, cargas de contaminantes y ejemplo de cálculo en solver de los coeficientes de exportación, junto con la memoria técnica de cálculo se presentan en el Anexo 11 “Estimación de coeficientes de exportación”.

Por lo tanto, los resultados de los contaminantes corresponden a estimaciones indirectas de cargas basadas en concentraciones observadas y caudales simulados, y no a resultados de una modelación hidrogeoquímica explícita. Por otra parte, los resultados de la campaña de muestreo de suelo (Sección 3) no fueron utilizados en esta estimación y se contrastan con ella en la Sección 7.1.

La selección de los puntos de monitoreo de calidad de agua se realizó priorizando subcuencas con baja intervención antrópica sobre los caudales, exceptuando usos agrícolas. Asimismo, se privilegiaron sectores donde no se identificaron descargas puntuales relevantes o fuentes potenciales de contaminación, tales como plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) o descargas de residuos industriales líquidos (RILES) directamente a canales o cursos de agua.

El coeficiente de exportación del contaminante *i*, $X_{i,j}$ [kg/ha/año], asociado al uso de suelo *j* (Tabla 59) en la salida de una subcuenca, se estimó mediante la siguiente expresión:

$$L_i = Q \cdot C_i \cdot 31.536 = \sum_j X_{i,j} \cdot A_j$$

Donde L_i es la carga anualizada del contaminante i [kg/año], Q corresponde al caudal observado en la fecha de monitoreo en el punto ubicado a la salida de la cuenca [m^3/s], C_i es la concentración del contaminante (i) medida en la misma fecha [mg/L] y A_j representa el área del uso de suelo *j* dentro de la subcuenca [ha]. El factor 31.536 permite expresar la carga asociada a las condiciones observadas durante el monitoreo en unidades de kg/año. El factor de conversión incorpora la transformación de segundos a año y de miligramos a kilogramos.

Los coeficientes de exportación obtenidos corresponden a valores anualizados a partir de mediciones puntuales de concentración y caudal realizadas entre los años 2014 y 2024. Por consiguiente, estos coeficientes representan la magnitud de la carga contaminante que se exportaría bajo condiciones equivalentes a las observadas en cada fecha de monitoreo durante un año completo. Dado que tanto el caudal como las concentraciones presentan variabilidad temporal, los coeficientes estimados reflejan las condiciones hidrológicas y de calidad de agua existentes al momento del muestreo, por lo que deben interpretarse como valores representativos de dichas condiciones y no como estimaciones directas de la carga anual efectiva exportada por la subcuenca.

La estimación de los coeficientes de exportación se realizó mediante un procedimiento de optimización numérica utilizando la herramienta Solver. La función objetivo consistió en minimizar el error entre la carga anual de contaminante calculada a partir de las concentraciones medidas en las estaciones de monitoreo y los caudales observados o simulados por el modelo SWAT+, y la carga anual estimada mediante la suma de los aportes generados por las 14 categorías de uso de suelo consideradas en cada subcuenca. Los coeficientes de exportación fueron ajustados iterativamente hasta alcanzar la mejor concordancia entre cargas observadas y modeladas, obteniéndose así un conjunto de coeficientes representativos para cada contaminante y tipo de cobertura o uso de suelo, considerando diferentes subcuencas (río Maipo, río Mapocho, río Puangue, río Clarillo) y periodos con información disponible.

Para el uso de suelo asociado a la extracción de áridos, se analizaron los datos de calidad del agua disponibles del estudio GORE–AquaExpert (2024), correspondientes a campañas realizadas en 2023 y 2024, con el objetivo de identificar una señal de impacto aguas abajo de las áreas intervenidas. Las ubicaciones de los puntos de monitoreo para áridos se presentan como cruces verdes en la Figura 69. Para los contaminantes evaluados, no se identificó una señal consistente atribuible a esta actividad, ya que los cambios de concentración observados entre estaciones no presentaron un comportamiento sistemático entre campañas. Solo para cloruros se identificó una señal de impacto en un sector del río Puangue, a partir de la cual se estimó preliminarmente un coeficiente de exportación. Sin embargo, debido al reducido tamaño de las áreas intervenidas y a su limitada representatividad a escala de cuenca, este coeficiente fue desestimado para el cálculo final de cargas. En consecuencia, la extracción de áridos no se consideró como fuente difusa para los restantes contaminantes. Se considera que su evaluación requiere campañas específicas de monitoreo local, con mediciones simultáneas de caudal y calidad de agua, aguas arriba y aguas abajo de las áreas intervenidas y en múltiples periodos, para mejorar la representatividad de los resultados.

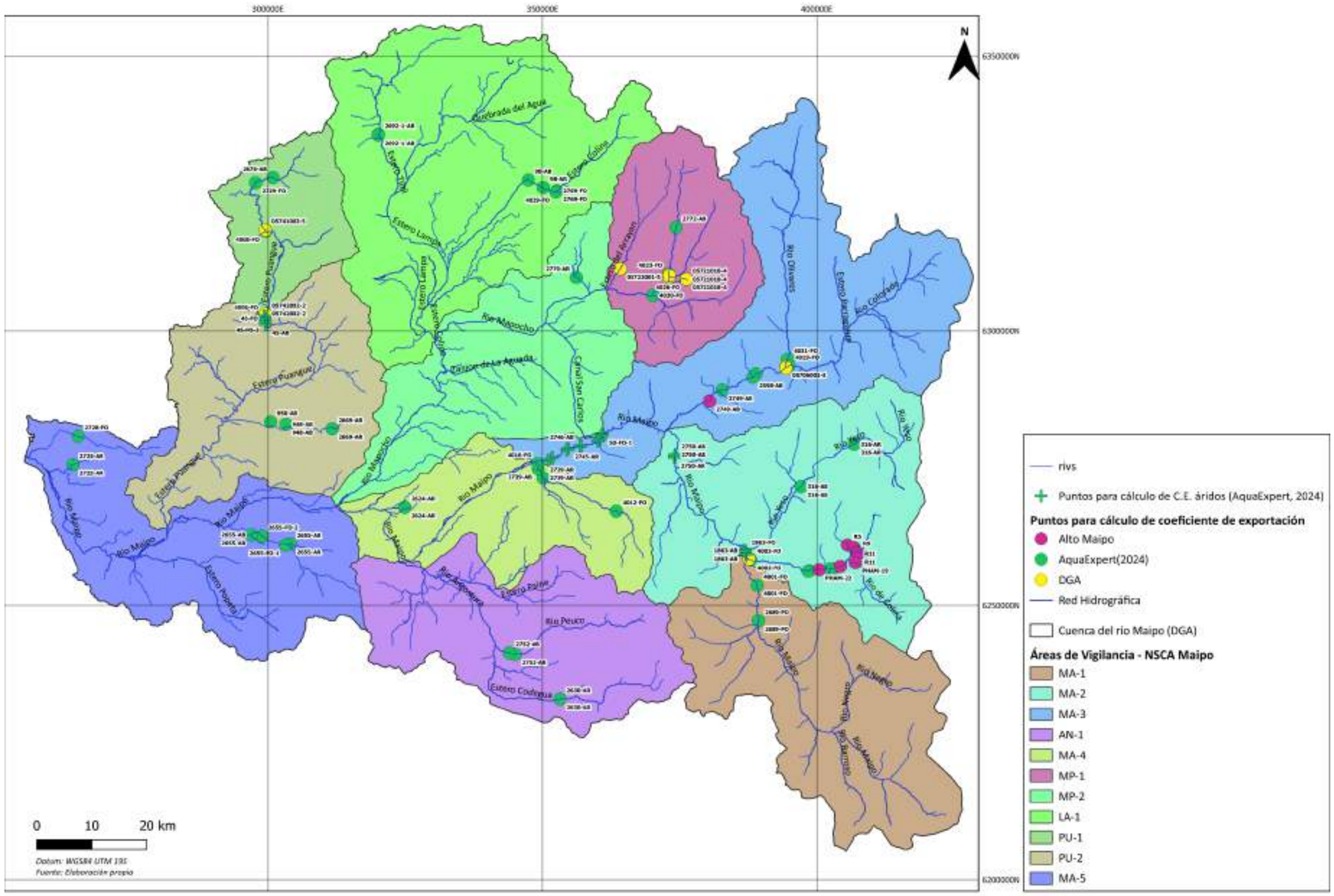


Figura 69 – Ubicación de puntos donde se consideró el cálculo de los coeficientes de exportación de contaminantes de la cuenca del río Maipo.

Tabla 59 – Usos de suelo considerados en el cálculo de coeficientes de exportación de contaminantes

ID	Uso de suelo
1	Áreas desprovistas de vegetación
2	Áreas urbanas e industriales
3	Bosques
4	Agua
5	Extracción de áridos
6	Humedales
7	Minería Industrial
8	Nieves eternas y glaciares
9	Praderas y matorrales
10	Agrícola
11	Agrícola con riego de PTRiles
12	Vertederos
13	Rocas desnudas con impacto en la calidad del agua
14	Pecuario

5.3.1 Evaluación de incertidumbre

La estimación de coeficientes de exportación presenta diversas fuentes de incertidumbre que deben ser consideradas durante la interpretación de los resultados, debido a que la metodología se basa en información obtenida en terreno y modelación hidrológica.

En el presente estudio se identificaron cuatro fuentes principales de incertidumbre: incertidumbre hidrológica, incertidumbre asociada al monitoreo de calidad de agua, incertidumbre derivada del tratamiento de información faltante e incertidumbre asociada al procedimiento de optimización.

5.3.1.1 Incertidumbre hidrológica

La estimación de cargas contaminantes depende del caudal utilizado durante el cálculo. En aquellas estaciones donde no existieron registros observados coincidentes con las campañas de monitoreo, se utilizaron caudales medios mensuales obtenidos mediante el modelo hidrológico SWAT+. El desempeño del modelo fue previamente evaluado mediante un proceso de calibración hidrológica, cuyos resultados se presentan en la sección 5.2.1 – Validación hidrológica. La incertidumbre del modelo hidrológico se transfiere directamente a la estimación de cargas y, por consiguiente, a los coeficientes de exportación. No obstante, la utilización de un modelo hidrológico previamente calibrado permitió disponer de una representación espacialmente consistente de los caudales para todas las subcuencas analizadas, ampliando significativamente la cobertura del estudio.

Para abordar explícitamente esta incertidumbre, se definieron bandas de error porcentuales para los caudales simulados a partir de los valores de PBIAS (%) obtenidos durante la calibración (ver sección 5.2.1 – Validación hidrológica), las cuales se transfieren a la estimación de cargas de contaminantes directamente. Los resultados de las bandas porcentuales de error de caudales, y por consiguiente de los coeficientes de exportación, se presentan en la Tabla 56. En MA-2, las bandas de error de los caudales van desde 0% a 105%, por lo que los coeficientes de exportación estimados serán menores a los estimados en este informe.

En AN-1, las bandas de error porcentuales de caudales y coeficientes de exportación van desde 100 a 231%, lo que sugiere que los coeficientes podrían alcanzar valores superiores a los estimados. En MP-1, las bandas varían entre 66 % y 168 %, excluyendo Estero Arrayán debido a la ausencia de estimaciones de caudal y coeficientes para dicha estación. Para el resto de la cuenca se adoptó un enfoque conservador, utilizando las bandas extremas observadas (0 %–233 %) como referencia para interpretar la incertidumbre asociada a los coeficientes de exportación estimados.

5.3.1.2 Incertidumbre asociada al monitoreo de calidad de agua

Las concentraciones utilizadas corresponden a campañas discretas de monitoreo realizadas en fechas específicas. Por esta razón, las concentraciones representan las condiciones existentes al momento del muestreo y no necesariamente el comportamiento continuo de cada contaminante durante todo el año hidrológico. Sin embargo, la utilización de múltiples campañas distribuidas entre distintos años hidrológicos permite reducir parcialmente esta incertidumbre y obtener coeficientes representativos de una amplia variedad de condiciones ambientales.

5.3.1.3 Incertidumbre asociada al tratamiento de información faltante

Para ortofosfato y zinc disuelto fue necesario estimar algunas concentraciones utilizando relaciones empíricas desarrolladas específicamente para la cuenca del río Maipo. Su utilización introduce incertidumbre adicional respecto de las mediciones directas, sin embargo, esta aproximación permitió incrementar significativamente el número de observaciones disponibles para ambos contaminantes y mejorar la representatividad espacial de la estimación.

5.3.1.4 Incertidumbre asociada al procedimiento de optimización

Los coeficientes de exportación fueron obtenidos mediante un procedimiento de optimización numérica y, por tanto, corresponden a parámetros inferidos a partir de las cargas observadas. En consecuencia, la incertidumbre asociada al procedimiento depende tanto de la calidad de la información de entrada como de la representatividad espacial de los usos de suelo presentes en cada subcuenca.

Los mayores niveles de incertidumbre se presentan en aquellas categorías cuya superficie es reducida o cuya representación espacial resulta limitada dentro de la base de datos utilizada, como ocurre en sectores de vertederos, zonas de actividad pecuaria intensiva y minería. Por el contrario, los usos de suelo ampliamente representados dentro de la cuenca presentan coeficientes más robustos debido a que fueron estimados utilizando un mayor número de observaciones distribuidas en distintas subcuencas y condiciones hidrológicas.

En conjunto, se considera que las incertidumbres identificadas son consistentes con estudios de escala regional y no comprometen la utilidad de los coeficientes de exportación obtenidos para los fines del presente estudio.

5.3.1.5 Incertidumbre asociada transferencia espacial y temporal

En las estimaciones de carga se considera una fuente adicional de incertidumbre asociada a la transferencia de coeficientes de exportación hacia aquellos sectores y/o periodos que no cuentan con información local suficiente para estimar un coeficiente propio. Esta transferencia puede ser geográfica, cuando se utiliza un coeficiente estimado en otro sector con características de uso de suelo similares, o temporal, cuando se

utiliza un coeficiente estimado para un tipo de año hidrológico o periodo con información disponible para representar otro periodo sin observaciones suficientes.

La incertidumbre asociada refleja las posibles diferencias entre el área o periodo de origen y aquel en que se aplica el coeficiente, particularmente en términos de condiciones climáticas, hidrológicas, geológicas y características de las actividades asociadas al uso de suelo. Dado que no se dispone de información suficiente para cuantificar de manera robusta el efecto de estas diferencias, no se aplica un factor de ajuste ni un intervalo numérico adicional. Por lo tanto, las cargas estimadas mediante coeficientes transferidos deben interpretarse como aproximaciones y presentan una incertidumbre mayor que aquellas obtenidas a partir de coeficientes estimados directamente con información local y para el mismo periodo.

5.3.2 Nitrógeno de nitrato

Los resultados de coeficientes de exportación de nitrógeno de nitrato (NO_3^--N) se presentan en la Tabla 60. Los coeficientes presentan una importante variabilidad temporal y espacial entre subcuencas y usos de suelo. Se observa en general un aumento de las cargas exportadas durante los años más húmedos 2023 y 2024, posteriores al prolongado periodo de megasequía registrado en la zona central de Chile entre aproximadamente 2010 y 2022. Este comportamiento se observa particularmente en usos de suelo asociados a actividad agrícola, áreas urbanas y minería, donde las mayores precipitaciones y caudales favorecen procesos de lavado de suelos, movilización de nitrógeno acumulado y aumento de la conectividad hidrológica.

En los usos agrícolas ($X_{NO3,10}$ y $X_{NO3,11}$), especialmente en áreas con riego mediante aguas tratadas, se observan incrementos significativos durante 2023–2024, alcanzando valores de hasta 1,6 kg/ha/año en el Maipo medio/bajo. De forma similar, las áreas urbanas e industriales ($X_{NO3,2}$) muestran aumentos notorios en 2024, donde se registran valores máximos de 0,2 kg/ha/año, asociados al arrastre superficial y descargas urbanas durante eventos de precipitación y deshielo. Además, se estimó el coeficiente de exportación de zonas urbanas en cordillera, como La Parva (subcuenca Estero Manzanito), las cuales cuentan con Plantas de tratamiento de aguas servidas. De forma notoria aumentan los nitratos en invierno y disminuyen drásticamente a cero en verano, lo que se ve reflejado en los coeficientes de exportación de zonas urbanas en esta zona (coeficientes de exportación de nitratos superan los 10 kg/ha/año en invierno).

En contraste, los usos asociados a coberturas naturales, como bosques ($X_{NO3,3}$), humedales ($X_{NO3,6}$), praderas y matorrales ($X_{NO3,9}$) y nieves eternas/glaciares ($X_{NO3,8}$), presentan en general coeficientes muy bajos y relativamente estables en el tiempo, consistentes con sistemas de menor intervención antrópica y menores aportes directos de nitrógeno. Sin embargo, es importante destacar que los coeficientes de exportación de nitratos de coberturas vegetales son más altos para zonas altas de la cuenca, que, para zonas bajas, debido a la intensidad de erosión que sufren estas cubiertas en montaña. Para el caso de las áreas desprovistas de vegetación ($X_{NO3,1}$), los coeficientes permanecen cercanos a cero durante gran parte del periodo analizado, aunque se observan aumentos moderados en años húmedos en el Maipo alto y Maipo medio/bajo, probablemente asociados a una mayor movilización de nitrato acumulado en sedimentos y regolito superficial.

Respecto de la actividad minera ($X_{NO3,7}$), se identifican diferencias importantes entre subcuencas. En el Maipo alto se observan coeficientes de exportación extremadamente elevados y altamente variables (rondando los 50-100 kg/ha/año), alcanzando un máximo de 1.126 kg/ha/año en 2024, lo que sugiere una fuerte influencia de actividades mineras no metálicas, depósitos y materiales mineralizados expuestos, manejo de botaderos de estériles con volúmenes mayores de roca removida y procesos de oxidación de compuestos nitrogenados asociados al uso histórico de explosivos. En contraste, en sectores de minería

metálica de menor impacto relativo, como la mina en el río San Francisco, los coeficientes estimados son considerablemente menores y cercanos a cero en varios años, indicando una contribución regional comparativamente baja en relación con otras fuentes de nitrato presentes en la cuenca.

Finalmente, para el uso de suelo "Rocas con influencia en la calidad del agua" ($X_{NO3,13}$), se optó por utilizar coeficientes equivalentes a los definidos para áreas desprovistas de vegetación ($X_{NO3,1}$), dado que esta categoría fue originalmente incorporada para representar aportes geogénicos de contaminantes asociados principalmente a cloruro, sulfato y metales como zinc, sin evidenciarse un aporte sistemático relevante de nitrato asociado a estas unidades geológicas.

5.3.3 Fósforo de Ortofosfato

Debido a la limitada disponibilidad de resultados de concentración de ortofosfato (PO_4^{-3}-P) en el monitoreo de calidad del agua de la cuenca del Río Maipo, se optó por estimar dichas concentraciones a partir de mediciones de fósforo total, utilizando la relación $[PO_4^{-3} - P] = 0.42[P_{total}]$. Esta relación fue obtenida empíricamente a partir del promedio de las razones entre las concentraciones de ortofosfato y fósforo total medidas simultáneamente en los mismos puntos de monitoreo de la cuenca del río Maipo.

De manera inusual, las subcuencas que presentan los mayores coeficientes de transporte de fósforo, expresados en kg/ha/año, corresponden al sector del Maipo Alto, particularmente en las zonas de estero Morado, Las Placas y La Engorda. En estas se emplaza el glaciar El Morado. Los coeficientes de exportación estimados para estas subcuencas alcanzan valores cercanos a 1 kg/ha/año de PO_4^{-3}-P. Esto se debe probablemente a la erosión intensa de cubiertas vegetales durante periodos de deshielo, pero además se suma la incertidumbre metodológica asociada a la estimación de concentraciones de fosfato. Los máximos coeficientes se obtuvieron durante diciembre/enero para Maipo Alto en cubiertas de praderas y matorrales, lo que respaldaría esta teoría.

De las subcuencas intervenidas por actividades humanas, Río Clarillo y Estero Cholqui presentan valores de 0,2 y 0,18 kg/ha/año de PO_4^{-3}-P, respectivamente, donde la actividad agropecuaria influye en los resultados. Las subcuencas con coeficientes de exportación de ortofosfatos nulos son las de las cabeceras de Estero Puangue, Colina y Tiltil.

Los resultados se presentan en la Tabla 61. Los coeficientes de exportación de ortofosfato (kg/ha/año) muestran una marcada variabilidad espacial, controlada por el tipo de uso de suelo y por la estacionalidad hidrológica de la cuenca. En términos generales, y como se mencionó anteriormente, los mayores aportes se concentran en las subcuencas del río Maipo Alto y del río Mapocho Alto, mientras que las zonas del Maipo Medio, Maipo Bajo y estero Puangue presentan contribuciones significativamente menores o nulas en la mayoría de las categorías evaluadas.

Entre los usos de suelo, destacan los menores coeficientes asociados a áreas desprovistas de vegetación ($X_{PO4,1}/X_{PO4,13}$), cuerpos de agua ($X_{PO4,4}$) y nieves eternas y glaciares ($X_{PO4,8}$). En el caso de áreas urbanas ($X_{PO4,2}$), se observa un comportamiento especialmente elevado en el Mapocho Alto, lo que se asocia a la presencia de centros de ski y su infraestructura asociada, incluyendo plantas de tratamiento de aguas servidas. En este contexto, los mayores valores se concentran durante el invierno, coincidiendo con la temporada alta de operación turística, lo que sugiere una fuerte influencia estacional en las cargas de ortofosfato. Algo similar ocurre en Maipo alto, donde se observan valores altos, lo que podría estar influenciado por descargas de aguas servidas o alta sensibilidad de los parámetros. Para el resto de áreas urbanas, el coeficiente de exportación se mantiene cercano a cero.

Los humedales ($X_{PO4,6}$) poseen valores entre los 0,01 y 0,25 kg/ha/año, lo cual puede deberse a la saturación del sistema o descomposición de materia orgánica. Los bosques ($X_{PO4,9}$) poseen valores entre 0,01 y 3,9 kg/ha/año en Maipo alto, posiblemente por efectos erosivos del derretimiento de nieves y glaciares. Estos valores oscilan entre 0,001 y 0,003 kg/ha/año en Mapocho alto. En Río Maipo bajo estos valores son nulos.

El uso de suelo agrícola con riego de aguas tratadas ($X_{PO4,11}$) muestra valores de coeficientes de exportación de fosfatos más altos (hasta 1,3 kg/ha/año) que los de uso agrícola sin riego de aguas tratadas ($X_{PO4,10}$), con valores cercanos a 0. La actividad pecuaria intensiva ($X_{PO4,14}$) presenta valores de hasta 0,4 kg/ha/año en 2024 y los vertederos ($X_{PO4,12}$) hasta 3 kg/ha/año, con incrementos relevantes en 2024 comparado con 2023.

Finalmente, extracción de áridos ($X_{PO4,5}$) se consideró como un uso con nula contribución directa. En conjunto, los resultados evidencian que las mayores cargas de ortofosfato están fuertemente controladas por actividades antrópicas concentradas en zonas específicas de la cuenca, con una clara variación estacional en sectores de alta montaña asociados a actividad turística invernal.

5.3.4 DBO_5

Al analizar las subcuencas de cabecera con mayores aportes de DBO_5, se observa que los sectores de montaña presentan los valores más elevados, en concordancia con los resultados previamente obtenidos para fosfatos y nitratos. Este patrón podría estar asociado a la alta erosión generada por el deshielo de nieves y glaciares, así como al arrastre de vegetación.

Los coeficientes de exportación de DBO5 alcanzan valores máximos de hasta 96 kg/ha/año en el estero Las Placas. Asimismo, el río Maipo en el área de vigilancia MA-1, el río Volcán y el río San Francisco presentan valores superiores a 50 kg/ha/año. El estero Manzanito, que drena aguas provenientes de centros de esquí, registra valores máximos de 36 kg/ha/año. En contraste, las subcuencas con menores valores se localizan en sectores bajos de la cuenca, incluyendo las cabeceras del río Puangue, el estero Tiltil y el estero Colina.

Los resultados de coeficientes de exportación de DBO_5 en kg/ha/año se presentan en la Tabla 62. A partir de los coeficientes de exportación de DBO_5 en la cuenca del río Maipo, se observa una marcada variabilidad temporal, con un aumento generalizado de los valores en el período más reciente (2023–2024), especialmente en sectores de cabecera y media cuenca. Este incremento es consistente con condiciones más húmedas, lo que favorece procesos de escorrentía, movilización de materia orgánica y conectividad hidrológica entre suelos, cauces y zonas productivas. En contraste, los años previos presentan valores más bajos o más intermitentes, lo que sugiere una fuerte dependencia del régimen hidrológico interanual en la exportación de DBO_5.

Desde el punto de vista espacial, se evidencia un patrón claro de disminución progresiva de los coeficientes desde la cordillera hacia los sectores bajos de la cuenca. Las mayores exportaciones se concentran en zonas de cabecera, asociadas a condiciones más “naturales” o de alta energía hidrológica, como nieve, matorrales, bosques y praderas. En cambio, hacia el Maipo medio y bajo, los valores tienden a ser más variables, pero generalmente menores, aunque con excepciones puntuales asociadas a acción antrópica. En particular, el sector del Mapocho alto muestra incrementos relevantes asociados a influencia urbana e industrial, alcanzando valores entre 1 y 300 kg/ha/año, lo que refleja una fuerte contribución de fuentes antrópicas localizadas.

En relación con los usos de suelo antrópicos, destaca el impacto de la actividad minera ($X_{DBO5,7}$), con coeficientes elevados y relativamente consistentes en el tiempo, alcanzando valores del orden de cientos de kg/ha/año en ciertos sectores de Maipo alto y medio (por ejemplo, >1.000 kg/ha/año en algunos puntos del periodo reciente). Asimismo, la actividad pecuaria intensa ($X_{DBO5,14}$), también muestra contribuciones relevantes, con valores del orden de 5 kg/ha/año. Respecto al uso de aguas tratadas para riego ($X_{DBO5,11}$), se observa efectivamente una señal de impacto, aunque más moderada y localizada, con aumentos en sectores del Maipo medio y bajo en 2023–2024 (del orden 0,2 a 25 kg/ha/año), lo que sugiere una contribución secundaria pero detectable en la exportación de DBO_5.

5.3.5 Cloruro

A partir de la información recopilada, se observa una marcada variación espacial en los coeficientes de exportación de cloruro entre las distintas subcuencas analizadas. Los mayores valores se registran en la subcuenca del río Volcán, con valores de hasta 4.866 kg/ha/año en el área de drenaje de la Mina Lo Valdés, seguida por el río Maipo alto (sector MA-1), con hasta 1.585 kg/ha/año, y el río Olivares, con valores máximos del orden de 568 kg/ha/año, durante el periodo de crecidas 2023–2024. En contraste, se observan valores muy bajos en las subcuencas del Estero Puangue (PU-1), Estero de Leyda (MA-5) y Estero Tiltil (LA-1), donde predominan coberturas de bosque y praderas/matorrales, con menor influencia geológica directa sobre la calidad del agua.

La variabilidad espacial y temporal observada en las concentraciones y cargas de cloruro sugiere que los principales factores controladores a escala de cuenca corresponden a las condiciones geológicas e hidrogeológicas, junto con las características hidrológicas interanuales (años secos, normales o húmedos), las cuales controlan significativamente la dilución y concentración de solutos. En este contexto, las unidades volcanosedimentarias y sedimentarias mesozoicas desempeñan un rol relevante en la disponibilidad de cloruros, destacando la Formación Colimapu (Kc), asociada a ambientes continentales y lacustres con posible desarrollo de condiciones salobres, y la Formación Lo Valdés (Kilv), de origen marino, que puede contener sales marinas relictas incorporadas durante su historia deposicional (SERNAGEOMIN, 1980).

Adicionalmente, se reconoce la influencia de procesos hidrotermales asociados a la actividad volcánica andina, así como la presencia de manantiales termales de tipo clorurado-sódico (Vergara, 2022), los cuales afloran principalmente en sectores estructuralmente controlados dentro de la Formación Lo Valdés y unidades adyacentes. Estos sistemas hidrotermales pueden aportar cloruro mediante la interacción con fluidos profundos y su ascenso a través de estructuras tectónicas, contribuyendo a las anomalías observadas en cabeceras de cuenca.

En relación con la clasificación de uso de suelo, la categoría “Rocas desnudas con impacto en la calidad del agua” actualmente incorpora la Formación Lo Valdés; sin embargo, no incluye la Formación Colimapu, a pesar de su potencial contribución geoquímica. Asimismo, esta categoría agrupa también rocas volcánicas que no presentan necesariamente un impacto significativo en el transporte de cloruro, particularmente en la cabecera del río Volcán (esteros Las Placas, La Engorda y El Morado), donde predominan litologías volcánicas con menor contribución salina.

En consecuencia, para este análisis se ajustó la clasificación de uso de suelo, incorporando explícitamente las Formaciones Colimapu (Kc) y Lo Valdés (Kilv) dentro de la categoría “Rocas desnudas con impacto en la calidad del agua”, mientras que el resto de las unidades geológicas aflorantes en terreno se mantuvieron clasificadas como “Áreas desprovistas de vegetación”, con el fin de reflejar de manera más consistente su potencial influencia hidrogeoquímica sobre la exportación de cloruro.

Los resultados de los coeficientes de exportación de cloruro por uso de suelo j, $X_{Cl-,j}$, se presenta en la Tabla 63. Los coeficientes de exportación de cloruros estimados presentan una alta variabilidad temporal y espacial entre subcuencas y años hidrológicos, observándose en general un incremento de las cargas exportadas durante los años más húmedos 2023 y 2024 en comparación con el periodo de megasequía registrado entre 2010 y 2022, lo que evidencia una fuerte dependencia de los procesos de movilización y transporte de contaminantes respecto de las condiciones hidrológicas. Este comportamiento es especialmente notorio en los coeficientes $X_{Cl-,1}$, $X_{Cl-,2}$, $X_{Cl-,7}$, $X_{Cl-,10}$ y $X_{Cl-,11}$, donde los valores aumentan considerablemente en 2023–2024 respecto de años anteriores, reflejando una mayor conectividad hidrológica, escorrentía superficial y lavado de sales y contaminantes acumulados en suelos, depósitos sedimentarios y zonas urbanas durante el periodo seco previo.

En términos espaciales, los mayores coeficientes de exportación se registran sistemáticamente en subcuencas de alta montaña y sectores con fuerte influencia minera o geológica. Destacan particularmente los valores asociados a $X_{Cl-,7}$ (minería) en río Colorado, donde se observan exportaciones elevadas y crecientes entre 2018 y 2024, alcanzando hasta 499.540 kg/ha/año en 2024. Asimismo, se observan valores altos en Mina Lo Valdés (río Volcán), El Teniente (estero Codegua) y Los Bronces (río San Francisco), sugiriendo una fuerte influencia de litologías mineralizadas, alteración hidrotermal y actividades mineras sobre la generación y transporte de contaminantes. Vertederos ($X_{Cl-,12}$), rocas con impacto en la calidad del agua ($X_{Cl-,13}$) y actividad pecuaria ($X_{Cl-,14}$) también registran una fuerte influencia en la carga de cloruros en los cursos de agua. La cobertura de suelo "Nieves eternas y glaciares" ($X_{Cl-,8}$) tiene un aporte considerable, dado que cubre rocas que tienen un impacto alto en la calidad del agua.

Por otro lado, subcuencas con predominancia de coberturas vegetacionales naturales (bosques, cultivos y praderas) y menor intervención antrópica, como en la cabecera de los ríos Puangue y Clarillo, presentan en general coeficientes bajos o nulos durante gran parte del periodo analizado, aunque con aumentos puntuales en años húmedos, evidenciando la importancia del régimen hidrológico sobre la exportación de contaminantes incluso en sistemas menos intervenidos. En conjunto, los resultados muestran que los coeficientes de exportación no son parámetros estáticos, sino que responden dinámicamente tanto a las condiciones hidrológicas interanuales como a las características geológicas, geomorfológicas y de uso de suelo de cada subcuenca.

Con respecto a resultados de aportes de cloruros del uso de suelo extracción de áridos, no se observa una tendencia clara en los sectores de Maipo alto, Maipo medio, y río Puangue, donde las concentraciones de cloruro tanto aumentan como disminuyen aguas abajo de faenas de extracción de áridos. El mayor aumento de concentración observado es en la estación número 1863 (-AR, -AB), con un aumento en abril de 2024 de 69 mg/L. Sin embargo, en esta misma ubicación, la concentración de cloruros disminuye en 97 mg/L en noviembre de 2023. En esta zona, el aporte de cloruros viene predominantemente y en la gran proporción de rocas volcánicas que la rodean, por lo que la determinación del coeficiente de exportación de cloruros desde el uso de suelo extracción de áridos está sujeto a un alto grado de error. En la zona de Maipo Medio, también se observan aumentos y disminuciones de concentración de cloruro, posiblemente influenciados por aportes de aguas subterráneas, por lo que no se determinó el coeficiente de exportación en esta zona. Finalmente, en la zona de Puangue, se observa un ligero aumento de la concentración de cloruros en dos tramos de tres de la zona estudiada (45-AR/45-FO/45-FO-2/45-AB) por GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA (2024). La estimación de $X_{Cl-,5}$ es de 3,8 kg/ha/año.

5.3.6 Zinc disuelto

Los datos de concentraciones de zinc disuelto también mostraron una limitada disponibilidad de resultados en el monitoreo de calidad del agua de la cuenca del Río Maipo, por lo que se optó por rellenar vacíos de la

información a partir de mediciones de zinc total, utilizando la relación $[Zn_{dis}] = 0.34[Zn_{total}]$ para Maipo Alto y $[Zn_{dis}] = 0.71[Zn_{total}]$ para Mapocho Alto. Estas relaciones fueron obtenidas empíricamente a partir del promedio de las razones entre las concentraciones de zinc disuelto y zinc total medidas simultáneamente en los mismos puntos de monitoreo de la cuenca del río Maipo.

De la información recopilada, se observa que los mayores coeficientes de exportación por subcuenca provienen de las cuencas Río Colorado (28,3 kg/ha/año) y río Olivares (6,0 kg/ha/año) en noviembre de 2023, bajo condiciones casi naturales, y Río San Francisco (2,3 kg/ha/año) y Volcán (1,8 kg/ha/año) en 2023, asociado a actividades mineras. La subcuenca de Yerba Loca también presenta altos coeficientes de exportación de zinc disuelto en condiciones naturales, alcanzando valores de hasta 0,8 kg/ha/año.

Los resultados de coeficientes de exportación de zinc disuelto se presentan en la Tabla 64. Los coeficientes de exportación de zinc presentan una marcada variabilidad espacial y temporal, siendo generalmente bajos para las áreas urbanas ($X_{Zn,2}$), humedales ($X_{Zn,6}$), nieves y glaciares ($X_{Zn,8}$), así como para los distintos usos agrícolas ($X_{Zn,10}$). Las zonas urbanas ($X_{Zn,2}$) registran valores cercanos a cero en toda la cuenca, con un máximo de 0,009 kg/ha/año en el Mapocho Alto durante 2024. De igual forma, los humedales mantienen coeficientes bajos y estables a lo largo del período analizado. En el caso de las áreas agrícolas, no se observa una influencia significativa de los riegos con aguas tratadas sobre la exportación de zinc, mientras que la actividad pecuaria intensiva tampoco muestra aportes relevantes, salvo algunos incrementos observados en 2024 que podrían estar asociados a la sensibilidad del modelo o a incertidumbres en los datos de entrada. Los vertederos presentan coeficientes intermedios en el Maipo Medio, principalmente asociados al vertedero Santa Marta y a la subcuenca del río Clarillo.

Los usos de suelo asociados a ambientes naturales de montaña muestran una respuesta más marcada frente a las condiciones hidrológicas. Los bosques presentan coeficientes generalmente bajos, aunque aumentan durante los años más húmedos 2023 y 2024, probablemente debido a una mayor erosión y transporte de sedimentos. La principal excepción corresponde al Maipo Alto, donde los valores son persistentemente más elevados, posiblemente como consecuencia de las características geológicas y edáficas de la zona. De manera similar, las áreas de nieves y glaciares alcanzan hasta 0,033 kg/ha/año durante los años lluviosos, lo que podría estar asociado al aumento de la escorrentía y los procesos de deshielo. Por su parte, las praderas y matorrales presentan los coeficientes de exportación más elevados dentro de los usos de suelo naturales, especialmente en el Maipo Alto y, en menor medida, en el Maipo Medio. Este comportamiento podría explicarse por la mayor acumulación de suelo y material meteorizado en comparación con áreas de roca y suelo desnudo, lo que favorece la liberación de zinc mediante procesos de meteorización química y su posterior transporte durante eventos de escorrentía. Adicionalmente, no puede descartarse una contribución de origen hidrotermal en sectores cordilleranos. En este sentido, la presencia de sistemas termales en el río Colina —tributario del río Volcán— de tipo clorosulfato sódico, sugiere una posible fuente natural de metales disueltos, incluyendo zinc, asociados a la influencia del sistema volcánico del complejo del volcán San José (GOChile, n.d.)

Las mayores exportaciones de zinc se observan en las zonas con actividad minera. Hasta 2022, la subcuenca de Yerba Loca presentó los coeficientes de exportación más elevados del Mapocho Alto, sugiriendo una importante contribución natural asociada a la meteorización de rocas mineralizadas presentes en la cordillera. Esta interpretación es consistente con los relativamente bajos coeficientes estimados para las áreas asociadas a la operación minera ubicada en la subcuenca del río San Francisco. Sin embargo, durante las temporadas lluviosas de 2023 y 2024 se observa un aumento significativo de las cargas exportadas desde sectores influenciados por actividad minera, alcanzando coeficientes de hasta 12,9 kg/ha/año en río San Francisco y 4,4 kg/ha/año en el área asociada a subcuenca del Estero Codegua durante 2023. Este

comportamiento coincide con las precipitaciones extremas registradas en la zona central de Chile, las cuales probablemente intensificaron los procesos de erosión, escorrentía y movilización de material mineralizado, favoreciendo el transporte de zinc disuelto y particulado hacia la red hidrográfica.

5.3.7 Sulfatos

Las tasas de exportación de sulfatos son más elevadas que el resto de los contaminantes del estudio. Al analizar los valores de coeficientes de exportación por subcuenca, se tiene que Río Volcán y sus tributarios estero La Engorda y estero Morado alcanzan coeficientes de exportación por sobre 1.000 kg/ha/año de sulfatos. También llegan a sobrepasar este valor las subcuencas de río Olivares, estero Yerba Loca y Río Maipo en el área de vigilancia MA-1. Valores de exportación bajos por subcuencas se reflejan en Maipo Bajo. Posiblemente las altas concentraciones de sulfatos en la zona cordillerana se deban a la geología volcánica y a la contribución de origen hidrotermal, debido a la presencia de termas en Maipo alto, por ejemplo, el sistema termal río Colina, tributario de río Volcán, asociada a la influencia del volcán San José con aguas de tipo clorosulfato sódicas (GOChile, n.d.).

Los resultados de coeficientes de exportación por uso de suelo se presentan en la Tabla 65. Los elevados coeficientes observados en usos de suelo como bosques, praderas y matorrales no necesariamente reflejan una contribución directa de la cobertura vegetal, sino que probablemente responden a la ubicación de estos usos en sectores donde afloran materiales volcánicos, alteración hidrotermal y aguas naturalmente enriquecidas en sulfatos. Asimismo, los incrementos registrados durante los años más húmedos 2023 y 2024 sugieren una mayor movilización de sulfatos producto del aumento de la escorrentía, la erosión de materiales alterados y el lavado de depósitos superficiales acumulados durante períodos más secos.

Entre las fuentes antrópicas de sulfatos destacan principalmente la actividad minera y la actividad pecuaria intensiva. Las áreas asociadas a faenas mineras presentan algunos de los coeficientes de exportación más elevados de toda la cuenca. En particular, la actividad minera en el estero Codegua registra valores alrededor de 8.000 kg/ha/año en 2023 y 2024, mientras que la minería en río Colorado alcanza valores de coeficientes de exportación de hasta 404.000 kg/ha/año en 2023. Por otro lado, la subcuenca del río San Francisco, donde se emplaza Minera Los Bronces, presenta coeficientes de hasta 1.650 kg/ha/año en 2023. Estos resultados evidencian la relevancia de las actividades extractivas como fuente potencial de sulfatos, especialmente en sectores donde existen materiales sulfurados expuestos a procesos de oxidación y lixiviación.

La actividad pecuaria intensiva constituye otra fuente antrópica relevante, particularmente en los sectores medio y bajo de la cuenca del Maipo. Los coeficientes de exportación alcanzan aproximadamente 6.700 kg/ha/año en el Maipo Medio y 1.500 de kg/ha/año en el Maipo Bajo durante 2023, aumentando a cerca de 22.000 y 15.000 kg/ha/año, respectivamente, en 2024. Estos valores sugieren una contribución significativa de sales y compuestos sulfurados asociados al manejo de estiércoles, purines y residuos pecuarios, cuya movilización puede intensificarse durante períodos de altas precipitaciones y escorrentía superficial.

Tabla 60 – Coeficientes de exportación de nitrato (NO_3^--N) en kg/año/ha[4]

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
X1/X13	R. Maipo Alto	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,004	0,006-0,010
	R. Maipo Medio/Bajo										0,050	0,001
	R. Mapocho alto					0	0		0	0	0	0
	R. Mapocho medio/bajo										0,010	
X2	R. Maipo Alto									0-0,005	0,003-0,006	0,143-0,234
	R. Maipo Medio/Bajo										0,005-0,066	0,001
	R. Mapocho alto (centros ski)					0(nov)-0,019(jun)	0		0(nov)-6,3(jun)	0,394(nov)-69,6(jun)	0(nov)-36,4 (jun)	0,005(abr/nov)
X3	R. Maipo Alto					0,010	0,018		0	0,018	0	0,015-2,4
	R. Maipo Medio/Bajo										0	3,5
	R. Mapocho alto					0,340(nov)-0,979(jun)	0,998 (jun)		0,415(jun)-634(nov)	0,672(jun)-0,888(nov)	0-0,005	18,2
	R. Puangue						0				0	
X4	Cuenca Rio Maipo								0			
X5	Cuenca Rio Maipo								No hay tendencias claras			
X6	R. Maipo Alto	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005					0,005	0,002
	R. Maipo Medio/Bajo										0,003	0,001-0,003
	R. Mapocho alto										0-0,004	0,002
X7	R. Maipo Alto						22,4		40,6-180,0	56,1-77,7	10,7-44,2	179,1-1.125,9
	R. Maipo Medio/Bajo										34,6	34,6
	R. San Francisco					0-0,799	0		0	0	0	0
X8	R. Maipo Alto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	
	R. Maipo Medio/Bajo										0,005	0-0,001
	R. Mapocho alto					0	0		0	0	0	0,057
X9	R. Maipo Alto	0,216	0,314	0,311	0,460		0,960	0,310	0,390	0,758		3,7-10,0
	R. Mapocho alto					0,286-0,432		0,167	0,288-0,298	0,257-0,331	0,697-4,177	0,504
	R. Puangue						0				0	
X10	R. Maipo						0,081		0,037	0,002	0,002	3,1
	R. Maipo Medio/Bajo										0,004-0,013	0,004
	R. Mapocho alto											0,431
X11	R. Maipo Medio/Bajo										0,851-1,6	0,853-0,877
X12	R. Maipo Medio/Bajo										0,004	0,056
X14	R. Maipo Medio/Bajo										20,2	100,0

[4] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Tabla 61 – Coeficientes de exportación de fósforo de ortofosfato (PO_4^{-3}-P) en kg/año/ha[5]

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
X1/X13	R. Maipo Alto	0	0	0	0	0	0,001 (0,028 en ene)	0	0 (0,013 en nov/dic)	0	0	0
	R. Mapocho alto										0	0
X2	R. Maipo Alto						0		0,098	0,348	3,268	0,044
	R. Maipo Medio										0	0,001
	R. Maipo Bajo										0	0
	R. Mapocho alto					0,319(nov)-0,405(jun)	0,553(jun)		0,173(nov)-0,509(jun)	0,129(nov)-4,985(jun)	0(oct)-2,1(jun)	0,951
X3	E. Puangue										0	
	R. Maipo Alto						0 (jun)		0,004 (jun)	7,0 (jun)-25,7(nov)	0,230 (may)-12,9(sep)	0,664 (abr)
	R. Maipo Medio										0,004	0,012
	R. Maipo Bajo										0	0
	R. Mapocho alto					0,007	0,004		0,010	0,013	0,062	0,010
	E. Puangue										0	
X4	Cuenca Rio Maipo						0					
X5	Cuenca Rio Maipo						No hay impacto					
X6	R. Maipo Alto	0,054	0,011	0,013	0,030	0,072	0,076	0,011	0,014	0,023	0,010	0,021
	R. Maipo Medio										0,003	0,002
	R. Maipo Bajo											
	R. Mapocho alto					0,109	0,139		0,124	0,043	0,247	0
X7	R. Maipo Alto					0,001	0		0,496	3,9	0,297	0,021
	R. San Francisco										0,022	0,066
X8	R. Maipo Alto	0	0	0	0	0	0,001		0	0,012	0	0
X9	R. Maipo Alto	0,022(0-0,048)	0,048 (0,004-0,098)	0,255 (0,003-0,973)	3,9 (0,006-29,8)	0,241 (0,023-0,550)	0,487 (0,002-3,5)		0,062 (0-0,526)	0,060 (0,002-0,118)	0,012	0,150
	R. Maipo Medio										0,012	0
	R. Maipo Bajo										0	0
	R. Mapocho alto					0	0,001		0	0,003	0,003	0
	E. Puangue										0	
X10	R. Maipo Alto									0,058	0,554	0,579
	R. Maipo Medio										0	0
	R. Maipo Bajo										0	0
	R. Mapocho alto										0	0
	E. Puangue										0	
X11	R. Maipo Medio										0	1,3
	R. Maipo Bajo										0,006	1,0
	E. Puangue										0	
X12	R. Maipo Medio										0	0,002
	R. Mapocho alto										0	3,0
X14	R. Maipo Medio										0,031	0,371
	R. Maipo Bajo										0,006	0,034

[5] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Tabla 62 – Coeficientes de exportación de DBO_5 en kg/año/ha[6]

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
X1/X13	R. Volcán	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,003	0,002			
	R. Maipo Alto					0,002			0		0,002	1,6
	Maipo Medio										4,0	8,9
	Maipo Bajo										0	0,181
	Mapocho alto										0	0,404
X2	R. Maipo Alto					2,5					2,8	2,1
	Maipo Medio								2,0		2,7	0,347
	Maipo bajo										0,320	0,042
	Mapocho alto (centros ski)										1,4	334,4
X3	R. Maipo Alto					189,9			21,4		499,5	500,0
	Maipo medio										0,354	3,5
	Maipo bajo										0,062	0,136
	Mapocho alto										0	32,1
X4	Cuenca Rio Maipo						0					
X5	Cuenca Rio Maipo						**No se pudo determinar el impacto**					
X6	R. Volcán	5,9	11,7	8,8	24,9	8,9	3,3	3,7	5,3			
	R. Maipo Alto					0,218			0,938		0	63,7
	Maipo medio										0,354	3,5
	Maipo bajo										15,8	1,8
X7	R. Maipo Alto					176,3			128,4		0,321	514,9
	E. Codegua										1.055,3	458,4
	Rio San Francisco										5,6	3,2
X8	R. Volcán	0	0,001	0,012	0,002	0,002	0,001	0,001	0			
	R. Maipo Alto					0			0		0,006	7,0
	Maipo Medio										4,0	8,9
	Mapocho Alto										0	99,9
X9	R. Volcán	0,990	1,7	10,7	1,6	4,8	0,651	0,350	0,252			
	R. Maipo Alto					6,0			3,3		32,0	44,1
	Maipo Medio										0,354	3,5
	Maipo Bajo										0,011	0,004
	Mapocho alto										2,3	0,225
X10	Maipo Medio										0,903	
	Maipo Bajo										0	0,007
X11	Maipo Medio										26,8	0,253
	Maipo Bajo										2,0	11,6
X12	Maipo Medio										0	2,9
	Mapocho Alto										136,9	26,6
X14	Maipo Medio										4,8	
	Maipo Bajo										4,9	3,4

[6] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Tabla 63 – Coeficientes de exportación de cloruro (Cl^-) en kg/año/ha[7]

		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
X1	R. Maipo	0	0	0,015	0,001	0,002	0,014	0,020		4,3	
	R. Mapocho				25,6	7,3		6,2	13,4	4,1	9,9
	R. Puangue										
X2	R. Mapocho				22,6	5,0		1,4	1,4	5,5	173,9
X3	R. Puangue									0	0
X4	R. Mapocho				0	0,001		0,001	0,001	0,293	0,181
	R. Puangue									0	0
X5	Cuenca Maipo	No hay tendencia									
	R. Puangue									3,8	
X6	R. Mapocho				0	0,002		0,002	0,002	0,018	0,003
X7	R. Colorado				183.255,1	272.571,1		233.798,1	342.751,5	352.614,0	499.540,3
	R. Volcan									362.871,1	78.548,4
	E. Codegua									394,9	1.281,9
	R. San Francisco									1.506,3	613,7
X8	R. Maipo	0,411	0,837	0,558	0,594	0,240	0,125	0,156		0,318	
	R. Mapocho				0,015	0,381		39,0	0,017	111,7	74,8
X9	R. Puangue									0	0
X10	R. Maipo								0,001-0,027	0-0,020	0,608-2,5
	R. Puangue			0,862	4,4	0,058					
	R. Clarillo									10,0	9,8
X11	R. Maipo								0,086	59,6	
	R. Puangue			4,2	3,3	0,133					
	R. Clarillo									148,4	290,8
X12	Vertedero Santa Marta (Maipo)								160,1		
	Vertedero Rio Colina									7.320,0	
X13	R. Maipo Alto	715,6	999,1	1.343,4	792,2	571,9	50,4	743,9		893,0	
X14	E. Cholqui								3.509,8	9.999,9	
	R. Puangue			4.833,4	41,7	0,231					
	R. Clarillo									4,0	36.641,1

[7] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Tabla 64 – Coeficientes de exportación de zinc disuelto (Zn^{2+}) en kg/año/ha[8]

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
X1	Cabecera R. Volcán	0,001	0	0	0	0	0,001	0	0			
	R. Maipo alto				0,244	0,003	0,003		0,001	0	0,080	0,020
	R. Mapocho alto				0	0,102	0,132		0,065	0,259	0,373	0,851
	R. Mapocho bajo										0,010	0,011
	Maipo Medio										0,007	0,079
X2	R. Maipo alto									0	0	0
	R. Mapocho alto											0,009
	R. Mapocho bajo										0	
	Maipo Medio										0	0,003
	Maipo Bajo										0	0
X3	R. Maipo alto					0,037	0,185		0,191	0,548	1,5	1,5
	R. Mapocho alto										0	0
	R. Mapocho bajo										0	
	Maipo Medio										0	0,014
	Maipo Bajo										0	0,004
X4	Cuenca Rio Maipo								0			
X5	Cuenca Rio Maipo	**No se observa impacto**										
X6	R. Maipo alto								0	0,002	0	0,002
	R. Mapocho alto											0,001
X7	R. Maipo alto				9,0	20,5	0,638		3,3	0,273	5,0	0,269
	R. San Francisco					0	0		0	0,116	0,200-12,9	0,436-8,5
	R. Tiltil										0	
	E. Codegua										4,4	0,103
X8	Cabecera R. Volcán	0	0	0	0	0	0	0	0			
	R. Maipo alto						0		0	0,001	0	0,009
	R. Mapocho alto				0	0,001	0		0,002	0,003	0,024	0,033
X9	Cabecera R. Volcán	0,010	0,016	0,011	0,009	0,347	0,027	0,011	0,011			
	R. Maipo alto				0,019	0,532	0,005		0,021	0,004	0,038	0,116
	R. Mapocho alto				1						0	0
	R. Mapocho bajo										0 (TilTil)-0,026 (Colina)	0,038 (Colina)
	Maipo medio										0,013	0,008
	Maipo bajo										0	0
X10	R. Maipo alto									0	0	0
	R. Tiltil										0	
	Maipo Medio										0,010	0,010
	Maipo bajo										0,001	0
X11	Maipo Medio										0,003	0
	Maipo bajo										0	0
X12	R. Tiltil										0	
	Maipo Medio										0,085	0,023
X13	Cabecera R. Volcán	0	0	0	0	0	0	0	0			
	R. Maipo alto				0,002	0,001	0		0	0,014	0	0
	R. Mapocho alto				0	0	0		0	0	0,418	0,056
X14	Maipo bajo										0	0,079

[8] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Tabla 65 – Coeficientes de exportación de sulfato (SO_4^{-2}) en kg/año/ha[9]

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
X1	R. Volcán	1,4	2,2	9,4	0,692	0,861	7,0	1,2	1,2		4,3	115,7
	R. Maipo Alto					5,4	27,6		17,3	83,8	7,6	42,2
	R. Maipo Medio										9.7	47,9
	R. Maipo Bajo										0,450	0
	R. Mapocho alto					318,9 (X1/X8/X13)	69,6(X1/X8/X13)		376,9(X1/X8/X13)	303,0 (X1/X8/X13)	264,6	9,5
	R. Mapocho bajo										68,6	
X2	R. Volcán										2,6	5,5
	R. Maipo Alto									2,2	2,4	4,6
	R. Maipo Bajo										0,561	2,3
	R. Mapocho alto					620,5				0,030	246,1	272,1
	R. Mapocho bajo										0,001	
X3	R. Volcán										63.573,9	35.681,4
	R. Maipo Alto					1.045,4			19.848,2	6.412,9	37.641,4	21,0
	R. Maipo Alto										15,6	333,9
	R. Maipo Bajo										0,009	3,6
	R. Mapocho bajo										0	
X4	Cuenca Rio Maipo							0				
X5	Cuenca Rio Maipo						**No se observa impacto**					
X6	R. Volcán										30,8	101,9
	R. Maipo Alto					31,1			2,5	121,3	53,8	25,3
	R. Mapocho alto										687,2	34,2
	R. Mapocho bajo										0	
X7	R. Volcán										171,2	4.772,0
	R. Colorado					2.684,8			115.010,9	52.557,4	403.990,4	268.367,9
	E. Codegua										7.833,4	8.413,8
	R. San Francisco					0,931	0		0	119,2	1.646,8	99,5
	E. Tiltil										0,002	
X8	R. Volcán	0,339	0,060	0,196	0,045	1,2	0,001	0,001	0,001		0,347	867,6
	R. Maipo Alto					0,884			0,010	147,5	200,7	170,0
	R. Mapocho alto										9,3	9,2
X9	R. Volcán	202,5	350,6	706,2	193,3	3.149,6	422,3	107,5	147,9		7,1	3.481,2
	R. Maipo Alto					2.669,6			145,8	215,4	33,3	137,9
	R. Maipo Medio										1,6	11,3
	R. Maipo bajo										0,036	0,483
	R. Mapocho alto										98,1	5,8
X10	R. Maipo Medio										41,5	50,7
	R. Maipo Bajo										0	1,6
X11	R. Maipo Medio										110,0	618,8
	R. Maipo Bajo										22,2	19,7
X12	Vert. Santa Marta										55,4	232,4

[9] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Vert. Tiltil										0	
X13	R. Volcán	0,186	0,040	0,211	0,012	0,001	0,001	0,001	0,001		2,3	293,6
	R. Maipo Alto					0,187			0,005	246,8	44,1	406,1
	R. Mapocho alto										1.214,0	2.474,9
	R. Mapocho bajo										73,5	
X14	R. Maipo Medio										6.709,1	22.203,1
	R. Maipo Bajo										1.515,6	15.451,6

6 Estimación de carga anual de parámetros y análisis de sensibilidad

En esta sección se presentan los resultados de la actividad OE4, correspondiente al objetivo específico d) "Estimar la carga anual de parámetros saturados y latentes provenientes de cada tipo de fuente difusa, asociada a los usos de suelo caracterizados fisicoquímicamente", y parte de los resultados de la actividad OE5, correspondiente al objetivo específico e) "Realizar análisis integral de la carga contaminante con perspectiva de cuenca en las áreas de vigilancia de las subcuencas del río Maipo, considerando el comportamiento de los parámetros declarados saturados y latentes".

La estimación de las cargas anuales provenientes de fuentes difusas se realizó a partir de los coeficientes de exportación obtenidos para los distintos usos de suelo caracterizados en la cuenca del río Maipo. El análisis consideró nitrógeno de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$), fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{3-}$), DBO_5, cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) y zinc disuelto (Zn), evaluando tanto la variabilidad de los coeficientes de exportación frente a distintas condiciones hidrológicas como su efecto sobre las cargas estimadas.

Para ello, el análisis se desarrolló en dos etapas. En primer lugar, se evaluó la sensibilidad de los coeficientes de exportación frente a las condiciones de precipitación, diferenciando años hidrológicos muy secos, secos, normales y húmedos. Posteriormente, estos coeficientes se combinaron con las superficies correspondientes a los 14 usos de suelo considerados en la modelación para estimar las cargas aportantes a cada área de vigilancia.

6.1 Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación

El análisis de sensibilidad tuvo como objetivo determinar en qué medida los coeficientes de exportación varían frente a las condiciones hidrológicas de la cuenca y si dicha respuesta difiere según el tipo de uso de suelo, contaminante y ubicación dentro de la cuenca. A partir de los resultados de la Sección 5.3 para cada uno de los seis parámetros analizados, se compararon los coeficientes de exportación en función de su respuesta a años muy secos, secos, normales y húmedos, definidos en la Sección 5.1.3 y diferenciando espacialmente los sectores de Maipo Alto, Mapocho Alto, Maipo Medio y Maipo Bajo, de acuerdo con la disponibilidad de información utilizada para la determinación de los coeficientes.

Se consideraron los 14 usos de suelo definidos en la modelación: áreas desprovistas de vegetación (X1), áreas urbanas e industriales (X2), bosques (X3), cuerpos de agua (X4), extracción de áridos (X5), humedales (X6), minería industrial (X7), nieves y glaciares (X8), praderas y matorrales (X9), agricultura (X10), agricultura con aplicación de aguas tratadas (X11), vertederos (X12), rocas con impacto geológico (X13) y actividad pecuaria intensiva (X14).

Las áreas de vigilancia fueron agrupadas espacialmente de la siguiente manera:

- Maipo Alto: MA-1, MA-2 y MA-3.
- Mapocho Alto: MP-1.
- Maipo Medio: MA-4, AN-1, LA-1 y MP-2.
- Maipo Bajo: MA-5, PU-1 y PU-2.

Es importante destacar que, si bien el año 2023 fue clasificado como un año hidrológicamente normal, su precipitación anual se ubicó muy próxima al umbral que separa las categorías de año normal y año húmedo. Adicionalmente, durante ese año se observaron evidencias de un aumento en las cargas de contaminantes asociado al efecto de lavado generado por las precipitaciones intensas posteriores al período de

megasequía. Considerando estos antecedentes, y con el propósito de evaluar un escenario más representativo de condiciones de recuperación hidrológica, para el presente análisis de sensibilidad los coeficientes de exportación correspondientes al año 2023 fueron agrupados dentro de la categoría de años húmedos.

La Tabla 66 y Figura 70 presentan el análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Nitrógeno de Nitrato (en kg/ha/año) para los escenarios de precipitación de año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo y para distintas áreas de la cuenca. De los resultados se observa que la sensibilidad de los coeficientes de exportación frente a las condiciones hidrológicas no es homogénea entre los distintos usos de suelos. En general, la mayor sensibilidad se manifiesta en usos de suelo asociados a actividades antrópicas o a sectores de alta montaña, donde el transporte de contaminantes depende fuertemente de la generación de escorrentía. En usos de suelo de zonas urbanas y/o industriales (X2), específicamente en Maipo Alto, el coeficiente aumenta de 0,003 a 0,1 en años húmedos. En bosques (X3) se presenta un incremento en años húmedos en Maipo Alto, pero en Mapocho alto los valores son altos en años secos, posiblemente por condiciones locales. Los humedales (X6) y nieves (X8) presentan una sensibilidad muy baja. En cambio, la minería (X7) corresponde a uno de los usos de suelo más sensibles. En la minería no metálica del Maipo Alto el coeficiente aumenta desde aproximadamente 67–81 kg/ha/año en años secos hasta cerca de 340 kg/ha/año en años húmedos, lo que evidencia una fuerte dependencia de la movilización de contaminantes por escorrentía. En contraste, la minería metálica del Mapocho Alto presenta coeficientes bajos y poco variables. De los usos naturales con mayor sensibilidad está praderas y matorrales (X9): en Maipo Alto los coeficientes aumentan aproximadamente un orden de magnitud durante años húmedos, mientras que en Mapocho Alto se incrementan desde valores inferiores a 0.3 kg/ha/año hasta más de 0.6 kg/ha/año, lo que refleja una elevada respuesta de estos sectores al incremento de la escorrentía y de los procesos erosivos. Finalmente, para el uso de suelo Agricultura (X10), se presenta una sensibilidad alta, especialmente en Maipo Alto, donde los coeficientes aumentan desde valores cercanos a cero hasta 1,55 kg/ha/año, lo que refleja procesos erosivos.

Tabla 66 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Nitrógeno de Nitrato (kg/ha/año)[10]

		Año Hidrológico				Promedio
Uso de suelo	Área cuenca	Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X1	Maipo Alto	0	0.0005	0	0.0067	0.0018
	Mapocho Alto	0	0		0	0
	Resto cuenca				0.0203	0.0203
X2	Maipo Alto		0.0025		0.0965	0.0495
	Mapocho Alto (Centros Ski)	2.10	17.50		9.10	9.57
	Resto cuenca				0.0240	0.0240
X3	Maipo Alto	0.0090	0.0140		0.8050	0.2760
	Mapocho Alto	211.80	0.7198		6.07	72.86
	Resto cuenca	0			1.75	0.8750
X4	Cuenca Rio Maipo	0	0		0	0
X6	Maipo Alto		0.0050	0.0038	0.0035	0.0041
	Mapocho Alto				0.0020	0.0020
	Resto cuenca				0.0023	0.0023
X7	No Metálica Maipo Alto	81.00	66.90		339.98	162.63
	Metálica Mapocho Alto	0	0.2663		0	0.0888

[10] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
	Resto cuenca				34.60	34.60
X8	Maipo Alto	0	0	0	0.0050	0.0013
	Mapocho Alto	0	0		0.0285	0.0095
	Resto cuenca				0.0020	0.0020
X9	Maipo Alto	0.6750	0.7580	0.3222	6.85	2.1513
	Mapocho Alto	0.2930	64.51	0.1670	0.60	16.39
	Resto cuenca	0			0	0
X10	Maipo Alto	0.0590	0.0020		1.55	0.5373
	Mapocho Alto				0.4310	0.4310
	Resto cuenca				0.0070	0.0070
X11	Cuenca Rio Maipo				1.05	1.05
X12	Cuenca Rio Maipo				0.0300	0.0300
X13	Maipo Alto	0	0.0005	0	0.0067	0.0018
	Mapocho Alto	0	0		0.0000	0
	Resto cuenca				0.0203	0.0203
X14	Cuenca Rio Maipo				60.10	60.10

La Tabla 67 y Figura 71 presentan el análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Fósforo de Ortofosfato (en kg/ha/año) para los escenarios de precipitación de año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo y para distintas áreas de la cuenca. El análisis de sensibilidad muestra los mayores incrementos asociados a condiciones húmedas se concentran en usos urbanas e industriales (X2) del Maipo Alto y Mapocho Alto: estas áreas presentan una sensibilidad importante en el Maipo Alto, con un aumento desde 0,049 en años muy secos y 0,348 en años secos hasta 1,656 en años húmedos. En los centros de ski del Mapocho Alto, los coeficientes son elevados en todas las categorías disponibles, con un máximo de 1,46 en años secos y 1,001 en años húmedos. Esto indica que, además de la precipitación, existen plantas de tratamiento de aguas servidas que actúan como fuentes de fosfatos relativamente persistentes que mantienen aportes elevados incluso durante condiciones de menor humedad. La minería no metálica del Maipo Alto alcanza su valor máximo en años secos, con 1,951, mientras que disminuye a 0,159 en años húmedos. Por lo tanto, no se observa una relación directa y creciente con la precipitación, lo que sugiere que su variabilidad podría depender de la disponibilidad temporal de material, la operación de las faenas y las condiciones particulares de los puntos de monitoreo. En la minería metálica del Mapocho Alto los coeficientes son bajos o nulos en los años con información. La agricultura (X10) presenta una sensibilidad clara en el Maipo Alto, aumentando desde 0,058 en años secos hasta 0,567 en años húmedos. Este resultado es consistente con una mayor movilización de fertilizantes y fósforo presente en el suelo durante períodos de mayor escorrentía. La agricultura con aguas tratadas (X11) registra un coeficiente de 0,461 en condiciones húmedas, aunque la ausencia de resultados para otras categorías impide establecer una tendencia completa. Los vertederos (X12) presentan valores bajos a escala general de la cuenca, pero alcanzan 1,5 en el Mapocho Alto durante años húmedos, evidenciando una respuesta localizada y potencialmente relevante frente a la precipitación. La actividad pecuaria intensiva (X14) también presenta aportes durante condiciones húmedas, con un coeficiente de 0,111, lo que sugiere movilización de fósforo asociado a residuos orgánicos y superficies intervenidas.

Tabla 67 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Fósforo de ortofosfato (kg/ha/año)[11]

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X1	Maipo Alto	0,011	0	0	0	0,003
	Mapocho Alto				0	0
X2	Maipo Alto	0,049	0,348		1,656	0,684
	Mapocho Alto (Centros Ski)	0,447	1,46		1,001	0,969
	Resto cuenca				0,0003	0,000
X3	Maipo Alto	0,002	16,35		3,615	6,656
	Mapocho Alto	0,007	0,010		0,036	0,018
	Resto cuenca				0,003	0,003
X4	Cuenca Rio Maipo	0	0	0	0	0
X6	Maipo Alto	0,045	0,048	0,011	0,016	0,030
	Mapocho Alto	0,132	0,076		0,124	0,110
	Resto cuenca				0,003	0,003
X7	No Metálica Maipo Alto	0,248	1,951		0,159	0,786
	Metálica Mapocho Alto				0,044	0,044
X8	Maipo Alto	0,001	0,006	0	0	0,002
X9	Maipo Alto	0	0	1,056	0,08100	0,391
	Mapocho Alto	0	0		0,002	0,001
	Resto cuenca				0,002	0,002
X10	Maipo Alto		0,0580		0,567	0,312
	Mapocho Alto				0	0
	Resto cuenca				0	0
X11	Cuenca Rio Maipo				0,461	0,461
X12	Cuenca Rio Maipo				0,001	0,001
	Mapocho Alto				1,500	1,500
X13	Maipo Alto	0,011	0	0	0	0,003
	Mapocho Alto				0	0
X14	Cuenca Rio Maipo				0,111	0,111

La Tabla 68 y Figura 72 presentan el análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de DBO_5 (en kg/ha/año) para los escenarios de precipitación de año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo y para distintas áreas de la cuenca. Se presentan distintas respuestas según el año hidrológico y área de cuenca, donde generalmente los mayores coeficientes se observan en condiciones húmedas y zonas altas de la cuenca. La zona de Mapocho Alto considera la presencia de plantas de tratamientos de aguas servidas de centros de ski, por lo que las áreas urbanas e industriales (X2) en este sector presentan coeficientes muy elevados de 167,9 kg/ha/año en condiciones húmedas. En Maipo Alto, los valores son similares en años secos y húmedos (alrededor de 2,5 kg/ha/año), lo que indica una menor sensibilidad al régimen hidrológico. En Maipo Medio y bajo los coeficientes son considerablemente menores, alcanzando 1,52 y 0,18 kg/ha/año en años húmedos, respectivamente.

Minería (X7) es la fuente antrópica más relevante para DBO_5 y evidencia sensibilidad a la precipitación. En Maipo Alto, se observa un aumento progresivo desde los 128,4 kg/ha/año en años muy secos hasta 257,6

[11] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

kg/ha/año en años húmedos. En condiciones húmedas destaca además el sector de Estero Codegua, con 756,85 kg/ha/año, mientras que la minería metálica del Mapocho Alto presenta un valor considerablemente menor (4,4 kg/ha/año). Estos resultados muestran que la respuesta de la actividad minera presenta una marcada variabilidad espacial.

Otras actividades antrópicas adquieren relevancia principalmente durante años húmedos. La agricultura (X10) presenta coeficientes bajos en Maipo Medio y Bajo (0,90 y 0,004 kg/ha/año), mientras que la agricultura con aguas tratadas (X11) alcanza valores mayores, de 13,53 kg/ha/año en Maipo Medio y 6,8 kg/ha/año en Maipo Bajo. Los vertederos (X12) destacan particularmente en Mapocho Alto, con 81,75 kg/ha/año, frente a 1,45 kg/ha/año en Maipo Medio. Por su parte, la actividad pecuaria intensiva (X14) presenta valores similares en Maipo Medio y Bajo, de 4,8 y 4,15 kg/ha/año, respectivamente.

Respecto de las fuentes naturales, los mayores coeficientes de exportación de DBO_5 se concentran principalmente en el Maipo Alto y muestran, en general, una alta sensibilidad a las condiciones hidrológicas. Los bosques (X3) presentan los valores más elevados, aumentando desde 21,4 kg/ha/año en años muy secos y 189,9 kg/ha/año en años secos hasta 499,75 kg/ha/año en años húmedos, lo que evidencia una marcada respuesta al incremento de la precipitación y la escorrentía. Los humedales (X6) muestran una tendencia similar y progresiva, aumentando desde 3,18 kg/ha/año en años muy secos hasta 31,85 kg/ha/año en años húmedos. Las praderas y matorrales (X9) también presentan una respuesta importante, pasando de 1,40 kg/ha/año en años muy secos a 38,05 kg/ha/año en años húmedos. Por su parte, las nieves y glaciares (X8), aunque presentan coeficientes bajos durante condiciones secas y normales, aumentan desde valores inferiores a 0,01 kg/ha/año hasta 3,50 kg/ha/año en años húmedos en el Maipo Alto, indicando una elevada sensibilidad relativa a las condiciones hidrológicas. En conjunto, estos resultados muestran que las coberturas naturales de la zona alta de la cuenca pueden constituir una fuente relevante de DBO_5 durante años húmedos, probablemente debido al aumento de la escorrentía, erosión y movilización de materia orgánica y material acumulado en el suelo y superficies naturales.

Tabla 68 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de DBO_5 (kg/ha/año)[12]

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X1/X13	Maipo Alto	0,001	0,003	0,002	0,801	0,202
	Mapocho alto				0,202	0,202
	Maipo Medio				6,450	6,450
	Maipo Bajo				0,091	0,091
X2	Maipo Alto		2,500		2,450	2,475
	Mapocho alto (centros ski)				167,900	167,900
	Maipo Medio	2,000			1,524	1,762
	Maipo Bajo				0,181	0,181
X3	Maipo Alto	21,400	189,900		499,750	237,017
	Mapocho alto				16,050	16,050
	Maipo Medio				1,927	1,927
	Maipo Bajo				0,099	0,099
X4	Cuenca Rio Maipo	0	0	0	0	0,000
X6	Maipo Alto	3,179	4,559	11,000	31,850	12,647
	Maipo Medio				1,927	1,927

[12] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
	Maipo Bajo				8,800	8,800
X7	No Metálica Maipo Alto	128,400	176,300		257,611	187,437
	E. Codegua				756,850	756,850
	Metálica Mapocho Alto				4,400	4,400
X8	Maipo Alto	0,0003	0,001	0,003	3,503	0,877
	Mapocho Alto				49,950	49,950
	Maipo Medio				6,450	6,450
X9	Maipo Alto	1,401	5,400	3,068	38,050	11,980
	Mapocho alto				1,263	1,263
	Maipo Medio				1,927	1,927
	Maipo Bajo				0,008	0,008
X10	Maipo Medio				0,903	0,903
	Maipo Bajo				0,004	0,004
X11	Maipo Medio				13,527	13,527
	Maipo Bajo				6,800	6,800
X12	Mapocho Alto				81,750	81,750
	Maipo Medio				1,450	1,450
X14	Maipo Medio				4,800	4,800
	Maipo Bajo				4,150	4,150

La Tabla 69 y Figura 73 presentan el análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de cloruro (Cl^-) (en kg/ha/año) para los escenarios de precipitación de año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo y para distintas áreas de la cuenca. Los coeficientes de cloruro muestran una tendencia general a aumentar bajo condiciones húmedas, siendo particularmente sensibles la actividad pecuaria intensiva, los vertederos y la agricultura con aguas tratadas. La minería del Maipo Alto constituye, sin embargo, la fuente dominante en términos de magnitud absoluta, mientras que entre las fuentes naturales destaca el aporte persistente de las unidades geológicas representadas por X13, con valores elevados y relativamente persistentes en Maipo Alto (658–893 kg/ha/año), mostrando un aumento moderado hacia condiciones húmedas. Las restantes coberturas naturales presentan aportes bajos o nulos.

Como se mencionó anteriormente, la minería (X7) constituye ampliamente la principal fuente, especialmente en el Maipo Alto, donde los coeficientes aumentan desde 253.185 kg/ha/año en años muy secos hasta 323.394 kg/ha/año en años húmedos. Si bien se indica una sensibilidad positiva a la precipitación, esta es menor comparada a otros usos de suelo. En Mapocho Alto y Estero Codegua también se observan aportes mineros importantes durante condiciones húmedas, aunque considerablemente menores que en Maipo Alto.

La actividad pecuaria intensiva (X14) presenta una de las respuestas hidrológicas más marcadas, aumentando desde 0,2 kg/ha/año en años muy secos hasta 15.548 kg/ha/año en años húmedos. Los vertederos (X12) también destacan, particularmente en Mapocho Alto, con 7.320 kg/ha/año en condiciones húmedas. Asimismo, la agricultura con aguas tratadas (X11) muestra una alta sensibilidad, donde aumenta desde 0,1 kg/ha/año en años muy secos hasta 219,6 kg/ha/año en años húmedos. Las áreas urbanas (X2) presentan una respuesta similar, aunque de menor magnitud, aumentando en Mapocho Alto (donde se encuentran los centros de Ski) desde 3,2 hasta 89,7 kg/ha/año.

Tabla 69 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Cloruro (Cl^-) (kg/ha/año)[13]

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X1	Maipo Alto	0	0	0	4,3	1,1
	Mapocho Alto	6,8	19,5		7,0	11,1
	Resto Cuenca	0				0,0
X2	Mapocho	3,2	12		89,7	35,0
X3	Resto Cuenca	0	0	0	0	0
X4	Mapocho Alto	0	0		0,2	0,1
	Resto Cuenca	0	0	0	0	0
X6	Resto Cuenca				3,8	3,8
	Mapocho Alto	0,002	0,001		0,0	0,0
X7	Maipo Alto	253184,6	263003,3		323393,5	279860,5
	Estero Codegua				838,4	838,4
	Mapocho Alto				1060,0	1060,0
X8	Maipo Alto	0,2	0,6	0,5	0,3	0,4
	Mapocho Alto	19,7	0,0		93,3	37,7
X9	Resto Cuenca	0	0	0	0	0
X10	Maipo Alto		0			0
	Resto Cuenca	0,1	4,4	0,9	9,9	3,8
X11	Maipo Alto		0,1		59,6	29,8
	Resto Cuenca	0,1	3,3	4,2	219,6	56,8
X12	Resto Cuenca		160,1			160,1
	Mapocho Alto				7320,0	7320,0
X13	Maipo Alto	657,9	792,2	777,1	893,0	780,1
X14	Resto cuenca	0,2	1775,8	4833,4	15548,3	5539,4

La Tabla 70 y Figura 74 presentan el análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de zinc disuelto (Zn^{2+}) (en kg/ha/año) para los escenarios de precipitación de año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo y para distintas áreas de la cuenca. Entre las fuentes antrópicas, la minería (X7) presenta los mayores coeficientes. En Maipo Alto se observan valores elevados en todas las condiciones hidrológicas, con un aumento desde 1,97 kg/ha/año en años muy secos hasta 10,39 kg/ha/año en años secos y 9,00 kg/ha/año en años normales, seguido de una disminución a 2,64 kg/ha/año en años húmedos. Por lo tanto, en esta zona no existe una relación creciente directa con la precipitación. En contraste, la minería del Mapocho Alto presenta una clara sensibilidad positiva, aumentando desde valores nulos o muy bajos en años muy secos y secos hasta 5,51 kg/ha/año en años húmedos. En Estero Codegua también se registra un coeficiente relativamente elevado de 2,25 kg/ha/año durante condiciones húmedas.

Los restantes usos antrópicos presentan coeficientes considerablemente menores. Las áreas urbanas e industriales (X2), la agricultura (X10) y la agricultura con aguas tratadas (X11) muestran valores cercanos a cero, mientras que los vertederos (X12) y la actividad pecuaria intensiva (X14) alcanzan 0,054 y 0,040 kg/ha/año, respectivamente, durante años húmedos. En consecuencia, su contribución resulta secundaria frente a la actividad minera.

[13] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Entre las fuentes naturales, los bosques (X3) del Maipo Alto presentan los mayores coeficientes y una marcada sensibilidad a la condición hidrológica, aumentando desde 0,19 kg/ha/año en años muy secos y 0,29 kg/ha/año en años secos hasta 1,50 kg/ha/año en años húmedos. Las áreas desprovistas de vegetación (X1) también muestran incrementos hacia condiciones húmedas, especialmente en Mapocho Alto, donde alcanzan 0,61 kg/ha/año. Las restantes coberturas naturales, incluyendo humedales (X6), nieves y glaciares (X8) y, en general, praderas y matorrales (X9), presentan coeficientes bajos y una menor sensibilidad.

Tabla 70 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Zinc disuelto (Zn^{2+}) (kg/ha/año)[14]

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X1	Maipo Alto	0,001	0,001	0,041	0,050	0,023
	Mapocho Alto	0,099	0,181	0	0,612	0,223
	Resto Cuenca				0,027	0,027
X2	Maipo Alto		0		0	0
	Mapocho Alto				0,009	0,009
	Resto Cuenca				0,001	0,001
X3	Maipo Alto	0,188	0,293		1,500	0,660
	Mapocho Alto				0	0
	Resto Cuenca				0,004	0,004
X4	Cuenca Rio Maipo	0	0	0	0	0
X6	Maipo Alto	0	0,002		0,001	0,001
	Mapocho Alto				0,001	0,001
X7	Maipo Alto	1,969	10,387	9,000	2,635	5,998
	Mapocho Alto	0,000	0,058		5,509	1,856
	E. Codegua				2,252	2,252
	Estero TilTil				0	0
X8	Maipo Alto	0	0,001	0	0,005	0,001
	Mapocho Alto	0,001	0,002	0	0,029	0,008
X9	Maipo Alto	0,016	0,294	0,013	0,077	0,100
	Mapocho Alto			1,000	0	0,500
	Resto Cuenca				0,026	0,026
X10	Maipo Alto		0		0	0
	Resto Cuenca				0,004	0,004
X11	Resto Cuenca				0,001	0,001
X12	Resto Cuenca				0,054	0,054
X13	Maipo Alto	0	0,005	0,0003	0	0,001
	Mapocho Alto	0	0	0	0,237	0,059
X14	Resto Cuenca				0,040	0,040

Finalmente, la Tabla 71 y Figura 75 presentan el análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de sulfato (SO_4^{-2}) (en kg/ha/año) para los escenarios de precipitación de año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo y para distintas áreas de la cuenca. Se observa una variabilidad espacial y entre usos de suelo, con mayores valores concentrados en Maipo Alto. Entre las fuentes antrópicas, el uso minero de minería no metálica (X7) en Maipo Alto presenta los valores más elevados, alcanzando 115.000 kg/ha/año

[14] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

en años secos y 169.000 kg/ha/año en años húmedos. Se presenta una sensibilidad de movilización de sulfatos al régimen hidrológico, especialmente para el sector de minería metálica en Mapocho alto.

La actividad pecuaria intensiva (X14) constituye otra fuente antrópica relevante, con coeficientes muy elevados durante años húmedos tanto en Maipo Medio (14.456 kg/ha/año) como en Maipo Bajo (8.484 kg/ha/año). Sin embargo, al no existir valores para otras categorías hidrológicas, no es posible evaluar directamente su sensibilidad a la precipitación. La agricultura con aguas tratadas (X11) alcanza 364 kg/ha/año en Maipo Medio durante condiciones húmedas, mientras que las áreas urbanas (X2), agricultura convencional (X10) y vertederos (X12) presentan aportes comparativamente menores.

Entre las fuentes naturales destacan especialmente los bosques (X3) del Maipo Alto, con coeficientes muy elevados y variables, desde 3.729 kg/ha/año en años secos hasta 34.229 kg/ha/año en años húmedos. Las nieves y glaciares (X8) del Maipo Alto también muestran una clara sensibilidad, aumentando desde valores prácticamente nulos en años muy secos y normales hasta 310 kg/ha/año en años húmedos. Por su parte, las rocas con impacto geológico (X13) presentan una respuesta particularmente importante en Mapocho Alto, aumentando desde 223–311 kg/ha/año en condiciones muy secas y secas hasta 1.845 kg/ha/año en años húmedos. Estos elevados coeficientes naturales son consistentes con la importancia de las características geológicas e hidrotermales de las zonas altas en la generación y movilización de sulfatos.

Tabla 71 – Análisis de sensibilidad de coeficientes de exportación de Sulfato (SO_4^{-2}) (kg/ha/año)[15]

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X1	Maipo Alto	13,3	30,0	3,0	42,5	22,2
	R. Mapocho alto	223,3	311,0		137,1	223,8
	Maipo Medio				47,9	47,9
	Mapocho Bajo				68,6	68,6
	Maipo Bajo				0,2	0,2
X2	Maipo Alto		2,2		3,8	3,0
	Mapocho Alto		310,3		259,1	284,7
	Maipo Bajo				1,4	1,4
	Mapocho Bajo				0,0	0,0
X3	Maipo Alto	19848,2	3729,2		34229,4	19268,9
	Mapocho Alto				174,8	174,8
	Maipo Bajo				1,8	1,8
	Mapocho Bajo				0,0	0,0
X4	Cuenca Rio Maipo	0	0	0	0	0
X6	Maipo Alto	2,5	76,2		53,0	43,9
	Mapocho Alto				360,7	360,7
	Mapocho Bajo				0,0	0,0
X7	Maipo Alto	115010,9	27621,1		169325,4	103985,8
	E. Codegua				8123,6	8123,6
	Mapocho Alto	0,0	60,1		873,2	311,1
	E. Tiltil				0,0	0,0
X8	Maipo Alto	0,0	62,0	0,1	309,7	93,0
	Mapocho Alto	223,3	311,0		9,3	181,2

[15] Las celdas vacías indican ausencia de información suficiente, ya sea para la fecha y sector específico, que permita realizar el cálculo de coeficientes de exportación.

Uso de suelo	Área cuenca	Año Hidrológico				Promedio
		Muy seco	Seco	Normal	Húmedo	
X9	Maipo Alto	215,5	2296,1	312,0	914,9	934,6
	Maipo Medio				6,5	6,5
	Maipo Bajo				0,3	0,3
	Mapocho Alto				52,0	52,0
X10	Maipo Medio				46,1	46,1
	Maipo Bajo				0,8	0,8
X11	Maipo Medio				364,4	364,4
	Maipo Bajo				21,0	21,0
X12	Vert. Santa Marta				143,9	143,9
	Vert. Tiltil				0,0	0,0
X13	Maipo Alto	0,0	0,0	0,1	186,5	46,7
	Mapocho Alto	223,3	311,0		1844,5	792,9
	Mapocho Bajo				73,5	73,5
X14	Maipo Medio				14456,1	14456,1
	Maipo Bajo				8483,6	8483,6

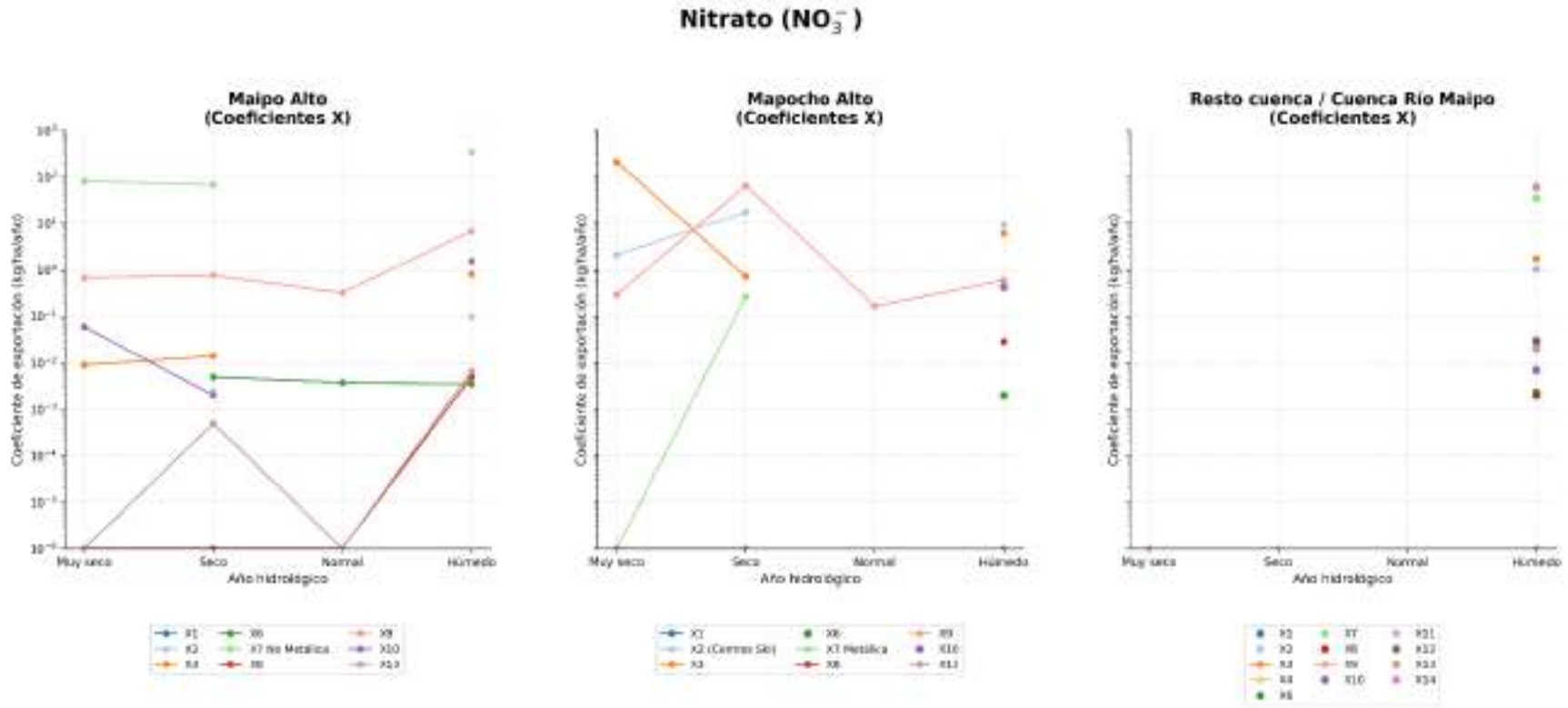


Figura 70 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Nitrógeno de Nitrato (N-NO_3^-) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo).

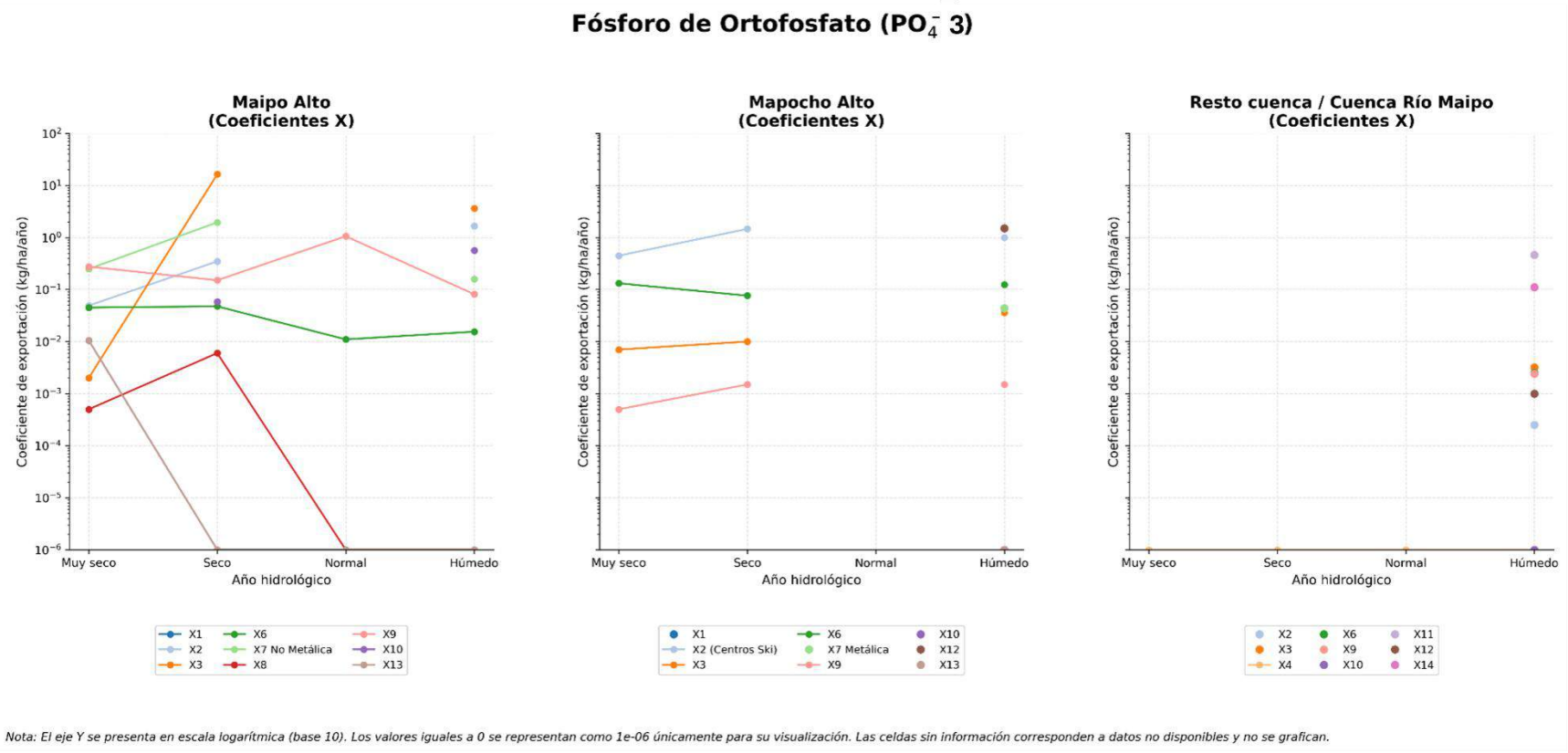


Figura 71 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{-3}$) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo).

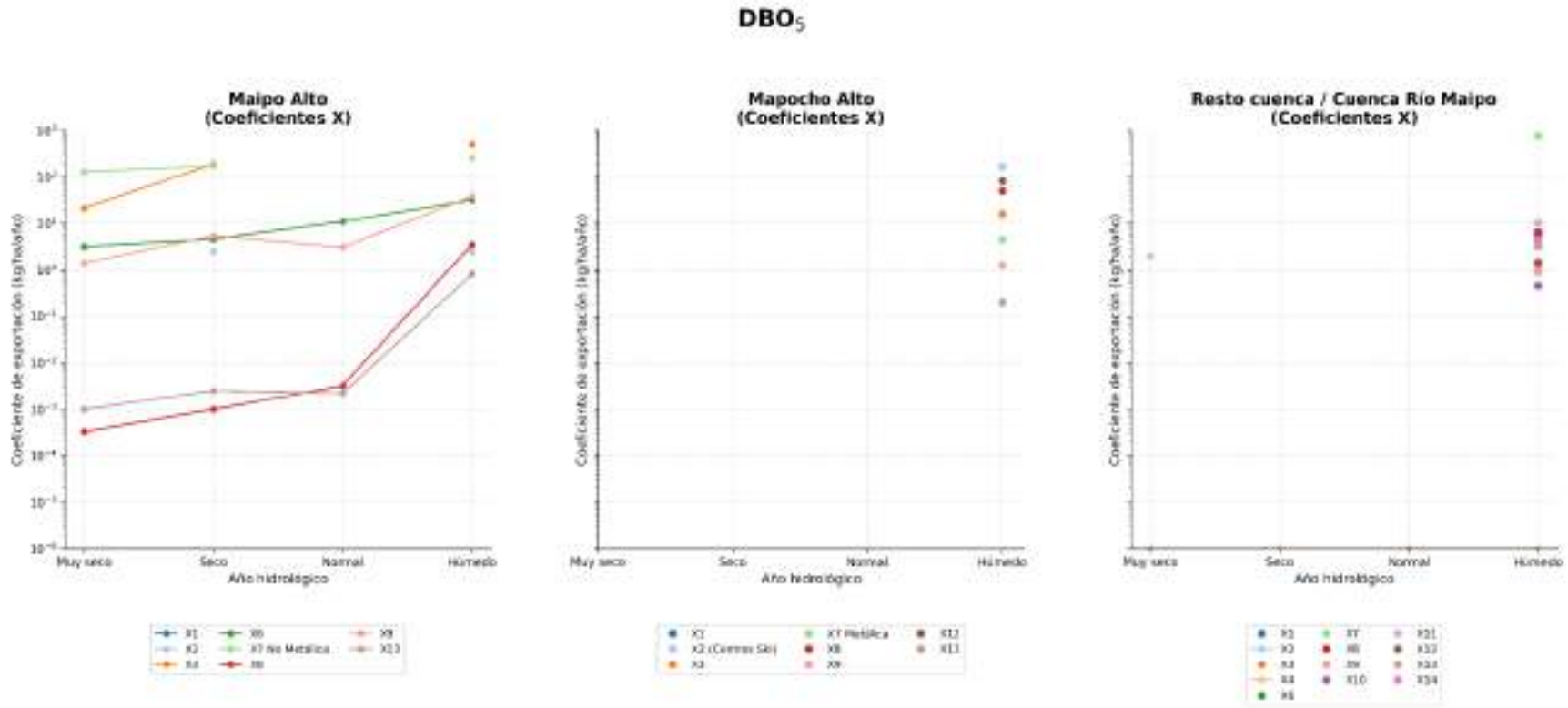


Figura 72 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de DBO_5 (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo).

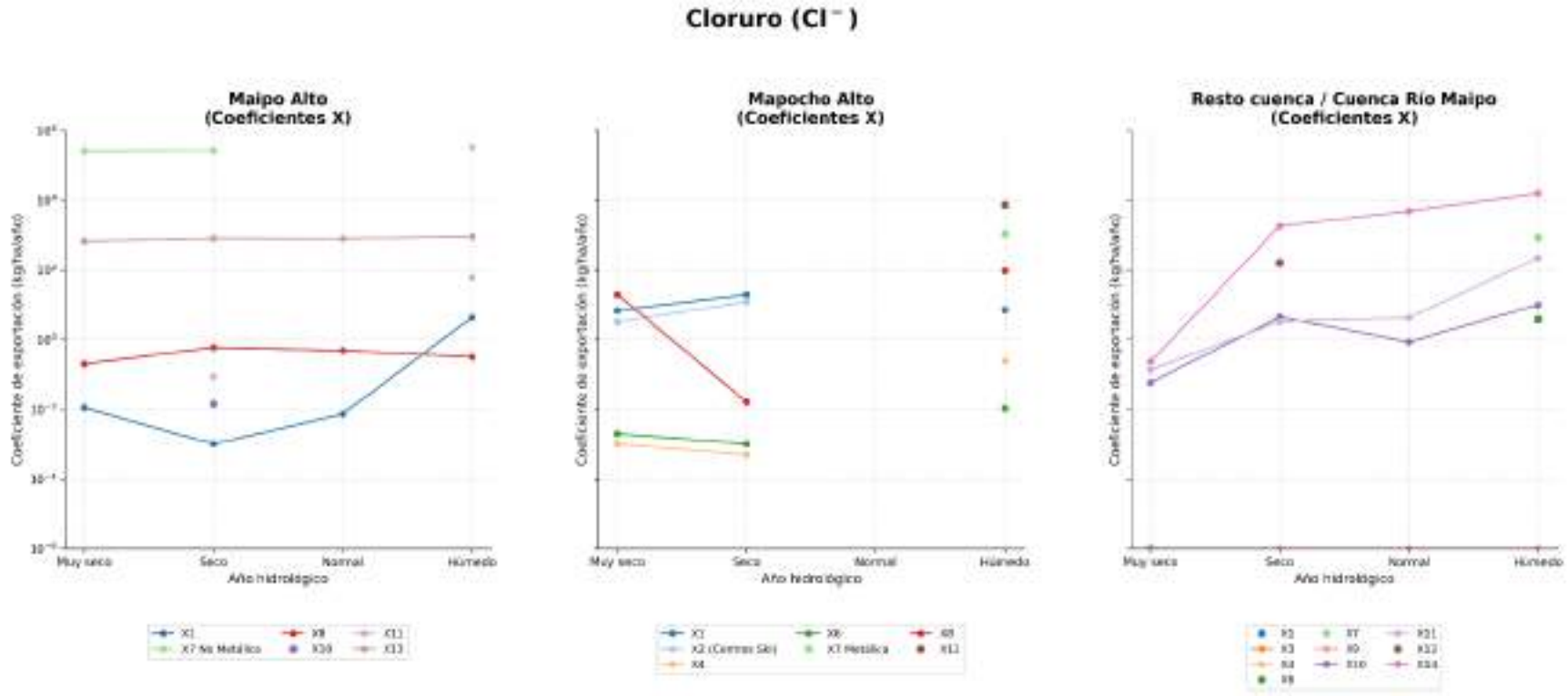
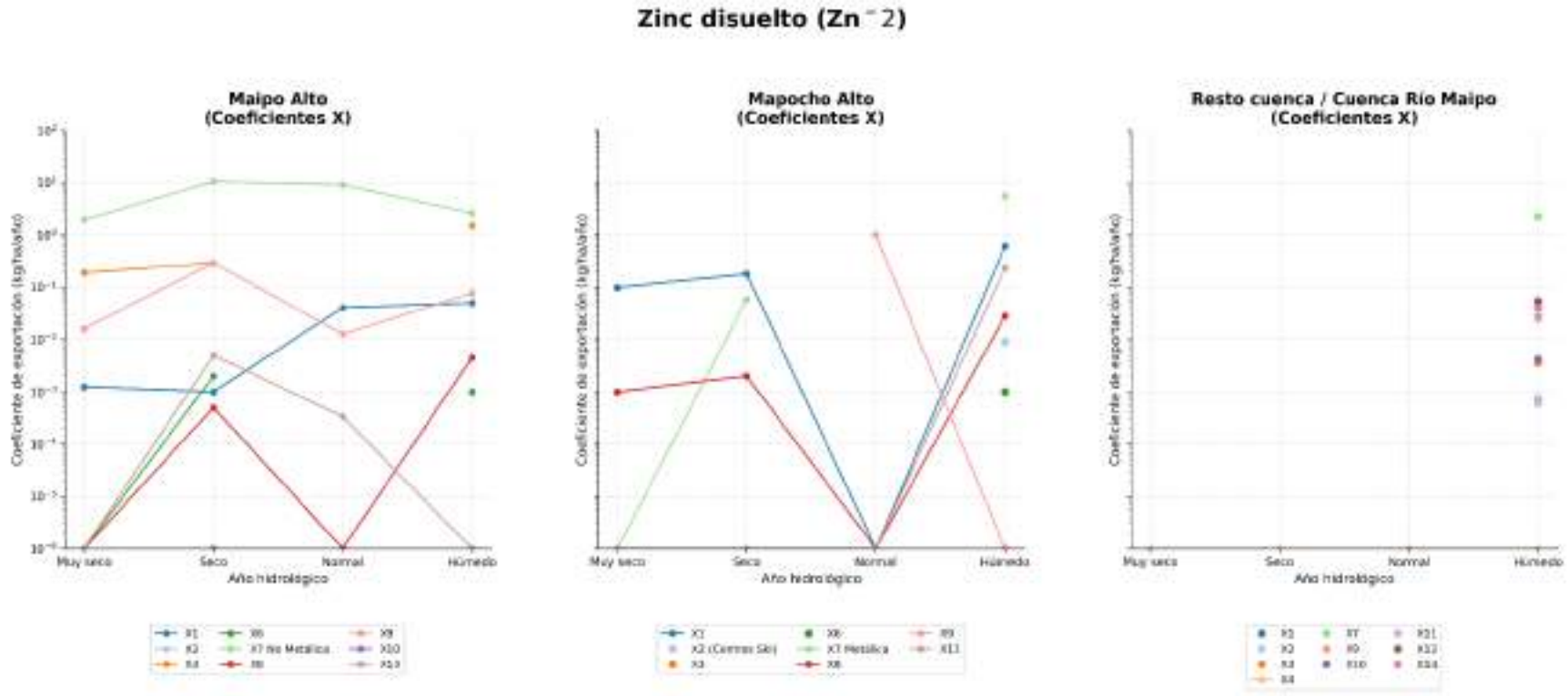


Figura 73 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Cloruro (Cl^-) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo).



Nota: El eje Y se presenta en escala logarítmica (base 10). Los valores iguales a 0 se representan como 1e-08 únicamente para su visualización. Las celdas sin información corresponden a datos no disponibles y no se grafican.

Figura 74 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Zinc disuelto (Zn^{2+}) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo).

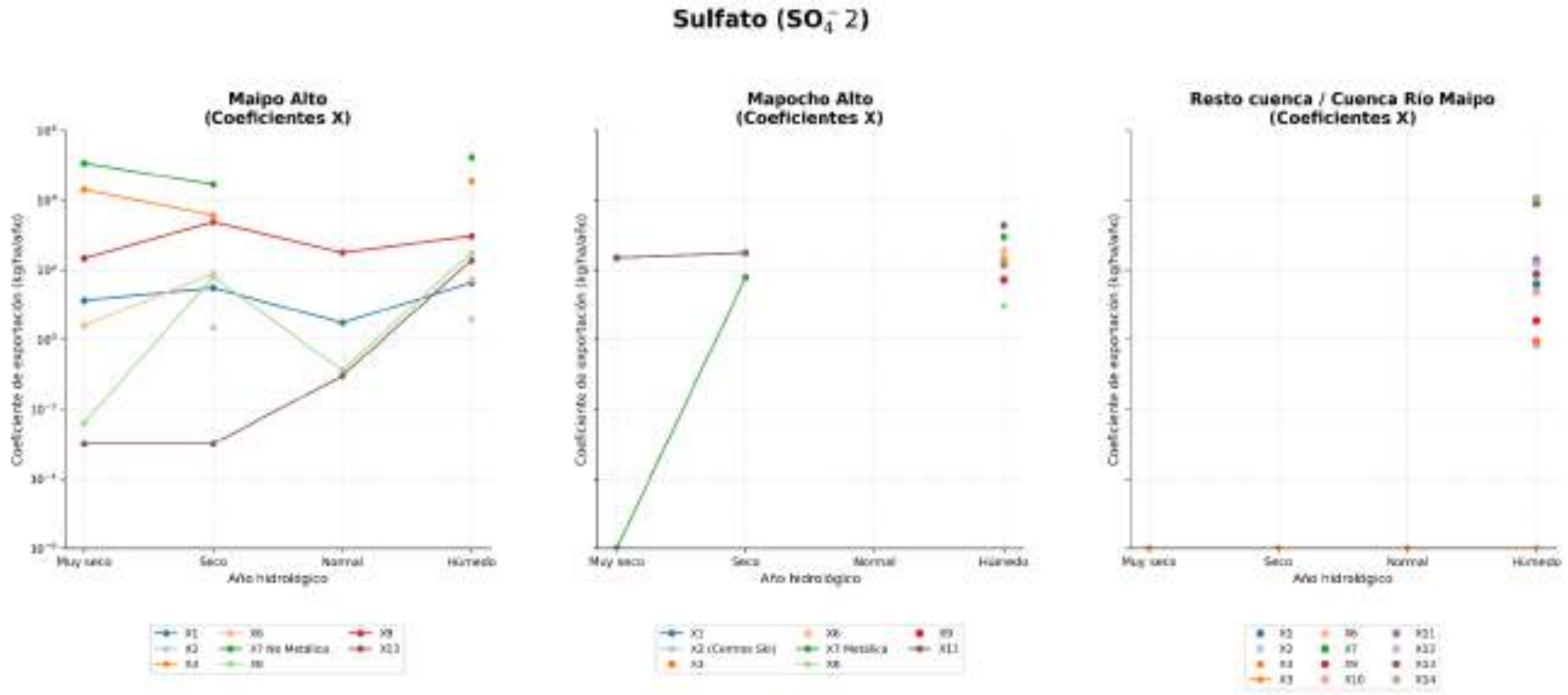


Figura 75 – Análisis de sensibilidad de coeficiente de exportación de Sulfato (SO_4^{-2}) (en kg/ha/año) considerando diferentes usos de suelo y escenarios de precipitación (año hidrológico muy seco, seco, normal y húmedo).

6.2 Estimación de cargas anuales por uso de suelo y análisis de sensibilidad

Para la estimación de las cargas se determinaron las superficies ocupadas por cada uno de los 14 usos de suelo dentro de las cuencas aportantes. Las superficies fueron obtenidas mediante el cruce espacial entre la cobertura de usos de suelo utilizada en la modelación y las cuencas aportantes correspondientes al área de vigilancia, y se expresaron en hectáreas (ha), presentado en la Tabla 72.

Para el caso del cloruro, se hizo una diferenciación en la definición del uso de suelo N° 13: Rocas con impacto en la calidad del agua. En este contexto, se identificó que las unidades volcanosedimentarias y sedimentarias mesozoicas eran relevantes para la disponibilidad del cloruro, específicamente la Formación Colimapu (Kc) y la Formación Lo Valdés (Kilv), asociadas a su vez a procesos hidrotermales y volcánicos. Por este motivo, se ajustó la clasificación de uso de suelo, incorporando las unidades geológicas anteriormente mencionadas dentro de la categoría "Rocas desnudas con impacto en la calidad del agua", mientras que el resto de las unidades geológicas aflorantes en terreno se mantuvieron clasificadas como "Áreas desprovistas de vegetación". El área aportante de cada uso de suelo por área de vigilancia para el contaminante cloruro se presenta en la Tabla 73.

Tabla 72 – Área en hectáreas (ha) por uso de suelo y por área de vigilancia, para los contaminantes nitrato, fosfato, DBO_5, zinc disuelto y sulfato.

Área de vigilancia	Área por uso de suelo (ha)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
AN-1	2084	5458	52200	1399	0	1261	11	7808	34556	14476	14321	3	14	138
LA-1	5731	18373	85222	241	112	1352	3589	40	76645	22826	12861	351	121	19
MA-1	48910	14	946	245	0	2648	0	23604	52391	77	0	0	21625	0
MA-2	38151	960	6493	1780	30	3620	139	40476	56374	695	0	0	19649	0
MA-3	71183	4936	12171	465	249	1888	89	33798	51666	3435	1078	125	16218	0
MA-4	2474	10951	24434	1681	938	354	44	135	13421	22591	15964	109	218	66
MA-5	1384	7591	70481	1997	83	0	23	0	28688	23407	12445	7	8	599
MP-1	20647	843	13102	161	0	2443	1603	3424	41418	64	0	0	4672	0
MP-2	2344	70102	19757	879	327	60	45	0	17084	17200	3908	151	48	16
PU-1	763	795	28098	23	23	0	0	0	23332	1488	649	1	0	18
PU-2	483	7450	40605	145	7	0	0	0	33614	35495	16127	4	3	472

Tabla 73 – Área en hectáreas (ha) por uso de suelo y por área de vigilancia, para el contaminante cloruro.

Área de vigilancia	Área por uso de suelo (ha)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
AN-1	2098	5458	52200	1399	0	1261	11	7808	34556	14476	14321	3	0	138
LA-1	5852	18373	85222	241	112	1352	3589	40	76645	22826	12861	351	0	19
MA-1	57353	14	896	209	0	2356	0	22195	39933	77	0	0	27428	0
MA-2	55204	960	6493	1718	30	3595	139	38286	55743	695	0	0	5505	0
MA-3	79514	4936	12166	430	249	1840	89	32302	46399	3435	1078	125	14738	0
MA-4	2691	10951	24434	1681	938	354	44	135	13421	22591	15964	109	0	66
MA-5	1391	7591	70481	1997	83	0	23	0	28688	23407	12445	7	0	599
MP-1	25319	843	13102	161	0	2443	1603	3424	41418	64	0	0	0	0

Área de vigilancia	Área por uso de suelo (ha)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
MP-2	2391	70102	19757	879	327	60	45	0	17084	17200	3908	151	0	16
PU-1	763	795	28098	23	23	0	0	0	23332	1488	649	1	0	18
PU-2	486	7450	40605	145	7	0	0	0	33614	35495	16127	4	0	472

A partir de estas superficies, la carga asociada a cada uso de suelo en cada área de vigilancia se obtuvo mediante el producto entre su coeficiente de exportación y el área correspondiente:

$$L_{\{i,j,k,z\}} = CE_{\{i,j,k,z\}} \cdot A_{\{j,z\}}$$

donde $L_{\{i,j,k,z\}}$ corresponde a la carga del contaminante (i), asociada al uso de suelo (j), para la condición hidrológica (k) y el área de vigilancia (z); $CE_{\{i,j,k,z\}}$ corresponde al coeficiente de exportación respectivo y $A_{\{j,z\}}$ a la superficie ocupada por dicho uso de suelo. Para mayor detalle de los valores utilizados y supuestos establecidos, referir al Anexo 12 "Estimación de cargas".

De acuerdo con las Bases Técnicas, los coeficientes de exportación se estimaron para los distintos usos de suelo considerados en la cuenca. No obstante, con el objetivo de mejorar la representatividad de la estimación, para el uso de suelo minería se realizó una desagregación adicional, diferenciando entre minería metálica y no metálica (minería metálica: en los sectores Mapocho Alto y río Angostura, minería no metálica: Maipo Alto). Esta diferenciación permitió considerar las particularidades productivas y ambientales de los principales sectores mineros de la cuenca, aun cuando las Bases no establecían como requisito la estimación de coeficientes diferenciados por subcuenca.

Para el área de vigilancia LA-1, la limitada disponibilidad de puntos de monitoreo de calidad del agua no permitió estimar un coeficiente específico con suficiente representatividad. Por ello, se utilizó como referencia el coeficiente correspondiente a minería metálica del sector Mapocho Alto, considerando las similitudes en el tipo de actividad minera y en las características geológicas de ambas áreas. En particular, ambos sectores presentan actividad asociada principalmente a minería de cobre y zinc y comparten unidades geológicas de carácter volcanosedimentario e intrusivo. Si bien existen diferencias climáticas, altitudinales e hidrológicas —el Mapocho Alto presenta mayores elevaciones y condiciones de montaña, mientras que Lampa se caracteriza por altitudes intermedias y menores precipitaciones—, no se aplicó un factor de ajuste debido a que no se contó con información local suficiente para establecerlo de manera robusta. Por lo tanto, el coeficiente utilizado en LA-1 corresponde a una transferencia y no a una estimación independiente para este sector.

Las cargas obtenidas para cada uso de suelo fueron posteriormente agregadas para determinar la carga total correspondiente a cada área de vigilancia y, posteriormente, para la cuenca del río Maipo en su totalidad. Los resultados para nitrógeno de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$), fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{3-}$), DBO_5, zinc disuelto (Zn), sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-), se presentan en las siguientes tablas: Tabla 74, Tabla 75, Tabla 76, Tabla 77, Tabla 78 y Tabla 79, respectivamente. En las secciones siguientes se realiza un análisis de los resultados.

Se aclara que, durante el desarrollo de la presente consultoría, no se dispuso oportunamente de los resultados del estudio de fuentes puntuales para ser incorporados en el presente estudio, debido a que fue abordado en una consultoría paralela, cuyos resultados no se encontraban disponibles al momento de realizar la estimación de cargas difusas. Por esta razón, no fue técnicamente posible incorporar un balance

cuantitativo completo de fuentes de contaminación puntuales y difusas, segmentado por área de vigilancia y parámetro.

Sin embargo, se realizó un análisis que permite efectuar una aproximación cuantitativa de la contribución de las fuentes difusas. Para cada área de vigilancia y parámetro evaluado, las cargas difusas estimadas a partir de los coeficientes de exportación fueron transformadas a una **concentración equivalente aportante por área de vigilancia**, utilizando los caudales correspondientes. Esta concentración representa el aporte que tendría la carga difusa estimada sobre el caudal aportante del área de vigilancia y permite compararla con las concentraciones observadas en la red de monitoreo. Por lo tanto, los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área**, **y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

Esta comparación permite evaluar la magnitud relativa del aporte difuso respecto de las concentraciones medidas. En aquellos casos en que la concentración equivalente asociada a las fuentes difusas resulta sustancialmente inferior a la concentración observada, los resultados indican que las fuentes difusas consideradas no explicarían por sí solas la concentración registrada, siendo consistente con la existencia de otros aportes, potencialmente asociados a fuentes puntuales. Esta interpretación se presenta como una aproximación y no como una cuantificación directa del aporte de las fuentes puntuales.

Por lo tanto, el análisis permite identificar, para cada área de vigilancia y parámetro, aquellos casos en que la contribución estimada de las fuentes difusas presenta una magnitud reducida respecto de la condición observada.

En consecuencia, las excedencias y condiciones de latencia o saturación se interpretan considerando esta limitación: las cargas difusas estimadas permiten caracterizar la contribución potencial de los usos de suelo evaluados y compararla con la condición observada, pero no permiten por sí solas determinar la participación porcentual de cada tipo de fuente. La incorporación del balance de fuentes puntuales permitiría complementar y fortalecer esta evaluación, particularmente en aquellas áreas donde el aporte difuso estimado resulta significativamente menor que las concentraciones observadas.

Tabla 74 – Cargas anuales de nitrógeno de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo).

AÑO MUY SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	14	0	0	0	6	88	0	0	854	14969	0	0	8270	24201	6	24195	0.0%	100.0%
LA-1	0	46	0	0	0	7	29588	0	0	1347	13443	11	0	1125	45566	7	45559	0.0%	100.0%
MA-1	0	0	9	0	0	13	0	0	35364	5	0	0	0	0	35390	35386	5	100.0%	0.0%
MA-2	0	2	58	0	0	18	11256	0	38052	41	0	0	0	0	49428	38129	11299	77.1%	22.9%
MA-3	0	12	110	0	0	9	7246	0	34875	203	1127	4	0	0	43586	34994	8592	80.3%	19.7%
MA-4	0	27	0	0	0	2	360	0	0	1333	16686	3	0	3959	22370	2	22369	0.0%	100.0%
MA-5	0	19	0	0	0	0	193	0	0	1381	13008	0	0	35970	50571	0	50571	0.0%	100.0%
MP-1	0	2	2775026	0	0	12	0	0	12136	4	0	0	0	0	2787180	2787174	6	100.0%	0.0%
MP-2	0	175	0	0	0	0	374	0	0	1015	4085	5	0	968	6622	0	6621	0.0%	100.0%
PU-1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	88	678	0	0	1076	1844	0	1844	0.0%	100.0%
PU-2	0	19	0	0	0	0	2	0	0	2094	16856	0	0	28381	47353	0	47353	0.0%	100.0%
Cuenca Río Maipo	0	319	2775203	0	0	68	49108	0	120427	8363	80851	22	0	79750	3114112	2895698	218414	93.0%	7.0%

AÑO SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	14	731	0	0	6	73	0	26194	29	14969	0	0	8270	50285	26931	23354	53.6%	46.4%
LA-1	0	46	1193	0	0	7	24438	0	58097	46	13443	11	0	1125	98405	59297	39108	60.3%	39.7%
MA-1	24	0	13	0	0	13	0	0	39713	0	0	0	11	0	39775	39774	0	100.0%	0.0%
MA-2	19	2	91	0	0	18	9296	0	42732	1	0	0	10	0	52170	42869	9300	82.2%	17.8%
MA-3	0	12	170	0	0	9	5985	0	39163	7	1127	4	8	0	46486	39351	7135	84.7%	15.3%
MA-4	0	27	342	0	0	2	297	0	10173	45	16686	3	0	3959	31535	10517	21018	33.4%	66.6%
MA-5	0	19	987	0	0	0	159	0	21745	47	13008	0	0	35970	71935	22732	49203	31.6%	68.4%
MP-1	0	2	9430	0	0	12	10914	0	2671974	0	0	0	0	0	2692333	2681416	10916	99.6%	0.4%
MP-2	0	175	277	0	0	0	309	0	12950	34	4085	5	0	968	18802	13226	5576	70.3%	29.7%
PU-1	0	2	393	0	0	0	0	0	17686	3	678	0	0	1076	19839	18079	1759	91.1%	8.9%
PU-2	0	19	568	0	0	0	2	0	25479	71	16856	0	0	28381	71377	26048	45329	36.5%	63.5%
Cuenca Río Maipo	44	319	14196	0	0	68	51473	0	2965905	284	80851	22	29	79750	3192941	2980241	212700	93.3%	6.7%

AÑO NORMAL

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	14	731	0	0	5	3	0	5771	854	14969	0	0	8270	30616	6506	24110	21.3%	78.7%
LA-1	0	46	1193	0	0	5	956	0	12800	1347	13443	11	0	1125	30925	13998	16927	45.3%	54.7%
MA-1	0	0	13	0	0	10	0	0	16880	5	0	0	0	0	16908	16904	5	100.0%	0.0%
MA-2	0	2	91	0	0	14	9296	0	18164	41	0	0	0	0	27608	18268	9340	66.2%	33.8%
MA-3	0	12	170	0	0	7	5985	0	16647	203	1127	4	0	0	24155	16824	7331	69.7%	30.3%
MA-4	0	27	342	0	0	1	12	0	2241	1333	16686	3	0	3959	24605	2585	22020	10.5%	89.5%
MA-5	0	19	987	0	0	0	6	0	4791	1381	13008	0	0	35970	56162	5778	50384	10.3%	89.7%
MP-1	0	2	9430	0	0	9	427	0	6917	4	0	0	0	0	16789	16356	433	97.4%	2.6%
MP-2	0	175	277	0	0	0	12	0	2853	1015	4085	5	0	968	9389	3130	6260	33.3%	66.7%
PU-1	0	2	393	0	0	0	0	0	3897	88	678	0	0	1076	6134	4290	1844	69.9%	30.1%
PU-2	0	19	568	0	0	0	0	0	5614	2094	16856	0	0	28381	53532	6182	47350	11.5%	88.5%
Cuenca Río Maipo	0	319	14196	0	0	51	16697	0	96574	8363	80851	22	0	79750	296824	110821	186003	37.3%	62.7%

AÑO HÚMEDO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	42	131	91350	0	0	3	371	16	0	101	14969	0	0	8270	115253	91411	23842	79.3%	20.7%
LA-1	117	441	149139	0	0	3	124189	0	0	160	13443	11	2	1125	288629	149261	139369	51.7%	48.3%
MA-1	326	1	762	0	0	9	0	118	358880	119	0	0	144	0	360360	360239	121	100.0%	0.0%
MA-2	254	93	5227	0	0	13	47243	202	386162	1078	0	0	131	0	440403	391990	48414	89.0%	11.0%
MA-3	475	476	9797	0	0	7	30414	169	353915	5328	1127	4	108	0	401820	364470	37349	90.7%	9.3%
MA-4	50	263	42760	0	0	1	1510	0	0	158	16686	3	4	3959	65395	42815	22580	65.5%	34.5%
MA-5	28	182	123342	0	0	0	810	0	0	164	13008	0	0	35970	173504	123370	50134	71.1%	28.9%
MP-1	0	81	10547	0	0	5	0	98	24872	28	0	0	0	0	35630	35521	109	99.7%	0.3%
MP-2	48	1682	34574	0	0	0	1569	0	0	120	4085	5	1	968	43053	34623	8430	80.4%	19.6%
PU-1	16	19	49172	0	0	0	0	0	0	10	678	0	0	1076	50972	49188	1784	96.5%	3.5%
PU-2	10	179	71060	0	0	0	9	0	0	248	16856	0	0	28381	116744	71069	45674	60.9%	39.1%
Cuenca Río Maipo	1365	3549	587730	0	0	40	206116	603	1123828	7515	80851	22	392	79750	2091762	1713958	377804	81.9%	18.1%

Tabla 75 – Cargas anuales de fósforo de ortofosfato ($P\text{-}PO_4^{3-}$) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo).

AÑO MUY SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	22	267	104	0	0	57	0	4	0	840	6605	0	0	15	7914	187	7727	2.4%	97.6%
LA-1	60	900	170	0	0	61	0	0	0	1324	5931	0	1	2	8451	293	8158	3.5%	96.5%
MA-1	514	1	2	0	0	119	0	12	0	4	0	0	227	0	879	873	5	99.4%	0.6%
MA-2	401	47	13	0	0	163	34	20	0	40	0	0	206	0	925	803	122	86.8%	13.2%
MA-3	747	242	24	0	0	85	22	17	0	199	497	0	170	0	2005	1044	961	52.1%	47.9%
MA-4	26	537	49	0	0	16	0	0	0	1310	7362	0	2	7	9310	93	9217	1.0%	99.0%
MA-5	15	372	141	0	0	0	0	0	0	1358	5739	0	0	66	7691	156	7535	2.0%	98.0%
MP-1	217	41	92	0	0	321	0	2	0	4	0	0	49	0	726	680	45	93.8%	6.2%
MP-2	25	3435	40	0	0	3	0	0	0	998	1802	0	0	2	6304	67	6237	1.1%	98.9%
PU-1	8	39	56	0	0	0	0	0	0	86	299	0	0	2	491	64	426	13.1%	86.9%
PU-2	5	365	81	0	0	0	0	0	0	2059	7438	0	0	52	10000	86	9914	0.9%	99.1%
Cuenca Río Maipo	2039	6246	773	0	0	824	57	55	0	8222	35674	1	657	147	54693	4347	50346	7.9%	92.1%

AÑO SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	1899	522	0	0	60	0	47	0	840	6605	0	0	15	9988	629	9359	6.3%	93.7%
LA-1	0	6394	852	0	0	64	0	0	0	1324	5931	0	0	2	14568	917	13651	6.3%	93.7%
MA-1	0	5	15467	0	0	126	0	142	0	4	0	0	0	0	15744	15734	9	99.9%	0.1%
MA-2	0	334	106166	0	0	172	271	243	0	40	0	0	0	0	107226	106581	645	99.4%	0.6%
MA-3	0	1718	198991	0	0	90	174	203	0	199	497	0	0	0	201872	199283	2589	98.7%	1.3%
MA-4	0	3811	244	0	0	17	0	1	0	1310	7362	0	0	7	12753	262	12491	2.1%	97.9%
MA-5	0	2642	705	0	0	0	0	0	0	1358	5739	0	0	66	10510	705	9805	6.7%	93.3%
MP-1	0	293	131	0	0	186	0	21	0	4	0	0	0	0	634	337	297	53.2%	46.8%
MP-2	0	24395	198	0	0	3	0	0	0	998	1802	0	0	2	27398	200	27197	0.7%	99.3%
PU-1	0	277	281	0	0	0	0	0	0	86	299	0	0	2	945	281	664	29.7%	70.3%
PU-2	0	2593	406	0	0	0	0	0	0	2059	7438	0	0	52	12547	406	12141	3.2%	96.8%
Cuenca Río Maipo	0	44361	323963	0	0	717	446	656	0	8222	35674	1	0	147	414185	325335	88850	78.5%	21.5%

AÑO NORMAL

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	1899	522	0	0	14	0	0	52	840	6605	0	0	15	9947	588	9359	5.9%	94.1%
LA-1	0	6394	852	0	0	15	0	0	115	1324	5931	0	0	2	14633	982	13651	6.7%	93.3%
MA-1	0	5	15467	0	0	29	0	0	55338	4	0	0	0	0	70844	70834	9	100.0%	0.0%
MA-2	0	334	106166	0	0	40	271	0	59545	40	0	0	0	0	166396	165751	645	99.6%	0.4%
MA-3	0	1718	198991	0	0	21	174	0	54573	199	497	0	0	0	256173	253584	2589	99.0%	1.0%
MA-4	0	3811	244	0	0	4	0	0	20	1310	7362	0	0	7	12760	268	12491	2.1%	97.9%
MA-5	0	2642	705	0	0	0	0	0	43	1358	5739	0	0	66	10553	748	9805	7.1%	92.9%
MP-1	0	293	131	0	0	27	0	0	62	4	0	0	0	0	517	220	297	42.5%	57.5%
MP-2	0	24395	198	0	0	1	0	0	26	998	1802	0	0	2	27421	224	27197	0.8%	99.2%
PU-1	0	277	281	0	0	0	0	0	35	86	299	0	0	2	980	316	664	32.2%	67.8%
PU-2	0	2593	406	0	0	0	0	0	50	2059	7438	0	0	52	12598	456	12141	3.6%	96.4%
Cuenca Río Maipo	0	44361	323963	0	0	150	446	0	169859	8222	35674	1	0	147	582821	493972	88850	84.8%	15.2%

AÑO HÚMEDO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	1	167	0	0	3	0	0	83	8200	6605	0	0	15	15075	253	14822	1.7%	98.3%
LA-1	0	5	273	0	0	3	0	0	184	12931	5931	0	0	2	19329	460	18869	2.4%	97.6%
MA-1	0	23	3419	0	0	41	0	0	4244	44	0	0	0	0	7771	7704	67	99.1%	0.9%
MA-2	0	1590	23470	0	0	56	22	0	4566	394	0	0	0	0	30098	28093	2006	93.3%	6.7%
MA-3	0	8174	43991	0	0	29	14	0	4185	1946	497	0	0	0	58837	48205	10631	81.9%	18.1%
MA-4	0	3	78	0	0	1	0	0	32	12798	7362	0	0	7	20282	111	20170	0.5%	99.5%
MA-5	0	2	226	0	0	0	0	0	69	13260	5739	0	0	66	19362	294	19068	1.5%	98.5%
MP-1	0	844	472	0	0	302	0	0	62	36	0	0	0	0	1716	835	880	48.7%	51.3%
MP-2	0	18	63	0	0	0	0	0	41	9744	1802	0	0	2	11670	104	11566	0.9%	99.1%
PU-1	0	0	90	0	0	0	0	0	56	843	299	0	0	2	1290	146	1144	11.3%	88.7%
PU-2	0	2	130	0	0	0	0	0	81	20108	7438	0	0	52	27810	211	27600	0.8%	99.2%
Cuenca Río Maipo	0	10661	72379	0	0	436	36	0	13603	80303	35674	1	0	147	213239	86417	126822	40.5%	59.5%

Tabla 76 – Cargas anuales de DBO_5 en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo).

AÑO MUY SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	2	10916	100589	0	0	4011	1375	3	66590	13072	193707	4	0	661	390928	171194	219734	43.8%	56.2%
LA-1	6	36745	164223	0	0	4297	460865	0	147695	20611	173962	509	0	90	1009003	316221	692782	31.3%	68.7%
MA-1	49	28	20244	0	0	8419	0	8	73400	69	0	0	22	0	102239	102142	97	99.9%	0.1%
MA-2	38	1920	138957	0	0	11509	17842	13	78980	628	0	0	20	0	249907	229517	20390	91.8%	8.2%
MA-3	71	9872	260453	0	0	6004	11487	11	72385	3102	14585	181	16	0	378167	338940	39227	89.6%	10.4%
MA-4	2	21903	47084	0	0	1125	5605	0	25863	20400	215931	158	0	316	338387	74075	264312	21.9%	78.1%
MA-5	1	15182	6978	0	0	0	3005	0	215	82	84624	11	0	2484	112580	7194	105386	6.4%	93.6%
MP-1	21	1687	210285	0	0	7766	7053	1	52290	58	0	0	5	0	279165	270367	8798	96.8%	3.2%
MP-2	2	140204	38071	0	0	190	5824	0	32921	15532	52860	220	0	77	285901	71184	214716	24.9%	75.1%
PU-1	1	1589	2782	0	0	0	0	0	175	5	4411	1	0	74	9038	2958	6081	32.7%	67.3%
PU-2	0	14901	4020	0	0	0	35	0	252	124	109661	5	0	1960	130959	4273	126686	3.3%	96.7%
Cuenca Río Maipo	194	254946	993686	0	0	43320	513090	36	550765	73682	849742	1087	63	5662	3286274	1588065	1698210	48.3%	51.7%

AÑO SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	5	13645	100589	0	0	5751	1888	8	66590	13072	193707	4	0	661	395919	172943	222976	43.7%	56.3%
LA-1	14	45932	164223	0	0	6162	632792	0	147695	20611	173962	509	0	90	1191990	318094	873896	26.7%	73.3%
MA-1	122	35	179644	0	0	12073	0	24	282913	69	0	0	22	0	474901	474796	104	100.0%	0.0%
MA-2	95	2400	1233081	0	0	16503	24499	40	304420	628	0	0	20	0	1581686	1554160	27526	98.3%	1.7%
MA-3	178	12340	2311216	0	0	8610	15772	34	278999	3102	14585	181	16	0	2645032	2599052	45980	98.3%	1.7%
MA-4	6	27379	47084	0	0	1613	7695	0	25863	20400	215931	158	0	316	346445	74567	271879	21.5%	78.5%
MA-5	3	18977	6978	0	0	0	4125	0	215	82	84624	11	0	2484	117499	7196	110302	6.1%	93.9%
MP-1	52	2108	210285	0	0	11135	7053	3	52290	58	0	0	5	0	282990	273770	9220	96.7%	3.3%
MP-2	6	175255	38071	0	0	272	7997	0	32921	15532	52860	220	0	77	323210	71270	251940	22.1%	77.9%
PU-1	2	1987	2782	0	0	0	0	0	175	5	4411	1	0	74	9437	2959	6478	31.4%	68.6%
PU-2	1	18626	4020	0	0	0	48	0	252	124	109661	5	0	1960	134698	4273	130424	3.2%	96.8%
Cuenca Río Maipo	485	318682	4297973	0	0	62119	701869	109	1192332	73682	849742	1087	63	5662	7503805	5553081	1950725	74.0%	26.0%

AÑO NORMAL

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	5	13645	100589	0	0	13876	1888	25	66590	13072	193707	4	0	661	404060	181084	222976	44.8%	55.2%
LA-1	13	45932	164223	0	0	14867	632792	0	147695	20611	173962	509	0	90	1200693	326798	873896	27.2%	72.8%
MA-1	108	35	179644	0	0	29129	0	76	160736	69	0	0	22	0	369818	369713	104	100.0%	0.0%
MA-2	84	2400	1233081	0	0	39820	24499	130	172955	628	0	0	20	0	1473616	1446090	27526	98.1%	1.9%
MA-3	157	12340	2311216	0	0	20773	15772	108	158512	3102	14585	181	16	0	2536762	2490783	45980	98.2%	1.8%
MA-4	5	27379	47084	0	0	3893	7695	0	25863	20400	215931	158	0	316	348724	76846	271879	22.0%	78.0%
MA-5	3	18977	6978	0	0	0	4125	0	215	82	84624	11	0	2484	117498	7196	110302	6.1%	93.9%
MP-1	45	2108	210285	0	0	26868	7053	11	52290	58	0	0	5	0	298723	289504	9220	96.9%	3.1%
MP-2	5	175255	38071	0	0	657	7997	0	32921	15532	52860	220	0	77	323595	71655	251940	22.1%	77.9%
PU-1	2	1987	2782	0	0	0	0	0	175	5	4411	1	0	74	9437	2958	6478	31.4%	68.6%
PU-2	1	18626	4020	0	0	0	48	0	252	124	109661	5	0	1960	134698	4273	130424	3.2%	96.8%
Cuenca Río Maipo	427	318682	4297973	0	0	149882	701869	350	818205	73682	849742	1087	63	5662	7217624	5266899	1950725	73.0%	27.0%

AÑO HÚMEDO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	13441	8315	100589	0	0	2431	8106	50360	66590	13072	193707	4	92	661	457367	233504	223864	51.1%	48.9%
LA-1	36967	27991	164223	0	0	2604	15793	255	147695	20611	173962	509	778	90	591479	352524	238956	59.6%	40.4%
MA-1	9864	34	472759	0	0	84341	0	82686	1993487	69	0	0	4361	0	2647602	2647498	104	100.0%	0.0%
MA-2	7694	2352	3245037	0	0	115296	35798	141786	2145031	628	0	0	3963	0	5697585	5658808	38777	99.3%	0.7%
MA-3	14356	12093	6082307	0	0	60148	23046	118393	1965906	3102	14585	181	3271	0	8297388	8244381	53007	99.4%	0.6%
MA-4	15954	16685	47084	0	0	682	192	869	25863	20400	215931	158	1404	316	345538	91857	253681	26.6%	73.4%
MA-5	125	1374	6978	0	0	0	103	0	215	82	84624	11	1	2484	95996	7319	88677	7.6%	92.4%
MP-1	4171	2066	210285	0	0	77794	7053	171009	52290	58	0	0	944	0	525669	516492	9177	98.3%	1.7%
MP-2	15117	106800	38071	0	0	115	200	0	32921	15532	52860	220	307	77	262219	86531	175688	33.0%	67.0%
PU-1	69	144	2782	0	0	0	0	0	175	5	4411	1	0	74	7661	3026	4635	39.5%	60.5%
PU-2	44	1349	4020	0	0	0	1	0	252	124	109661	5	0	1960	117416	4316	113100	3.7%	96.3%
Cuenca Río Maipo	117803	179202	10374134	0	0	343411	90291	565359	6430425	73682	849742	1087	15121	5662	19045920	17846254	1199666	93.7%	6.3%

Tabla 77 – Cargas anuales de zinc disuelto (Zn) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo).

AÑO MUY SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	3	0	188	0	0	0	24	0	0	0	11	0	0	5	231	191	40	82.5%	17.5%
LA-1	7	0	307	0	0	0	0	0	0	0	10	19	0	1	343	314	29	91.5%	8.5%
MA-1	61	0	178	0	0	0	0	0	838	0	0	0	0	0	1077	1077	0	100.0%	0.0%
MA-2	48	0	1221	0	0	0	274	0	902	0	0	0	0	0	2444	2170	274	88.8%	11.2%
MA-3	89	0	2288	0	0	0	176	0	827	0	1	7	0	0	3387	3204	184	94.6%	5.4%
MA-4	3	0	88	0	0	0	0	0	0	0	12	6	0	3	111	91	20	81.7%	18.3%
MA-5	2	0	254	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	24	289	255	33	88.4%	11.6%
MP-1	2034	0	0	0	0	0	0	3	663	0	0	0	0	0	2700	2700	0	100.0%	0.0%
MP-2	3	0	71	0	0	0	0	0	0	0	3	8	0	1	86	74	12	86.3%	13.7%
PU-1	1	0	101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	103	102	1	98.8%	1.2%
PU-2	1	0	146	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	19	178	147	31	82.6%	17.4%
Cuenca Río Maipo	2251	0	4842	0	0	0	474	3	3230	0	58	40	0	52	10950	10325	625	94.3%	5.7%

AÑO SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	2	0	188	0	0	1	1	4	881	0	11	0	0	5	1093	1076	17	98.5%	1.5%
LA-1	6	0	307	0	0	1	208	0	1954	0	10	19	0	1	2506	2268	238	90.5%	9.5%
MA-1	49	0	277	0	0	5	0	12	15420	0	0	0	108	0	15871	15871	0	100.0%	0.0%
MA-2	38	0	1899	0	0	7	1443	20	16593	0	0	0	98	0	20099	18656	1443	92.8%	7.2%
MA-3	71	0	3560	0	0	4	929	17	15207	0	1	7	81	0	19877	18940	937	95.3%	4.7%
MA-4	2	0	88	0	0	0	3	0	342	0	12	6	0	3	456	433	23	95.0%	5.0%
MA-5	1	0	254	0	0	0	1	0	732	0	9	0	0	24	1021	987	35	96.6%	3.4%
MP-1	3727	0	0	0	0	2	93	2	1056	0	0	0	0	0	4880	4787	93	98.1%	1.9%
MP-2	2	0	71	0	0	0	3	0	436	0	3	8	0	1	524	509	14	97.3%	2.7%
PU-1	1	0	101	0	0	0	0	0	595	0	0	0	0	1	698	697	1	99.8%	0.2%
PU-2	0	0	146	0	0	0	0	0	857	0	12	0	0	19	1035	1004	31	97.0%	3.0%
Cuenca Río Maipo	3900	0	6891	0	0	22	2681	55	54074	0	58	40	287	52	68060	65229	2832	95.8%	4.2%

AÑO NORMAL

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	0	188	0	0	1	1	0	881	0	11	0	0	5	1087	1070	17	98.4%	1.6%
LA-1	0	0	307	0	0	1	208	0	1954	0	10	19	0	1	2500	2263	238	90.5%	9.5%
MA-1	1997	0	277	0	0	3	0	0	664	0	0	0	7	0	2947	2947	0	100.0%	0.0%
MA-2	1558	0	1899	0	0	4	1251	0	714	0	0	0	7	0	5432	4181	1251	77.0%	23.0%
MA-3	2907	0	3560	0	0	2	805	0	654	0	1	7	5	0	7941	7128	813	89.8%	10.2%
MA-4	0	0	88	0	0	0	3	0	342	0	12	6	0	3	454	431	23	94.9%	5.1%
MA-5	0	0	254	0	0	0	1	0	732	0	9	0	0	24	1020	985	35	96.6%	3.4%
MP-1	0	0	0	0	0	2	93	0	41418	0	0	0	0	0	41514	41421	93	99.8%	0.2%
MP-2	0	0	71	0	0	0	3	0	436	0	3	8	0	1	521	507	14	97.2%	2.8%
PU-1	0	0	101	0	0	0	0	0	595	0	0	0	0	1	697	696	1	99.8%	0.2%
PU-2	0	0	146	0	0	0	0	0	857	0	12	0	0	19	1034	1003	31	97.0%	3.0%
Cuenca Río Maipo	6462	0	6891	0	0	14	2364	0	49247	0	58	40	19	52	65148	62633	2515	96.1%	3.9%

AÑO HÚMEDO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	56	3	188	0	0	1	24	35	881	61	11	0	0	5	1266	1161	104	91.7%	8.3%
LA-1	153	11	307	0	0	1	9456	0	1954	96	10	19	0	1	12008	2416	9592	20.1%	79.9%
MA-1	2445	0	1419	0	0	3	0	106	4034	0	0	0	0	0	8007	8007	0	100.0%	0.0%
MA-2	1908	0	9740	0	0	4	366	182	4341	0	0	0	0	0	16540	16174	366	97.8%	2.2%
MA-3	3559	0	18256	0	0	2	236	152	3978	0	1	7	0	0	26191	25947	243	99.1%	0.9%
MA-4	66	7	88	0	0	0	98	1	342	95	12	6	0	3	718	497	220	69.3%	30.7%
MA-5	37	5	254	0	0	0	53	0	732	98	9	0	0	24	1211	1022	189	84.4%	15.6%
MP-1	12636	8	0	0	0	2	8831	98	0	0	0	0	1107	0	22682	13843	8839	61.0%	39.0%
MP-2	63	42	71	0	0	0	250	0	436	72	3	8	0	1	945	570	376	60.2%	39.8%
PU-1	20	0	101	0	0	0	0	0	595	6	0	0	0	1	724	717	8	98.9%	1.1%
PU-2	13	4	146	0	0	0	1	0	857	149	12	0	0	19	1201	1016	185	84.6%	15.4%
Cuenca Río Maipo	20956	80	30570	0	0	14	19314	574	18150	578	58	40	1107	52	91494	71371	20123	78.0%	22.0%

Tabla 78 – Cargas anuales de sulfato (SO_4^{-2}) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo).

AÑO MUY SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	27664	7808	94195	0	0	0	87004	31	222888	667329	5218401	363	0	1989304	8314987	344778	7970208	4.1%	95.9%
LA-1	76084	26282	153783	0	0	0	29157956	0	494360	1052257	4686483	50522	0	270618	35968346	724228	35244118	2.0%	98.0%
MA-1	649275	31	18776199	0	0	6620	0	94	11287695	3543	0	0	22	0	30723479	30719905	3574	100.0%	0.0%
MA-2	506456	2112	128880714	0	0	9050	15981915	162	12145783	32043	0	0	20	0	157558253	141542184	16016069	89.8%	10.2%
MA-3	944956	10859	241566488	0	0	4721	10288875	135	11131524	158359	392929	17950	16	0	264516813	253647840	10868972	95.9%	4.1%
MA-4	32837	15666	44091	0	0	0	0	1	86566	1041436	5817125	15632	0	952368	8005722	163495	7842227	2.0%	98.0%
MA-5	311	10859	127183	0	0	0	0	0	7444	18726	260716	1049	0	5077435	5503723	134939	5368784	2.5%	97.5%
MP-1	4609380	1855	2289547	0	0	881013	0	764319	2151670	2958	0	0	1043042	0	11743784	11738970	4814	100.0%	0.0%
MP-2	31114	0	0	0	0	0	0	0	110191	792924	1424035	21784	0	232888	2612935	141305	2471630	5.4%	94.6%
PU-1	172	1137	50704	0	0	0	0	0	6055	1190	13591	78	0	151941	224866	56930	167936	25.3%	74.7%
PU-2	109	10658	73273	0	0	0	0	0	8723	28396	337853	544	0	4006210	4465766	82104	4383662	1.8%	98.2%
Cuenca Río Maipo	6878358	87266	392056176	0	0	901405	55515750	764742	37652898	3799161	18151132	107921	1043100	12680764	529638673	439296678	90341994	82.9%	17.1%

AÑO SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	62561	7808	94195	0	0	0	87004	484321	222888	667329	5218401	363	0	1989304	8834173	863964	7970208	9.8%	90.2%
LA-1	172058	26282	153783	0	0	0	29157956	2456	494360	1052257	4686483	50522	0	270618	36066776	822658	35244118	2.3%	97.7%
MA-1	1468282	31	3527739	0	0	201783	0	1464202	120292930	3543	0	0	22	0	126958531	126954957	3574	100.0%	0.0%
MA-2	1145308	2112	24214564	0	0	275842	3838228	2510735	129437569	32043	0	0	20	0	161456421	157584038	3872383	97.6%	2.4%
MA-3	2136942	10859	45386366	0	0	143901	2470984	2096483	118628615	158359	392929	17950	16	0	171443404	168392323	3051081	98.2%	1.8%
MA-4	74257	15666	44091	0	0	0	0	8357	86566	1041436	5817125	15632	0	952368	8055499	213272	7842227	2.6%	97.4%
MA-5	311	10859	127183	0	0	0	0	0	7444	18726	260716	1049	0	5077435	5503723	134939	5368784	2.5%	97.5%
MP-1	6420098	1855	2289547	0	0	881013	96284	1064568	2151670	2958	0	0	1452783	0	14360777	14259679	101098	99.3%	0.7%
MP-2	70361	0	0	0	0	0	0	0	110191	792924	1424035	21784	0	232888	2652182	180552	2471630	6.8%	93.2%
PU-1	172	1137	50704	0	0	0	0	0	6055	1190	13591	78	0	151941	224866	56930	167936	25.3%	74.7%
PU-2	109	10658	73273	0	0	0	0	0	8723	28396	337853	544	0	4006210	4465766	82104	4383662	1.8%	98.2%
Cuenca Río Maipo	11550459	87266	75961444	0	0	1502540	35650456	7631122	371447010	3799161	18151132	107921	1452841	12680764	540022118	469545417	70476701	86.9%	13.1%

AÑO NORMAL

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	6207	7808	94195	0	0	0	87004	1001	222888	667329	5218401	363	1	1989304	8294500	324291	7970208	3.9%	96.1%
LA-1	17070	26282	153783	0	0	0	29157956	5	494360	1052257	4686483	50522	11	270618	35909348	665230	35244118	1.9%	98.1%
MA-1	145672	31	3527739	0	0	201783	0	3026	16347118	3543	0	0	1946	0	20230858	20227284	3574	100.0%	0.0%
MA-2	113629	2112	24214564	0	0	275842	3838228	5189	17589822	32043	0	0	1768	0	46073198	42200815	3872383	91.6%	8.4%
MA-3	212012	10859	45386366	0	0	143901	2470984	4333	16120947	158359	392929	17950	1460	0	64920099	61869019	3051081	95.3%	4.7%
MA-4	7367	15666	44091	0	0	0	0	17	86566	1041436	5817125	15632	20	952368	7980289	138062	7842227	1.7%	98.3%
MA-5	311	10859	127183	0	0	0	0	0	7444	18726	260716	1049	1	5077435	5503724	134940	5368784	2.5%	97.5%
MP-1	6420098	1855	2289547	0	0	881013	96284	439	2151670	2958	0	0	1452783	0	13296648	13195549	101098	99.2%	0.8%
MP-2	6981	0	0	0	0	0	0	0	110191	792924	1424035	21784	4	232888	2588806	117176	2471630	4.5%	95.5%
PU-1	172	1137	50704	0	0	0	0	0	6055	1190	13591	78	0	151941	224866	56930	167936	25.3%	74.7%
PU-2	109	10658	73273	0	0	0	0	0	8723	28396	337853	544	0	4006210	4465766	82104	4383662	1.8%	98.2%
Cuenca Río Maipo	6929628	87266	75961444	0	0	1502540	35650456	14010	53145784	3799161	18151132	107921	1457995	12680764	209488101	139011401	70476701	66.4%	33.6%

AÑO HÚMEDO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																	Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	99821	7808	94195	0	0	0	87004	725829	222888	667329	5218401	363	1052	1989304	9113993	1143784	7970208	12.5%	87.5%
LA-1	274533	26282	153783	0	0	0	1116527	3681	494360	1052257	4686483	50522	8871	270618	8137917	935229	7202689	11.5%	88.5%
MA-1	2076213	53	32380694	0	0	140215	0	2194329	47931445	3543	0	0	1008907	0	85735399	85731803	3596	100.0%	0.0%
MA-2	1619514	3624	222262610	0	0	191678	14449866	3762718	51575182	32043	0	0	916692	0	294813925	280328393	14485532	95.1%	4.9%
MA-3	3021725	18633	416596063	0	0	99994	9302569	3141899	47268289	158359	392929	17950	756655	0	480775065	470884625	9890440	97.9%	2.1%
MA-4	118484	15666	44091	0	0	0	13578	12525	86566	1041436	5817125	15632	16002	952368	8133473	277668	7855805	3.4%	96.6%
MA-5	311	10859	127183	0	0	0	7279	0	7444	18726	260716	1049	576	5077435	5511577	135515	5376063	2.5%	97.5%
MP-1	2829633	3184	2289547	0	0	881013	498645	620185	2151670	2958	0	0	3704414	0	12981249	12476462	504787	96.1%	3.9%
MP-2	160783	0	0	0	0	0	14110	0	110191	792924	1424035	21784	3493	232888	2760207	274467	2485740	9.9%	90.1%
PU-1	172	1137	50704	0	0	0	0	0	6055	1190	13591	78	0	151941	224866	56930	167936	25.3%	74.7%
PU-2	109	10658	73273	0	0	0	84	0	8723	28396	337853	544	212	4006210	4466061	82316	4383746	1.8%	98.2%
Cuenca Río Maipo	10201297	97902	674072142	0	0	1312901	25489662	10461167	149862812	3799161	18151132	107921	6416873	12680764	912653735	852327192	60326543	93.4%	6.6%

Tabla 79 – Cargas anuales de cloruro (Cl^-) en kg/año por área de vigilancia, para la cuenca del río Maipo y por tipo de uso de suelo. Se presenta un análisis de sensibilidad por condiciones hidrológicas (año muy seco, seco, normal y húmedo).

AÑO MUY SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	0	17466	0	0	0	3	8979	1546	0	840	1905	403	0	32	31173	1548	29624	5.0%	95.0%
LA-1	0	58792	0	0	0	3	3009261	8	0	1324	1710	56210	0	4	3127312	11	3127301	0.0%	100.0%
MA-1	631	45	0	0	0	5	0	4395	0	4	0	0	18044717	0	18049796	18049747	49	100.0%	0.0%
MA-2	607	3072	0	0	0	7	35086322	7581	0	40	0	0	3621549	0	38719178	3629744	35089434	9.4%	90.6%
MA-3	875	15795	0	0	0	4	22649894	6396	0	199	143	19971	9695821	0	32389098	9703095	22686003	30.0%	70.0%
MA-4	0	35045	0	0	0	1	36596	27	0	1310	2123	17392	0	15	92509	27	92481	0.0%	100.0%
MA-5	0	24290	0	0	0	0	19619	0	0	1358	1655	1167	0	138	48227	0	48227	0.0%	100.0%
MP-1	170902	2699	0	0	0	5	1699169	67412	0	4	0	0	0	0	1940191	238319	1701872	12.3%	87.7%
MP-2	0	224326	0	0	0	0	38030	0	0	998	520	24236	0	4	288113	0	288113	0.0%	100.0%
PU-1	0	2543	0	0	0	0	0	0	0	86	86	86	0	4	2806	0	2806	0.0%	100.0%
PU-2	0	23842	0	0	0	0	226	0	0	2059	2145	605	0	109	28986	0	28986	0.0%	100.0%
Cuenca Río Maipo	173015	407913	0	0	0	27	62548096	87364	0	8222	10288	120070	31362086	307	94717388	31622492	63094896	33.4%	66.6%

AÑO SECO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	2	65497	0	0	0	1	8979	125	0	63693	47258	403	0	244361	430319	128	430191	0.0%	100.0%
LA-1	6	220471	0	0	0	1	3009261	1	0	100432	42441	56210	0	33242	3462064	8	3462057	0.0%	100.0%
MA-1	57	167	0	0	0	2	0	13184	0	1	0	0	21728264	0	21741675	21741507	168	100.0%	0.0%
MA-2	55	11519	0	0	0	4	36446997	22742	0	10	0	0	4360831	0	40842158	4383632	36458526	10.7%	89.3%
MA-3	80	59230	0	0	0	2	23528275	19188	0	48	93	19971	11675071	0	35301958	11694340	23607617	33.1%	66.9%
MA-4	3	131418	0	0	0	0	36596	2	0	99400	52680	17392	0	116986	454476	5	454471	0.0%	100.0%
MA-5	1	91089	0	0	0	0	19619	0	0	102992	41067	1167	0	1062786	1318722	1	1318720	0.0%	100.0%
MP-1	493717	10121	0	0	0	2	1699169	55	0	282	0	0	0	0	2203346	493774	1709572	22.4%	77.6%
MP-2	2	841222	0	0	0	0	38030	0	0	75680	12896	24236	0	28607	1020674	2	1020671	0.0%	100.0%
PU-1	1	9535	0	0	0	0	0	0	0	6545	2141	86	0	31804	50112	1	50112	0.0%	100.0%
PU-2	0	89406	0	0	0	0	226	0	0	156178	53218	605	0	838562	1138196	0	1138196	0.0%	100.0%
Cuenca Río Maipo	493924	1529675	0	0	0	13	64787153	55296	0	605262	251793	120070	37764166	2356349	107963702	38313399	69650302	35.5%	64.5%

AÑO NORMAL

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	15	65497	0	0	0	1	8979	3769	0	12478	60146	403	0	665124	816413	3786	812628	0.5%	99.5%
LA-1	42	220471	0	0	0	1	3009261	19	0	19676	54015	56210	0	90481	3450177	63	3450114	0.0%	100.0%
MA-1	416	167	0	0	0	2	0	10715	0	66	0	0	21314790	0	21326157	21325923	234	100.0%	0.0%
MA-2	400	11519	0	0	0	4	36446997	18482	0	599	0	0	4277848	0	40755850	4296734	36459116	10.5%	89.5%
MA-3	576	59230	0	0	0	2	23528275	15594	0	2961	4529	19971	11452903	0	35084042	11469075	23614966	32.7%	67.3%
MA-4	20	131418	0	0	0	0	36596	65	0	19473	67047	17392	0	318424	590435	85	590350	0.0%	100.0%
MA-5	10	91089	0	0	0	0	19619	0	0	20177	52268	1167	0	2892790	3077120	10	3077110	0.0%	100.0%
MP-1	493717	10121	0	0	0	2	1699169	1653	0	55	0	0	0	0	2204717	495372	1709345	22.5%	77.5%
MP-2	17	841222	0	0	0	0	38030	0	0	14826	16413	24236	0	77866	1012611	17	1012593	0.0%	100.0%
PU-1	6	9535	0	0	0	0	0	0	0	1282	2725	86	0	86566	100200	6	100195	0.0%	100.0%
PU-2	4	89406	0	0	0	0	226	0	0	30597	67732	605	0	2282476	2471046	4	2471042	0.0%	100.0%
Cuenca Río Maipo	495223	1529675	0	0	0	13	64787153	50297	0	122191	324875	120070	37045541	6413728	110888767	37591074	73297693	33.9%	66.1%

AÑO HÚMEDO

Área de vigilancia	Carga de contaminante (kg/año)																Carga contaminante (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL	Natural	Antrópica	Natural	Antrópica
AN-1	9023	489587	0	0	0	4793	8979	2483	0	143309	3144788	403	0	2139606	5942973	16299	5926674	0.3%	99.7%
LA-1	25164	1648022	0	0	0	5136	3009261	13	0	225973	2824236	56210	0	291065	8085078	30312	8054766	0.4%	99.6%
MA-1	246619	1251	0	49	0	8952	0	7058	0	761	0	0	24492981	0	24757671	24755659	2012	100.0%	0.0%
MA-2	237376	86107	0	407	0	13661	44815864	12175	0	6881	0	0	4915706	0	50088178	5179326	44908852	10.3%	89.7%
MA-3	341908	442748	0	102	0	6992	28930778	10272	0	34008	64266	19971	13160614	0	43011659	13519889	29491770	31.4%	68.6%
MA-4	11572	982347	0	0	0	1345	36596	43	0	223649	3505600	17392	0	1024324	5802868	12960	5789908	0.2%	99.8%
MA-5	5983	680893	0	0	0	0	19619	0	0	231731	2732847	1167	0	9305678	12977918	5983	12971935	0.0%	100.0%
MP-1	177232	75652	0	0	0	26	1699169	319251	0	635	0	0	0	0	2271965	496508	1775457	21.9%	78.1%
MP-2	10283	6288132	0	0	0	227	38030	0	0	170281	858173	24236	0	250484	7639845	10510	7629335	0.1%	99.9%
PU-1	3279	71277	0	0	0	0	0	0	0	14727	142459	86	0	278471	510299	3279	507020	0.6%	99.4%
PU-2	2090	668307	0	0	0	0	226	0	0	351401	3541412	605	0	7342389	11906431	2090	11904341	0.0%	100.0%
Cuenca Río Maipo	1070528	11434323	0	559	0	41132	78558523	351294	0	1403356	16813782	120070	42569301	20632016	172994884	44032814	128962070	25.5%	74.5%

6.2.1 Evaluación de incertidumbre en estimación de cargas de contaminantes

La Tabla 80 presenta las bandas porcentuales de error asociadas al caudal mensual estimado para cada área de vigilancia y las respectivas estaciones fluviométricas DGA donde se estimó dicha incertidumbre. La metodología para obtener dichos valores se presenta en la Sección 151 – Validación hidrológica. Estos valores son extraídos de la calibración del modelo hidrológico SWAT+, a partir del ajusto de caudales mensuales observados vs. simulados. En caso de que no exista calibración en una zona de vigilancia, se consideró el valor más conservador de banda de error a partir de resultados de la calibración global. Debido a que la carga contaminante anualizada se calcula directamente a partir del caudal y de la concentración medida, manteniendo esta última constante, el error relativo asociado al caudal se propaga directamente a la carga estimada. Por lo tanto, las bandas de error de caudal indicadas en la tabla constituyen, asimismo,

una referencia para la incertidumbre cuantitativa asociada a las cargas contaminantes utilizadas en la estimación de los coeficientes de exportación.

Tabla 80 – Error de estimación de caudal mensual y carga contaminante a partir de bandas porcentuales inferiores y superiores.

Área de vigilancia	Error de caudal mensual/carga de contaminante		Estación fuente de error
	Banda porcentual inferior	Banda porcentual superior	
MA-1	0	1.05	Rio Colorado y Rio Olivares
MA-2	0	1.05	Rio Colorado y Rio Olivares
MA-3	0	1.05	Rio Colorado y Rio Olivares
MA-4	0	2.33	Todas
MA-5	0	2.33	Todas
MP-1	0.11	1.65	Rio Molina, Yerba Loca y Estero Arrayán
MP-2	0.11	1.65	Rio Molina, Yerba Loca y Estero Arrayán
AN-1	1	2.33	Rio Angostura y Estero Pintué
LA-1	0	2.33	Todas
PU-1	0	2.33	Todas
PU-2	0	2.33	Todas

Sin embargo, estas bandas no representan por sí solas la incertidumbre total de los coeficientes obtenidos mediante el procedimiento de optimización, dado que estos dependen adicionalmente de la calidad y representatividad temporal de las mediciones de concentración, del tratamiento de información faltante, de la estructura y supuestos del procedimiento de optimización y de la asignación espacial y temporal de los coeficientes a las distintas categorías de uso de suelo. En consecuencia, la incertidumbre de las cargas y coeficientes de exportación debe entenderse como la combinación de la incertidumbre hidrológica cuantificada mediante las bandas de error de caudal y otras fuentes de incertidumbre de carácter metodológico y de información. En este contexto, se incorporó en el apartado 5.3.1 una evaluación cualitativa de la incertidumbre asociada a la estimación de cargas y coeficientes de exportación, considerando la incertidumbre hidrológica, la incertidumbre asociada al monitoreo de calidad del agua, el tratamiento de información faltante, el procedimiento de optimización y la transferencia espacial y temporal de los resultados.

6.2.2 Carga de Nitrógeno de Nitrato

A partir de los resultados de la Tabla 74, se observa una sensibilidad a la condición hidrológica de las cargas difusas anuales de nitrógeno de nitrato (Figura 76). La carga total de nitrógeno de nitrato alcanza aproximadamente 3,11 millones de kg/año en años muy secos, 3,19 millones de kg/año en años secos, disminuye a 0,30 millones de kg/año en años normales y aumenta hasta aproximadamente 2,09 millones de kg/año en años húmedos. Por lo tanto, no se observa una relación lineal entre precipitación y carga total, sino que la respuesta depende de la variación de los coeficientes de exportación de cada uso de suelo. Los cambios más importantes corresponden a los usos N°3 (bosques) y N°9 (praderas y matorrales), que modifican significativamente su contribución entre escenarios hidrológicos debido al extensa área que ocupan. Los valores altos durante condiciones secas podrían estar asociados a la acumulación de nitrógeno en el suelo durante períodos de baja escorrentía y su posterior movilización, mientras que en condiciones más húmedas el lavado previo y la menor acumulación disponible pueden reducir los coeficientes. Por lo tanto, la respuesta del nitrato depende no solo de la precipitación anual, sino también de las condiciones hidrológicas antecedentes y la disponibilidad de nitrógeno acumulado.

El aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo a la carga anual de nitrógeno de nitrato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica, se presenta en la Figura 77. En cuanto a los usos de suelo, durante los años muy secos la carga total está dominada por X3 (bosques), que aporta aproximadamente un 89 % de la carga de la cuenca. En años secos, la fuente dominante cambia a X9 (praderas y matorrales), con aproximadamente un 93 % de la carga total. Durante años normales la distribución es considerablemente más equilibrada, destacando X9 (32,5 %), X11, agricultura con aguas tratadas (27,2 %) y X14, actividad pecuaria intensiva (26,9 %). Finalmente, durante años húmedos vuelve a aumentar la importancia de las coberturas naturales, principalmente X9 (53,7 %) y X3 (28,1 %), seguidas por X7, minería (9,9 %). Entre las fuentes antrópicas, por tanto, los principales aportes corresponden a minería, agricultura con aguas tratadas y actividad pecuaria intensiva.

Las condiciones hidrológicas afectan de manera diferenciada las cargas asociadas a cada uso de suelo. Destaca particularmente X9, cuya carga aumenta desde aproximadamente 120 mil kg/año en condiciones muy secas hasta 2,97 millones de kg/año en años secos, disminuye a 97 mil kg/año en condiciones normales y alcanza nuevamente 1,12 millones de kg/año en años húmedos. X3 presenta igualmente una elevada sensibilidad, con 2,78 millones de kg/año en condiciones muy secas y 588 mil kg/año durante años húmedos, pero valores mucho menor en condiciones secas y normales. La minería (X7) aumenta considerablemente durante condiciones húmedas, alcanzando aproximadamente 206 mil kg/año, frente a 17–51 mil kg/año en los demás escenarios. En contraste, las cargas asociadas a X11 y X14 permanecen prácticamente constantes entre escenarios, por lo que su importancia relativa aumenta principalmente cuando disminuyen los aportes de las coberturas naturales.

El análisis por área de vigilancia evidencia también una importante sensibilidad espacial. En condiciones muy secas, MP-1 concentra cerca del 90 % de la carga total de la cuenca, con aproximadamente 2,79 millones de kg/año, explicados casi completamente por X3. Durante años secos MP-1 continúa siendo el principal aporte, con aproximadamente 2,69 millones de kg/año, pero en este escenario la carga está asociada principalmente a X9. Esta fuerte concentración espacial explica gran parte de las elevadas cargas obtenidas para los escenarios muy seco y seco.

En condiciones normales la carga se distribuye de manera mucho más homogénea entre las áreas de vigilancia, destacando MA-5 y PU-2, donde adquieren mayor importancia X14 y X11, junto con aportes de X9. En condiciones húmedas se produce un desplazamiento de las mayores cargas hacia Maipo Alto, particularmente MA-2 (440 mil kg/año), MA-3 (402 mil kg/año) y MA-1 (360 mil kg/año), dominadas principalmente por X9. También destaca LA-1, con aproximadamente 289 mil kg/año, donde los principales aportes corresponden a X3 y X7.

En resumen, los resultados indican que la sensibilidad de las cargas frente a las condiciones hidrológicas está controlada principalmente por la respuesta de bosques (X3), praderas y matorrales (X9) y minería (X7). Asimismo, la condición hidrológica modifica significativamente la distribución espacial de las cargas: mientras en años muy secos y secos existe una fuerte concentración en MP-1, en años normales se distribuye de manera mucho más homogénea entre las áreas de vigilancia, destacando MA-5 y PU-2, y finalmente durante años húmedos los mayores aportes se trasladan hacia las áreas de vigilancia del Maipo Alto (MA-1, MA-2 y MA-3). Las fuentes antrópicas X11 y X14 presentan una respuesta más estable, pero pueden adquirir una importancia relativa significativa cuando disminuyen los aportes provenientes de las coberturas naturales. El resumen del impacto de las fuentes difusas y su distribución sobre la carga de nitrógeno de nitrato para condiciones hidrológicas húmedas se presenta en el mapa conceptual de la Figura 78.

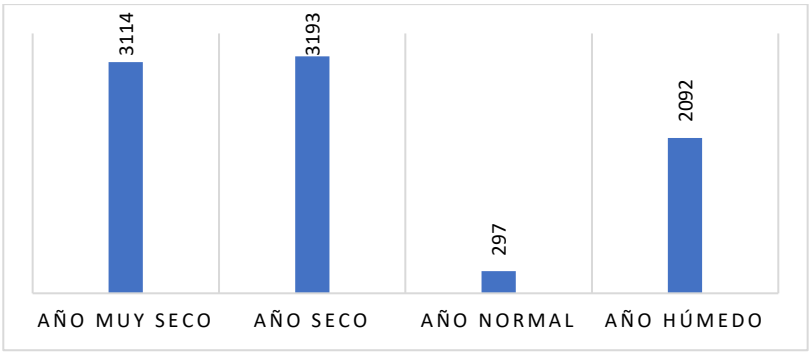


Figura 76 – Carga de nitrógeno de nitrato en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica.

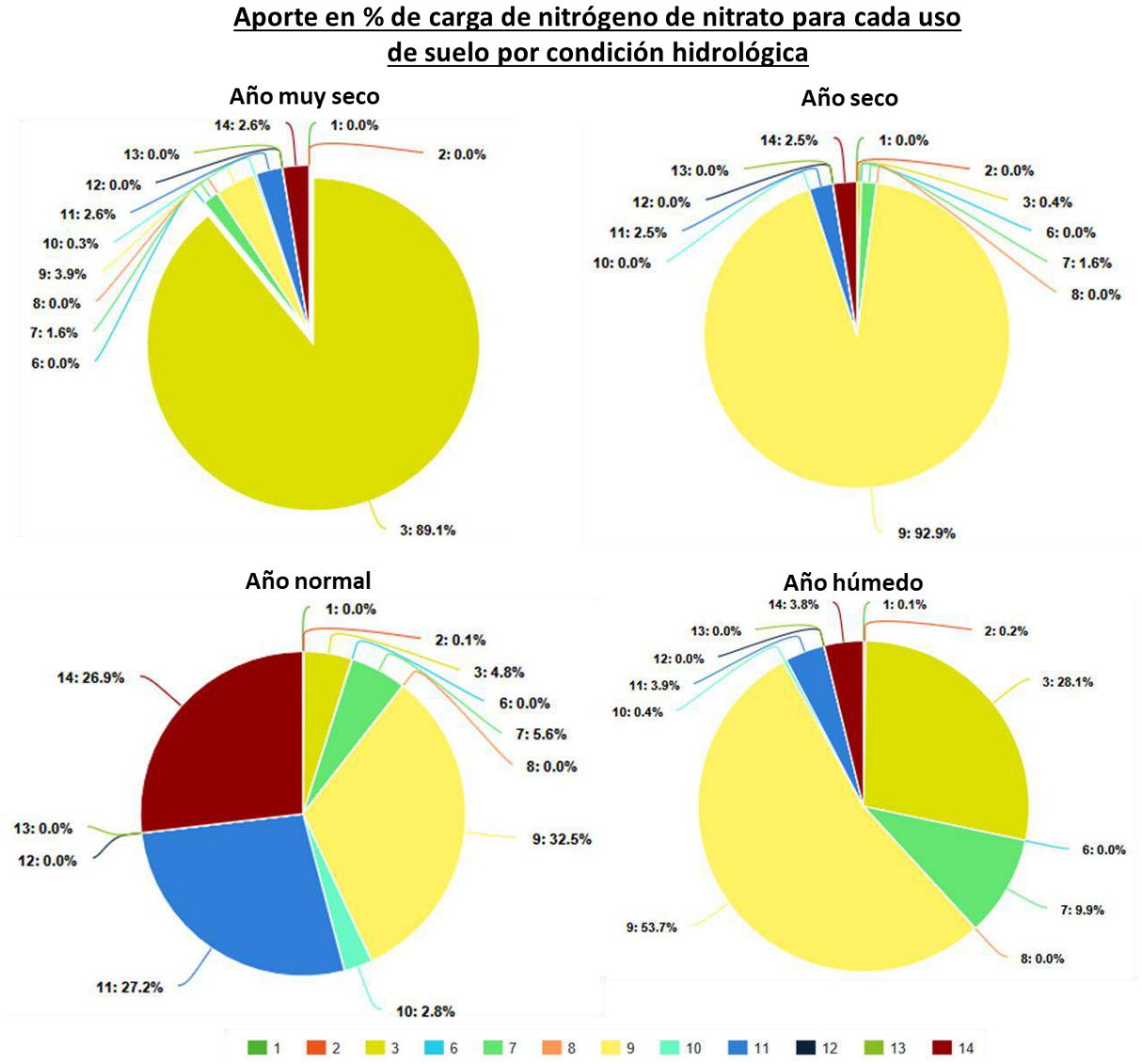


Figura 77 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de nitrógeno de nitrato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica.

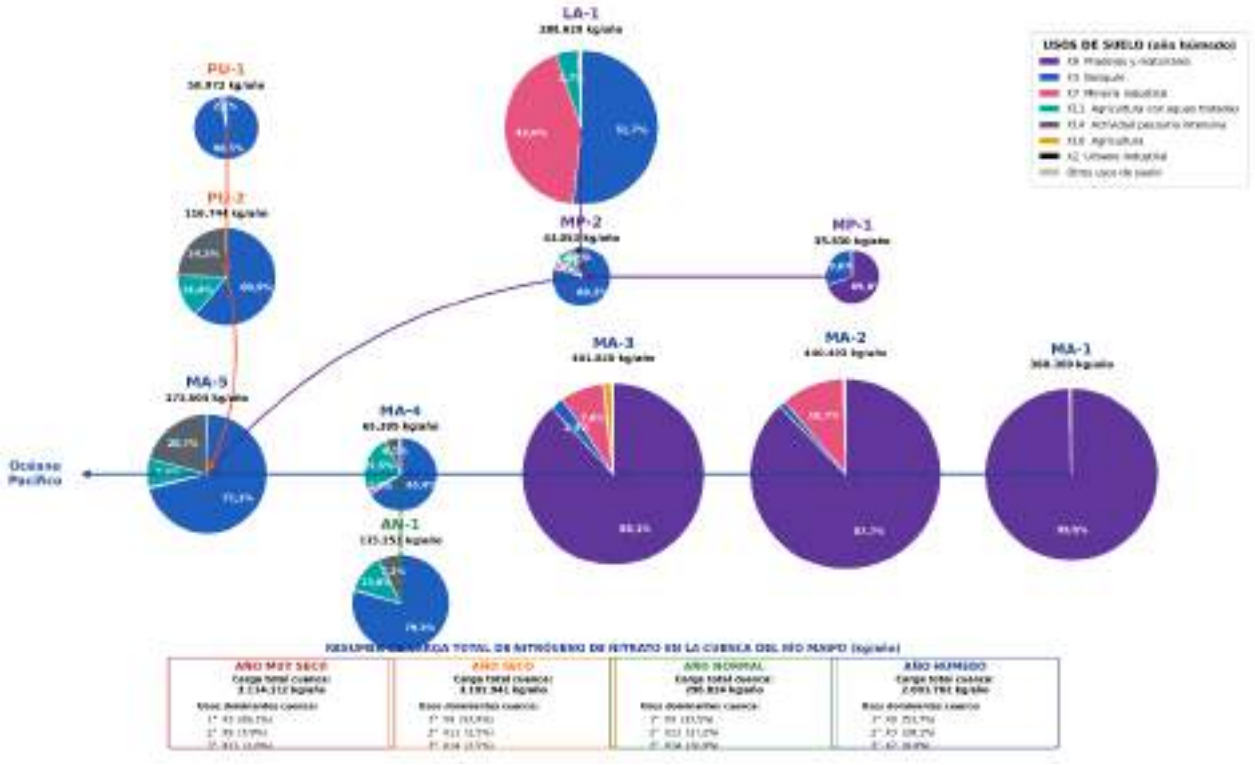


Figura 78 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Nitrógeno de Nitrato, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO.

Al considerar los caudales medios anuales simulados por SWAT+ para cada área de vigilancia y las cargas contaminantes de nitrógeno de nitrato estimadas previamente, se realizó una estimación referencial de la concentración aportante de este contaminante para cada área de vigilancia y condición hidrológica (años muy seco, seco, normal y húmedo) respecto de la norma D.S. N°53/2013 MMA (Tabla 81). Estos valores deben interpretarse como aproximaciones (y por lo mismo, se incluyeron estas estimaciones como porcentaje del valor de la norma por área de vigilancia) y no como concentraciones medidas o valores de referencia, debido a las incertidumbres asociadas tanto a la estimación de las cargas mediante coeficientes de exportación como a la modelación de los caudales. Entre las principales limitaciones se encuentran el distinto desempeño del modelo hidrológico según el sector de la cuenca, con un mejor ajuste en algunas estaciones de cabecera que en sectores aguas abajo, así como la disponibilidad y distribución espacial de los datos de calidad del agua utilizados para estimar las cargas.

No obstante, esta aproximación permite caracterizar de manera cuantitativa y comparativa la contribución potencial de las distintas áreas de vigilancia bajo diferentes condiciones hidrológicas, evaluando su posible incidencia sobre la saturación respecto de los límites establecidos en el D.S. N°53/2013 del MMA e identificando las áreas y usos de suelo que presentan una mayor contribución al aporte de nitrógeno de nitrato.

Cabe señalar que las concentraciones estimadas corresponden al aporte de cada área de vigilancia de manera independiente, considerando exclusivamente las cargas difusas generadas dentro de sus respectivos límites y el caudal asociado a dicha área. En términos de la concentración efectiva en un área de vigilancia ubicada aguas abajo, esta debería considerar además los aportes provenientes de las áreas de vigilancia aguas arriba, ponderados de acuerdo con su contribución relativa al caudal total. Sin embargo,

dado que el objetivo de este análisis es evaluar de forma diferenciada el comportamiento de cada área de vigilancia y la contribución potencial de los usos de suelo presentes en ellas, se optó por mantener el cálculo de manera independiente. Por lo tanto, los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área**, **y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

En condiciones de **año hidrológico normal**, las estimaciones de carga difusa indican que estas fuentes, por sí solas, no generarían una saturación de la norma de $N\text{-}NO_3^-$ en las áreas de vigilancia. Por tanto, las excedencias observadas en terreno bajo estas condiciones podrían estar asociadas a la contribución adicional de fuentes puntuales, además de las fuentes difusas estimadas. Esta diferencia es particularmente relevante en el río Mapocho, donde existe una importante presencia de plantas de tratamiento de aguas servidas y otras descargas puntuales que pueden incrementar las concentraciones de nitratos aguas abajo. En **años muy secos**, MA-5 presenta una posible influencia relevante de las fuentes difusas sobre la saturación, asociada principalmente a la actividad agropecuaria intensiva, que representa aproximadamente el 71% de la carga estimada. En MP-1, la posible saturación estaría asociada principalmente a fuentes naturales provenientes de bosques (97%), considerando además que este sector posee un límite normativo más estricto (1,5 mg/L). En PU-1 y PU-2, la posible saturación estaría asociada principalmente a la actividad agropecuaria intensiva (cerca del 60%) y a campos agrícolas regados con aguas tratadas (más del 36%).

Para los **años secos**, MP-1 mantiene una posible influencia de fuentes naturales, principalmente praderas, mientras que en el río Puangue las principales contribuciones difusas corresponden nuevamente al riego de áreas agrícolas con aguas tratadas y a la actividad agropecuaria intensiva, que en conjunto representan alrededor del 64% de los aportes, además de una contribución de bosques cercana al 36%. En **años húmedos**, el incremento de los caudales favorecería el arrastre y transporte de nitratos asociados al suelo y la vegetación, generando posibles excedencias en LA-1, MA-2, MA-3 y PU-1. En LA-1, los aportes estimados corresponden principalmente a bosques (52%) y minería (43%), mientras que en MA-2 y MA-3 predominan los aportes naturales de praderas y matorrales (89%), con una contribución minera cercana al 10%. En PU-1, la eventual excedencia estaría dominada por fuentes naturales de praderas y matorrales (97%), lo que podría asociarse al transporte de nitratos durante eventos de crecida.

Cabe señalar que estos resultados corresponden a estimaciones gruesas del aporte de fuentes difusas y, por tanto, no representan directamente las concentraciones observadas en los cursos de agua. El contraste con las mediciones de calidad del agua debe considerar que estas últimas integran tanto fuentes difusas como fuentes puntuales y los procesos de transporte, mezcla y retención que ocurren a lo largo de la red de drenaje. Así, las concentraciones medias elevadas observadas en PU-2 (10,7 mg/L) y particularmente en las aguas subterráneas de MP-2 (hasta 16,9 mg/L) (ver sección 4.2.6) no necesariamente contradicen las estimaciones de aporte difuso, sino que reflejan el efecto combinado de las distintas fuentes presentes en cada sector. En particular, el incremento de $N\text{-}NO_3^-$ observado hacia sectores bajos del Mapocho puede estar fuertemente condicionado por las descargas de plantas de tratamiento de aguas servidas, además de los aportes difusos asociados a la expansión de las áreas agrícolas. Por ello, la aproximación presentada permite identificar dónde y bajo qué condiciones las fuentes difusas podrían contribuir significativamente a la saturación, pero no permite atribuir por sí sola las concentraciones medidas a dichas fuentes.

Tabla 81 – Concentración aportante de $N\text{-}NO_3^-$ por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA[16]

		Concentración aportante por AV, en % de la norma DS53/2013 MMA			
Área de vigilancia	**Norma N-NO3 (mg/l)**	**Año muy seco**	**Año seco**	**Año normal**	**Año húmedo**
AN-1	4.0	26%	27%	8%	28%
LA-1	4.0	50%	74%	17%	134%
MA-1	0.5	18%	21%	6%	95%
MA-2	0.5	97%	90%	31%	457%
MA-3	0.5	32%	36%	14%	262%
MA-4	4.0	26%	13%	27%	19%
MA-5	8.0	104%	13%	13%	60%
MP-1	1.5	1859%	1522%	7%	12%
MP-2	10.0	3%	5%	2%	6%
PU-1	1.5	3603%	512%	61%	11152%
PU-2	10.0	133%	81%	27%	38%

>=100%
>80% y <100%
<=80%

6.2.3 Carga de Fósforo de Ortofosfato

A partir de los resultados de la Tabla 75, se observa una sensibilidad a la condición hidrológica de las cargas difusas anuales de fósforo de ortofosfato (Figura 79). El aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo a la carga anual de fósforo de ortofosfato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica, se presenta en la Figura 80.

Se observan diferencias en el patrón para ortofosfatos, en comparación de lo observado para nitrato, ya que la mayor carga se presenta en condiciones normales, y la importancia de las fuentes difusas cambia entre escenarios hidrológicos. La carga total aumenta desde aproximadamente 54.700 kg/año en años muy secos a 414.200 kg/año en años secos, alcanza un máximo cercano a 582.800 kg/año en años normales y disminuye posteriormente a aproximadamente 213.200 kg/año en años húmedos. Este comportamiento evidencia que no existe una relación lineal entre precipitación y carga total, sino que la respuesta depende de la variación de los coeficientes de exportación asociados a cada uso de suelo.

La composición de las cargas también cambia de manera importante entre escenarios hidrológicos. En años muy secos predominan las fuentes antrópicas, especialmente X11, correspondiente a agricultura con aguas tratadas, que representa aproximadamente 65,2 % de la carga total, seguida por X10, agricultura convencional, con 15,0 %, y X2, áreas urbanas e industriales, con 11,4 %. En años secos, en cambio, la carga pasa a estar dominada por X3, bosques, con aproximadamente 78,2 % del total. Esta predominancia de

[16] Los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área, y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

fuentes naturales se mantiene durante años normales, aunque con una distribución más diversificada entre X3, con 55,6 %, y X9, praderas y matorrales, con 29,1 %. En años húmedos vuelve a aumentar la importancia relativa de las actividades antrópicas, destacando X10 con 37,7 % y X11 con 16,7 %, mientras que X3 mantiene un aporte importante de 33,9 %.

La sensibilidad de las cargas por uso de suelo muestra que X3 y X9 presentan las mayores variaciones entre escenarios, particularmente en los sectores altos de la cuenca. Sus aportes aumentan de forma considerable durante condiciones secas y normales, lo que explica gran parte del incremento de la carga total en dichos escenarios. Por su parte, las cargas asociadas a la agricultura convencional y a la agricultura con aguas tratadas adquieren mayor relevancia en condiciones muy secas y húmedas. En consecuencia, la condición hidrológica no sólo modifica la magnitud de la carga, sino también el tipo de fuente que domina el aporte de ortofosfato.

El análisis por área de vigilancia muestra igualmente una fuerte variabilidad espacial. En condiciones muy secas las mayores cargas se encuentran relativamente distribuidas entre PU-2, MA-4, LA-1 y AN-1, con valores entre aproximadamente 7.900 y 10.000 kg/año, asociados principalmente a X11. En años secos y normales, en cambio, las cargas se concentran claramente en Maipo Alto, destacando MA-3, con aproximadamente 201.900 y 256.200 kg/año, respectivamente, y MA-2, con alrededor de 107.200 y 166.400 kg/año. En ambos casos, la mayor parte de la carga corresponde a X3. Durante años húmedos MA-3 continúa siendo el área con mayor aporte, con aproximadamente 58.800 kg/año, aunque aumenta la importancia relativa de sectores medios y bajos como PU-2, MA-4, MA-5, LA-1 y AN-1, donde predominan principalmente X10 y X11.

En resumen, las cargas de fósforo de ortofosfato presentan una respuesta hidrológica caracterizada por un cambio de predominancia entre fuentes naturales y antrópicas. Los años secos y normales concentran los mayores aportes desde bosques y praderas/matorrales del Maipo Alto, mientras que en condiciones muy secas y húmedas adquieren mayor relevancia las actividades agrícolas, especialmente la agricultura convencional y la agricultura con aplicación de aguas tratadas. El resumen del impacto de las fuentes difusas y su distribución sobre la carga de fósforo de ortofosfato para condiciones hidrológicas húmedas se presenta en el mapa conceptual de la Figura 78.

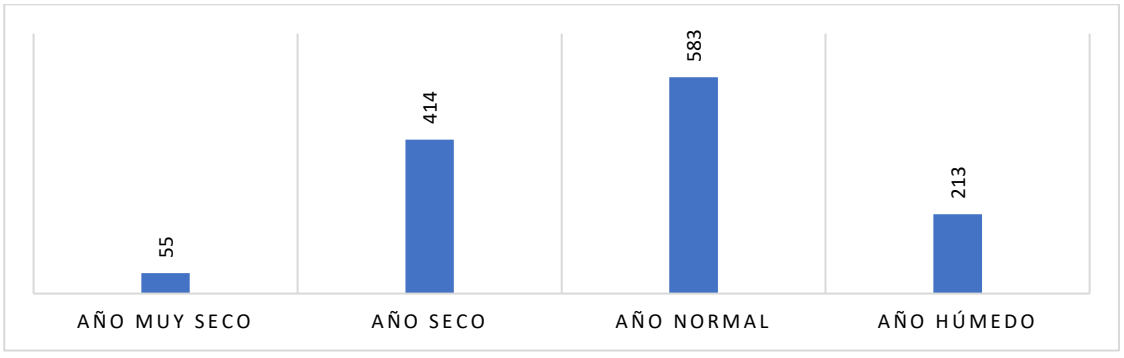


Figura 79 – Carga de fósforo de ortofosfato en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica.

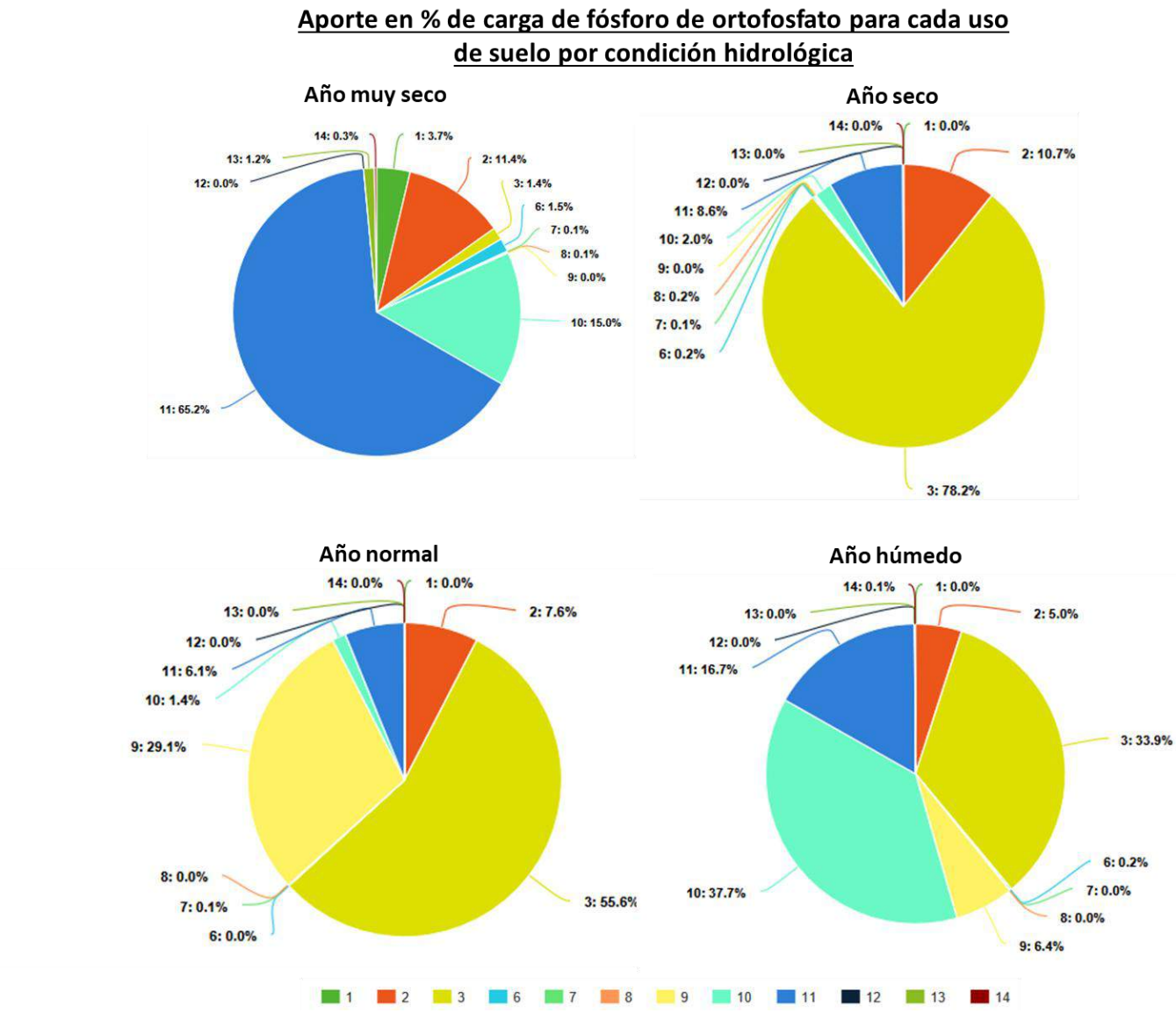


Figura 80 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de fósforo de ortofosfato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica.

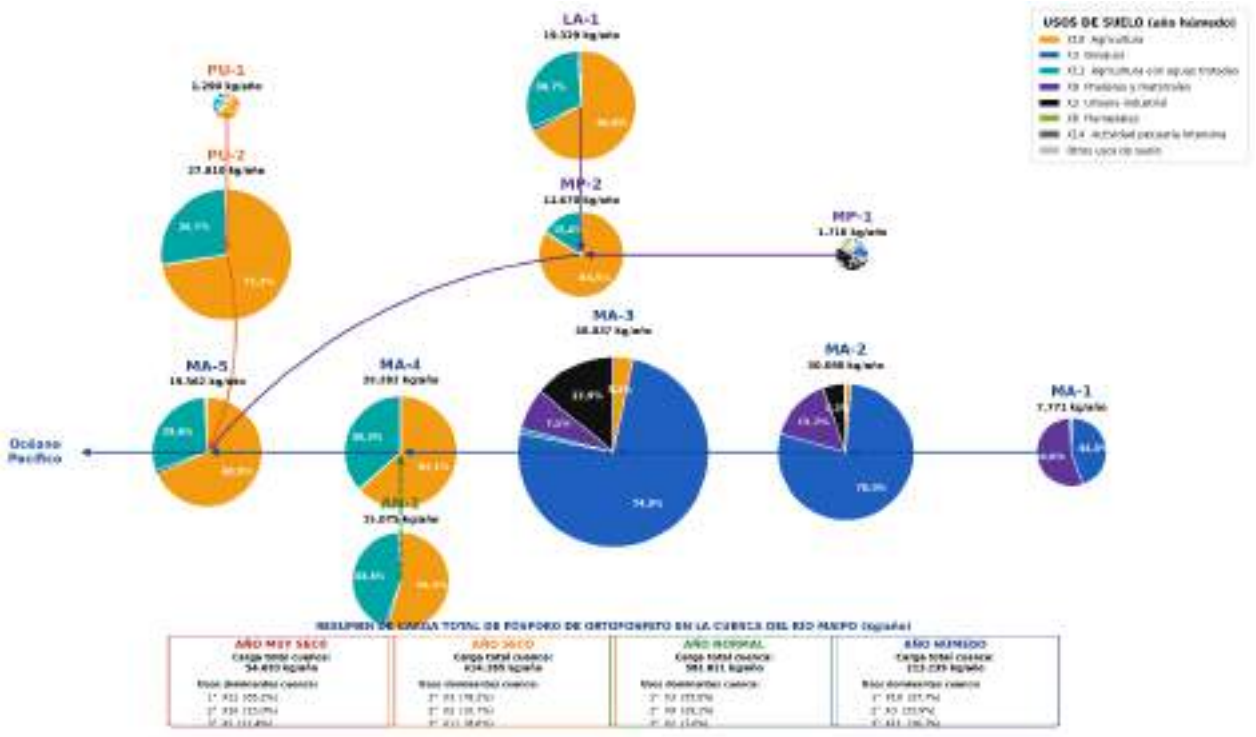


Figura 81 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Fósforo de ortofosfato, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO.

Como aproximación complementaria al análisis de cargas de fósforo de ortofosfato, se estimaron concentraciones aportantes para cada área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 MMA (Tabla 82), a partir de las cargas anuales estimadas y los caudales medios anuales simulados por SWAT+. Estos resultados tienen carácter referencial y permiten comparar la contribución potencial de las distintas áreas bajo años muy secos, secos, normales y húmedos, así como evaluar su magnitud relativa respecto de los valores establecidos en el D.S. N°53/2013 del MMA. Las principales incertidumbres asociadas a estas estimaciones corresponden a aquellas previamente señaladas para la estimación de cargas y la modelación hidrológica, por lo que los valores obtenidos deben interpretarse como una herramienta de análisis comparativo y no como concentraciones observadas o valores normativos.

En condiciones de **año hidrológico normal**, las estimaciones de fuentes difusas indican, en general, cumplimiento de la norma de ortofosfato, con excepción de sectores del Maipo Alto (MA-1, MA-2 y MA-3). Estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que los coeficientes de exportación utilizados para esta zona se estimaron a partir de sectores como río Colorado y río Volcán, donde se han observado concentraciones relativamente elevadas de ortofosfato. En MA-1, MA-2 y MA-3, más del 99% de la carga estimada corresponde a fuentes naturales, principalmente bosques y praderas, y el límite normativo es particularmente restrictivo (0,1 mg/L). Por ello, las posibles excedencias estimadas en estos sectores no deben interpretarse directamente como evidencia de contaminación antrópica. Aguas abajo, en **MA-4**, adquieren mayor relevancia las fuentes de origen antrópico, destacando las áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (58%), las zonas industriales y urbanas (30%) y las áreas agrícolas (13%). En términos generales, este comportamiento es consistente con las concentraciones medidas, que muestran valores

superiores a 0,08 mg/L en algunos cursos del Maipo Alto, aunque las concentraciones medias del río Maipo se mantienen bajo dicho valor.

En **años muy secos**, las áreas con mayor potencial de saturación se concentran principalmente en sectores asociados a actividades agrícolas. En PU-1 y PU-2, predominan las cargas provenientes de áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (61% y 74%, respectivamente), seguidas por áreas agrícolas convencionales (18% y 21%) y, en menor proporción, sectores urbanos e industriales. En AN-1, las áreas agrícolas regadas con aguas tratadas representan aproximadamente el 84% de la carga, mientras que en el Maipo Medio y Bajo estas fuentes representan aproximadamente entre 75% y 80%, seguidas por las áreas agrícolas (14–17%). En años secos, AN-1 mantiene una fuerte contribución agrícola (75%), acompañada de una mayor participación de fuentes urbanas e industriales (19%). Por su parte, MA-2 y MA-3 mantienen un comportamiento asociado principalmente a fuentes naturales, mientras que MA-4 continúa mostrando una combinación de aportes antrópicos, dominada por agricultura y riego con aguas tratadas. Esto resulta especialmente relevante al considerar que las mediciones disponibles muestran concentraciones elevadas en el estero Puangue, con un promedio de 0,85 mg/L en PU-2, muy por sobre el límite normativo de 0,6 mg/L.

En **años húmedos**, el incremento de las cargas asociadas al escurrimiento y al transporte de material desde el suelo y la vegetación puede aumentar los aportes difusos, particularmente en MA-2 y MA-3, donde nuevamente predominan las fuentes naturales. En MA-4, la combinación de agricultura, riego con aguas tratadas y aportes urbanos e industriales podría llevar a una eventual saturación de la norma. Al contrastar estos resultados con las mediciones, destaca que las concentraciones elevadas observadas en sectores como río Mapocho en El Monte (0,87 mg/L) y estero Lampa antes del río Mapocho (0,65 mg/L) no pueden atribuirse exclusivamente a las fuentes difusas estimadas, ya que las mediciones integran también aportes puntuales. Esto es particularmente importante en el sistema Mapocho, donde existen múltiples descargas de plantas de tratamiento de aguas servidas y RILES. En consecuencia, las estimaciones presentadas deben considerarse aproximaciones gruesas y de carácter comparativo, útiles para identificar áreas y usos de suelo potencialmente relevantes, pero no como una predicción exacta de las concentraciones observadas en los cursos de agua.

Tabla 82 – Concentración aportante de $P\text{-}PO_4^{-3}$ por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA[17]

		Concentración aportante por AV, en % de la norma DS53/2013 MMA			
Área de vigilancia	**Norma Ortofosfato (mg/l)**	**Año muy seco**	**Año seco**	**Año normal**	**Año húmedo**
AN-1	0.2	228%	141%	66%	97%
LA-1	0.6	62%	73%	53%	60%
MA-1	0.1	3%	52%	163%	13%
MA-2	0.1	11%	1161%	1181%	195%
MA-3	0.1	9%	969%	942%	239%
MA-4	0.2	286%	138%	372%	157%
MA-5	1.0	127%	16%	20%	54%
MP-1	0.1	9%	7%	4%	10%
MP-2	2.5	10%	29%	20%	6%
PU-1	0.6	2396%	61%	24%	706%
PU-2	2.5	112%	57%	25%	36%

>=100%
>80% y <100%
<=80%

6.2.4 Carga de DBO_5

A partir de los resultados de la Tabla 76, se observa una sensibilidad a la condición hidrológica de las cargas difusas anuales de DBO_5 (Figura 82). El aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo a la carga anual de fósforo de ortofosfato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica, se presenta en la Figura 83.

A escala de la cuenca del río Maipo, las cargas difusas estimadas de DBO_5 presentan una clara sensibilidad a la condición hidrológica. La carga total aumenta desde aproximadamente 3,29 millones de kg/año en años muy secos hasta 7,50 millones de kg/año en años secos y 7,22 millones de kg/año en años normales, alcanzando un máximo de aproximadamente 19,05 millones de kg/año en años húmedos. A diferencia de lo observado para nitrato y ortofosfato, en DBO_5 se distingue con mayor claridad un incremento de la carga total bajo condiciones húmedas, asociado principalmente al aumento de los aportes desde coberturas naturales de la zona alta de la cuenca.

Los usos de suelo que explican la mayor parte de la carga corresponden principalmente a X3 (bosques) y X9 (praderas y matorrales). X3 incrementa su carga desde aproximadamente 0,99 millones de kg/año en años muy secos hasta 4,30 millones en condiciones secas y normales, alcanzando 10,37 millones de kg/año en años húmedos, equivalente al 54,5 % de la carga total de la cuenca. X9 presenta una respuesta igualmente

[17] Los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área, y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

marcada, aumentando desde 0,55 millones de kg/año en años muy secos hasta 6,43 millones de kg/año en condiciones húmedas, cuando representa el 33,8 % de la carga total. Este comportamiento es consistente con una mayor movilización de materia orgánica y material superficial mediante escorrentía y erosión durante períodos de mayor disponibilidad hídrica. También destaca X8 (nieves y glaciares), cuya carga pasa desde valores prácticamente despreciables en años secos a aproximadamente 565 mil kg/año en años húmedos, evidenciando una elevada sensibilidad al régimen hidrológico.

Entre las fuentes antrópicas, X7 (minería) presenta una contribución relevante durante años muy secos, secos y normales, con cargas del orden de 0,51 a 0,70 millones de kg/año, pero disminuye considerablemente durante el escenario húmedo, hasta aproximadamente 90 mil kg/año. Por el contrario, X11 (agricultura con aguas tratadas) mantiene una carga cercana a 850 mil kg/año en todos los escenarios, adquiriendo mayor importancia relativa cuando disminuyen los aportes naturales. Las áreas urbanas e industriales (X2) presentan una contribución secundaria a escala de cuenca, mientras que agricultura convencional (X10), vertederos (X12) y actividad pecuaria intensiva (X14) representan aportes menores en comparación con las principales fuentes.

La distribución espacial de las cargas también cambia significativamente con la condición hidrológica. En años muy secos destaca LA-1, con aproximadamente 1,01 millones de kg/año, donde la minería (X7) representa cerca del 46 % de la carga, seguida por X11 y X3. En años secos y normales, los mayores aportes se desplazan hacia Maipo Alto, particularmente MA-3 y MA-2: MA-3 alcanza aproximadamente 2,65 y 2,54 millones de kg/año, respectivamente, dominada principalmente por X3, mientras que MA-2 presenta entre 1,47 y 1,58 millones de kg/año, también con predominio de bosques.

Esta concentración en la zona alta se intensifica durante los años húmedos (Figura 84). MA-3 alcanza aproximadamente 8,30 millones de kg/año, seguido por MA-2 con 5,70 millones de kg/año y MA-1 con 2,65 millones de kg/año. En MA-3 y MA-2 predominan X3 y X9, mientras que en MA-1 la carga se encuentra dominada por X9 (75,3 %), seguida por X3. En contraste, en sectores medios y bajos, como MA-4, MA-5, PU-1 y PU-2, adquiere mayor importancia X11, llegando a representar 88,2 % de la carga en MA-5 y 93,4 % en PU-2 durante condiciones húmedas.

En síntesis, la sensibilidad de las cargas de DBO_5 está controlada principalmente por la respuesta de las coberturas naturales de Maipo Alto, especialmente bosques y praderas/matorrales, cuyos aportes aumentan considerablemente durante años húmedos. Las fuentes antrópicas presentan comportamientos más diversos: la minería adquiere mayor relevancia bajo condiciones secas y normales, mientras que la agricultura con aguas tratadas mantiene aportes relativamente constantes y domina varias áreas de vigilancia de los sectores medio y bajo de la cuenca.

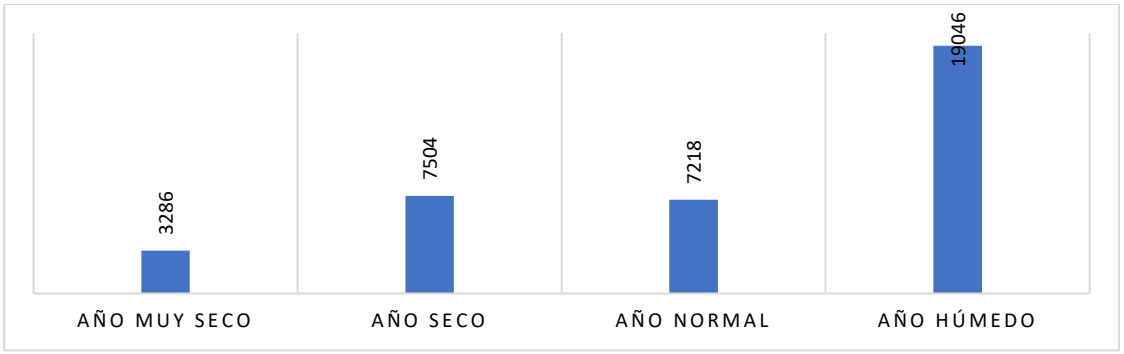


Figura 82 – Carga de DBO_5 en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica.

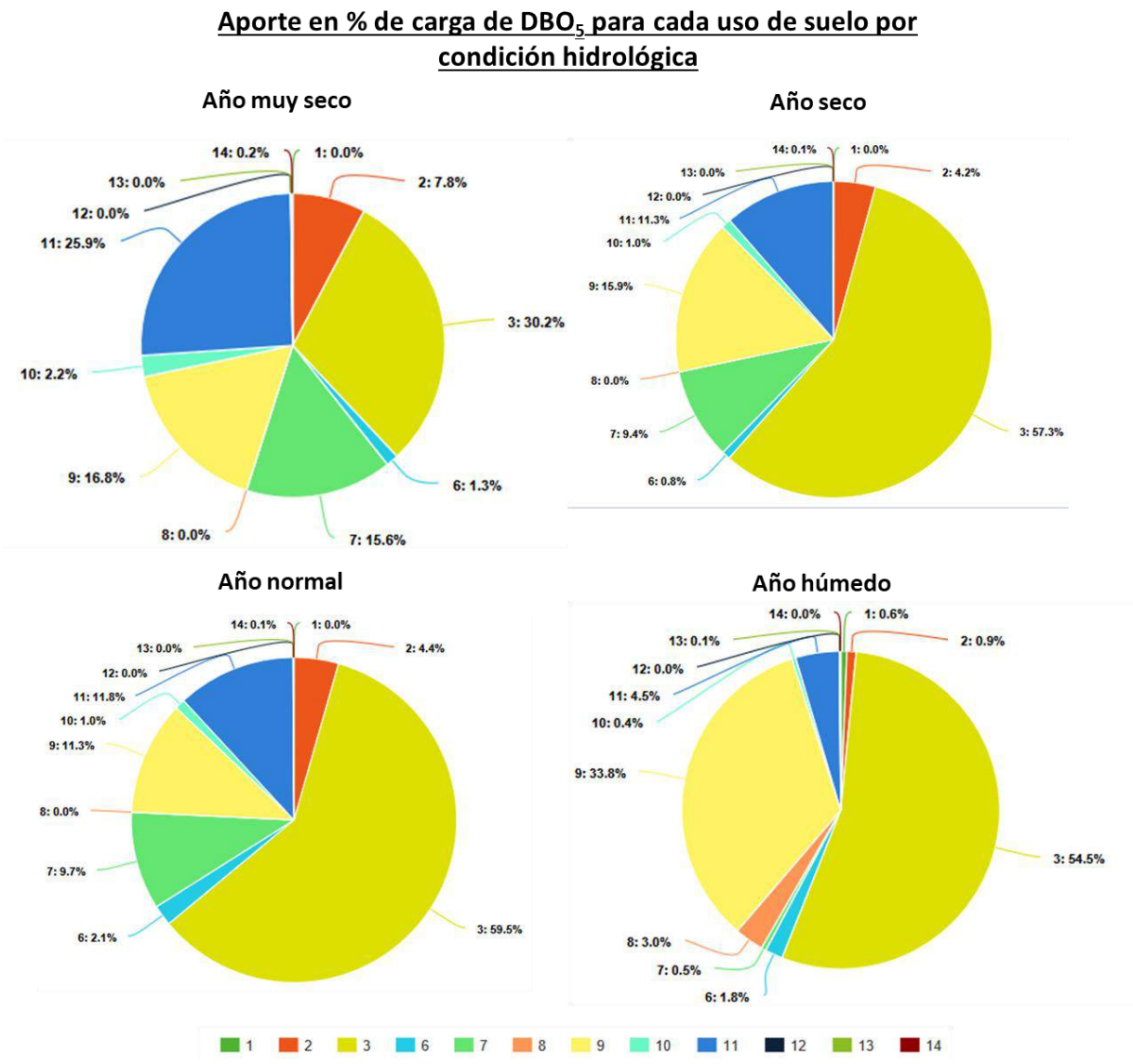


Figura 83 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de DBO_5 en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica.

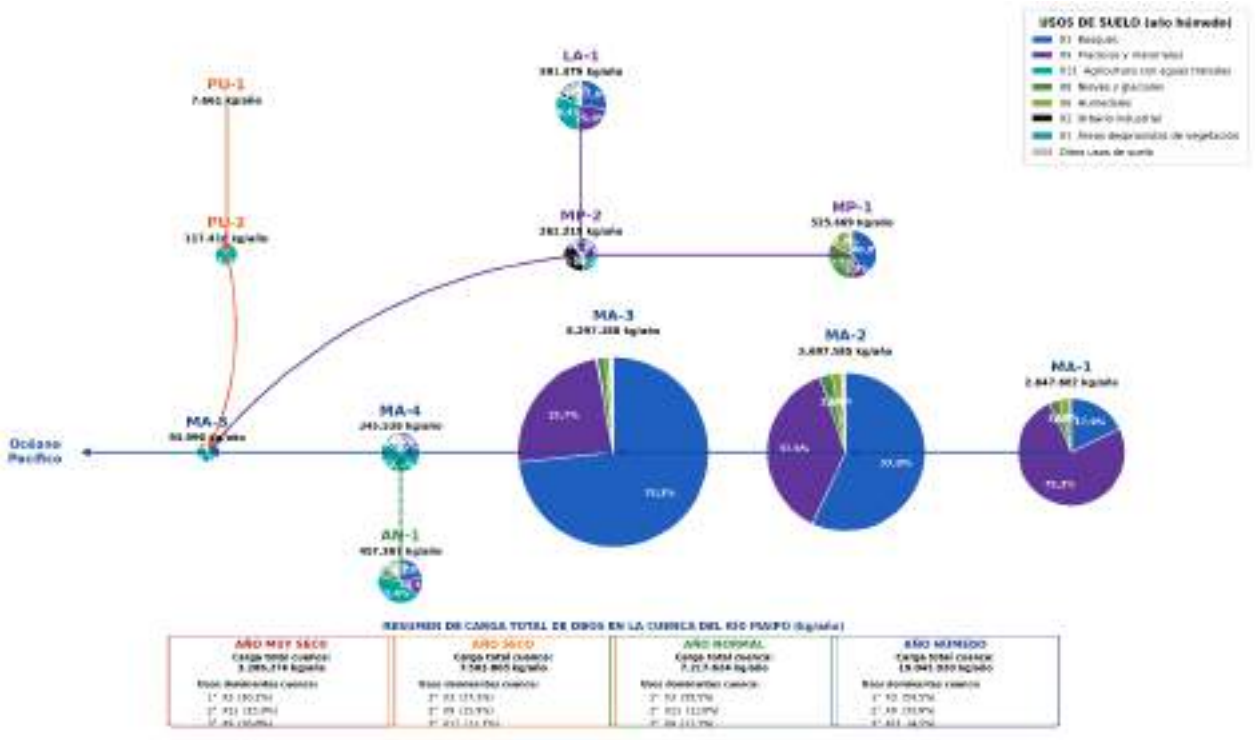


Figura 84 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante DBO_5, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO.

Como aproximación complementaria al análisis de cargas de DBO_5, se estimaron concentraciones aportantes para cada área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 MMA (

Tabla 83), a partir de las cargas anuales estimadas y los caudales medios anuales simulados por SWAT+. Estos resultados tienen carácter referencial y permiten comparar la contribución potencial de las distintas áreas bajo años muy secos, secos, normales y húmedos, así como evaluar su magnitud relativa respecto de los valores establecidos en el D.S. N°53/2013 del MMA. Las principales incertidumbres asociadas a estas estimaciones corresponden a aquellas previamente señaladas para la estimación de cargas y la modelación hidrológica, por lo que los valores obtenidos deben interpretarse como una herramienta de análisis comparativo y no como concentraciones observadas o valores normativos.

En **años hidrológicos normales**, el área de vigilancia más crítica corresponde a LA-1, cuya concentración aportante estimada alcanza aproximadamente un 263% de la norma. La carga difusa proviene principalmente de actividades mineras (53%), seguida de áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (15%) y agricultura (2%), mientras que las fuentes naturales, principalmente bosques y praderas, representan aproximadamente el 26%. Este patrón se mantiene en años secos y muy secos, en los que LA-1 continúa presentando una potencial saturación asociada a estas mismas fuentes. En MA-4 también se observa una contribución importante de fuentes antrópicas, particularmente de áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (62%), agricultura (6%) y zonas urbanas (8%), mientras que bosques y praderas representan cerca del 21% de la carga. Bajo condiciones muy secas, MA-4 podría superar la norma, manteniéndose una composición de fuentes similar. Por su parte, MA-2 y MA-3 presentan concentraciones aportantes superiores o cercanas a la norma en años secos, normales y húmedos, pero con una predominancia de fuentes naturales, por lo que estas excedencias estimadas deben interpretarse con especial cautela.

En **años muy secos**, destaca especialmente PU-2, donde la concentración aportante estimada alcanza 367% de la norma, asociada principalmente al riego de áreas agrícolas con aguas tratadas (84%) y, en menor medida, a áreas urbanas (11%). En PU-1, la concentración estimada también podría superar la norma en años húmedos. En este último caso, la carga difusa proviene principalmente de áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (58%) y de bosques y praderas (39%). La elevada sensibilidad de estos sectores a la condición hidrológica sugiere una importante influencia del escurrimiento y transporte de materia orgánica desde las superficies aportantes, aunque los valores extremos obtenidos deben considerarse estimaciones gruesas y no concentraciones efectivamente esperadas en el cauce. En años húmedos, LA-1 presenta una disminución relativa de su concentración aportante, aunque permanece cercana a la norma (110%), con una mayor participación de fuentes naturales (53%) y de agricultura regada con aguas tratadas (29%).

Finalmente, en el sistema Mapocho (MP-1 y MP-2) las estimaciones muestran una contribución relativamente baja de las fuentes difusas en comparación con otros sectores, por lo que las concentraciones de DBO_5 observadas que superan la norma —particularmente aguas abajo de la incorporación de tributarios— no pueden atribuirse únicamente a estas fuentes. Las mediciones de calidad del agua integran además fuentes puntuales, entre las que destacan las plantas de tratamiento de aguas servidas, así como los aportes provenientes de sectores aguas arriba, como LA-1. En consecuencia, las estimaciones de carga difusa permiten identificar las áreas donde determinadas actividades agrícolas, mineras o urbanas podrían contribuir de manera relevante a la carga orgánica, pero no permiten por sí solas explicar las concentraciones medidas en el río. En particular, el comportamiento observado en el Mapocho refuerza la necesidad de considerar conjuntamente las fuentes difusas y puntuales para interpretar la calidad del agua.

Tabla 83 – Concentración aportante de DBO_5 por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA[18]

		Concentración aportante por AV, en % de la norma DS53/2013 MMA			
Área de vigilancia	**Norma DBO5 (mg/l)**	**Año muy seco**	**Año seco**	**Año normal**	**Año húmedo**
AN-1	10.0	169%	84%	40%	44%
LA-1	10.0	442%	359%	263%	110%
MA-1	8.0	3%	16%	9%	44%
MA-2	8.0	31%	171%	105%	370%
MA-3	8.0	17%	127%	93%	338%
MA-4	8.0	195%	70%	190%	50%
MA-5	8.0	232%	22%	28%	33%
MP-1	5.0	56%	48%	36%	51%
MP-2	10.0	111%	85%	60%	34%
PU-1	5.0	5298%	73%	28%	503%
PU-2	10.0	367%	152%	68%	38%

>=100%
>80% y <100%
<=80%

6.2.5 Carga de Zinc disuelto

A partir de los resultados de la Tabla 77, se observa una sensibilidad importante a la condición hidrológica de las cargas difusas anuales de zinc disuelto (Figura 85). La carga total aumenta desde aproximadamente 10.950 kg/año en años muy secos hasta 68.060 kg/año en años secos, se mantiene en un nivel similar durante años normales con 65.148 kg/año, y alcanza su máximo en años húmedos con aproximadamente 91.494 kg/año. En términos generales, la respuesta es positiva frente al aumento de la disponibilidad hídrica.

El aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo a la carga anual de zinc disuelto en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica, se presenta en la Figura 86. Los usos de suelo que explican la mayor parte de la carga cambian entre escenarios. En años muy secos predominan X3 (bosques, 44,2 %), X9 (praderas y matorrales, 29,5 %) y X1 (áreas desprovistas de vegetación, 20,6 %). En años secos y normales, X9 se convierte claramente en la principal fuente, representando 79,4 % y 75,6 % de la carga total, respectivamente. En condiciones húmedas la distribución se vuelve más equilibrada: X3 aporta 33,4 %, X1 22,9 %, X7 (minería) 21,1 % y X9 19,8 %. Por lo tanto, **la minería adquiere una relevancia mucho mayor bajo condiciones húmedas**, mientras que en años secos y normales domina principalmente la contribución desde praderas y matorrales.

[18] Los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área, y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

La sensibilidad por uso de suelo también muestra patrones diferenciados. X9 aumenta desde aproximadamente 3.230 kg/año en años muy secos hasta más de 54.000 kg/año en años secos, manteniéndose cercano a 49.000 kg/año en condiciones normales y disminuyendo a aproximadamente 18.150 kg/año en años húmedos. En contraste, X7 presenta una respuesta fuertemente asociada al escenario húmedo, aumentando hasta aproximadamente 19.314 kg/año, frente a valores considerablemente menores en los demás escenarios. X1 también incrementa su aporte en condiciones húmedas, alcanzando cerca de 20.956 kg/año, lo que sugiere una mayor movilización superficial desde sectores con escasa cobertura vegetal.

El análisis espacial muestra que las mayores cargas se concentran principalmente en las zonas altas de la cuenca. En años muy secos destaca MA-3, con aproximadamente 3.387 kg/año, seguido por MP-1 y MA-2. Durante años secos y normales, MP-1 pasa a ser el principal aporte individual, con aproximadamente 4.880 y 41.514 kg/año, respectivamente; en el escenario normal su carga se explica casi completamente por X9. En condiciones húmedas (Figura 87), las mayores cargas corresponden a MA-3 (26.191 kg/año), MP-1 (22.682 kg/año) y MA-2 (16.540 kg/año).

En estas áreas, la composición de las fuentes cambia de manera importante. En MA-3 durante el año húmedo predominan X3 (69,7 %) y X9 (15,2 %), mientras que en MA-2 domina también X3 (58,9 %), seguido por X9 (26,2 %). En MP-1, en cambio, la carga húmeda está controlada principalmente por X1 (55,7 %) y X7 minería (38,9 %). Esta diferencia evidencia una marcada variabilidad espacial en los procesos de exportación de zinc.

En síntesis, las cargas de zinc disuelto presentan una respuesta hidrológica caracterizada por un aumento general hacia condiciones húmedas, pero con cambios importantes en la fuente dominante. En años secos y normales predomina la contribución de praderas y matorrales, mientras que durante años húmedos adquieren mayor relevancia bosques, áreas desprovistas de vegetación y minería, especialmente en los sectores altos de la cuenca.

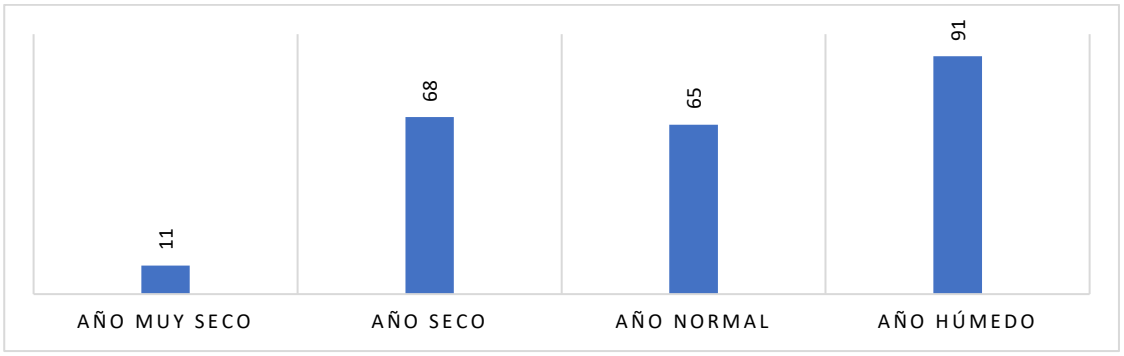


Figura 85 – Carga de Zinc disuelto en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica.

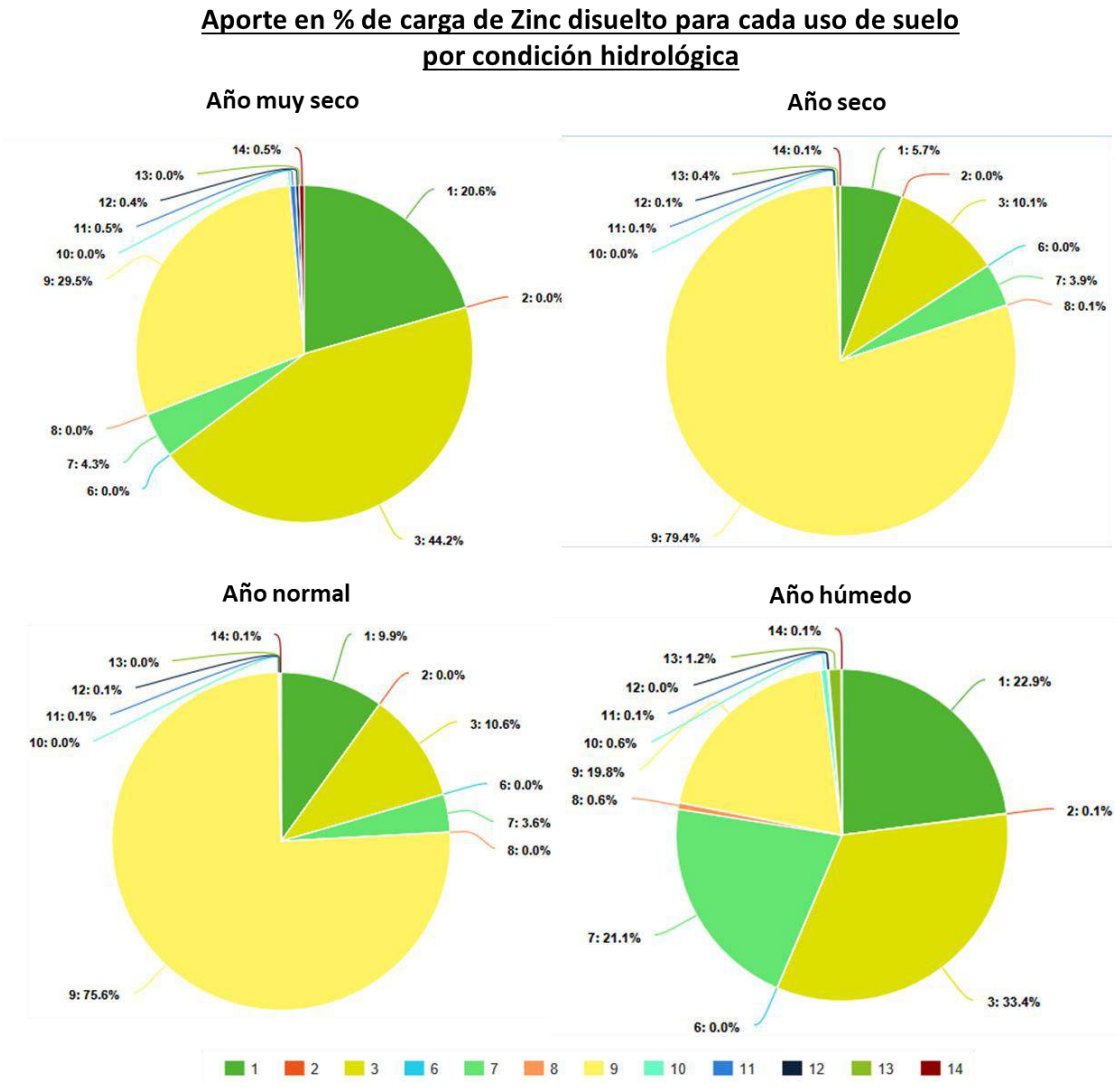


Figura 86 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de Zinc disuelto en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica.

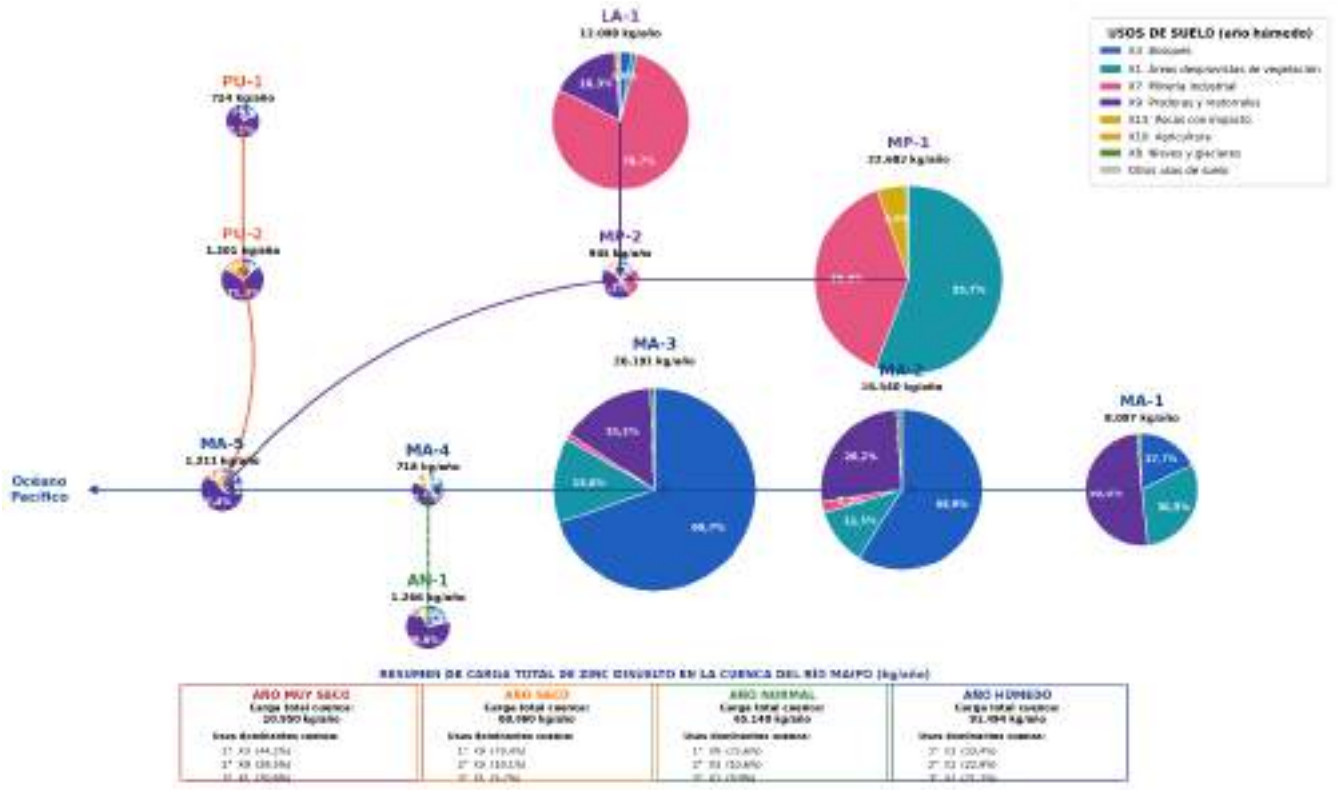


Figura 87 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Zinc disuelto, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO.

Como aproximación complementaria al análisis de cargas de zinc disuelto, se estimaron concentraciones aportantes para cada área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 MMA (Tabla 84), a partir de las cargas anuales estimadas y los caudales medios anuales simulados por SWAT+. Estos resultados tienen carácter referencial y permiten comparar la contribución potencial de las distintas áreas bajo años muy secos, secos, normales y húmedos, así como evaluar su magnitud relativa respecto de los valores establecidos en el D.S. N°53/2013 del MMA. Las principales incertidumbres asociadas a estas estimaciones corresponden a aquellas previamente señaladas para la estimación de cargas y la modelación hidrológica, por lo que los valores obtenidos deben interpretarse como una herramienta de análisis comparativo y no como concentraciones observadas o valores normativos.

En términos de las cargas difusas estimadas, el zinc disuelto presenta un comportamiento variable según el área de vigilancia y la condición hidrológica. En **años normales**, la mayoría de las áreas se mantiene bajo la norma. PU-1 se presenta con excedencias potenciales, sin embargo, **estos resultados deben interpretarse con especial cuidado, debido a su relación con el bajo caudal aportante y la incertidumbre asociada al coeficiente de exportación estimados desde otras zonas de la cuenca, donde el comportamiento geológico probablemente puede variar**. En MA-2 y MA-3, que alcanzan 80% y 42% de la norma, respectivamente, predominan las contribuciones de bosques (50% y 68%) y minería industrial (40% y 24%), lo que refleja una combinación de aportes naturales (geología bajo la cobertura de bosques) y antrópicos. En MA-1, en cambio, la minería industrial representa aproximadamente el 78% de la carga difusa estimada.

En **años secos**, se observa un aumento importante de las concentraciones aportantes en varias áreas. MA-1, MA-2 y MA-3 presentan excedencias, con una fuerte participación de bosques (donde se deriva el efecto de la geología subyacente) y minería industrial. En MA-2, por ejemplo, los bosques representan 83% y la minería industrial 9%, mientras que en MA-3 corresponden a 77% y 18%, respectivamente. También destacan MP-1, donde la carga difusa proviene principalmente de bosques (76%) y minería industrial (22%). En consecuencia, las excedencias estimadas en varios de estos sectores no pueden interpretarse directamente como evidencia de contaminación minera, dado que una proporción importante corresponde a fuentes naturales.

En **años húmedos**, el aumento de las concentraciones aportantes es particularmente marcado en LA-1, MA-2, MA-3, MP-1 y MA-5. En este escenario, MA-2 y MA-3 alcanzan 286% y 284% de la norma, respectivamente, con predominio de bosques (58,9% y 69,7%), mientras que la minería industrial representa un 26,2% y 15,2%. En LA-1, la excedencia estimada (746%) está asociada principalmente a minería industrial (79%), seguida de bosques (16%), mientras que en MP-1 predominan los suelos descubiertos (56%) y la minería industrial (39%). PU-1 presenta nuevamente un valor extremo, por lo que debe revisarse el coeficiente de exportación para bosques en zonas bajas de la cuenca.

El contraste con las concentraciones medidas durante 2014–2024 resulta especialmente relevante para este contaminante. Mientras la estimación de fuentes difusas identifica posibles aportes de minería en sectores como MA-1, MA-2 y MA-3, las mediciones muestran la situación más crítica en el río San Francisco, asociado aguas arriba a la Mina Los Bronces, donde se registra una concentración media de zinc disuelto de 1,13 mg/L, muy superior al límite de 0,03 mg/L. El efecto también se observa aguas abajo, con 0,08 mg/L en el río Mapocho en Los Almendros. Por otra parte, en MA-2 y MA-3 se registran concentraciones medias sobre la norma en sectores como estero La Engorda y río Colorado, aunque de menor magnitud. Esto sugiere que existen fuentes difusas asociadas a la geología del terreno, que tienen un papel particularmente importante para explicar las concentraciones observadas. En este sentido, las estimaciones deben considerarse gruesas y de carácter comparativo, útiles para identificar áreas potencialmente sensibles y distinguir la contribución relativa de los usos de suelo, pero no como una predicción exacta de las concentraciones de zinc disuelto observadas en terreno.

Tabla 84 – Concentración aportante de zinc disuelto por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA[19]

		Concentración aportante por AV, en % de la norma DS53/2013 MMA			
Área de vigilancia	**Norma Zinc disuelto (mg/l)**	**Año muy seco**	**Año seco**	**Año normal**	**Año húmedo**
AN-1	0.03	33%	77%	36%	41%
LA-1	0.03	50%	252%	182%	746%
MA-1	0.03	9%	139%	18%	35%
MA-2	0.03	80%	581%	103%	286%
MA-3	0.03	42%	254%	78%	284%
MA-4	0.03	17%	25%	66%	28%
MA-5	0.03	159%	50%	65%	112%
MP-1	0.03	90%	138%	843%	368%
MP-2	0.03	11%	46%	32%	41%
PU-1	0.03	10094%	901%	345%	7925%
PU-2	0.03	166%	390%	173%	130%

>=100%
>80% y <100%
<=80%

6.2.6 Carga de Sulfatos

A partir de los resultados de la Tabla 78, se observa una sensibilidad importante a la condición hidrológica de las cargas difusas anuales de sulfatos (Figura 88). La carga total es del orden de 529,6 millones de kg/año en años muy secos, aumenta levemente a 540,0 millones de kg/año en años secos, disminuye a aproximadamente 209,5 millones de kg/año en años normales y alcanza su máximo en años húmedos, con cerca de 912,7 millones de kg/año. Por lo tanto, la respuesta no es lineal con la precipitación, aunque las condiciones húmedas favorecen claramente las mayores cargas totales.

El aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo a la carga anual de sulfatos en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica, se presenta en la Figura 89. Los usos de suelo que dominan la carga corresponden principalmente a X3 (bosques) y X9 (praderas y matorrales), con una fuerte concentración espacial en Maipo Alto. En años muy secos, X3 representa aproximadamente 74,0 % de la carga total de la cuenca, mientras que X7 (minería) aporta 10,5 % y X9 7,1 %. En años secos cambia la predominancia y X9 alcanza 68,8 % de la carga total, seguido por X3 con 14,1 %. En años normales la distribución es más equilibrada, con X3 aportando 36,3 %, X9 25,4 % y X7 17,0 %. Finalmente, durante años húmedos vuelve a dominar claramente X3, con 73,9 % de la carga, seguido por X9 con 16,4 %.

[19] Los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área, y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

La sensibilidad por uso de suelo muestra cambios especialmente relevantes en X3, X7 y X9. X3 aumenta desde aproximadamente 392 millones de kg/año en condiciones muy secas hasta 674 millones de kg/año durante años húmedos, mientras que X9 presenta su máximo durante años secos, con alrededor de 371 millones de kg/año, y disminuye posteriormente a 150 millones de kg/año en condiciones húmedas. La minería (X7) también presenta una respuesta importante, con cerca de 55,5 millones de kg/año en años muy secos, 35,7 millones en años secos y normales, y 25,5 millones en años húmedos. Por lo tanto, los aportes mineros son elevados en términos absolutos, pero su contribución relativa disminuye durante condiciones húmedas debido al fuerte incremento de las cargas provenientes de coberturas naturales.

El análisis espacial evidencia una marcada concentración de las cargas en Maipo Alto, principalmente en MA-2 y MA-3. En condiciones muy secas, MA-3 alcanza aproximadamente 264,5 millones de kg/año y MA-2 cerca de 157,6 millones de kg/año, dominadas ampliamente por X3. Durante años secos, las cargas se mantienen elevadas en MA-3 y MA-2, aunque X9 adquiere mayor relevancia. En años normales, MA-3 continúa siendo el principal aporte con aproximadamente 64,9 millones de kg/año, seguido por MA-2 con 46,1 millones de kg/año.

Esta concentración se intensifica significativamente durante los años húmedos (Figura 90). MA-3 alcanza cerca de 480,8 millones de kg/año y MA-2 aproximadamente 294,8 millones de kg/año, explicados principalmente por X3, que representa 86,7 % y 75,4 % de las respectivas cargas. MA-1 también adquiere importancia, con aproximadamente 85,7 millones de kg/año, dominada por X9 y X3. Fuera de Maipo Alto, destaca MP-1, donde durante el escenario húmedo las cargas se distribuyen principalmente entre X13, X1, X3 y X9, evidenciando una mayor influencia de factores geológicos y de coberturas naturales.

En síntesis, **las cargas de sulfato se encuentran fuertemente controladas por las coberturas naturales de los sectores altos de la cuenca**, especialmente bosques y praderas/matorrales, y muestran un incremento importante durante condiciones húmedas, asociados probablemente a fuentes hidrotermales. La minería mantiene aportes elevados en varios escenarios, pero su importancia relativa es menor frente a las grandes cargas naturales de Maipo Alto. Este patrón es consistente con la influencia conjunta de la escorrentía, la geología y las condiciones hidrotermales características de las zonas cordilleranas.

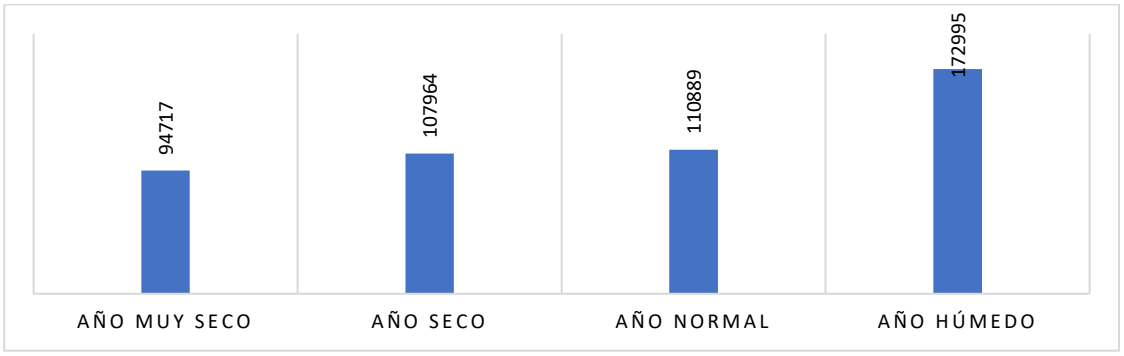


Figura 88 – Carga de Sulfato en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica.

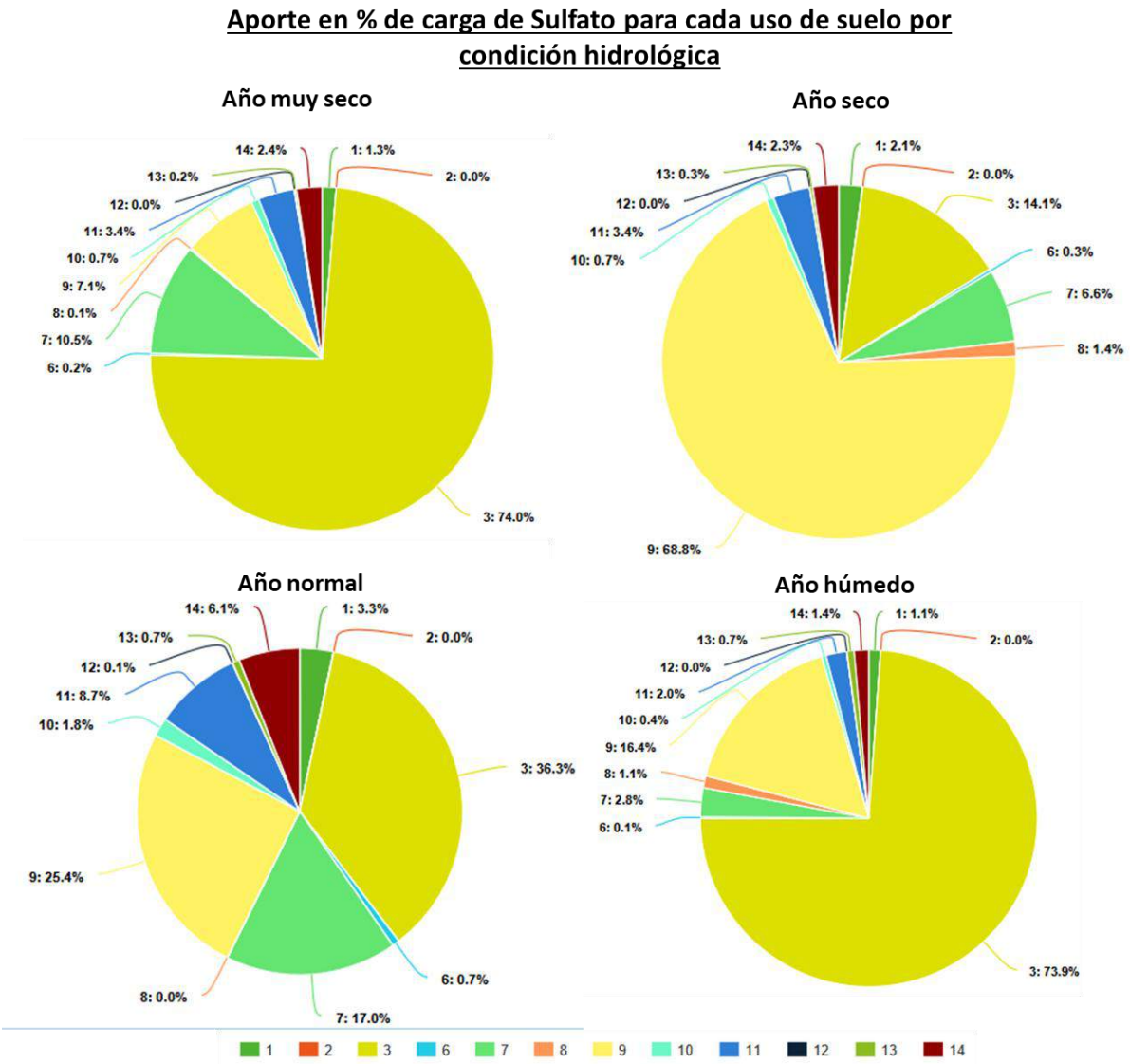


Figura 89 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de Sulfato en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica.

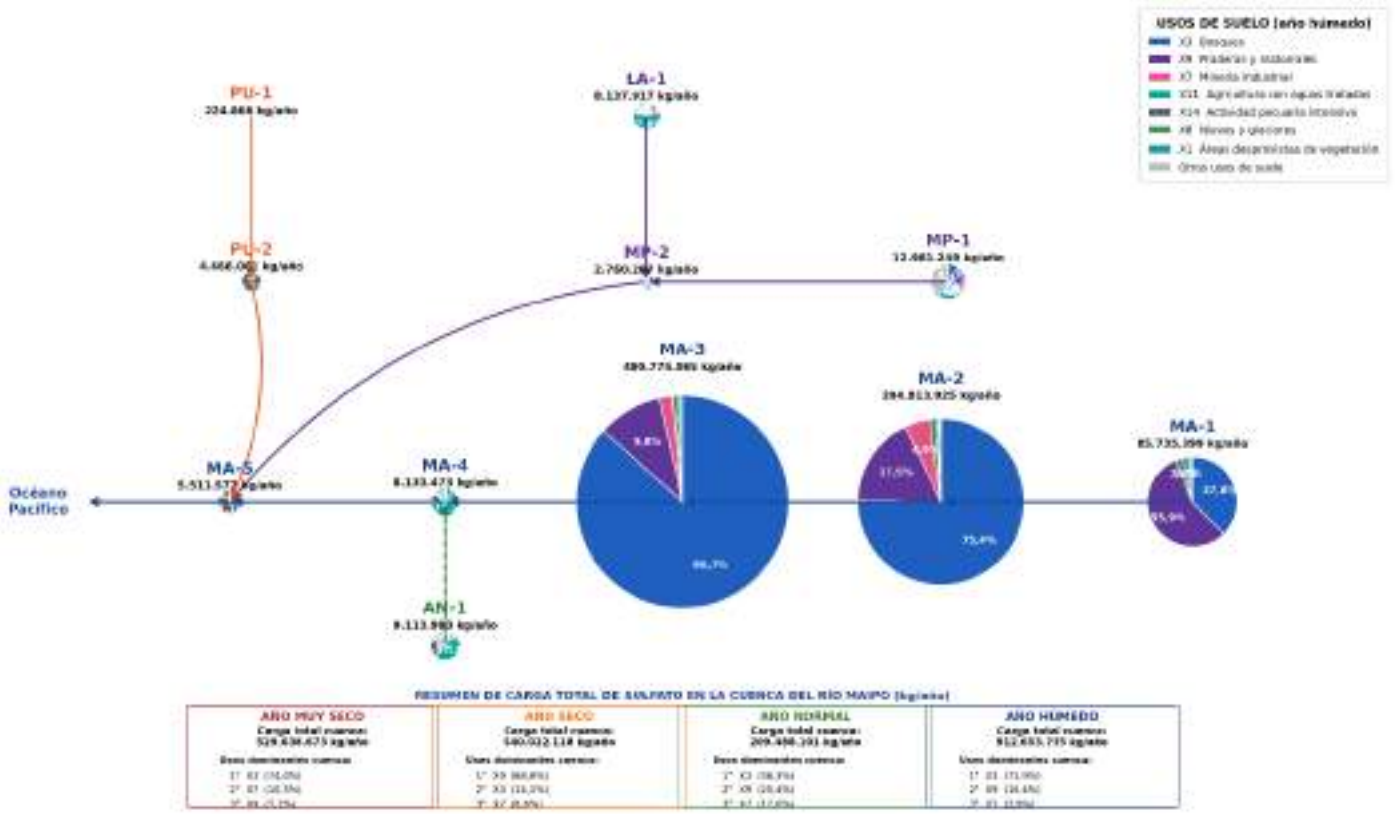


Figura 90 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Sulfato, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO.

Como aproximación complementaria al análisis de cargas de sulfatos, se estimaron concentraciones aportantes para cada área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 MMA (Tabla 85), a partir de las cargas anuales estimadas y los caudales medios anuales simulados por SWAT+. Estos resultados tienen carácter referencial y permiten comparar la contribución potencial de las distintas áreas bajo años muy secos, secos, normales y húmedos, así como evaluar su magnitud relativa respecto de los valores establecidos en el D.S. N°53/2013 del MMA. Las principales incertidumbres asociadas a estas estimaciones corresponden a aquellas previamente señaladas para la estimación de cargas y la modelación hidrológica, por lo que los valores obtenidos deben interpretarse como una herramienta de análisis comparativo y no como concentraciones observadas o valores normativos.

En **años hidrológicos normales**, las concentraciones aportantes estimadas de sulfato se mantienen bajo los límites establecidos por la norma en todas las áreas de vigilancia. No obstante, LA-1 presenta una mayor contribución potencial de fuentes antrópicas, principalmente asociada a la actividad minera (81%), seguida por áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (13%) y agricultura (3%). Este resultado debe interpretarse con cuidado, considerando que los coeficientes de exportación utilizados fueron estimados a partir de información proveniente de sectores mineros del río Mapocho, mientras que no fue posible obtener un coeficiente específico para el sector de Lampa. Por ello, se recomienda complementar la caracterización de LA-1 mediante monitoreo químico específico en el sector de Lampa, que permita representar de mejor manera las condiciones locales. En este contexto, los resultados corresponden a una aproximación de las fuentes difusas y no permiten establecer por sí solos las concentraciones que se observarían en el cauce.

En **años muy secos**, se observa el mayor incremento de las concentraciones aportantes de sulfato, particularmente en LA-1, MA-2, MA-3, MA-5 y el río Puangue. En LA-1 se mantiene el predominio de la minería (81%), mientras que en MA-2 y MA-3 entre un 90% y 96% de la carga estimada proviene de fuentes naturales asociadas a la geología y a las coberturas de bosques y praderas, con una contribución minera menor. En MA-5, aproximadamente el 92% de la carga se asocia a actividad pecuaria intensiva. En PU-1 y PU-2 predominan igualmente las fuentes pecuarias intensivas, con aproximadamente 68% y 90% de los aportes, respectivamente, seguidas por áreas agrícolas regadas con aguas tratadas. En **años secos**, se mantiene el patrón de LA-1, mientras que MA-2 y MA-3 presentan un aumento de sulfatos principalmente asociado a fuentes naturales, que representan más del 97% y 98% de las cargas, respectivamente. PU-2 también muestra una mayor concentración aportante, dominada por la actividad pecuaria intensiva (90%).

En **años húmedos**, el aumento del escurrimiento favorecería el transporte de sulfatos desde las zonas altas del Maipo, especialmente en MA-2 y MA-3. En estos sectores, las fuentes naturales continúan siendo ampliamente predominantes, mientras que la minería representa aproximadamente un 5% y 2% de la carga, respectivamente. En PU-1, la eventual saturación estaría asociada principalmente a la actividad pecuaria intensiva (68%), complementada por fuentes naturales asociadas a praderas (23%). Estos resultados presentan una correspondencia cualitativa con las mediciones de calidad del agua, que muestran concentraciones elevadas de sulfatos en MA-2 y MA-3, particularmente en río Yeso (494 mg/L), río Volcán (hasta 670 mg/L) y río Colorado Bajo (464 mg/L), superando el límite de 380 mg/L. Asimismo, el río San Francisco y estero Yerba Loca presentan valores sobre el límite establecido para MP-1. La presencia de concentraciones elevadas en sectores cordilleranos, junto con el predominio de fuentes naturales estimado en MA-2 y MA-3, sugiere una influencia importante de las características geológicas y volcánicas de la zona, aunque las fuentes mineras también pueden contribuir localmente. En consecuencia, los resultados de cargas deben considerarse estimaciones gruesas y de carácter comparativo, especialmente en los sectores donde predominan las fuentes naturales.

Tabla 85 – Concentración aportante de sulfato por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA[20]

		Concentración aportante por AV, en % de la norma DS53/2013 MMA			
Área de vigilancia	Norma Sulfato (mg/l)	Año muy seco	Año seco	Año normal	Año húmedo
AN-1	380	94%	49%	22%	23%
LA-1	480	329%	226%	164%	32%
MA-1	430	18%	77%	9%	26%
MA-2	380	408%	368%	69%	403%
MA-3	380	256%	173%	50%	412%
MA-4	380	97%	35%	92%	25%
MA-5	380	239%	21%	28%	40%
MP-1	150	78%	81%	54%	42%
MP-2	380	27%	18%	13%	9%
PU-1	150	4393%	58%	22%	492%
PU-2	380	329%	133%	59%	38%

>=100%
>80% y <100%
<=80%

6.2.7 Carga de Cloruros

A partir de los resultados de la Tabla 79, se observa una sensibilidad importante a la condición hidrológica de las cargas difusas anuales de cloruros (Figura 91), observándose una respuesta creciente de carga de cloruro frente a condiciones de mayor precipitación. La carga total aumenta desde aproximadamente 94,7 millones de kg/año en años muy secos, a 108,0 millones de kg/año en años secos y 110,9 millones de kg/año en años normales, alcanzando un máximo de aproximadamente 173,0 millones de kg/año en años húmedos. En comparación con otros contaminantes analizados, el cloruro presenta una relación más clara entre aumento de la disponibilidad hídrica y carga total exportada.

El aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo a la carga anual de cloruros en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica, se presenta en la Figura 92. **Los principales aportes a escala de cuenca corresponden a X7 (minería) y X13 (rocas con impacto geológico)**. En años muy secos, X7 representa aproximadamente 66,0 % de la carga total y X13 un 33,1 %, mientras que en años secos sus contribuciones corresponden a 60,0 % y 35,0 %, respectivamente. Esta predominancia se mantiene durante años normales, con 58,4 % para X7 y 33,4 % para X13. En condiciones húmedas, ambas fuentes continúan siendo las más importantes, aunque su participación relativa disminuye a 45,4 % para minería y 24,6 % para rocas con impacto, debido al incremento de otras fuentes antrópicas, principalmente X14 (actividad pecuaria intensiva, 11,9 %), X11 (agricultura con aguas tratadas, 9,7 %) y X2 (áreas urbanas e industriales, 6,6 %).

[20] Los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área, y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.**

La sensibilidad hidrológica es particularmente evidente en las fuentes antrópicas de los sectores medio y bajo de la cuenca. Durante años húmedos aumentan significativamente las cargas asociadas a X2, X11 y X14, lo que es consistente con una mayor movilización de sales acumuladas mediante escorrentía y lavado de superficies intervenidas. En cambio, X7 y X13 presentan cargas elevadas bajo todos los escenarios, lo que indica la existencia de una fuente persistente de cloruro asociada tanto a actividades mineras como a las características geológicas de los sectores cordilleranos. El incremento de sus cargas durante condiciones húmedas puede relacionarse con una mayor capacidad de movilización y transporte de sales presentes en estas zonas.

Espacialmente, las mayores cargas se concentran de forma persistente en Maipo Alto. En condiciones muy secas destacan MA-2, MA-3 y MA-1, con aproximadamente 38,7, 32,4 y 18,0 millones de kg/año, respectivamente. Esta misma distribución se mantiene en años secos y normales, con MA-2 y MA-3 como las principales áreas aportantes. En MA-2 domina ampliamente X7, con participaciones cercanas al 89–91 %, mientras que en MA-1 prácticamente la totalidad de la carga corresponde a X13. MA-3 presenta una combinación de ambas fuentes, con predominio de X7 y una contribución importante de X13.

Durante años húmedos (Figura 93) se intensifican las cargas en estos mismos sectores: MA-2 alcanza aproximadamente 50,1 millones de kg/año, MA-3 43,0 millones de kg/año y MA-1 24,8 millones de kg/año. En sectores más bajos cambia la naturaleza de las fuentes dominantes. Por ejemplo, MA-5 y PU-2 presentan una fuerte contribución de X14, mientras que MP-2 está dominado por X2. Asimismo, en AN-1 adquieren importancia X11 y X14 durante condiciones húmedas. Esto evidencia que el aumento de precipitación no sólo incrementa la carga total, sino que también amplía la importancia relativa de fuentes antrópicas distintas de la minería.

En resumen, las cargas de cloruro están controladas principalmente por minería y fuentes geológicas en Maipo Alto, que explican la mayor parte de la carga bajo todas las condiciones hidrológicas. Sin embargo, durante años húmedos se observa una diversificación de las fuentes, con un aumento significativo de los aportes urbanos, agrícolas con aguas tratadas y pecuarios en los sectores medio y bajo de la cuenca. Esta respuesta es consistente con una mayor movilización de sales por escorrentía y lavado bajo condiciones de mayor precipitación.

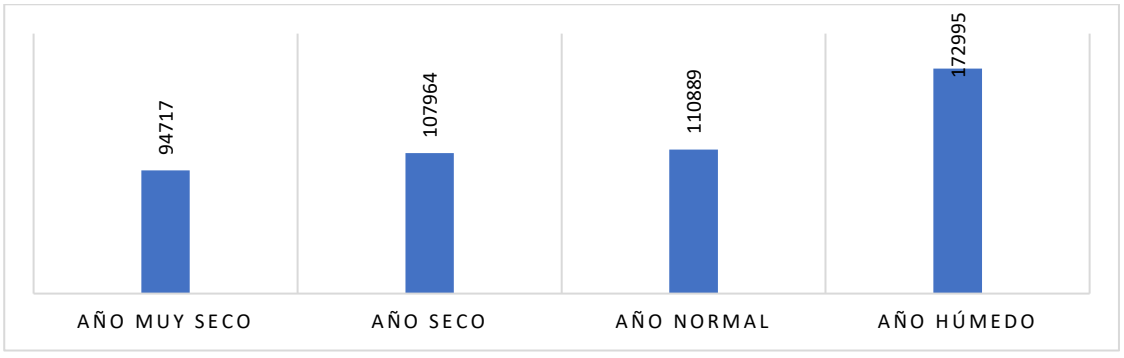


Figura 91 – Carga de cloruro en tonelada/año en la cuenca del río Maipo, por condición hidrológica.

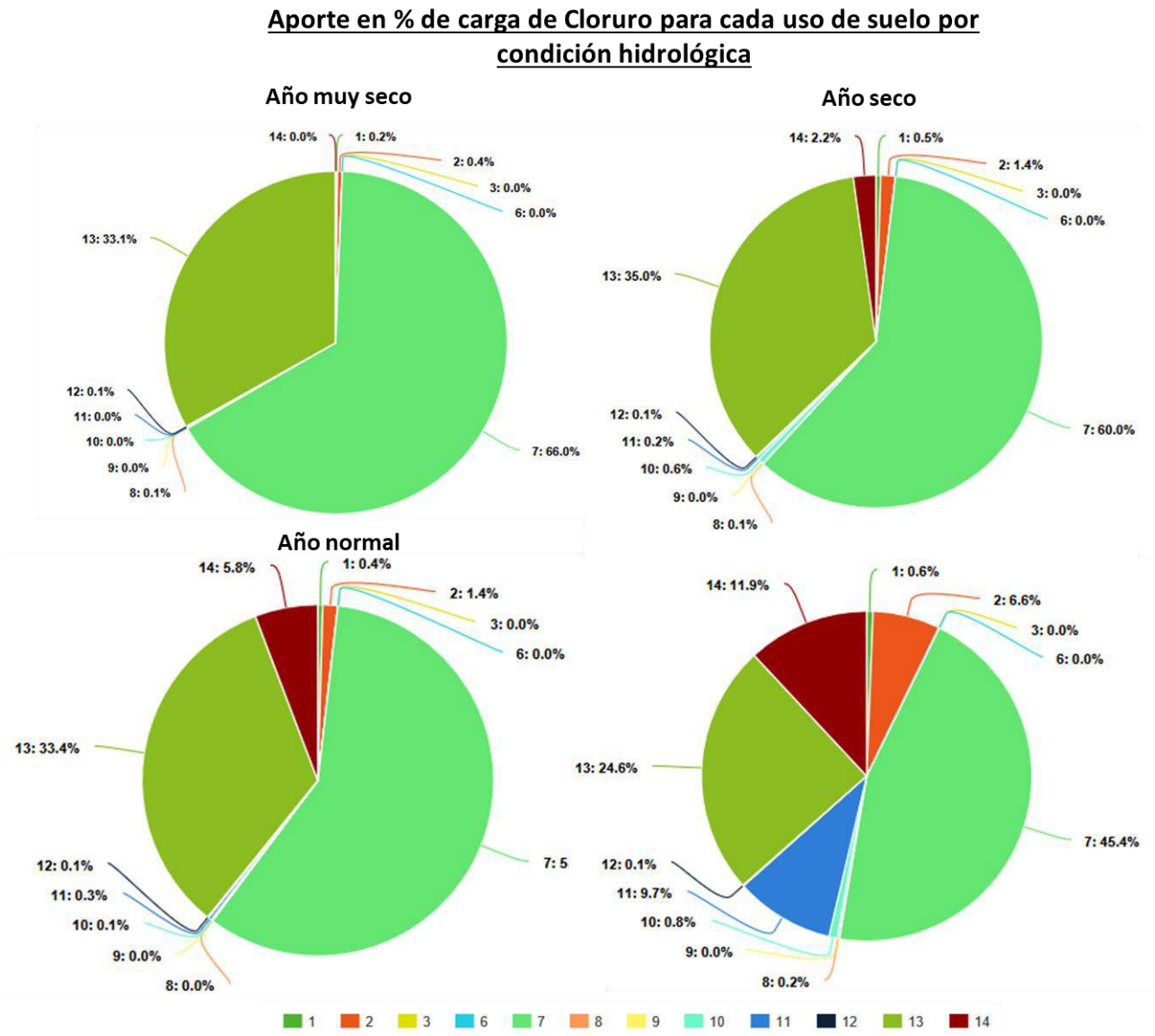


Figura 92 – Aporte en porcentaje (%) de cada uso de suelo (numerados del 1 al 14) a la carga anual de Cloruro en la cuenca del Río Maipo, por condición hidrológica.

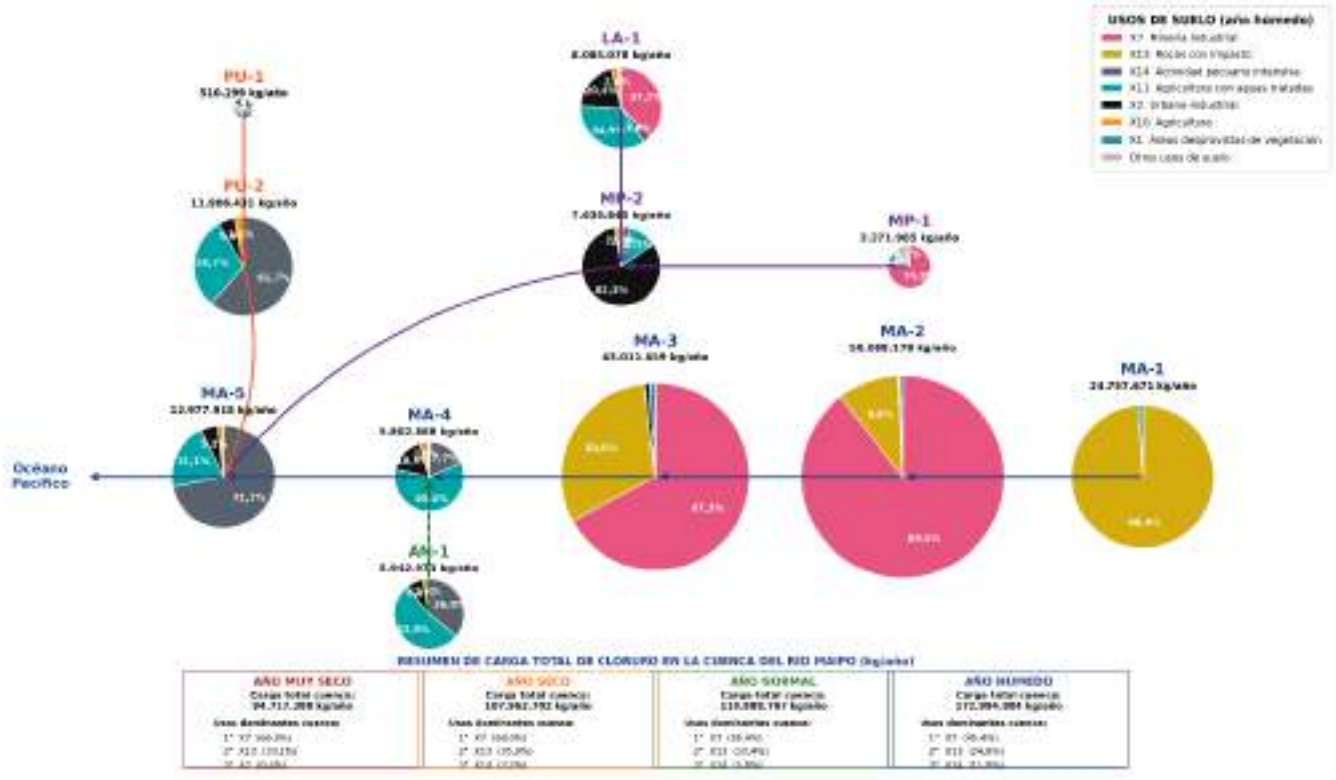


Figura 93 – Mapa conceptual del impacto de fuentes difusas por área de vigilancia en la cuenca del río Maipo para el contaminante Cloruro, considerando la condición hidrológica: AÑO HÚMEDO.

Como aproximación complementaria al análisis de cargas de cloruros, se estimaron concentraciones aportantes para cada área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 MMA (Tabla 86), a partir de las cargas anuales estimadas y los caudales medios anuales simulados por SWAT+. Estos resultados tienen carácter referencial y permiten comparar la contribución potencial de las distintas áreas bajo años muy secos, secos, normales y húmedos, así como evaluar su magnitud relativa respecto de los valores establecidos en el D.S. N°53/2013 del MMA. Las principales incertidumbres asociadas a estas estimaciones corresponden a aquellas previamente señaladas para la estimación de cargas y la modelación hidrológica, por lo que los valores obtenidos deben interpretarse como una herramienta de análisis comparativo y no como concentraciones observadas o valores normativos.

En MA-1 se observa una situación que requiere una caracterización más detallada. Las mediciones disponibles muestran concentraciones medias de cloruro cercanas o superiores al límite normativo de 300 mg/L (289 mg/L según DGA y hasta 437 mg/L según Alto Maipo); sin embargo, las estimaciones realizadas a partir de coeficientes de exportación de fuentes difusas no indican una saturación atribuible a las fuentes naturales de este sector. Esta diferencia debe interpretarse con cuidado, debido a la limitada disponibilidad de puntos de monitoreo de calidad del agua y caudal en MA-1, que dificulta la estimación de coeficientes de exportación representativos. Por ello, se recomienda fortalecer el monitoreo conjunto de calidad del agua y caudales en MA-1, con el objetivo de caracterizar adecuadamente el origen y magnitud de los aportes de cloruro. En consecuencia, los resultados de cargas para este sector deben considerarse preliminares.

En **años hidrológicos normales y secos**, MA-2 constituye el principal sector con potencial de saturación por fuentes difusas, asociado principalmente a la actividad minera (aproximadamente 89%) y, secundariamente, a áreas de suelo desnudo (10,5%). En **años muy secos**, MA-2 mantiene este comportamiento y se incorpora PU-1, donde la eventual saturación estaría dominada por fuentes urbanas e industriales (91%), seguida por áreas agrícolas, con y sin riego con aguas tratadas (aproximadamente 6%), y vertederos (3%). En **años húmedos**, además de MA-2, aumentan las concentraciones aportantes potenciales en PU-1, PU-2 y MA-5. En PU-1 predominan la actividad agrícola intensiva (55%) y las áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (28%), mientras que en PU-2 estas representan aproximadamente 62% y 30%, respectivamente. En MA-5, la carga difusa estaría dominada por la actividad agropecuaria intensiva (72%), seguida por áreas agrícolas regadas con aguas tratadas (21%). El aumento bajo condiciones húmedas podría estar asociado a una mayor movilización y transporte de cloruros desde las superficies aportantes.

Al contrastar las concentraciones aportantes estimadas de cloruros desde fuentes difusas (las cuales son en términos generales bajas, ver Tabla 86) y las concentraciones reales medidas (las cuales tienden a ser más altas en algunos sectores), se infiere que existirían aportes de fuentes puntuales de contaminación que explicarían las excedencias registradas en la cuenca. En particular, las concentraciones medias observadas en MA-5 (194 mg/L) superan el límite normativo de 180 mg/L, pese a que la estimación de fuentes difusas indica valores bajos (excepto para años húmedos); de manera similar, PU-2 presenta concentraciones que deben interpretarse considerando posibles aportes puntuales adicionales a las fuentes difusas identificadas. En consecuencia, las estimaciones presentadas deben entenderse como aproximaciones gruesas del aporte de fuentes difusas, útiles para identificar áreas y actividades potencialmente relevantes, pero no como una estimación exacta de las concentraciones en el cauce y por lo tanto, no representan cumplimiento o incumplimiento normativo. Esta distinción es especialmente importante en sectores donde las mediciones integran simultáneamente aportes difusos, fuentes puntuales y procesos de mezcla y transporte aguas arriba.

Tabla 86 – Concentración aportante de cloruro por área de vigilancia y condición hidrológica respecto de la norma D.S. N°53/2013 del MMA[21]

		Concentración aportante por AV, en % de la norma DS53/2013 MMA			
Área de vigilancia	**Norma Cloruro (mg/l)**	**Año muy seco**	**Año seco**	**Año normal**	**Año húmedo**
AN-1	180	1%	5%	5%	32%
LA-1	240	57%	43%	31%	63%
MA-1	300	16%	19%	13%	11%
MA-2	240	159%	147%	96%	108%
MA-3	240	50%	56%	43%	58%
MA-4	180	2%	4%	14%	37%
MA-5	180	4%	11%	33%	201%
MP-1	30	65%	62%	45%	37%
MP-2	240	5%	11%	8%	41%
PU-1	30	274%	65%	50%	5582%
PU-2	240	3%	54%	52%	161%

>=100%
>80% y <100%
<=80%

[21] Los valores presentados representan **concentraciones aportantes referenciales de cada área**, y no la concentración final esperada en el cauce en el punto de control correspondiente y, por lo tanto, no representan por sí mismas una evaluación de cumplimiento o incumplimiento de los límites establecidos en el D.S. N.º 53/2013.

7 Análisis integral de la carga contaminante

En esta sección se presenta parte de los resultados de la actividad OE5, correspondiente al objetivo específico e) "Realizar análisis integral de la carga contaminante con perspectiva de cuenca en las áreas de vigilancia de las subcuencas del río Maipo, considerando el comportamiento de los parámetros declarados saturados y latentes". Cabe notar que los mapas conceptuales por parámetros en saturación y latencia y las áreas de vigilancia se presentan anteriormente en la Sección 6.2.

7.1 Contraste de resultados de modelación de carga y de muestreo de suelo

Con el propósito de verificar la consistencia de los resultados presentados en la Sección 5.3 con la evidencia levantada durante la campaña de muestreo de suelo del Objetivo Específico 2 (52 puntos de muestreo distribuidos en 11 áreas de vigilancia de la cuenca del río Maipo, cuyos resultados se presentan en la Sección 3), se realizó un análisis exploratorio independiente de las concentraciones de suelo, evaluando diferencias estadísticamente significativas (prueba de Kruskal-Wallis, α=0,05) según uso de suelo y según área de vigilancia (AV). Es importante precisar que ambas líneas de evidencia no son directamente equivalentes: los coeficientes de exportación de la Sección 5.3 fueron calibrados contra series históricas de calidad de agua y caudal (DGA y GORE RM – Seremi MA RMS – AquaExpert SpA, periodo 2014–2024) mediante el modelo SWAT+ y representan un *flujo* anualizado (kg/ha/año), mientras que la campaña de muestreo de suelo constituye un *inventario puntual de concentración* (mg/kg) en un único periodo (diciembre de 2025 y marzo–mayo de 2026), sin que sus resultados hayan sido utilizados como dato de entrada de la modelación, dada la incertidumbre asociada a su representatividad a escala de cuenca (número de muestras, heterogeneidad del territorio y superficie de la cuenca). Por lo tanto, el presente contraste debe interpretarse como evidencia complementaria, no como una validación cruzada directa.

7.1.1 Convergencias entre ambas líneas de evidencia

- Cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{-2}): el modelo atribuye la variabilidad espacial de estos parámetros principalmente a factores geológicos e hidrotermales (Formación Colimapu, Formación Lo Valdés, sistema termal del río Colina), más que al uso de suelo. En la campaña de suelo, la prueba de Kruskal-Wallis no mostró diferencias significativas por uso de suelo para cloruro (Cl^-) (p=0,070) ni sulfato (SO_4^{-2}) (p=0,069), y tampoco se observó un patrón monótono entre las AV de cabecera del Maipo alto (MA-1 a MA-4). Ambas conclusiones, obtenidas por métodos independientes, convergen en que el control dominante de estos parámetros es geológico y no antrópico-difuso.
- La minería como fuente crítica: el modelo identifica a la actividad minera (ríos Colorado, San Francisco, Volcán, estero Codegua) como responsable de los coeficientes de exportación más elevados de cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), zinc (Zn^{2+}) y nitrato (NO_3^--N) de toda la cuenca. En la campaña de suelo, las dos únicas muestras con fuente difusa clasificada como "Minería" (ambas en el AV MP-1) presentan una concentración media de zinc de 240 mg/kg, aproximadamente 3 veces mayor que el promedio de las muestras no mineras del mismo AV (84 mg/kg), es decir, los resultados del muestreo van en la misma dirección que la modelación, aunque con baja representatividad muestral (n=2).
- Cobertura natural en cabecera no implica bajo riesgo: el modelo señala que los coeficientes elevados de zinc (Zn^{2+}) y sulfato (SO_4^{-2}) en bosques y praderas/matorrales de cabecera responden a la meteorización de sustrato geológico mineralizado, y no a un aporte directo de la cobertura vegetal. Esto es consistente con que el uso de suelo no resultó un predictor estadísticamente significativo de la concentración de zinc en la campaña de muestreo (p=0,39), sugiriendo que el

área de vigilancia (que captura la variable geológica de forma implícita) explica mejor este parámetro que la cobertura de suelo.

7.1.2 Nitrato: una aparente discrepancia explicable por representatividad de muestreo y por la diferencia entre stock y flujo

Uno de los hallazgos más significativo de la campaña de muestreo suelo (p=0,0006) fue la mayor concentración de nitrato (NO_3^--N) en Terrenos Agrícolas (696 mg/kg en promedio) frente al resto de usos de suelo, en particular frente a Extracción de Áridos (≈1 mg/kg). Sin embargo, el modelo (Sección 5.3.2) concluye que la minería en el Maipo alto exporta nitrato (NO_3^--N) en un orden de magnitud muy superior (hasta 1.126 kg/ha/año) al de las áreas agrícolas (máximo 1,6 kg/ha/año), asociado a la oxidación de compuestos nitrogenados remanentes del uso histórico de explosivos. Esta diferencia de magnitud no debe interpretarse como una contradicción entre ambos análisis, sino como reflejo de dos limitaciones distintas: primero, la campaña de suelo no cuenta con representatividad suficiente en zonas mineras (solo 2 de 52 muestras quedaron asociadas a fuente difusa minera, una clasificada bajo el uso de suelo "Minería Industrial" y otra bajo el uso de suelo "Praderas y Matorrales", debido particularmente a la imposibilidad de ingresar a las faenas mineras); segundo, la concentración en suelo es un *stock* que puede permanecer retenido o ser absorbido por cultivos, mientras que el coeficiente de exportación es un *flujo* que depende fuertemente de la conectividad hidrológica y erosiva del terreno, y que es sustancialmente mayor en faenas mineras que en suelos agrícolas con cobertura vegetal.

7.1.3 Zinc disuelto en las AV MP-1 y MP-2

Un análisis preliminar, agregado a nivel de AV completa, no encontró diferencias relevantes en la concentración media de zinc en suelo entre MP-1 y MP-2 (162 y 175 mg/kg, respectivamente), lo que en un primer momento no permitía explicar por qué el zinc (Zn^{2+}) se satura en MP-1 y no en MP-2 según los antecedentes de calidad de agua. Al desagregar las muestras de MP-1 según su fuente difusa asociada, se observó que las dos muestras con influencia minera concentran un zinc notoriamente mayor que el resto (ver sección anterior), lo que sí es consistente con la explicación del modelo: la minería aguas arriba, en tributarios del Mapocho alto (río San Francisco, estero Yerba Loca), constituye el principal control geoquímico del zinc en el sector de MP-1, mientras que en MP-2 predomina una mezcla de fuentes urbano-industriales sin ese componente geogénico-minero, además de mayor caudal de dilución aguas abajo.

7.1.4 pH: evidencia de suelo no capturada por los coeficientes de exportación

El pH y la conductividad eléctrica no forman parte de los parámetros modelados en la Sección 5.3, dado que no corresponden a cargas contaminantes exportables mediante coeficientes de masa por área. En la campaña de muestreo de suelo, el pH mostró diferencias estadísticamente significativas entre AV (p=0,0002). El patrón no corresponde a un gradiente monótono simple desde la cabecera: las AV MA-1 y MA-3 presentan los valores más alcalinos (pH 8,0–8,5), mientras que MA-2, MA-4 y MA-5 se mantienen en un rango más neutro (pH 7,6–7,97), y el valor mínimo se registra en PU-1 (pH 6,35). Al tratarse de un parámetro declarado saturado en la NSCA de la cuenca (D.S. N° 21/2023) que no cuenta con un coeficiente de exportación asociado, esta evidencia de suelo constituye información nueva y complementaria.

7.1.5 Síntesis del contraste

Tabla 87 – Contraste entre coeficientes de exportación (modelación) y concentraciones en suelo (muestreo)

Parámetro	Modelación	Muestreo de suelo	Lectura
Cl^- / SO_4^{-2}	Controlados por geología e hidrotermalismo, no por uso de suelo	Sin diferencia significativa por uso de suelo (p=0,070 / 0,069); sin patrón por AV	Convergen
Zn^{+2}	Dominado por minería y meteorización geogénica en cabecera; MP-1 con influencia de San Francisco/Yerba Loca; lavado de zinc en usos mineros en años húmedos	Muestras mineras de MP-1 con Zn ~3x mayor que el resto del AV	Convergen
NO_3^--N	Minería >> agrícola en magnitud de exportación (hasta 1.126 vs 1,6 kg/ha/año)	Agrícola muestra la mayor concentración en suelo (696 mg/kg); minería subrepresentada (n=2)	Diferencia radica en la cobertura muestral
pH	No modelado (no es una carga exportable)	Más alcalino en MA-1 y MA-3 (8,0–8,5); sin gradiente monótono por AV	Evidencia nueva, complementaria

7.2 Análisis global de contaminantes, fuentes aportantes y sensibilidad a la precipitación

El análisis conjunto de nitrógeno de nitrato, fósforo de ortofosfato, DBO_5, cloruro, sulfato y zinc disuelto muestra que las cargas difusas de la cuenca del río Maipo presentan una fuerte dependencia tanto del uso de suelo como de la ubicación dentro de la cuenca y de la condición hidrológica. En términos generales, las zonas altas, especialmente Maipo Alto y en algunos casos Mapocho Alto, concentran las mayores cargas de varios contaminantes, asociadas a la combinación de coberturas naturales extensas, actividad minera y características geológicas propias de los sectores cordilleranos. En los sectores medio y bajo de la cuenca adquieren mayor importancia relativa las fuentes agrícolas, la aplicación de aguas tratadas, vertederos y actividad pecuaria intensiva.

La respuesta a la precipitación no es uniforme entre contaminantes. DBO_5, cloruro, sulfato y zinc disuelto tienden a presentar sus mayores cargas globales bajo condiciones húmedas, lo que evidencia una mayor movilización de material por escorrentía, erosión y lavado de superficies. En cambio, nitrato y ortofosfato muestran respuestas más complejas y no monotónicas. Para nitrato, las mayores cargas pueden presentarse durante condiciones muy secas o secas debido a la elevada sensibilidad de ciertos usos naturales, mientras que en años húmedos cambia la distribución espacial de los aportes y aumenta la importancia del Maipo Alto. En ortofosfato, los máximos se observan bajo condiciones secas y normales, asociados principalmente a bosques y praderas/matorrales, mientras que las fuentes agrícolas adquieren mayor relevancia relativa en escenarios muy secos y húmedos.

Entre las fuentes naturales, bosques (X3) y praderas/matorrales (X9) son los usos que presentan una mayor influencia transversal sobre varios contaminantes. Ambos pueden generar cargas relevantes de nitrato,

ortofosfato, DBO_5, sulfato y zinc disuelto, particularmente en la zona alta de la cuenca, debido a su amplia superficie y a la sensibilidad de sus coeficientes de exportación frente al régimen hidrológico. A ello se suman las áreas desprovistas de vegetación (X1), nieves y glaciares (X8) y rocas con impacto geológico (X13), que adquieren importancia especialmente para zinc, cloruro y sulfato. En estos últimos dos parámetros, la geología y las condiciones hidrotermales constituyen un control adicional relevante, por lo que parte importante de las cargas no puede atribuirse exclusivamente a actividades antrópicas.

Entre las fuentes antrópicas, la minería (X7) constituye una de las actividades más relevantes y persistentes. Su influencia es especialmente marcada para cloruro y sulfato, y también resulta significativa para zinc disuelto y, localmente, DBO_5. En varios casos los aportes mineros se concentran en Maipo Alto y Mapocho Alto, aunque la sensibilidad a la precipitación varía según el contaminante. La agricultura convencional (X10), agricultura con aguas tratadas (X11) y actividad pecuaria intensiva (X14) adquieren mayor importancia en nutrientes y materia orgánica, especialmente en Maipo Medio y Maipo Bajo. Los vertederos (X12) y áreas urbanas e industriales (X2) presentan una influencia más localizada, pero pueden constituir fuentes relevantes bajo condiciones húmedas debido al aumento del lavado superficial.

Se identifican además sinergias entre fuentes y procesos de transporte. La minería y las unidades geológicas naturales pueden actuar simultáneamente sobre cloruro, sulfato y zinc, dificultando la separación completa entre aportes naturales y antrópicos en sectores cordilleranos. Asimismo, los usos agrícolas, pecuarios y urbanos pueden aportar simultáneamente nitrógeno, fósforo y materia orgánica, por lo que un mismo sector puede incrementar de manera conjunta las cargas de nitrato, ortofosfato y DBO_5. Bajo condiciones húmedas, estas fuentes pueden verse potenciadas por el aumento de la escorrentía, mientras que los materiales acumulados durante períodos secos pueden generar pulsos de exportación elevados cuando ocurren eventos de precipitación posteriores.

Desde una perspectiva espacial, los resultados permiten distinguir dos patrones principales. Maipo Alto y Mapocho Alto concentran las cargas asociadas a coberturas naturales, minería y control geológico, mientras que Maipo Medio y Maipo Bajo presentan una mayor influencia relativa de actividades agrícolas, aplicación de aguas tratadas y actividad pecuaria. Esta diferenciación es relevante porque la condición hidrológica puede modificar no sólo la magnitud de las cargas, sino también la zona de la cuenca donde se concentra el aporte dominante.

En resumen, la precipitación actúa principalmente como un factor de movilización y transporte, pero su efecto depende de la disponibilidad del contaminante, el tipo de uso de suelo y las condiciones antecedentes de la cuenca. Por esta razón, no es adecuado asumir una relación única y lineal entre precipitación y carga para todos los parámetros. Los resultados muestran que la sensibilidad hidrológica surge de la interacción entre coeficientes de exportación, extensión de los usos de suelo, acumulación previa de contaminantes, escorrentía, erosión y características geológicas, lo que explica las diferencias observadas entre contaminantes y entre sectores de la cuenca.

8 Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

8.1.1 Antecedentes e información de base

La revisión bibliográfica confirmó que los coeficientes de exportación son parámetros empíricos muy variables, incluso para un mismo uso de suelo. Por eso deben entenderse como rangos plausibles y no como constantes transferibles entre cuencas. La literatura disponible es relativamente abundante para nitrógeno y fósforo (114 y 99 coeficientes recopilados, respectivamente). En cambio, es muy escasa para cloruro (4 coeficientes), sulfato (12, todos para bosque) y zinc (3), lo que justifica la necesidad de estimar coeficientes propios para la cuenca del río Maipo.

El estudio GORE RM – Seremi MA RMS – AquaExpert (2024) aplicó coeficientes solo para nutrientes y solo para los sectores agropecuario y minero. Sus valores se ubican en el rango bajo a medio de la literatura, y el informe no documenta sus fuentes. La revisión de su inventario permitió reclasificar como fuentes difusas actividades registradas como "sin emisión": 49 de las 158 fuentes así categorizadas corresponden a riego con RILes. Con ello, las fuentes difusas pasaron de 1.141 a 1.207.

8.1.2 Campaña de muestreo

La campaña de muestreo, concebida como una línea de evidencia complementaria a la modelación, consideró 56 muestras (40 de suelo, 10 de sedimento, 2 de polvo y 4 de agua superficial) en las 11 áreas de vigilancia, abarcando 22 comunas de 3 regiones. El nitrato fue el único parámetro con diferencias estadísticamente significativas según uso de suelo ($p=0,0006$). Las mayores concentraciones se registraron en terrenos agrícolas (696 mg/kg en promedio), lo que es consistente con el uso de fertilizantes nitrogenados.

Al agrupar por fuente difusa, fueron significativos el zinc, el plomo y el nitrato. Al agrupar por AV, lo fueron el pH, el NTK, el zinc y el plomo. En conjunto, esto indica que el uso de suelo, por sí solo, es un predictor débil de la composición fisicoquímica del suelo en la cuenca. La ubicación (que integra de manera implícita la geología) y la actividad específica permiten discriminar mejor.

Las muestras de agua mostraron una química dominada por sulfato y cloruro de origen geogénico. Los resultados exploratorios sugieren dos efectos adicionales. El primero es un efecto local de la extracción de áridos sobre el sulfato disuelto, que alcanzó en promedio 478,8 mg/L frente a 246,4 mg/L en puntos de background. El segundo es una acumulación de metales en superficies urbanas, con cargas de zinc de 1,5 a 6,4 mg/m² y de plomo de 1,6 a 2,0 mg/m².

Estos resultados deben interpretarse como exploratorios, dado que corresponden a cuatro muestras de agua superficial y no constituyen una caracterización representativa de la cuenca. En particular, la diferencia de sulfato observada en el sector de extracción de áridos corresponde a una señal local; al no observarse un comportamiento consistente entre parámetros y campañas, no se consideró suficiente para asignar un coeficiente de exportación de áridos en la estimación final de cargas.

8.1.3 Herramienta de modelación

SWAT+ resultó una herramienta adecuada para la gran escala y alta complejidad de la cuenca. Es de código abierto, ha sido validada en el contexto nacional y es capaz de representar procesos de nieve, uso agrícola

y ciclos de nutrientes, específicamente para nitrato y fosfato. El modelo se construyó con 637 subcuencas y 5.417 HRUs para el periodo 2014–2024.

La validación hidrológica se realizó para el periodo 2015-2024 y mostró un desempeño correcto, pero variable entre subcuencas, con valores de PBIAS entre aproximadamente −67 % y +85 %. Los mejores ajustes se obtuvieron en río Colorado, estero Yerba Loca y estero Pintué, y las mayores dificultades en río Olivares y río Angostura. El modelo reproduce razonablemente la dinámica hidrológica general, pero su confiabilidad no es homogénea en toda la cuenca.

Los coeficientes de exportación se obtuvieron mediante un balance de masa inverso (optimización numérica), a partir de concentraciones observadas y caudales observados o simulados por SWAT+, con el fin de reducir la incertidumbre en los resultados

8.1.4 Coeficientes de exportación

- Los coeficientes obtenidos no son parámetros estáticos: varían de forma marcada entre subcuencas, años hidrológicos y, en algunos casos, estaciones del año. Los principales hallazgos son los siguientes:
- La minería presenta los coeficientes más altos de la cuenca para cloruro, sulfato y zinc disuelto. En Maipo Alto (asociado a minería no metálica) presenta además coeficientes elevados de nitrato (hasta 1.126 kg/ha/año en 2024) y de DBO_5. Se observa una diferencia importante entre la minería no metálica de Maipo Alto y la minería metálica de Mapocho Alto, en particular para nitrato.
- Las coberturas naturales de cabecera (bosques y praderas/matorrales) presentan coeficientes elevados de sulfato, zinc, DBO_5 y ortofosfato. Esto no responde a un aporte directo de la vegetación. Responde a su emplazamiento sobre sustratos volcánicos, mineralizados o con influencia hidrotermal, y a la erosión asociada al deshielo. En consecuencia, una cobertura natural en cabecera no implica necesariamente un aporte bajo.
- La agricultura con riego de aguas tratadas presenta coeficientes de ortofosfato (hasta 1,3 kg/ha/año) y de DBO_5 superiores a los de la agricultura convencional. Esto identifica la aplicación de efluentes tratados al suelo como una fuente difusa detectable. Esta interpretación corresponde a una señal a escala de uso de suelo y sector dentro del procedimiento de estimación aplicado; no constituye una atribución causal a una instalación o titular individual.
- Las áreas urbanas de cordillera asociadas a centros de ski, con plantas de tratamiento de aguas servidas, muestran una fuerte estacionalidad invernal en nitrato, ortofosfato y DBO_5.
- No se identificó una señal consistente atribuible a la extracción de áridos a partir del análisis de información de calidad del agua en la zona de influencia de esta actividad, por lo que este uso no se incorporó como fuente difusa en la estimación de cargas.

8.1.5 Cargas y su respuesta a la precipitación

La relación entre precipitación y carga no es lineal y difiere entre contaminantes.

- DBO_5, cloruro y zinc disuelto aumentan de forma relativamente clara hacia condiciones húmedas. La DBO_5 pasa de 3,29 a 19,05 millones de kg/año, el cloruro de 94,7 a 173,0 millones de kg/año y el zinc de 10.950 a 91.494 kg/año entre años muy secos y húmedos.
- El sulfato alcanza su máximo en años húmedos (912,7 millones de kg/año), aunque con una respuesta no monotónica.

- El nitrato y el ortofosfato presentan respuestas complejas. El nitrato registra sus mayores cargas en años muy secos y secos (≈3,1–3,2 millones de kg/año) y la menor en años normales (0,30 millones de kg/año). El ortofosfato alcanza su máximo en años normales (≈582.800 kg/año).

La condición hidrológica modifica no solo la magnitud de la carga, sino también el uso de suelo dominante y la zona de la cuenca donde se concentra el aporte. Esto refleja la influencia de la acumulación de contaminantes durante periodos secos y del lavado posterior, como el observado en 2023–2024 tras la megasequía.

8.1.6 Distribución espacial de las fuentes

Se distinguen dos patrones principales:

- Maipo Alto y Mapocho Alto concentran las cargas asociadas a coberturas naturales, minería y control geológico. Para cloruro, la minería (X7) y las rocas con impacto en la calidad del agua (X13) explican en conjunto cerca del 70 % o más de la carga en todas las condiciones hidrológicas. El sulfato está dominado por bosques y praderas/matorrales de Maipo Alto, lo que es consistente con un origen principalmente geológico e hidrotermal.

En Maipo Medio y Maipo Bajo adquieren mayor importancia relativa la agricultura convencional, la agricultura con riego de aguas tratadas y la actividad pecuaria intensiva, especialmente para nutrientes, DBO_5 y, en años húmedos, cloruro.

8.1.7 Contribución de las fuentes difusas a la condición observada

La comparación entre concentraciones aportantes referenciales y concentraciones medidas muestra que, en varios sectores, las fuentes difusas estimadas no explican por sí solas la condición observada:

- el cloruro en MA-5;
- el nitrato, el ortofosfato y la DBO_5 en el sistema Mapocho;

Esto es consistente con la influencia de fuentes de emisión (PTAS, RILes), aportes de aguas subterráneas y procesos de mezcla aguas arriba.

Por el contrario, las fuentes difusas podrían tener una contribución relevante en otros sectores:

- LA-1, asociada principalmente a minería, aunque con un coeficiente transferido desde Mapocho Alto.
- PU-1 y PU-2, asociadas a riego con aguas tratadas, agricultura y actividad pecuaria intensiva.
- MA-4, asociada a agricultura con aguas tratadas y áreas urbanas.
- MA-5, asociada a actividad pecuaria intensiva.
- MP-1, asociada a actividad minera (4%) y natural. En años húmedos, la minería incrementaría su contribución al 21%.

En MA-2 y MA-3, las excedencias potenciales estimadas de fosfatos, DBO_5 y sulfatos se asocian mayoritariamente a fuentes naturales, por lo que no deben interpretarse directamente como evidencia de contaminación antrópica. Se estimó un impacto considerable sobre concentraciones de cloruro y un impacto menor sobre las concentraciones de nitrato de la minería no metálica en estas dos áreas de vigilancia.

8.1.8 Contraste entre suelo y modelación

Ambas líneas de evidencia, obtenidas de manera independiente, convergen en tres aspectos:

- el control predominantemente geológico del cloruro y del sulfato;
- el rol de la minería en el zinc de MP-1, donde las muestras con influencia minera presentan concentraciones aproximadamente 3 veces mayores que el resto del AV;
- la relevancia de la geología subyacente en coberturas naturales de cabecera.

La aparente discrepancia en nitrato se explica por la diferencia entre *stock* (concentración en suelo) y *flujo* (exportación), y por la baja representatividad del muestreo en zonas mineras. El pH, parámetro saturado sin coeficiente de exportación asociado, mostró diferencias significativas entre AV y constituye evidencia complementaria nueva.

8.2 Recomendaciones

Fortalecer el monitoreo conjunto de caudal y calidad del agua. La principal restricción del estudio fue la disponibilidad de mediciones simultáneas de caudal y concentración. Se recomienda priorizar:

- MA-1, donde las concentraciones de cloruro observadas no son explicadas por las fuentes difusas estimadas, lo que implicaría mayores coeficientes de exportación de cloruro asociados a usos naturales de suelo;
- LA-1 (sector Lampa), donde se utilizó un coeficiente minero transferido;
- PU-1, donde los caudales son muy bajos, por lo que es importante realizar mediciones de caudal (por ejemplo, con molinete), para reducir la incertidumbre del cálculo de coeficiente de exportación y concentraciones estimadas. Los coeficientes de zinc para bosques en zonas bajas deben revisarse;

Se recomienda además incorporar muestreos durante eventos de precipitación y deshielo, dado que los pulsos de exportación en años húmedos resultaron determinantes en las cargas.

Medir directamente ortofosfato y zinc disuelto. En la red de monitoreo, parte importante de las concentraciones de estos parámetros debió estimarse mediante relaciones empíricas: PO_4^{3-}-P = 0,42·P total, y Zn disuelto = 0,34 o 0,71·Zn total según el sector. Incorporar la medición sistemática de ambas fracciones reduciría una fuente de incertidumbre relevante.

Integrar el balance de fuentes puntuales. Se recomienda incorporar los resultados del estudio de fuentes puntuales desarrollado en paralelo.. Esto permitiría cerrar el balance de cargas por AV y parámetro, y cuantificar la participación relativa de cada tipo de fuente. Es especialmente relevante en el sistema Mapocho, en MA-5 y en el estero Puangue.

Actualizar y refinar la información de uso de suelo. El mapa de uso de suelo se basa en el catastro CONAF (2013), por lo que se recomienda actualizarlo con información reciente. Se recomienda, además:

- verificar en terreno la superficie efectivamente regada con aguas tratadas, dado que el criterio de radio de 200 m podría sobreestimarla, como sugieren los resultados de suelo;
- mantener la desagregación entre minería metálica y no metálica.

Caracterizar fuentes específicas con campañas dirigidas. Se recomiendan campañas específicas para las siguientes fuentes:

- **Extracción de áridos:** mediciones simultáneas de caudal y calidad aguas arriba y aguas abajo de las faenas, en distintos periodos, considerando la señal exploratoria de sulfato observada.
- **Minería:** muestreo de suelo, sedimento y calidad de agua en faenas y botaderos, gestionando el acceso mediante convenios con los titulares, dado que no fue posible ingresar durante este estudio.
- **Actividad pecuaria intensiva y vertederos:** caracterización más detallada, ya que presentan coeficientes elevados con alta incertidumbre por su reducida superficie.
- **Aguas subterráneas:** monitoreo de nitrato en MP-2, con valores medios en pozos de hasta 16,9 mg/L, y de sulfato en MA-4 (pozo Fundo Cachantún), por su potencial influencia sobre las aguas superficiales.

Acotar el uso de los coeficientes fuera de sectores donde fueron estimados. Los coeficientes de exportación estimados particularmente para minería reflejan las condiciones específicas de cada sector de la cuenca, incluyendo el tipo de actividad (metálica o no metálica), la geología y alteración hidrotermal del sustrato, el régimen hidrológico y las características de las instalaciones mineras. Su variabilidad entre faenas de la propia cuenca alcanza varios órdenes de magnitud. Por ello, se recomienda no extrapolarlos directamente a otras áreas mineras. Su uso fuera de los sectores donde fueron estimados debiera limitarse a una referencia preliminar de orden de magnitud para faenas análogas en tipo de mineral, geología y condiciones hidrológicas, considerando el rango de valores por condición hidrológica y verificándolo mediante monitoreo local aguas arriba y aguas abajo de la faena. Este es el caso de LA-1 (Sección 6.2), donde se utilizó el coeficiente de minería metálica de Mapocho Alto por similitud en tipo de mineral y geología, pero con diferencias de altitud, precipitación e hidrología, sin factor de ajuste y sin verificación local; por ello, los resultados de este sector deben considerarse preliminares hasta contar con monitoreo específico. Los aprendizajes de carácter conceptual, en cambio, sí son extensibles a otros sectores mineros cordilleranos: la relevancia de la minería como fuente de zinc, sulfato y cloruro, el efecto de los años húmedos posteriores a periodos secos sobre la exportación y la necesidad de contar con subcuencas de referencia natural para separar el aporte geológico.

Actualizar periódicamente los coeficientes. Se recomienda actualizar los coeficientes a medida que se disponga de nuevos años de información, en particular años húmedos y muy húmedos, que están subrepresentados en el periodo 2014–2024. Para ello puede utilizarse el modelo entregado (Anexo 10) y las capacidades instaladas mediante la capacitación realizada a profesionales del Ministerio y la Seremi del Medio Ambiente.

8.3 Limitaciones, incertidumbres y brechas de información

Naturaleza de los coeficientes. Los coeficientes se anualizaron a partir de mediciones discretas de concentración y caudal. Por lo tanto, representan la exportación que ocurriría si las condiciones de cada fecha de monitoreo se mantuvieran durante un año completo, y no la carga anual efectiva de cada subcuenca. Además, al obtenerse por optimización, un mismo conjunto de cargas observadas puede ser reproducido por distintas combinaciones de coeficientes. La mayor incertidumbre se concentra en usos de superficie reducida (minería, vertederos, actividad pecuaria intensiva), cuyos valores extremos deben interpretarse como indicativos de cargas importantes concentradas en áreas pequeñas.

Incertidumbre hidrológica. La validación hidrológica se realizó en siete subcuencas de cabecera con baja intervención, por lo que el desempeño del modelo en los sectores medio y bajo no fue verificado directamente.

Representatividad temporal. El periodo 2014–2024 incluye un solo año clasificado como húmedo (2024) y ningún año muy húmedo. El año 2023 se agrupó como húmedo para el análisis de sensibilidad por su

cercanía al umbral. Algunos resultados atípicos en coberturas naturales, como el nitrato en bosques de MP-1 en años muy secos o el zinc en PU-1, deben revisarse con información adicional.

Tratamiento de información faltante y transferencia de coeficientes. Las relaciones empíricas usadas para ortofosfato y zinc disuelto introducen incertidumbre adicional. Además, en algunos sectores se transfirieron coeficientes desde otras zonas sin factor de ajuste, por falta de información local:

- LA-1 utiliza el coeficiente de minería metálica de Mapocho Alto;
- en MA-1, los coeficientes de contaminantes se derivaron de sectores como río Colorado y río Volcán (MA-2 y MA-3).

Las cargas estimadas con coeficientes transferidos tienen una incertidumbre mayor, no cuantificada.

Limitaciones estructurales del modelo. SWAT+ no representa procesos hidrogeoquímicos en el cauce (pH, redox, complejación, precipitación) y simplifica la interacción río-acuífero y los aportes subterráneos. Estos aportes son relevantes en sectores como MP-2 y MA-4.

Información de uso de suelo. El mapa de uso de suelo se basa principalmente en CONAF (2013) y en supuestos de delimitación, como el radio de 200 m para riego con RILes.

Alcance del muestreo de suelo. La campaña consideró 52 muestras sólidas en una única campaña sin repetición estacional y a nivel superficial (0–10 cm). Además:

- la minería quedó representada por solo 2 muestras, por imposibilidad de acceso a faenas;
- el plomo se analizó en 19 de 52 muestras;

Estos resultados no se utilizaron como dato de entrada de la modelación, por lo que constituyen evidencia complementaria y no una validación cruzada, dado que su representatividad está limitada por el número de muestras, la heterogeneidad del territorio y la superficie de la cuenca.

Parámetros sin coeficiente de exportación. El pH, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto, declarados saturados, no pueden abordarse mediante coeficientes de masa por área. Por ello, quedan fuera del enfoque de cargas desarrollado.

8.4 Aplicabilidad de los resultados al PPDH del río Maipo

Los resultados constituyen una base técnica útil para el diseño del PPDH, siempre que se utilicen de acuerdo con su naturaleza: estimaciones de orden de magnitud y de contribución relativa a escala de cuenca y de área de vigilancia. En particular, permiten:

- **Priorizar sectores y actividades por parámetro.** Los resultados identifican qué usos de suelo explican la mayor parte de la carga difusa en cada AV y bajo qué condición hidrológica, orientando la focalización de medidas.
- **Distinguir el componente natural del antrópico.** En Maipo Alto, una parte importante de las cargas de cloruro, sulfato, zinc y ortofosfato se asocia a geología, hidrotermalismo y coberturas naturales. Este es un antecedente relevante para definir qué fracción de la condición observada es gestionable mediante medidas sobre actividades. Esta diferenciación debe entenderse a escala de categorías de uso de suelo y sectores de la cuenca, y no como un ejercicio formal de atribución de fuentes.

- **Orientar la gestión hacia fuentes puntuales donde corresponda.** Donde el aporte difuso estimado es bajo respecto de la condición observada (sistema Mapocho, MA-5 para cloruro), los resultados sugieren priorizar el control de fuentes puntuales y la caracterización de aguas subterráneas.
- **Incorporar la variabilidad hidrológica.** Los años húmedos posteriores a periodos secos pueden generar pulsos de carga significativos. Esto debiera considerarse tanto en el diseño de medidas (control de escorrentía, manejo de acopios y botaderos) como en la interpretación de los resultados del programa de monitoreo del plan.

A modo de síntesis, la siguiente tabla resume los sectores y fuentes difusas que, según los resultados, podrían orientar líneas de medidas a evaluar en el PPDH:

Tabla 88 – Fuentes difusas relevantes por sector para aplicación a PPDH

Sector / AV	Parámetros de interés	Fuentes difusas relevantes	Consideraciones
Maipo Alto (MA-1, MA-2, MA-3)	Cl^-, SO_4^{2-}, Zn, $P\text{-}PO_4^{3-}$, DBO_5	Geología e hidrotermalismo (X13, coberturas naturales), minería no metálica (X7)	Predominio de aporte natural; medidas enfocadas en faenas mineras y botaderos. Requiere mejor caracterización en MA-1.
Mapocho Alto (MP-1)	Zn, SO_4^{2-}, $N\text{-}NO_3^-$, $P\text{-}PO_4^{3-}$, DBO_5	Minería metálica, rocas con impacto (X13), centros de ski con PTAS (X2)	Estacionalidad invernal en nutrientes y DBO_5 asociada a actividad turística.
LA-1	DBO_5, Zn, SO_4^{2-}, $N\text{-}NO_3^-$	Minería (coeficiente transferido), agricultura con aguas tratadas	Resultados preliminares; requiere monitoreo local antes de definir medidas.
MA-4, AN-1	$P\text{-}PO_4^{3-}$, DBO_5	Agricultura con riego de aguas tratadas, áreas urbanas	Control de calidad y tasas de aplicación de efluentes tratados al suelo.
MA-5, PU-1, PU-2	$N\text{-}NO_3^-$, $P\text{-}PO_4^{3-}$, DBO_5, Cl^-, SO_4^{2-}	Actividad pecuaria intensiva, agricultura con aguas tratadas, agricultura convencional	Manejo de purines y estiércoles; considerar también fuentes puntuales.
Sistema Mapocho medio-bajo (MP-2)	$N\text{-}NO_3^-$, DBO_5, $P\text{-}PO_4^{3-}$	Aporte difuso bajo frente a lo observado	Priorizar fuentes puntuales (PTAS, RILes) y nitrato en aguas subterráneas.

Al mismo tiempo, los resultados **no deben utilizarse** para:

- asignar responsabilidades a titulares individuales;
- establecer límites de emisión;
- evaluar el cumplimiento normativo en un punto de control.

Los coeficientes representan comportamientos medios por uso de suelo y sector, con incertidumbres que pueden ser significativas. Se recomienda utilizarlos junto con sus bandas de incertidumbre y la condición hidrológica correspondiente, y actualizarlos una vez incorporado el balance de fuentes puntuales y nueva información de monitoreo.

En el caso particular de la minería, los coeficientes estimados no debieran extrapolarse directamente a otras áreas mineras, dado que reflejan condiciones específicas de cada sector; su uso fuera de la cuenca o de los sectores donde fueron estimados se limita a una referencia preliminar para faenas análogas, según los criterios indicados en la Sección 8.2.

9 Bibliografía

Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, *87*(1–2), 45–59.

Addiscott, T. M., & Mirza, N. A. (1998). Modelling contaminant transport at catchment or regional scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *67*(2–3), 211–221.

Allen, R. G. (1986). A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *112*(4), 348–368. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:4(348)

Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., & Burman, R. D. (1989). Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal*, *81*(4), 650–662.

Ashby, S. F., & Falgout, R. D. (1996). A parallel multigrid preconditioned conjugate gradient algorithm for groundwater flow. *Advances in Water Resources*, *19*(4), 181–192.

Bagnold, R. A. (1977). Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, *13*(2), 303–312.

Baumgardner, M. F., Silva, L. F., Biehl, L. L., & Stoner, E. R. (1985). Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, *38*, 1–44.

Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Jobes, T. H., & Donigian, A. S. (2001). *Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF): User's Manual for Release 12*. U.S. Environmental Protection Agency.

Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Yen, H., Sayahi, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, *53*(1), 115–130.

Brunner, P., & Simmons, C. T. (2012). HydroGeoSphere: A Fully Integrated, Physically Based Hydrological Model. *Ground Water*, *50*(2), 170–176.

Camporese, M., Paniconi, C., Putti, M., & Orlandini, S. (2010). Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data. *Water Resources Research*, *46*(2).

Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & Tao, H. (2012). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.12: Documentation and users' manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University.

CORFO. (1964). *Suelos. Descripciones. Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID*. https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/6916

Corporación Nacional Forestal. (2013). *Superficies de catastros de uso de suelo y recursos vegetacionales*. http://sit.conaf.cl/

DHI. (2023). *DHI ECO Lab: Generic Software Editor for Environmental Modelling. User Guide*. DHI Water & Environment.

Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Maipo*.

edáfica. (2020). *COEFICIENTES EXPORTACIÓN DE NUTRIENTES SEGÚN USOS DE SUELO EN LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA COMO APOYO AL PROYECTO DEFINITIVO DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA*. http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=e5a5825b-a8ae-458a-b892-fcdf9a8725f5&fname=405-AGA-20-02-227_INFORME%20ETAPA%20III_REV-0-Pag%201-138.pdf&access=public

Edwards, P. J., Gregory, J. D., & Allen, H. L. (1999). Seasonal sulfate deposition and export patterns for a small appalachian watershed. *Water, Air, and Soil Pollution*, *110*(1–2), 137–155. https://doi.org/10.1023/A:1005087421791/METRICS

FAO, & UNEP. (2021). *Global assessment of soil pollution: Report*. FAO and UNEP. https://doi.org/10.4060/cb4894en

Galleguillos, M., Dinamarca, D., Seguel, O., & Faundez, C. (2022). CLSoilMaps: A national soil gridded product for Chile. In *Earth Science System Data*. https://doi.org/10.5281/zenodo.7464209

García, A. (2024). Water Quality of Rainwater Harvesting Systems and Acceptance of Their Reuse in Young Users: An Exploratory Approach. *Water*, *13*(11), 159.

Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. (2024). *Análisis y aplicación de un modelo de calidad de agua en la cuenca del río Maipo*.

GOChile. (n.d.). *Volcanoes in Chile*. Retrieved July 1, 2026, from https://www.gochile.cl/en/destinations-volcanoes.htm

Godwin, D. C., Jones, C. A., Ritchie, J. T., Vlek, P. L. G., & Youngdahl, L. J. (1984). *The water and nitrogen components of the CERES models*. International Fertilizer Development Center (IFDC).

GORE RM - SEREMI MA RMS - AquaExpert SpA. (2024). *Análisis y aplicación de un modelo de calidad de agua en la cuenca del río Maipo* (Number BIP 40032621-0). Proyecto del Gobierno Regional Metropolitano, ejecutado por la Seremi del Medio Ambiente de la Región Metropolitana como contraparte técnica y por AquaExpert como equipo consultor. http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=3dbb60de-6c1e-470e-94ff-c29966efea4e&fname=E-Modelaci%C3%B3n%20Maipo%20Informe%20final%20V0%20GORE%2001_11_2024.PDF&access=public

Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics: Part I. The Flow of Air and Water through Soils. *The Journal of Agricultural Science*, *4*(1), 1–24.

Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Agricultural solar radiation pipeline. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *111*(3), 202–212.

Hrachowitz, M., Benettin, P., Van Breukelen, B. M., Fovet, O., Howden, N. J., Ruiz, L., van der Velde, Y., & Wade, A. J. (2016). Transit times—The link between hydrology and water quality at the catchment scale. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *3*(5), 629–657.

Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1975). The dependence of bare soil albedo on soil water content. *Journal of Applied Meteorology*, *14*, 109–113.

Johnes, P. J. (1996). Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology*, *183*(3–4), 323–349. https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6

Jones, C. A., Cole, C. V, Sharpley, A. N., & Williams, J. R. (1984). A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. *Soil Science Society of America Journal*, *48*(4), 800–805.

Kopáček, J., Hejzlar, J., Porcal, P., & Posch, M. (2014). A mass-balance study on chloride fluxes in a large central European catchment during 1900–2010. *Biogeochemistry 2014 120:1*, *120*(1), 319–335. https://doi.org/10.1007/S10533-014-0002-2

Lagos, M. S., Muñoz, J. F., Suárez, F. I., Fuenzalida, M. J., Yáñez-Morroni, G., & Sanzana, P. (2024). Investigating the effects of channelization in the Silala River: A review of the implementation of a coupled MIKE-11 and MIKE-SHE modeling system. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *11*(1), e1673.

Maxwell, R. M., Condon, L. J., & Kollet, S. J. (2015). A refactored version of ParFlow (v3. 1) and its application to continental-scale hydrology. *Geoscientific Model Development*, *8*(5), 1161–1183.

McCarthy, G. T. (1938). The unit hydrograph and flood routing. *Proceedings of the Conference of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers*.

McGuckin, S. O., Jordan, C., & Smith, R. V. (1999). Deriving phosphorus export coefficients for corine land cover types. *Water Science and Technology*, *39*(12), 47–53. https://doi.org/10.2166/WST.1999.0528

Mendez, L. (2018). *DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DEL LAGO LANALHUE, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE*. UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, *19*, 205–234.

(NRCS), N. R. C. S. (2009). *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology*.

Padarian, J., Pérez-Quezada, J., & Seguel, O. (2017). Modelling the distribution of organic carbon in the soils of Chile. *Proceedings of the Fifth Global Workshop on Digital Soil Mapping: Digital Soil Assessments and Beyond*, 329–333.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A*, *193*, 120–145.

Penman, H. L. (1956). Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, *4*(1), 9–29.

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, *100*(2), 81–92.

Reckhow, K. H., Beaulac, M. N., & Simpson, J. T. (1980). *MODELING PHOSPHORUS LOADING AND LAKE RESPONSE UNDER UNCERTAINTY A MANUAL AND COMPILA1ION OF EXPORT COEFFICIENTS*.

Reddy, K. R., Khaleel, R., Wanielista, M. P., & Todd, D. A. (1979). Phosphorus and nitrogen feedlot runoff: A conceptual model. *Journal of Environmental Quality*, *8*(2), 202–212.

Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete equilibrium. *Water Resources Research*, *8*(5), 1204–1213.

Sangrey, D. A., Harrop-Williams, K. O., & Klaiber, J. A. (1984). Predicting ground-water response to precipitation. *Journal of Geotechnical Engineering*, *110*(7), 957–975. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:7(957)

Secretaría Regional de Planificación y Coordinación Región Metropolitana. (1980). *La minería en la Región Metropolitana*.

Seremi Medio Ambiente Región de Los Ríos. (2023). *Carta 234454*. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2023/proyectos/Folio_6750-6974_2023.10.12_Carta_234454_MMA.pdf

SERNAGEOMIN. (1980). *Carta Geológica de Chile N° 39. Geología de la Hoja de Santiago. Escala 1:250.000.* .

Shrestha, S., Kazama, F., & Newham, L. T. H. (2008). A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data. *Environmental Modelling and Software*, *23*(2), 182–194. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.006

Simpson, D. E. . (1991). *Quantification of the effects of land-use on runoff water quality in selected catchments in Natal : final report*. Water Research Commission.

Simunek, J., van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*, *7*(2), 587–600.

Skinner, L., Townsend, S., & Fortune, J. (2009). *The Impact of Urban Land-use on Total Pollutant Loads Entering Darwin Harbour*.

Svensson, T., Lovett, G. M., & Likens, G. E. (2010). Is chloride a conservative ion in forest ecosystems? *Biogeochemistry 2010 107:1*, *107*(1), 125–134. https://doi.org/10.1007/S10533-010-9538-Y

Therrien, R., McLaren, R. G., Sudicky, E. A., & Panday, S. M. (2010). *HydroGeoSphere: A fully integrated model of surface and subsurface water flow and solute transport*. University of Waterloo.

USDA. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. USDA, NRCS, CED, TR55. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2183758

USDA Agricultural Research Service. (n.d.-a). *Nitrogen Cycle in the Soil | SWAT+ Documentation*. Retrieved July 1, 2026, from https://swatplus.gitbook.io/io-docs/theoretical-documentation/section-3-nutrients-pesticides/chapter-3-1-nitrogen/3-1.1-nitrogen-cycle-in-the-soil

USDA Agricultural Research Service. (n.d.-b). *Phosphorus | SWAT+ Documentation*. Retrieved July 1, 2026, from https://swatplus.gitbook.io/io-docs/theoretical-documentation/section-3-nutrients-pesticides/phosphorus

USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS). (2017). *Soil Survey Manual*.

USDA Soil Conservation Service. (1972). *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. USDA Soil Conservation Service*. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1547032

USEPA. (2005). Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters EPA 841-B-08-002. *Originally Published as: Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters [Electronic Resource] ([Washington, D.C.] : United States Environmental Protection Agency, Office of Water, [2005]);414 p. : Digital, PDF File*.

Venetis, C. (1969). A STUDY ON THE RECESSION OF UNCONFINED ACQUIFERS. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, *14*(4), 119–125. https://doi.org/10.1080/02626666909493759

Vergara, C. (2022). *Contributions to geoconservation in Cajón del Maipo aspiring geopark (Chile)*. Universidade do Minho.

Vitousek, P. M. (1994). Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, *75*(7), 1861–1876. https://doi.org/10.2307/1941591;WEBSITE:WEBSITE:ESAJOURNALS;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:19399170;JOURNAL:JOURNAL:19399170;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Wang, W., Chen, L., & Shen, Z. (2020). Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution. *Science of the Total Environment*, *747*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141164

Weill, S., Mazzia, A., Putti, M., & Paniconi, C. (2011). Coupling water flow and solute transport into a physically-based surface–subsurface hydrological model. *Advances in Water Resources*, *34*(1), 128–136.

White, P. J., & Hammond, J. P. (2006). *UPDATING THE ESTIMATE OF THE SOURCES OF PHOSPHORUS IN UK WATERS*.

Williams, J. R. (1977). Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. USDA Sediment-Yield Workshop*, 244–252.

Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, *26*, 189–193.

Xepapadeas, A. (2011). The Economics of Non-Point-Source Pollution. *Annual Review of Resource Economics*, *3*, 355–373. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-RESOURCE-083110-115945

Zehe, E., Maurer, T., Ihringer, J., & Plate, E. (2001). Modeling water flow and mass transport in a loess catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, *26*(7–8), 487–507.