UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

CONTAMINANTES Y PARÁMETROS REGULADOS Y EMERGENTES EN EL RÍO MAIPO: PRESENCIA, TRATAMIENTO Y REMOCIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FERNANDO ANDRÉS LAGOS DEL RÍO

PROFESOR GUÍA:
GERARDO AHUMADA THEODULOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARÍA PÍA MENA PATRI
CARMEN DROPPELMANN CUNEO

SANTIAGO DE CHILE
2023

CONTAMINANTES Y PARÁMETROS REGULADOS Y EMERGENTES EN EL RÍO MAIPO: PRESENCIA, TRATAMIENTO Y REMOCIÓN

El presente trabajo de título tiene como enfoque principal la realización de un análisis sobre la presencia y tratamiento de contaminantes en el cauce superficial principal del río Maipo ubicado en las regiones Metropolitana y Valparaíso.

Para efectos de este trabajo, estos contaminantes y parámetros indicadores se clasifican en dos: Parámetros y Contaminantes Regulados; y Contaminantes Emergentes. Los primeros, se encuentran regulados en las normativas de calidad de agua superficial, que incluyen las normas establecidas en el D.S. N°53/2014, la NCh 409/2005, la NCh 1333/1978 y el D.S. N°143/2009. Los segundos, son contaminantes que no se encuentran regulados actualmente en las normativas locales y para los cuales existe menor información disponible. La gran mayoría son micro-contaminantes que poseen concentraciones bajas del orden de $\frac{\mu g}{L}$/ o $\frac{ng}{L}$.

En el caso de los parámetros y contaminantes regulados se realiza una evaluación de las características físico-químicas, que incluyen las series de concentraciones y valores en periodos de interés, estadísticos y porcentajes de muestras que se encuentran dentro de los límites establecidos en las diferentes normativas, con prioridad en la Norma Secundaria de Calidad de Agua Superficial (NSCA) del río Maipo establecida en el Decreto Supremo N°53. También se incluyen análisis de algunos parámetros seleccionados en torno a las normas relacionadas a diferentes usos como agua potable, riego y recreacional.

En el caso de los contaminantes emergentes (CEs), debido a la escasez de información, se realiza un análisis bibliográfico que incluye la caracterización de estos, tecnologías disponibles de remoción y algunos resultados expuestos en trabajos de investigación anteriores.

Finalmente, a modo de conclusiones se observan bajos porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en las normativas de uso para diferentes parámetros y contaminantes regulados en algunas estaciones de control, como por ejemplo sulfato, cloruro, conductividad eléctrica, hierro y manganeso para la NCh 1333; y arsénico, hierro y manganeso para el caso de la NCh 409. También se observan bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la NSCA, como el caso de la conductividad eléctrica, cloruro y sulfato. En el caso de los contaminantes emergentes, se recomienda realizar estudios sobre las concentraciones de estos en el río Maipo, como los existentes en otros ríos del país (ej: río Biobío) y así evaluar y exponer los niveles de contaminación emergente en el principal efluente de una de las cuencas más pobladas y con mayor actividad productiva de Chile.

Agradecimientos

Agradecer a mi familia y amigos por su apoyo incondicional durante este largo periodo universitario, especialmente durante el último tramo vinculado a este trabajo.

Agradecer a todas esas personas que me han ayudado y guiado durante esta experiencia. Al profesor Gerardo, por aceptar ser mi profesor guía y ayudarme en la elección del tema de interés incluso ante imprevistos importantes que significaron grandes cambios en el trabajo. A la profesora María Pía, por su importante, generosa y desinteresada ayuda con las correcciones y por su gran aporte en la redacción del presente trabajo. A Verónica por aceptar ser parte de la comisión evaluadora y por su gran aporte en las correcciones e información de gran valor y por aportar una mirada valiosa y objetiva de alguien que trabaja en un organismo público estrechamente vinculado al tema principal. Sin los integrantes de la comisión, este trabajo no habría sido posible.

Finalmente también agradecer por las virtudes que me permitieron sacar adelante este proceso, incluso frente a grandes incertidumbres que se presentaron en el camino y al incalculable tiempo invertido. Orgulloso de presentar este trabajo y como expresa un dicho popular “no tirar la toalla”.

Tabla de Contenido

1. Introducción y Motivación **1**
1.1. Objetivo General . . . 4
1.2. Objetivos Específicos . . . 4

2. Alcances **5**

3. Caracterización Zona de Estudio: Cuenca del Río Maipo **7**
3.1. Antecedentes Político Administrativos . . . 8
3.2. Demografía . . . 9
3.3. Hidrogeología . . . 11
3.4. Hidrología . . . 11
3.4.1. Disponibilidad de Información . . . 11
3.4.2. Temperaturas Medias Mensuales y Anuales . . . 14
3.4.3. Precipitaciones Medias . . . 16
3.4.4. Caudales Medios . . . 19

4. Características aguas superficiales y su relación con la norma secundaria de calidad **22**
4.1. Norma Secundaria de Calidad del Agua Superficial Río Maipo: Decreto Supremo N°53 . . . 22
4.2. Disponibilidad de Información . . . 26
4.3. Metodología de Análisis . . . 27
4.4. Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados . . . 29
4.4.1. Oxígeno Disuelto . . . 29
4.4.2. Conductividad Eléctrica . . . 29
4.4.3. pH . . . 30
4.4.4. Cloruro . . . 31
4.4.5. Sulfato . . . 31
4.4.6. DBO-5 . . . 32
4.4.7. Nitrato y Nitrito . . . 33
4.4.8. Fósforo como Ortofosfato . . . 33
4.4.9. Plomo . . . 34
4.4.10. Niquel . . . 35
4.4.11. Zinc . . . 35
4.4.12. Cromo . . . 36
4.5. Concentraciones y Resultados de Parámetros Regulados . . . 37
4.5.1. Oxígeno Disuelto . . . 38
4.5.2. Conductividad Eléctrica . . . 40

4.5.3. pH . . . 43
4.5.4. Cloruro . . . 46
4.5.5. Sulfato . . . 49
4.5.6. Demanda Biológica de Oxígeno . . . 52
4.5.7. Nitrato . . . 55
4.5.8. Ortofosfato . . . 58
4.5.9. Plomo Disuelto . . . 61
4.5.10. Níquel Disuelto . . . 63
4.5.11. Zinc Disuelto . . . 65
4.5.12. Cromo Total . . . 67
4.6. Comentarios . . . 70

5. Usos del Agua y Marco Regulatorio 73
5.1. Uso Agua Potable . . . 73
5.1.1. NCh 409: Agua Potable . . . 77
5.2. Uso Riego . . . 80
5.2.1. NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos . . . 81
5.3. Uso Recreacional . . . 85
5.3.1. Decreto Supremo N°143: Establece normas de calidad primaria para las aguas continentales superficiales aptas para actividades de recreación con contacto directo . . . 85
5.4. Uso como cuerpo receptor . . . 88
5.4.1. Decreto Supremo N°90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales . . . 92
5.5. Análisis Contaminantes y Parámetros Regulados en Normativa de Uso . . . 94
5.5.1. Disponibilidad de Información . . . 94
5.5.2. Metodología de Análisis . . . 96
5.5.3. Contaminantes y Parámetros Regulados Seleccionados . . . 97
5.5.3.1. Arsénico . . . 98
5.5.3.2. Boro . . . 99
5.5.3.3. Cadmio . . . 99
5.5.3.4. Conductividad Eléctrica . . . 100
5.5.3.5. Cloruro . . . 100
5.5.3.6. Cobre . . . 100
5.5.3.7. Cromo . . . 100
5.5.3.8. Hierro . . . 101
5.5.3.9. Magnesio . . . 101
5.5.3.10. Manganeso . . . 102
5.5.3.11. Mercurio . . . 102
5.5.3.12. Plomo . . . 103
5.5.3.13. Sodio porcentual . . . 103
5.5.3.14. Sulfato . . . 104
5.5.3.15. Zinc . . . 104
5.5.4. Resultados . . . 105
5.5.4.1. Arsénico Total . . . 106
5.5.4.2. Boro Total . . . 109

5.5.4.3. Cadmio Total . . . 110
5.5.4.4. Conductividad Eléctrica . . . 111
5.5.4.5. Cloruro . . . 116
5.5.4.6. Cobre Total . . . 119
5.5.4.7. Cromo Total . . . 122
5.5.4.8. Hierro Total . . . 123
5.5.4.9. Magnesio Total . . . 126
5.5.4.10. Manganeso Total . . . 129
5.5.4.11. Mercurio Total . . . 132
5.5.4.12. Plomo Total . . . 133
5.5.4.13. Sodio porcentual . . . 135
5.5.4.14. Sulfato . . . 138
5.5.4.15. Zinc Total . . . 141
5.6. Tecnologías de Tratamientos Recomendadas para Usos del Agua . . . 144
5.6.1. Arsénico . . . 145
5.6.2. Hierro y Manganeso . . . 148
5.6.3. Sólidos Disueltos Totales . . . 149
5.7. Comentarios . . . 150

6. Contaminantes Emergentes 153
6.1. Principales Fuentes . . . 155
6.2. Clasificación y Caracterización . . . 156
6.2.1. Productos Farmacéuticos y de Higiene Personal . . . 156
6.2.2. Productos Químicos . . . 158
6.2.3. Plaguicidas . . . 158
6.2.4. Agentes Tensoactivos . . . 159
6.3. Eficiencia de Remoción Plantas de Tratamiento Convencionales . . . 159
6.4. Tecnologías para la Eliminación de Contaminantes Emergentes . . . 164
6.4.1. Tratamientos Físico-químicos y Procesos de Membrana . . . 164
6.4.2. Tratamientos Biológicos . . . 170
6.5. Casos de Estudio en Chile . . . 174
6.5.1. Productos Farmacéuticos en la Cuenca del Biobío . . . 174
6.5.2. Presencia de Microcontaminantes Orgánicos en el río Biobío: Evaluación de Procesos de Oxidación Avanzada, UV/H2O2 y O3/CAP, como alternativas para su abatimiento . . . 176
6.5.3. Contaminación farmacéutica en los ríos del mundo: Río Maipo y Mapocho 178
6.6. Comentarios . . . 180

7. Conclusiones y Recomendaciones 182

Bibliografía 185

Índice de Tablas

3.1. Subcuencas y División Político-Administrativa. 8
3.2. Estaciones Meteorológicas en Cuenca Río Maipo 13
3.3. Estaciones Meteorológicas en Cuenca Río Maipo 13
3.4. Estaciones Fluviométricas en Cuenca Río Maipo 14
3.5. Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Estaciones Fluviométricas en Cuenca Río Maipo Periodo 1989-2018. 14
3.6. Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Subcuencas Maipo Periodo 1989-2018. 15
3.7. Precipitaciones Medias Estaciones Cuenca Maipo Periodo 1989-2018. 17
3.8. Precipitaciones Medias Subcuencas Maipo Periodo 1989-2018. 18
4.1. Niveles de calidad ambiental por área de vigilancia Decreto Supremo N° 53. . . 24
4.2. Áreas de Vigilancia Resolución N° 1799. 25
4.3. Estaciones de monitoreo Norma Secundaria Calidad de Agua Superficial río Maipo. 27
4.4. Estaciones representativas por área de vigilancia analizadas. 28
4.5. Resumen porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la NSCA Río Maipo para las áreas de vigilancia en el cauce principal del Río Maipo por parámetros de control. 37
4.6. Estadísticos Oxígeno Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 39
4.7. Estadísticos Conductividad Eléctrica por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 41
4.8. Estadísticos pH por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 44
4.9. Estadísticos Cloruro por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 47
4.10. Estadísticos Sulfato por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 50
4.11. Estadísticos DBO5 por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 53
4.12. Estadísticos Nitrato por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 56
4.13. Estadísticos Ortofosfato por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 59
4.14. Estadísticos Plomo Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 62
4.15. Estadísticos Níquel Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 64
4.16. Estadísticos Zinc Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 66
4.17. Estadísticos Cromo Total por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53. 68
5.1. Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo. 73
5.1. Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo. 74
5.1. Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo. 75

5.1. Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo. 76
5.2. Tabla 1 NCh 409: Elementos esenciales. 78
5.3. Tabla 2 NCh 409: Elementos o sustancias no esenciales. 78
5.4. Tabla 3 NCh 409: Sustancias orgánicas. 79
5.5. Tabla 4 NCh 409: Plaguicidas. 79
5.6. Tabla 5 NCh 409: Productos secundarios de la desinfección. 79
5.7. Tabla 6 NCh 409: Límites máximos para elementos radiactivos. 80
5.8. Tabla 7 NCh 409: Parámetros relativos a características organolépticas. 80
5.9. Tabla 1 NCh 1.333: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. 82
5.10. Tabla 2 NCh 1.333: - Clasificación de aguas para riego según su salinidad. . . . 83
5.11. Niveles de calidad ambiental para aguas continentales superficiales determinadas por la norma en situaciones normales y de emergencia Tabla 1 y 2 D.S. Nº143/2009. 86
5.12. Frecuencias mínimas de monitoreo Tabla 3 D.S. Nº143/2009. 87
5.13. Valores máximos de excedencia Tabla 4 D.S. Nº143/2009. 88
5.14. Descripción Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Cuenca río Maipo. . . 89
5.14. Descripción Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Cuenca río Maipo. . . 90
5.14. Descripción Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Cuenca río Maipo. . . 91
5.15. Emisiones RILES mayores a 1000 m3/día Cuenca Río Maipo Enero 2022. . . . 92
5.16. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales Tablas 1 y 2 D.S. Nº90/2001. 93
5.17. Estaciones de calidad de agua superficial seleccionadas Río Maipo. 95
5.18. Estaciones representativas por área de vigilancia (NSCA Río Maipo) en análisis por norma de uso. 97
5.19. Contaminantes y parámetros seleccionados análisis normativa uso. 98
5.20. Resumen porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en 3 normativas de uso para diferentes parámetros y contaminantes regulados seleccionados. 105
5.21. Resumen porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos según clasificación de agua por Conductividad Eléctrica en NCh1333. 106
5.22. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Arsénico. 106
5.23. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Arsénico. 107
5.24. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Boro Total. 109
5.25. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cadmio Total. 110
5.26. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Conductividad Eléctrica. . 111
5.27. Tabla 2 NCh 1.333: - Clasificación de aguas para riego según su salinidad. Fuente: INN (1987) 112
5.28. Clasificación de cultivos de acuerdo a sus sensibilidad frente a conductividad eléctrica 112
5.29. Siembra de Hortalizas Región Metropolitana Año 2022. 113
5.30. Superficie cosechada Región Metropolitana año 2021-22. 114
5.31. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Conductividad Eléctrica. 115
5.32. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cloruro. 116
5.33. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Cloruro. 117
5.34. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cobre Total. Fuente: Elaboración Propia 119

5.35. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Cobre Total. . . . 120
5.36. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cromo Total. . . . 122
5.37. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Hierro Total. . . . 124
5.38. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Hierro Total . . . 125
5.39. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Magnesio Total. . . . 126
5.40. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Magnesio Total. . . . 127
5.41. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Manganeso Total. . . . 129
5.42. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Manganeso Total. . . . 130
5.43. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Mercurio Total. . . . 132
5.44. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Plomo Total. . . . 134
5.45. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Sodio Porcentual. . . . 135
5.46. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Sodio Porcentual. . . . 136
5.47. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Sulfato. . . . 138
5.48. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Sulfato. 139
5.49. Límites máximos establecidos en normativas de uso: Zinc Total. . . . 141
5.50. Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Zinc Total . . . 142
5.51. Plantas de tratamientos diseñadas para la remoción de Arsénico en Chile. . . . 146
6.1. Clasificación de microcontaminantes. . . . 156
6.2. Tasas de Excreción Productos Farmacéuticos. . . . 157
6.3. Eficiencias de Remoción de Algunos Compuestos Farmacéuticos en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Convencionales. . . . 160
6.3. Eficiencias de Remoción de Algunos Compuestos Farmacéuticos en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Convencionales. . . . 161
6.4. Eficiencias de Remoción Atrazina. . . . 162
6.5. Eficiencias de Remoción Carbamazepina. . . . 162
6.6. Eficiencias de Remoción Diclofenaco. . . . 163
6.7. Eficiencias de Remoción Triclosán. . . . 164
6.8. Procesos de membrana más comunes en el tratamiento de agua potable y aguas residuales. . . . 168
6.9. Eliminación de contaminantes emergentes mediante adsorción. . . . 170
6.10. Microcontaminantes analizados por Henriquez (2012) . . . 175
6.11. Porcentajes de remoción de microcontaminantes en las distintas plantas de tratamiento de aguas servidas cuenca Biobío. . . . 176
6.12. Detección de microcontaminantes orgánicos en el río Biobío y sistemas de tratamientos de agua potable y servidas. . . . 177
6.13. Productos farmacéuticos analizados en *Pharmaceutical Pollution of the world´s rivers*. . . . 178
6.14. Resultados *Pharmaceutical Pollution of the world´s rivers*: concentraciones compuestos farmacéuticos en río Maipo y Mapocho. . . . 180

Índice de Ilustraciones

1.1. Esquema General de las diferentes fuentes y rutas de incorporación de múltiples microcontaminantes hacia el medio ambiente natural. 2
3.1. Cartografía Cuenca Río Maipo. 7
3.2. Cartografía Subcuencas Río Maipo. 9
3.3. Densidad poblacional en Cuenca Río Maipo. 10
3.4. Origen del Agua en Viviendas de la Región Metropolitana. 10
3.5. Sistemas de Acuíferos y Unidades Hidrogeológicas. 11
3.6. Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas en la Cuenca Río Maipo. 12
3.7. Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Estaciones Fluviométricas en Cuenca Río Maipo Periodo 1989-2018. 15
3.8. Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Subcuencas Maipo. 16
3.9. Precipitaciones Medias Estaciones Cuenca Maipo (*En azul el promedio*). 18
3.10. Precipitaciones Medias Subcuencas Maipo Periodo 1989-2018. 19
3.11. Diagrama unifilar estaciones fluviométricas presentadas. 20
3.12. Serie Histórica de Caudales Medios Mensuales Estaciones Cuenca Maipo Periodo 1990-2020. 21
3.13. Caudales Medios Estaciones Cuenca Maipo Periodo 1990-2020. 21
4.1. Áreas de vigilancia y estaciones de monitoreo red NSCA río Maipo. 26
4.2. Estaciones seleccionadas de calidad de agua superficial NSCA río Maipo. . . . 27
4.3. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Oxígeno Disuelto. 38
4.4. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Oxígeno Disuelto. 39
4.5. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Oxígeno Disuelto. 40
4.6. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Conductividad Eléctrica. 41
4.7. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Conductividad Eléctrica. 42
4.8. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Conductividad Eléctrica. 43
4.9. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: pH. 44
4.10. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : pH. 45
4.11. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: pH. . . 46
4.12. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Cloruro. 47
4.13. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Cloruro. 48

4.14. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Cloruro. 49
4.15. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Sulfato. 50
4.16. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Sulfato. 51
4.17. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Sulfato. 52
4.18. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53. 53
4.19. Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : DBO5. . . . 54
4.20. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: DBO5. 55
4.21. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Nitrato. 56
4.22. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Nitrato. 57
4.23. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Nitrato. 58
4.24. Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Ortofosfato. 59
4.25. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Ortofosfato. 60
4.26. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Ortofosfato. 61
4.27. Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : Plomo Disuelto. 62
4.28. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Plomo Disuelto. 63
4.29. Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : Níquel Disuelto. 64
4.30. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Níquel Disuelto. 65
4.31. Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : Zinc Disuelto. 66
4.32. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Zinc Disuelto. 67
4.33. Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Cromo Total. 69
4.34. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Cromo Total. 70
4.35. Diagrama Unifilar Río Maipo. 71
5.1. Plantas de Agua Potable y Agua Potable Rural (APR) Cuenca Río Maipo. . . 76
5.2. Plantas de Agua Potable cuya fuente es el Río Maipo. 77
5.3. Zonas de Riego Cuenca Río Maipo. 81
5.4. Principales aguas continentales superficiales cuenca río Maipo. 85
5.5. Plantas de Aguas Servidas Cuenca Río Maipo. 89
5.6. Estaciones seleccionadas de calidad de agua superficial Río Maipo. 96
5.7. Serie de Concentración (1990-Actualidad) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Arsénico Total. 107
5.8. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-Actualidad) : Arsénico Total. 108
5.9. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Arsénico Total. 109
5.10. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cadmio Total. 111
5.11. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Conductividad Eléctrica. 114
5.12. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Conductividad Eléctrica. 115

5.13. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Conductividad Eléctrica. 116
5.14. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Cloruro. 117
5.15. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Cloruro. 118
5.16. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cloruro. 119
5.17. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Cobre Total. 120
5.18. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Cobre Total. 121
5.19. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cobre Total. 122
5.20. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cromo Total. 123
5.21. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Hierro Total. 124
5.22. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Hierro Total. 125
5.23. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Hierro Total. 126
5.24. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Magnesio Total. 127
5.25. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Magnesio Total. 128
5.26. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Magnesio Total. 129
5.27. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Manganeso Total. 130
5.28. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Manganeso Total. 131
5.29. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Manganeso Total. 132
5.30. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Mercurio Total. 133
5.31. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Plomo Total. 135
5.32. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Sodio porcentual. 136
5.33. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Sodio porcentual. 137
5.34. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Sodio porcentual. 138
5.35. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Sulfato. 139
5.36. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Sulfato. 140
5.37. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Sulfato. 141
5.38. Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Zinc Total. 142
5.39. Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Zinc Total. 143

5.40. Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Zinc Total. 144
6.1. Evolución publicación de documentos relacionados con Contaminantes Emergentes. 154
6.2. Fuentes de Contaminantes Emergentes. 155
6.3. Eliminación de algunos compuestos farmacéuticos con Ozono. 166
6.4. Comparación de tecnología UV y UV/H2O2, para la remoción de octilfenol. . 167
6.5. Comparación de la eliminación de BHA mediante tecnología UV y UV/O3. . . 167
6.6. Esquema diferencias entre procesos de membrana 169
6.7. Comparación de Biorreactor de Membrana con Lodos Activados. 171
6.8. Eliminación de diferentes microcontaminantes con MBR: Triazinas, organoclorados y Eddp. 172
6.9. Eliminación de diferentes microcontaminantes con MBR: Fármacos, parabenos, hormonas, surfactantes y plastificantes. 172
6.10. Comparación de eliminación de diferentes microcontaminantes con MBR adicionando post-tratamientos. 173
6.11. Eficiencias de remoción globales de MBR + post-tratamientos. 174
6.12. Ubicación muestras tomadas en estudio *Pharmaceutical Pollution of the world´s rivers*. 179

Capítulo 1

Introducción y Motivación

A fines del siglo XX, una de las principales preocupaciones de Chile estaba en el déficit ambiental producido por la contaminación de las aguas superficiales. Para remediar esta situación se puso en marcha un mega plan de inversión y políticas publicas en sistemas de tratamiento de aguas servidas y nuevas y más exigentes normas de emisión. Fruto de esto, para diciembre del año 2022 se estima en 99,98 % la cobertura nacional de tratamiento de aguas servidas para zonas urbanas (Saldivia, 2020; Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2021).

Pese a este enorme avance, al día de hoy se presentan nuevos desafíos frente a la calidad y disponibilidad del recurso hídrico en Chile y el mundo. Un ejemplo de esto son las mega-sequías, como la que se observa en Chile desde hace más de una década, donde la disminución de las precipitaciones en un 20 a 40 % (Garreaud et al., 2020) ha provocado una disminución de la disponibilidad del agua, sumado a esto un aumento en la demanda, contaminación hídrica y sobre-explotación de este recurso.

Como se mencionó anteriormente, la contaminación hídrica presenta un gran desafío a futuro, tanto para garantizar el suministro de agua potable para la población, como para preservar los sistemas ecológicos y disminuir los efectos negativos en estos.

En Chile existen diferentes normativas que regulan la calidad del agua según usos y/o criterios ambientales. Estas pueden ser normas con recomendaciones técnicas de carácter no obligatorio o decretos de carácter obligatorio. Por ejemplo, la NCh 409 (2005) regula la calidad del agua potable; la NCh 1333 (1978) establece requisitos de calidad de agua para diferentes usos como riego, recreacional, vida acuática, etc...; el Decreto Supremo N°90 (2000) regula la descarga de contaminantes a las aguas marinas y superficiales; y el Decreto Supremo N°53 (2014) que dicta las normas secundarias de calidad del agua superficial de la cuenca del río Maipo. Estas normativas establecen límites máximos, mínimos o criterios para varios contaminantes y parámetros.

Aun así, pese al gran avance en la regulación de contaminantes y tratamiento de agua, un tema que despierta bastante interés es la presencia de contaminantes en los cuerpos de aguas naturales. Estos se pueden clasificar como Macrocontaminantes y Microcontaminantes, con concentraciones de orden $\frac{mg}{L}$ y $\frac{\mu g}{L}$ o $\frac{ng}{L}$ respectivamente. Sumado a esta problemática, se agrega la presencia de nuevos contaminantes que generalmente no se encuentran regulados

en las normativas de calidad de agua debido a su carácter de importancia reciente y a dificultades en la medición, escasa información toxicológica y estudios. Estos son consecuencia del creciente desarrollo industrial y económico y pueden poseer propiedades no-degradables en el medio ambiente, persistiendo durante años y provocando incluso efectos nocivos para la salud y el medio ambiente.

Estos contaminantes pueden ser incorporados a los cuerpos de aguas por descargas puntuales como descargas ilegales de contaminantes o descargas de aguas servidas tratadas. Estas últimas, a pesar de recibir un tratamiento, no están diseñadas para remover efectivamente estos compuestos, por lo cual en caso de la presencia de estos, se necesitara de un tratamiento adicional. Por otra parte, existen también fuentes de contaminación difusas como la agricultura, ganadería y acuicultura, donde los contaminantes pueden ser transportados por escorrentía e infiltración en aguas subterráneas, incluso por transporte atmosférico y dispersión. La Figura 1.1 presenta un esquema con las diferentes fuentes y rutas de incorporación de microcontaminantes en el medio natural.

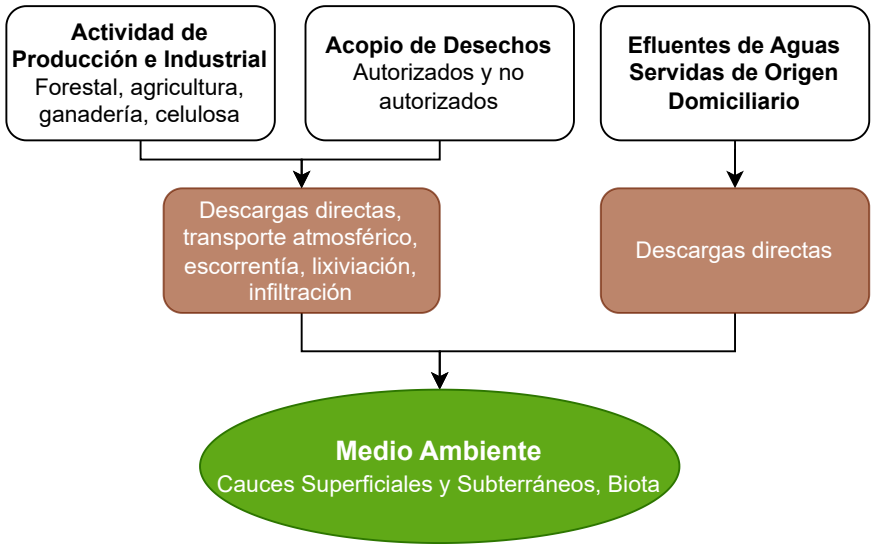


Figura 1.1: Esquema General de las diferentes fuentes y rutas de incorporación de múltiples microcontaminantes hacia el medio ambiente natural.

Fuente: Rozas, 2016.

Dentro de estos nuevos contaminantes, destacan los contaminantes emergentes, que se definen como: " sustancias de diverso origen y naturaleza química, cuya presencia en el medio ambiente no se considera significativa en razón de su distribución y concentración, por lo que pasan inadvertidos. No obstante, debido al aumento en su detección, el potencial impacto ecológico y los riesgos que entrañan a la salud humana, han recibido atención reciente en análisis académicos, estudios oficiales y políticas de calidad del agua" (Jacobo-Marín y de León, 2021). El término "emergentes" se debe a que no se encuentran aún regulados, o están siendo sometidos a un proceso de regulación (Patiño et al., 2014; Barceló y de Alda, 2008).

A partir de las definiciones anteriores y para efectos del presente trabajo, se clasifican los contaminantes en dos categorías principales:

- Contaminantes Regulados: Contaminantes que se encuentran definidos en alguna normativa local de calidad del agua y para los cuales se fijan límites o criterios.
- Contaminantes Emergentes: Contaminantes que no se encuentran regulados en alguna normativa local de calidad del agua y que han sido mencionados como de interés por sus efectos tóxicos.

Ejemplos de contaminantes regulados son arsénico, cloruro, sulfato y plomo. También existen parámetros regulados que permiten evaluar el nivel de calidad del agua como la conductividad eléctrica, DBO5, oxígeno disuelto y pH.

Por otra parte, los contaminantes emergentes (CEs) son generalmente microcontaminantes que incluyen sustancias de uso cotidiano como: productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), plastificantes, pesticidas, retardantes de llama, narcóticos, surfactantes, nanomateriales, entre otros, incluyendo sus sub-productos de transformación y derivados (Vásquez, 2018).

En Chile, pese a la existencia de nuevos y más accesibles procedimientos de medición de concentración de microcontaminantes, se han realizado pocos estudios sobre la presencia de estos CEs y sus concentraciones en los principales cauces del país. Algunos estudios detallados se han realizado en la cuenca del río Biobío (Rozas, 2016).

Debido a esto y al creciente interés en el tema junto con la falta de estudios a nivel local, surge la motivación para incluir en el trabajo un análisis bibliográfico sobre estos contaminantes emergentes en el cauce del río Maipo.

El enfoque principal del trabajo estará en los contaminantes y parámetros regulados en el curso principal del río Maipo, realizándose un análisis que incluya las concentraciones y valores de estos junto a una evaluación frente a los límites establecidos en diferentes normativas.

El río Maipo es un importante curso de aguas que fluye a través de la Región Metropolitana y de Valparaíso. La cuenca del Maipo presenta una alta concentración de habitantes y diversas industrias. Además el río Maipo atiende alrededor del 70 % de la demanda actual de agua potable y cerca de un 90 % de las demandas de regadío de la Región Metropolitana (Biblioteca Nacional del Congreso de Chile, s/f) con 7.307.000 habitantes según el censo 2017 (Instituto Nacional de Estadística, 2019). También es fuente de agua potable de parte de la Región de Valparaíso, como lo son las comunas de San Antonio y Santo Domingo, encontrándose aguas abajo de descargas de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) del Gran Santiago y localidades de la región Metropolitana.

De esta manera, surge la importancia de evaluar la potencial contaminación de este afluente y visibilizar la situación sobre la calidad del agua, presentando tecnologías de tratamiento frente a contaminantes de interés (ej: contaminantes con bajo porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en las normativas analizadas).

1.1. Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es realizar un análisis de los contaminantes regulados y emergentes presentes en las aguas superficiales del río Maipo y posteriormente presentar alternativas de tratamiento para estos contaminantes.

1.2. Objetivos Específicos

A continuación se enumeran los objetivos específicos:

1. Presentar la normativa relacionada a la calidad del agua superficial del río Maipo y las normativas relacionadas al uso de sus aguas junto a los contaminantes y parámetros regulados incluyendo los límites establecidos para estos.
2. Analizar concentración de contaminantes y parámetros regulados en el río Maipo.
3. Describir las características principales de estos contaminantes y parámetros, incluyendo sus posibles efectos negativos para el medio ambiente y la salud humana.
4. Realizar un análisis frente a la normativa local de calidad del agua, que incluya porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos para cada contaminante y parámetro y sus principales estadísticos como valores promedio, máximos y mínimos.
5. Discutir posibles fuentes de contaminación y medidas de mitigación frente a contaminantes con bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las normas de uso.
6. Presentar y describir diferentes alternativas de tratamiento disponibles para la remoción de los contaminantes con bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las normas de uso.
7. Realizar un análisis bibliográfico sobre los contaminantes emergentes que incluya una caracterización, estudios relacionados y tecnologías de tratamiento disponibles.

Capítulo 2

Alcances

Los alcances de la presente memoria se limitan a la investigación bibliográfica y recopilación de antecedentes y procesamiento de datos mediante información facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y otros estudios anteriores para evaluar la presencia y concentración de contaminantes en las aguas superficiales del río Maipo.

En el caso de contaminantes y parámetros regulados, al existir una amplia disponibilidad de información para el río Maipo, el alcance incluye un análisis de datos sobre estos contaminantes; concentraciones y tendencias; calidad y disponibilidad de información; y una evaluación frente a las normas vinculadas a la calidad del río Maipo y usos del agua. Esta última se realiza a partir de los porcentajes de muestras que se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas locales de calidad del agua, con principal enfoque en la Norma Secundaria de Calidad de Agua Superficial del río Maipo seguido de las normativas de uso: NCh 409, NCh 1333 y D.S. Nº143.

Para el caso de los contaminantes emergentes, al no haber disponibilidad de información sobre concentraciones, el alcance se limita a la investigación bibliográfica y recopilación de información a partir de estudios similares.

A continuación se presenta de forma enumerada los principales alcances:

1. Contaminantes y Parámetros Regulados:

    a) Recopilación de antecedentes de características y efectos de contaminantes y parámetros regulados.

    b) Análisis y procesamiento de datos sobre parámetros y contaminantes regulados en el cauce principal del río Maipo.

    c) Análisis sobre calidad y disponibilidad de información.

    d) Análisis de la Normativa de Calidad Del Agua Superficial, con prioridad en la NSCA y posteriormente de las normativas de uso.

    e) Presentación de las series de concentraciones y valores de los parámetros y contaminantes seleccionados, junto a los estadísticos y porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las normativas.

f) Recopilación de antecedentes sobre diferentes tecnologías disponibles para la remoción o disminución de contaminantes o parámetros con porcentajes bajos de muestras dentro de los límites establecidos en las normativas de uso.

2. Contaminantes Emergentes:

a) Recopilación de antecedentes que incluyen clasificación, características y efectos de los contaminantes emergentes.

b) Recopilación de antecedentes sobre efectividad y remoción de tratamientos convencionales frente a estos contaminantes.

c) Recopilación de antecedentes sobre tratamiento no convencionales disponibles en la actualidad, efectividad y factibilidad.

d) Recopilación de antecedentes sobre estudios similares, a nivel local e internacional.

3. Otros:

a) Recopilación de antecedentes e información sobre la cuenca de estudio, esto incluye información demográfica, caracterización hidrológica, actividades económicas, etc...

b) Caracterización del uso del agua en la cuenca como uso para agua potable, riego, recreacional y uso como receptor de aguas servidas.

Capítulo 3

Caracterización Zona de Estudio: Cuenca del Río Maipo

La cuenca del río Maipo se encuentra emplazada en la zona central de Chile (Figura 3.1). Cubre un 91 % la Región Metropolitana, un 4 % la Región de Valparaíso y un 5 % la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins. Tiene un área total de 15.304 km^2. Es considerada una de las cuenca más importantes del país debido a que alberga un 42 % de la población nacional, aportando al mismo tiempo con cerca del 42 % del PIB nacional (ICASS S.P.A., 2021).

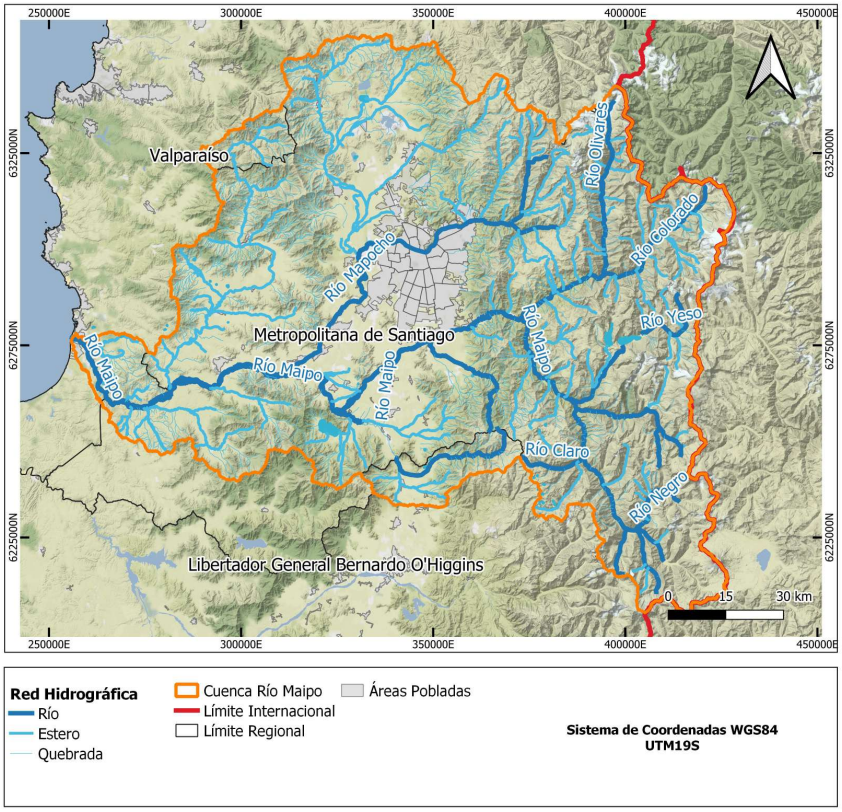


Figura 3.1: Cartografía Cuenca Río Maipo.

A modo de introducir la zona de estudio del presente trabajo, se presenta una breve ca-

racterización de la cuenca basada en estudios anteriores, principalmente el último informe de planificación estratégica de gestión hídrica en la cuenca de Maipo realizado para la Dirección General de Aguas (ICASS S.P.A., 2021). Esta caracterización incluye aspectos político administrativos, demográficos, hidrológicos e hidrogeológicos.

3.1. Antecedentes Político Administrativos

La cuenca del Maipo se divide en 5 principales sub-cuencas, caracterizadas por sus dos principales afluentes, el río Maipo y el Mapocho. Estas subcuencas son Mapocho Alto, Mapocho Bajo, Maipo Alto, Maipo Medio y Maipo Bajo. A continuación se presenta una tabla con la superficie total y las regiones, provincias y comunas que engloba cada una de estas:

Tabla 3.1: Subcuencas y División Político-Administrativa.

Subcuenca	Área $[km^2]$	Región	Provincia	Comunas
Río Maipo Alto	4.859	Metropolitana	Cordillera	San José de Maipo
Río Mapocho Alto	1.022	Metropolitana	Santiago	Lo Barnechea
Río Maipo Medio	2.574	Metropolitana	Cordillera	Pirque, Puente Alto, San José de Maipo
			Talagante	Talagante, Isla de Maipo
			Maipo	Calera de Tango, San Bernardo, Buin, Paine
			Santiago	La Pintana
			Melipilla	Melipilla
		Libertador Bernardo O´Higgins	Cachapoal	Mostazal, Codegua, Graneros
Río Mapocho Bajo	3.456	Metropolitana	Chacabuco	Til Til, Colina, Lampa
			Santiago	Quilicura, Pudahuel, Huechuraba, Vitacura, Conchalí, Las Condes, Independencia, Recoleta, Providencia, Ñuñoa, Renca, Cerro Navia, Quinta Normal, Santiago, Estación Central, Lo Prado, Cerrillos, Lo Espejo, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, La Cisterna, San Ramón, La Pintana, La Granja, San Joaquín, La Florida, Peñalolen, Macul, La Reina
			Cordillera	Puente Alto
			Maipo	San Bernardo, Calera de Tango
			Talagante	Padre Hurtado, Peñaflor, Talagante, El Monte, Isla de Maipo
Río Maipo Bajo	3.363	Metropolitana	Talagante	El Monte, Isla de Maipo
			Melipilla	Curacaví, Maria Pinto, Melipilla, San Pedro
		Valparaíso	San Antonio	San Antonio, Santo Domingo
			Marga Marga	Quilpué

Fuente: ICASS SPA, 2021.

En la Figura 3.2 se observan las diferentes subcuencas, con los límites provinciales y regionales.

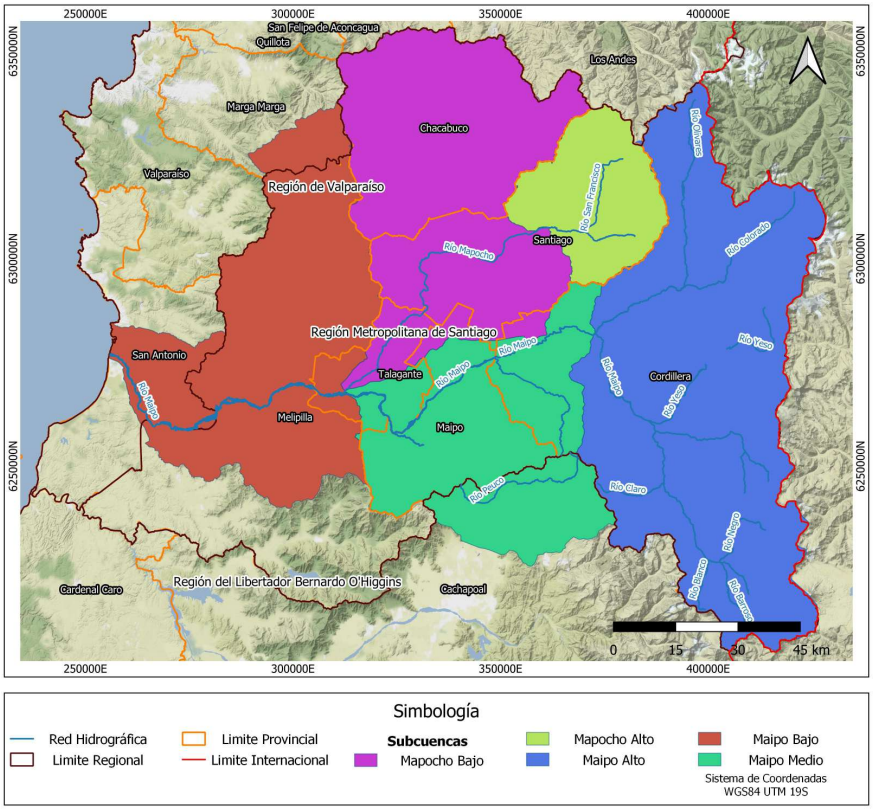


Figura 3.2: Cartografía Subcuencas Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos ICASS SPA, 2021.

3.2. Demografía

Según los datos del último censo del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) 2017 la población total de la cuenca Maipo era de 7.416.935 personas y, según las proyecciones, llegarán a los 8.844.243 habitantes en el año 2035 solo en la Región Metropolitana (ICASS S.P.A., 2021; Instituto Nacional de Estadística, 2019), lo cual indica que esta cifra sería aun mayor para la totalidad de la cuenca.

Esta cuenca al ser la más poblada de Chile, presenta una alta densidad demográfica, con un promedio de 461,8 hab/km^2 y con la mayor concentración en las zonas urbanas del Gran Santiago, como se observa en la Figura 3.3.

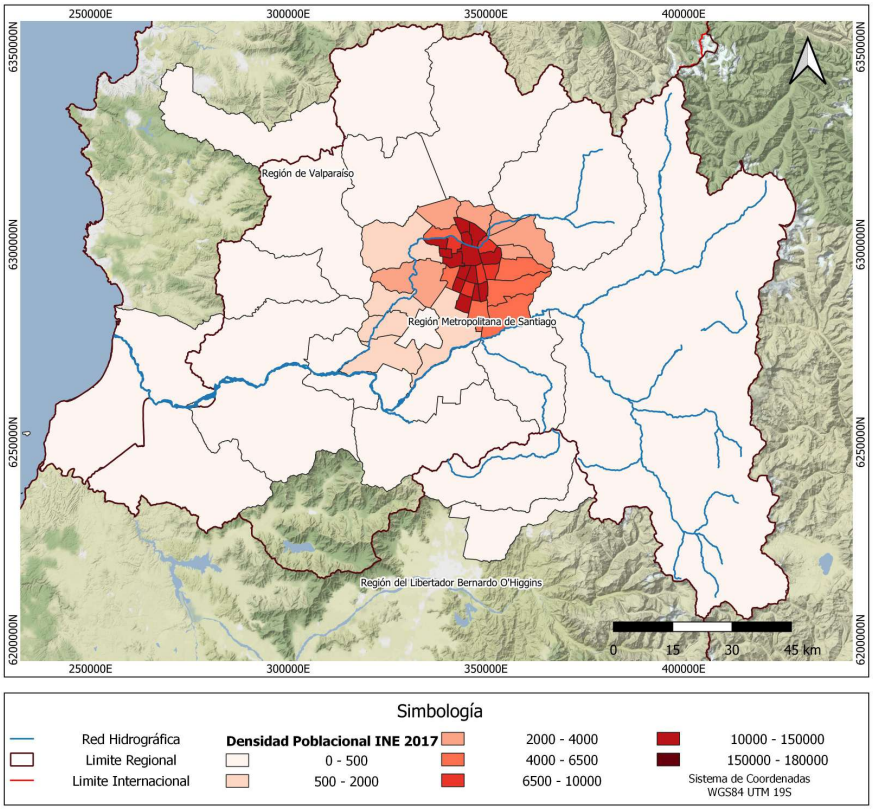


Figura 3.3: Densidad poblacional en Cuenca Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos INE, 2017.

También, se presenta en la Figura 3.3 el origen del agua en las viviendas de las zonas urbanas de la Región Metropolitana, donde se observa una amplia cobertura de la red pública, llegando a casi el 99 %.

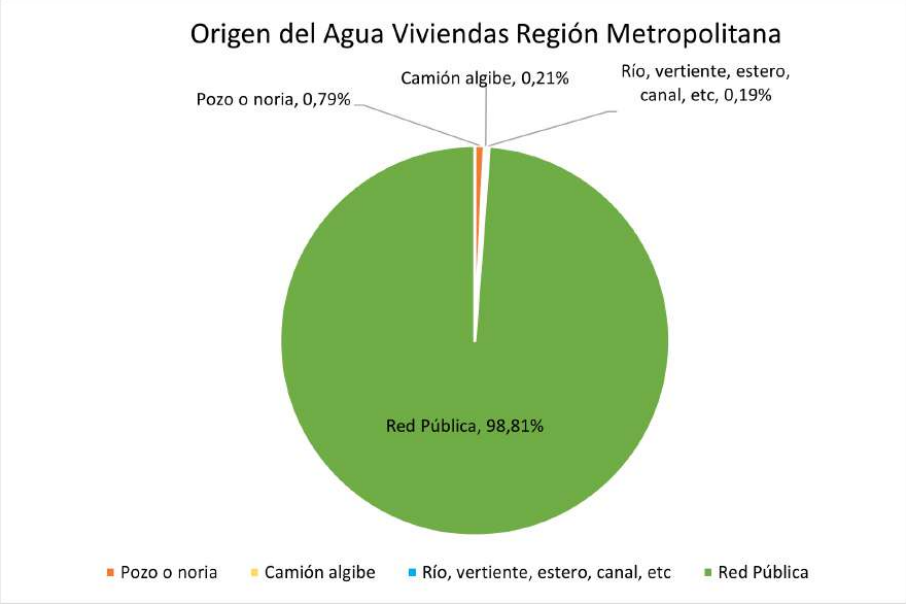


Figura 3.4: Origen del Agua en Viviendas de la Región Metropolitana.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos INE, 2017; ICASS SPA, 2021.

3.3. Hidrogeología

En el estudio de la DGA (2020) se definieron 7 sistemas hidrogeológicos principales en la cuenca de estudio, que se presentan en la Figura 3.5. Se observa que estos están constituidos principalmente por unidades de rocas y rellenos sedimentarios de mayor permeabilidad. Información más detallada sobre las unidades que compone cada sistema se encuentra en el Plan de Gestión Hídrica de la Cuenca del Maipo (ICASS S.P.A., 2021).

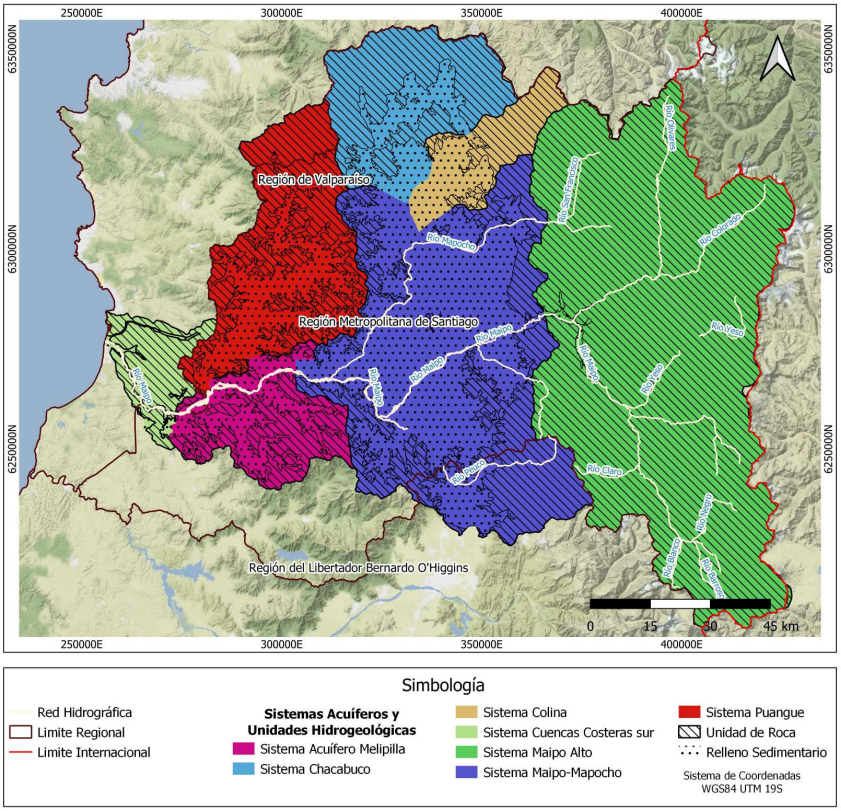


Figura 3.5: Sistemas de Acuíferos y Unidades Hidrogeológicas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos ICASS SPA, 2021.

3.4. Hidrología

3.4.1. Disponibilidad de Información

A continuación se presentan las diferentes estaciones meteorológicas y fluviométricas existentes en la cuenca. En la Figura 3.6 se puede observar la ubicación de estas y en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4 se presenta mayor información sobre estas.

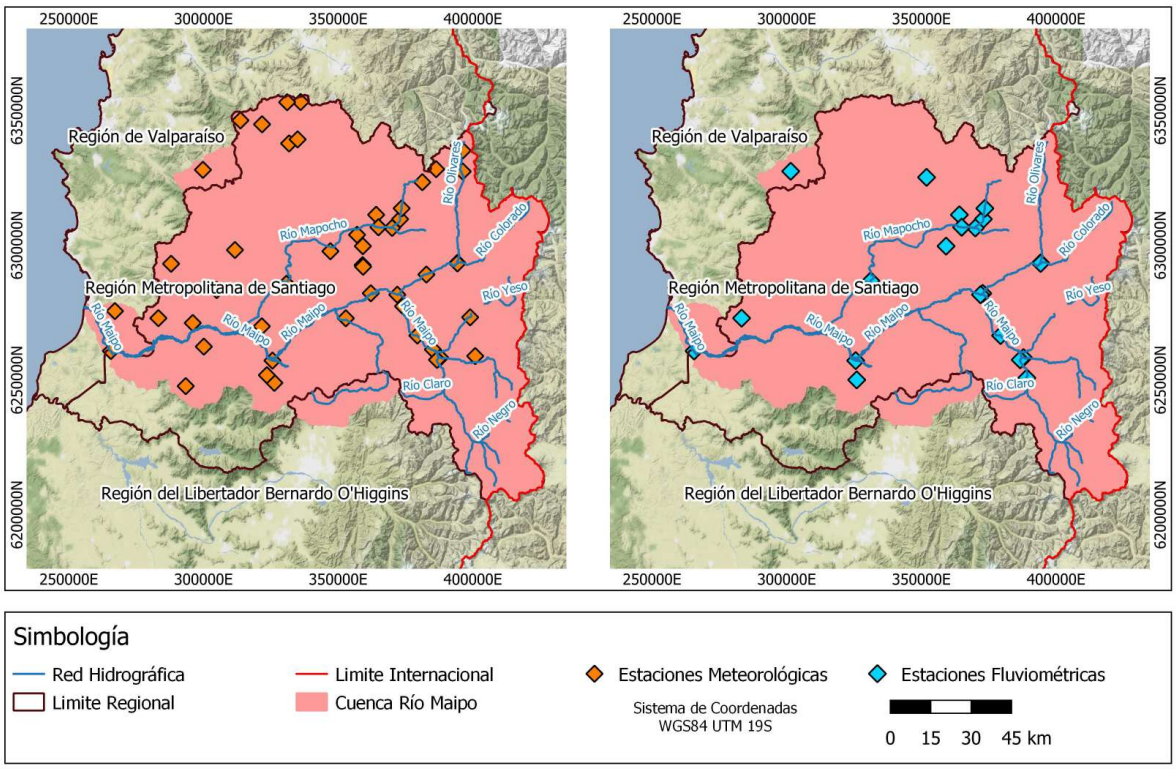


Figura 3.6: Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas en la Cuenca Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

Tabla 3.2: Estaciones Meteorológicas en Cuenca Río Maipo

NOMBRE ESTACIÓN	CODIGO BNA	ESTADO	UTM E	UTM N
ANTUPIREN	05730013-2	Vigente	359.149	6.292.612
FUNDO MARRUECOS	05737008-4	Vigente	330.811	6.285.653
MALLARAUCO	05745001-0	Vigente	304.935	6.283.364
ESTERO PUANGUE EN RUTA 78	05746001-6	Vigente	283.302	6.272.931
CARMEN DE LAS ROSAS	05740004-8	Vigente	300.173	6.262.366
MELIPILLA	05740005-6	Vigente	296.069	6.271.128
LOS GUINDOS	05747001-1	Vigente	293.453	6.247.706
RIO MAIPO EN CABIMBAO	05748001-7	Vigente	265.651	6.260.738
CERRILLOS DE LEYDA	05748003-3	Vigente	267.151	6.275.551
IBACACHE ALTO	05744003-1	Vigente	288.017	6.293.109
QUEBRADA RAMON EN RECINTO EMOS	05730008-6	Vigente	359.226	6.299.663
CERRO CALAN	05730012-4	Vigente	357.078	6.303.869
RINCON DE LOS VALLES	05733006-6	Vigente	336.111	6.353.157
CALEU	05733007-4	Vigente	313.765	6.346.338
RUNGUE EMBALSE	05733008-2	Vigente	321.794	6.344.885
FUNDO LAS BATEAS	05733010-4	Vigente	331.120	6.353.082
HUECHUN EMBALSE	05732001-K	Vigente	331.837	6.337.777
HUECHUN ANDINA	05732002-8	Vigente	335.008	6.339.281
VALLE OLIVARES	05706003-4	Vigente	396.313	6.327.380
GLACIAR JUNCAL SUR	05706004-2	Vigente	396.269	6.335.124
GLACIAR OLIVARES ALFA	05706005-0	Vigente	386.439	6.328.240
RIO COLORADO ANTES JUNTA RIO OLIVARES	05705001-2	Vigente	394.337	6.293.457
RIO OLIVARES ANTES JUNTA RIO COLORADO	05706001-8	Vigente	394.343	6.293.240
MAITENES BOCATOMA	05707003-K	Vigente	382.834	6.289.120
RIO MAIPO EN EL MANZANO	05710001-K	Vigente	372.019	6.281.633

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

Tabla 3.3: Estaciones Meteorológicas en Cuenca Río Maipo

NOMBRE ESTACIÓN	CODIGO BNA	ESTADO	UTM E	UTM N
LA OBRA RECINTO EMOS	05710007-9	Vigente	362.190	6.282.161
EL YESO EMBALSE	05703008-9	Vigente	399.081	6.273.246
RIO MAIPO EN SAN ALFONSO	05704002-5	Vigente	379.470	6.266.472
SAN GABRIEL	05704004-1	Vigente	385.249	6.261.273
SAN JOSE DE MAIPO RETEN	05704006-8	Vigente	374.166	6.277.328
RIO VOLCAN EN QUELTEHUES	05702001-6	Vigente	387.971	6.258.289
GLACIAR SAN FRANCISCOEN AGUAS PANIMAVIDA	05702011-3	Vigente	400.956	6.258.861
RIO MAIPO EN QUELTEHUES	05701009-6	Vigente	386.768	6.257.461
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	05721001-K	Vigente	373.072	6.309.689
RIO SAN FRANCISCO ANTES JUNTA ESTERO YERBA LOCA	05721016-8	Vigente	373.641	6.313.676
ESTERO YERBA LOCA EN PIEDRA CARVAJAL	05721017-6	Vigente	381.313	6.323.390
RIO MOLINA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	05720001-4	Vigente	370.094	6.306.419
ESTERO ARRAYAN EN LA MONTOSA	05722001-5	Vigente	364.171	6.311.298
RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	05722002-3	Vigente	365.020	6.306.679
RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS GPRS	05722007-4	Vigente	365.020	6.306.679
RIO ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE	05716001-2	Vigente	325.665	6.257.179
LAGUNA ACULEO	05716005-5	Vigente	326.369	6.248.925
LAGUNA ACULEO LOS CASTAÑOS	05716011-K	Vigente	323.587	6.251.765
COLLIGUAY	05741002-7	Vigente	299.845	6.327.982
LOS PANGUILES	05744002-3	Vigente	311.733	6.298.233
TERRAZA OFICINAS CENTRALES DGA	05730016-7	Vigente	347.173	6.297.768
QUEBRADA DE MACUL	05730039-6	Vigente	359.320	6.292.012
EL VERGEL	05717008-5	Vigente	321.707	6.269.904
PIRQUE	05711003-1	Vigente	352.897	6.272.884

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

Tabla 3.4: Estaciones Fluviométricas en Cuenca Río Maipo

NOMBRE ESTACIÓN	CODIGO BNA	ESTADO	UTM E	UTM N
RIO MAPOCHO EN EL TREBAL	05737019-K	Vigente	331.266	6.286.786
ESTERO PUANGUE EN RUTA 78	05746001-6	Vigente	283.302	6.272.931
RIO MAIPO EN CABIMBAO	05748001-7	Vigente	265.651	6.260.738
QUEBRADA RAMON EN RECINTO EMOS	05730008-6	Vigente	359.226	6.299.663
RIO COLINA EN PELDEHUE	05735001-6	Vigente	351.984	6.325.196
RIO COLORADO ANTES JUNTA RIO OLIVARES	05705001-2	Vigente	394.337	6.293.457
RIO OLIVARES ANTES JUNTA RIO COLORADO	05706001-8	Vigente	394.343	6.293.240
RIO COLORADO ANTES JUNTA RIO MAIPO	05707002-1	Vigente	372.847	6.282.122
RIO MAIPO EN EL MANZANO	05710001-K	Vigente	372.019	6.281.633
RIO MAIPO EN SAN ALFONSO	05704002-5	Vigente	379.470	6.266.472
RIO VOLCAN EN QUELTEHUES	05702001-6	Vigente	387.971	6.258.289
RIO MAIPO EN QUELTEHUES	05701009-6	Vigente	386.768	6.257.461
CANAL QUELTEHUE	05705002-0	Vigente	389.232	6.250.732
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	05721001-K	Vigente	373.072	6.309.689
RIO SAN FRANCISCO ANTES JUNTA ESTERO YERBA LOCA	05721016-8	Vigente	373.641	6.313.676
RIO MOLINA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	05720001-4	Vigente	370.094	6.306.419
ESTERO ARRAYAN EN LA MONTOSA	05722001-5	Vigente	364.171	6.311.298
RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	05722002-3	Vigente	365.020	6.306.679
RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS GPRS	05722007-4	Vigente	365.020	6.306.679
RIO ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE	05716001-2	Vigente	325.665	6.257.179
ESTERO PINTUE EN PUENTE PINTUE	05716003-9	Vigente	326.050	6.250.016
ESTERO PUANGUE EN BOQUERON	05741001-9	Vigente	301.533	6.327.448

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

3.4.2. Temperaturas Medias Mensuales y Anuales

En la Tabla 3.5 y la Figura 3.7 se presentan las temperaturas medias mensuales de diferentes estaciones meteorológicas presentes en la cuenca durante el periodo 1989-2018, donde se observa una clara tendencia de aumento de temperaturas durante los meses de verano, para luego disminuir con la llegada del invierno.

Tabla 3.5: Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Estaciones Fluviométricas en Cuenca Río Maipo Periodo 1989-2018.

Estación Meteorológica	Altitud [m.s.n.m.]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	T media [°C]
Cerro Calán	848	17,0	13,7	11,6	10,7	11,6	13,2	15,7	18,9	21,0	22,7	22,3	20,8	16,6
El Yeso Embalse	2475	10,4	6,8	3,5	2,4	3,5	5,2	8,0	10,7	13,4	15,4	15,2	14,0	9,0
Huechún Andina	590	15,9	12,6	10,9	9,5	10,9	13,2	16,1	18,8	20,7	22,1	21,7	19,8	15,9
Laguna Aculeo	360	14,7	11,8	10,3	8,9	10,3	12,6	15,0	17,5	19,4	20,7	20,2	18,4	14,9
Los Panguiles	190	16,1	13,0	11,4	9,9	11,4	13,4	15,5	17,8	19,7	21,0	20,6	19,3	15,7
Pirque	168	14,3	11,6	10,1	8,9	10,1	11,9	14,1	16,6	18,5	19,8	19,2	17,8	14,2

Fuente: ICASS SPA, 2021.

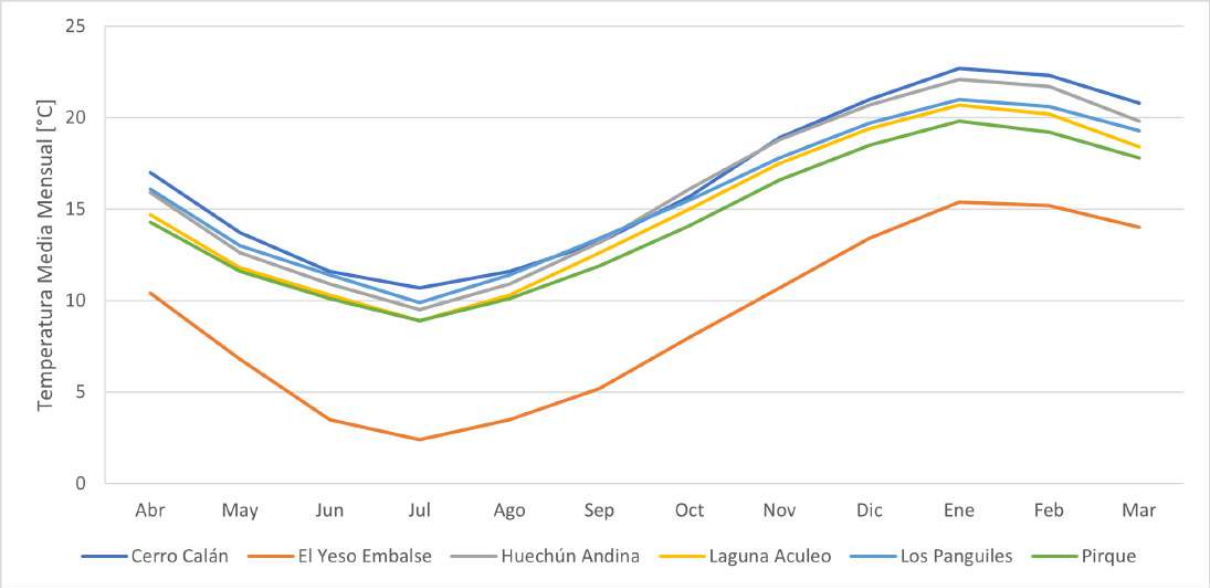


Figura 3.7: Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Estaciones Fluviométricas en Cuenca Río Maipo Periodo 1989-2018.

Fuente: ICASS SPA, 2021.

También se presenta en la Tabla 3.6 y Figura 3.8 las temperaturas medias mensuales de las subcuencas que componen a la cuenca del Maipo, donde se observa una dependencia orográfica, a mayor elevación media de la subcuenca, menor temperatura media.

Tabla 3.6: Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Subcuencas Maipo Periodo 1989-2018.

Subcuenca	Hmed [m.s.n.m.]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	T media [°C]
Maipo Bajo	420	14,6	11,4	9,4	8,6	9,5	11,6	13,6	16,3	18,4	19,6	19,3	17,8	14,2
Maipo Medio	1056	13,9	10,4	8,3	7,5	8,2	10,1	12,7	15,9	18,3	19,6	19,3	17,7	13,5
Maipo Alto	3193	6,3	2,6	-0,3	-1,8	-0,9	1,0	3,4	6,6	9,7	11,4	10,8	9,9	4,9
Mapocho Bajo	893	14,8	11,3	9,0	8,1	9,0	10,7	13,6	16,6	18,9	20,3	19,9	18,4	14,2
Mapocho Alto	2498	9,0	5,3	3,0	1,8	2,4	4,0	6,6	9,5	12,3	13,8	13,4	12,5	7,8

Fuente: ICASS SPA, 2021.

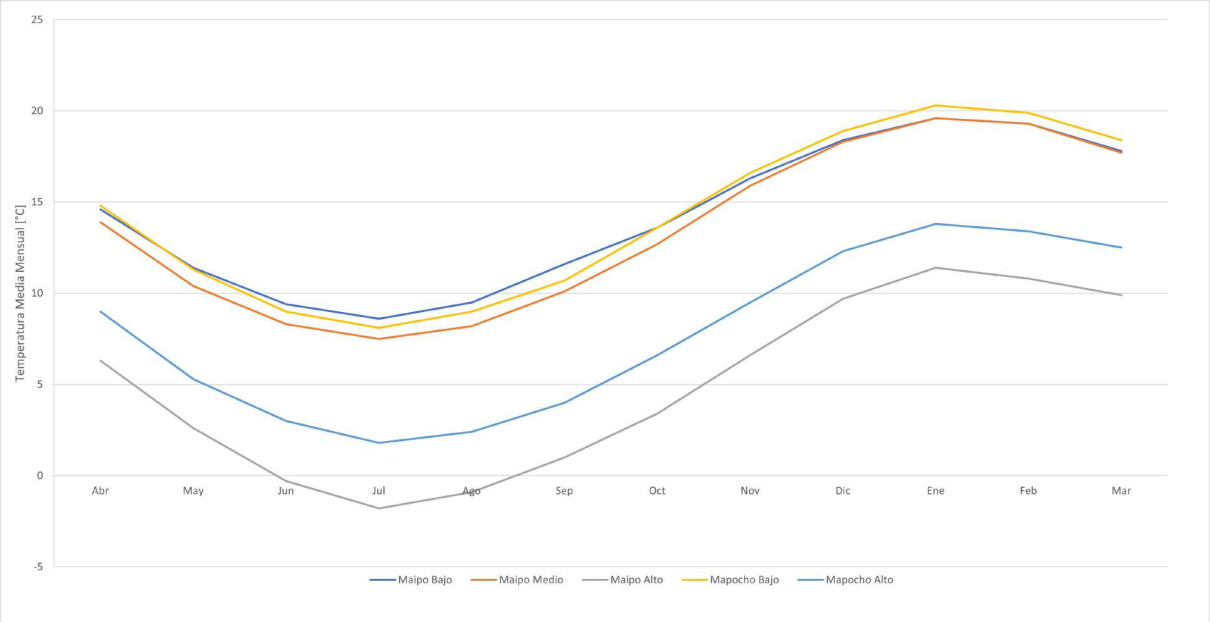


Figura 3.8: Temperaturas Medias Mensuales y Anuales Subcuencas Maipo.

Fuente: ICASS SPA, 2021.

3.4.3. Precipitaciones Medias

Se presenta en la Tabla 3.7 y Figura 3.9 las precipitaciones medias de diferentes estaciones meteorológicas para cada mes del año durante el periodo 1989-2018. Se observa un aumento de las precipitaciones durante los meses de invierno, característica de la zona central de Chile. Se obtiene una precipitación promedio de toda la cuenca de 369 mm. Aun así, esta cifra podría sobre-estimar las precipitaciones actuales al incluir datos anteriores a la megasequia que afecta el país.

Tabla 3.7: Precipitaciones Medias Estaciones Cuenca Maipo Periodo 1989-2018.

Estación Meteorológica	Altitud [m.s.n.m.]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Pp anual [mm]
Antupirén	904	26	53	95	69	69	42	20	10	9	1	2	6	393
Caleu	1120	17	77	153	88	85	39	17	4	2	0	2	8	481
Carmen de las Rosas	165	17	64	110	69	64	26	13	4	2	0	1	4	371
Cerrillos de Leyda	182	19	76	109	77	70	28	16	5	4	0	1	5	404
Cerro Calán	848	24	54	90	71	67	41	20	9	8	1	3	6	383
Colliguay	490	20	90	165	124	96	51	21	5	3	0	2	6	575
El Vergel	340	18	60	114	73	60	27	11	5	3	0	1	3	370
El Yeso Embalse	2475	38	86	155	96	97	59	17	17	6	7	7	11	571
Estero Puangue en Ruta 78	93	17	58	72	58	50	25	12	4	2	0	1	3	298
Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	1350	30	44	70	38	57	34	26	12	11	3	5	6	321
Fundo Las Bateas	810	16	43	88	55	53	21	10	4	1	0	1	4	291
Fundo Marruecos	430	13	46	83	49	52	22	11	5	3	0	1	4	284
Huechun Andina	590	8	26	62	37	35	15	8	5	1	0	1	3	197
Huechun Embalse	556	8	34	68	40	36	17	8	4	2	0	1	3	217
Ibacache Alto	169	15	61	106	66	68	30	12	3	2	0	1	4	363
La Obra en Recinto Emos	796	29	81	154	101	108	58	32	17	7	1	4	9	587
Laguna Aculeo	360	23	73	152	104	86	39	17	6	2	0	2	5	502
Los Guindos	125	21	85	143	87	82	35	14	5	3	0	2	3	475
Maitenes Bocatoma	1143	28	61	104	57	70	35	18	10	5	2	4	8	387
Mallarauco	176	14	46	92	57	51	22	10	4	2	0	1	3	298
Quebrada de Macul	950	20	46	64	62	77	37	23	18	6	2	4	9	352
Quebrada Ramón Recinto Emos	845	6	37	31	26	52	18	6	10	4	0	1	1	190
Rincón de los Valles	955	14	38	80	51	42	19	11	3	1	0	1	3	259
Río Maipo en Cabimbao	35	18	33	54	16	51	17	11	2	2	0	0	1	204
Río Maipo en el Manzano	850	34	36	70	47	55	20	20	3	8	1	1	3	291
Río Molina antes junta San Francisco	1158	22	49	59	26	49	27	29	12	12	2	4	5	284
San Gabriel	1266	38	87	141	84	90	55	22	14	5	4	3	7	535
San José de Maipo Retén	943	32	74	118	78	76	43	18	9	6	2	3	7	454
Promedio		21	58	100	65	66	32	16	7	4	1	2	5	369

Fuente: ICASS SPA, 2021.

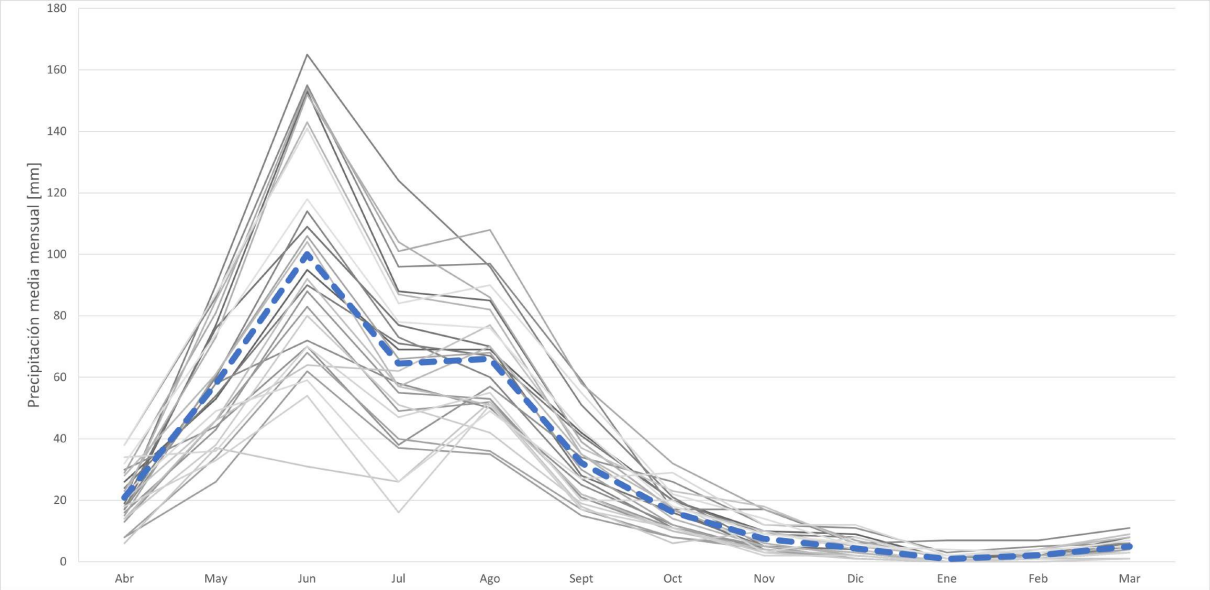


Figura 3.9: Precipitaciones Medias Estaciones Cuenca Maipo (*En azul el promedio*).

Fuente: ICASS SPA, 2021.

También se presentan en la Tabla 3.8 y Figura 3.10 las precipitaciones medias mensuales de las subcuencas, basadas en el estudio de ICASS SPA, 2021. Se observa nuevamente un aumento de las precipitaciones en la temporada de invierno. Aun así, no se observa una dependencia estrictamente orográfica, donde se observan precipitaciones mayores en las zonas altas, seguido de las zonas bajas y en último lugar la zonas intermedias (Maipo Medio).

Tabla 3.8: Precipitaciones Medias Subcuencas Maipo Periodo 1989-2018.

Subcuenca	Hmed [m.s.n.m.]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Pp media [mm]
Maipo Bajo	420	39,0	97,7	133,9	120,4	94,8	58,5	27,2	13,1	8,7	5,3	6,5	8,9	613,9
Maipo Medio	1056	26,5	65,4	93,5	88,6	67,3	39,0	19,6	9,3	5,2	3,5	4,1	7,5	429,5
Maipo Alto	3193	51,0	123,3	164,2	146,1	119,1	79,2	36,6	18,8	13,0	8,2	9,2	10,4	779,2
Mapocho Bajo	893	33,3	73,3	106,2	100,7	77,2	50,7	24,7	13,1	8,6	7,2	6,3	8,5	509,7
Mapocho Alto	2498	55,5	133,2	173,4	152,8	126,3	87,4	39,7	21,4	16,6	11,1	11,8	11,0	840,1

Fuente: ICASS SPA, 2021.

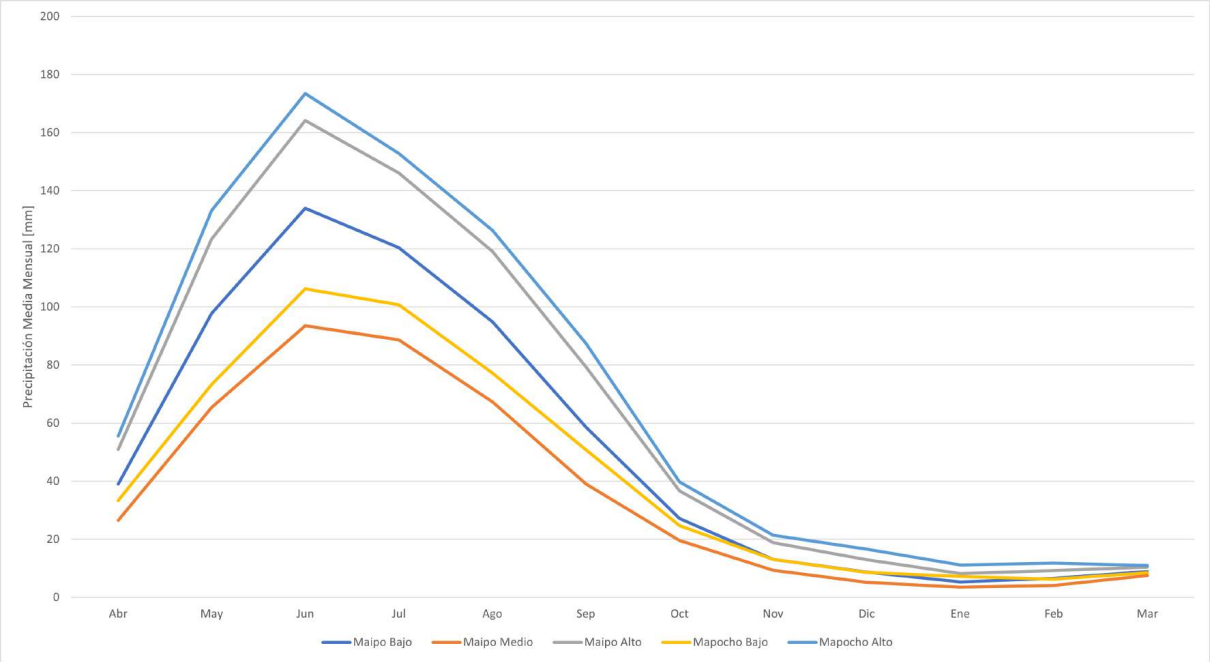


Figura 3.10: Precipitaciones Medias Subcuencas Maipo Periodo 1989-2018.

Fuente: ICASS SPA, 2021.

3.4.4. Caudales Medios

En la Figura 3.11 se presenta un diagrama unifilar con la ubicación de las estaciones fluviométricas seleccionadas. Se listan las estaciones asociadas a los números del diagrama.

1. Río Maipo en Cambimbao
2. Río Angostura en Valdivia de Paine
3. Río Maipo en el Manzano
4. Río Mapocho en los Almendros
5. Estero Arrayán en Montosa

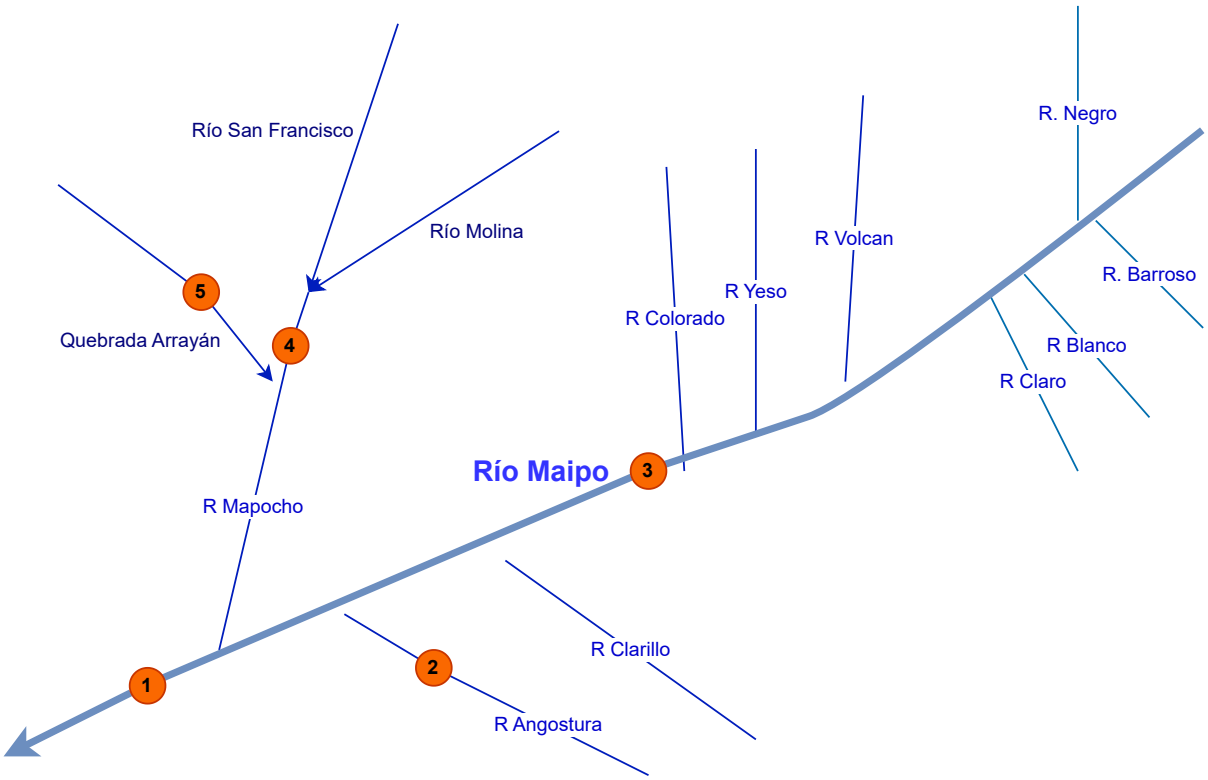


Figura 3.11: Diagrama unifilar estaciones fluviométricas presentadas.

Se presenta en la Figura 3.12 la serie de caudales medios mensuales históricos de 5 estaciones presentes en la cuenca del Maipo durante el periodo 1990-2020, donde se observan caudales mayores en el principal cauce, el río Maipo, seguido de sus afluentes el Angostura y Mapocho.

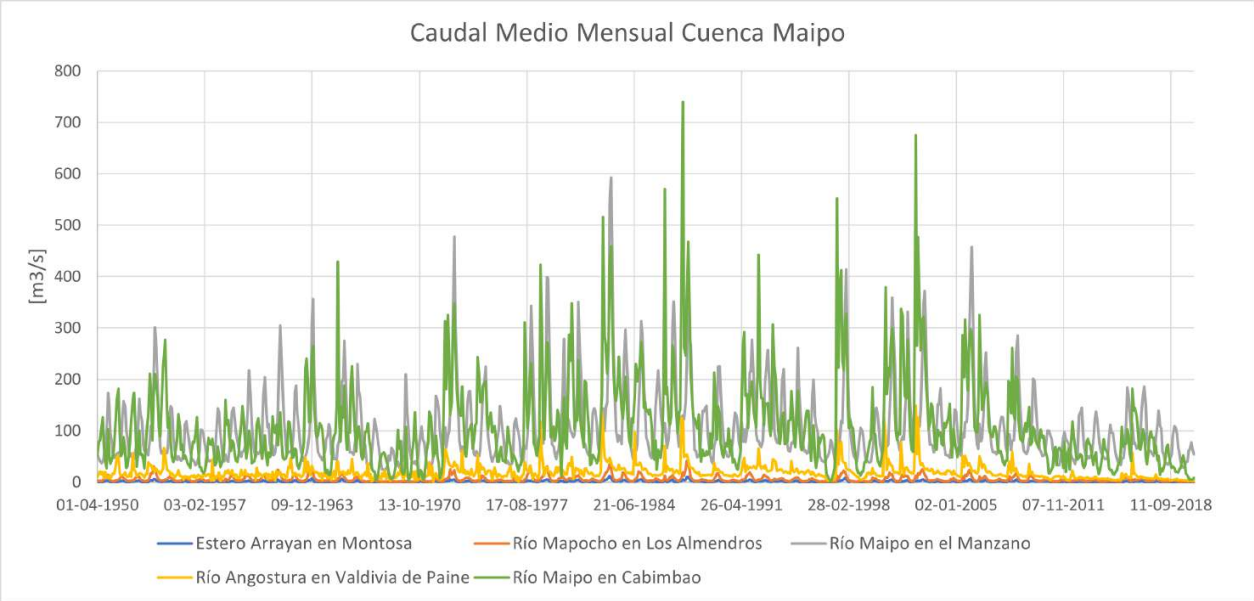


Figura 3.12: Serie Histórica de Caudales Medios Mensuales Estaciones Cuenca Maipo Periodo 1990-2020.

Fuente: ICASS SPA, 2021.

También se presentan los caudales medio mensuales para cada mes, donde se observa que en la zona alta del Maipo (Maipo en el Manzano) se tiene un régimen hidrológico nival y en la zona baja (Maipo en Cabimbao) se tiene un régimen pluvio-nival.

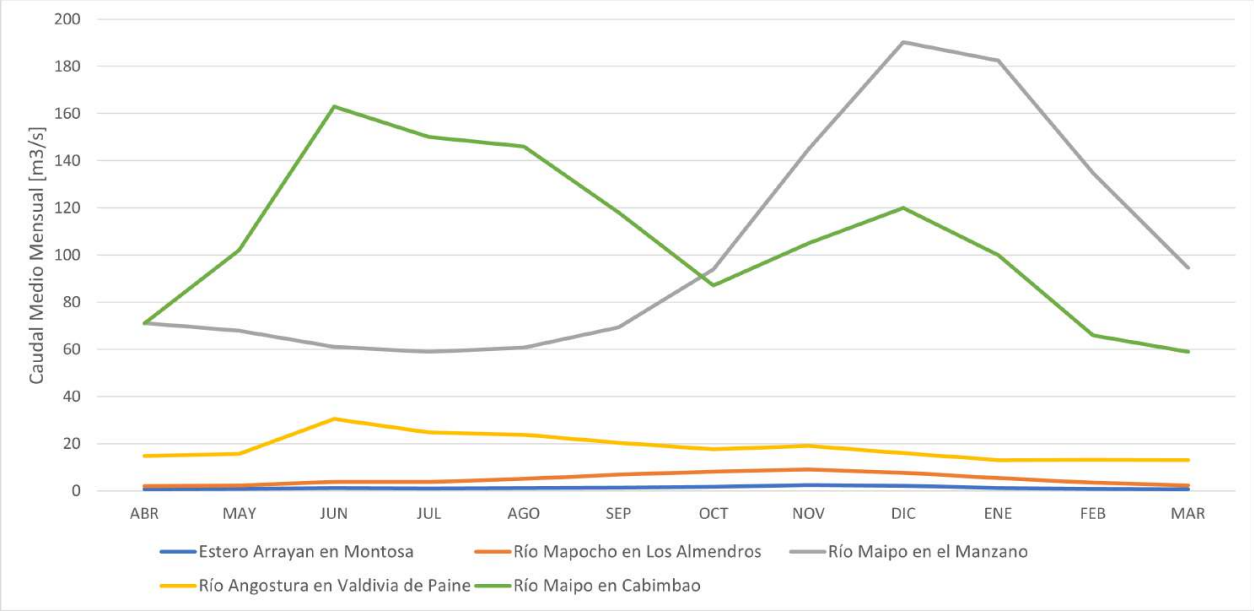


Figura 3.13: Caudales Medios Estaciones Cuenca Maipo Periodo 1990-2020.

Fuente: ICASS SPA, 2021.

Capítulo 4

Características aguas superficiales y su relación con la norma secundaria de calidad

En este capítulo se presenta un análisis de los parámetros y contaminantes físico-químicos regulados en la Norma Secundaria de Calidad del Agua Superficial del río Maipo.

4.1. Norma Secundaria de Calidad del Agua Superficial Río Maipo: Decreto Supremo Nº53

El Decreto Supremo Nº 53 fue promulgado el 27 de diciembre de 2013 y publicado oficialmente el 4 de julio de 2014 por el Ministerio del Medio Ambiente. Este establece las normas secundarias de calidad ambiental (NSCA) para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Maipo (MMA, 2014).

El objetivo de este decreto es "conservar o preservar los ecosistemas hídricos y sus servicios ecosistémicos a través de la mantención o mejoramiento de la calidad de las aguas de la cuenca. " (MMA, 2014).

En este sentido la NSCA estableció para la cuenca del río Maipo once áreas de vigilancia para efectos de control del cumplimiento. Estas son definidas en el artículo 3º como: "Curso de agua continental superficial, o la parte de él, que se establece para efectos de asignar y controlar su calidad ambiental" (MMA, 2014). Para estas áreas de vigilancia se establecieron diferentes niveles de calidad ambiental definidos para algunos parámetros específicos (Tabla 4.1).

En marzo de 2018, es promulgada la Resolución Nº 271 (MMA y SMA, 2018) la cual dicta el programa de medición y control de calidad ambiental del agua para la NSCA río Maipo. En esta se establece una red de control conformada por 11 áreas de vigilancia y 11 estaciones de monitoreo, además de una red de observación compuesta por 22 estaciones de monitoreo repartidas en 18 áreas de vigilancia. También establece los parámetros medidos en las estaciones de monitoreo, la frecuencia de medición (mensual para parámetros red de control y bi-anual o anual para red de observación), metodologías de muestreo, análisis y otras disposiciones.

Posteriormente, en septiembre de 2020 es promulgada la Resolución N° 1799, que revoca y reemplaza la Resolución N° 271 (MMA y SMA, 2020). En esta se dicta nuevamente el programa de medición y control de calidad ambiental del agua para la NSCA río Maipo. En la cual se establece una red de control y otra de observación, formada por 11 estaciones repartidas en 11 áreas de vigilancia y 22 estaciones en 18 áreas de vigilancia respectivamente. (Figura 4.2). En las estaciones de observación se considera el monitoreo de otros parámetros de interés en las áreas de vigilancia que integran la red de control junto con pruebas o ensayos ecotoxicológicos y el muestreo de bioindicadores como herramientas complementarias para determinar los efectos de la calidad del agua en las comunidades acuáticas (MMA y SMA, 2020). Se establecen además, las frecuencias mínimas de muestreo y las metodologías empleadas para la medición de diferentes parámetros.

Los niveles de calidad ambiental y áreas de vigilancia establecidos en la Tabla 4.1, pertenecen a la red de control y por tanto deben ser vigilados mensualmente y verificar su cumplimiento.

El Artículo decimocuarto de la Resolución Exenta N°1799 (2020) describe que la evaluación del cumplimiento de la NSCA de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Maipo es realizada por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) que, anualmente elabora un informe técnico de cumplimiento en base a los reportes entregados por los organismos responsables de la campaña de monitoreo. En este informe, se presentan de manera consolidada los resultados del examen y validación de los datos, la evolución de la calidad del agua de acuerdo a los resultados de los periodos anteriores y el estado en que se encuentra el cuerpo de agua protegido, ya sea que se encuentre conforme a lo establecido en la Norma de Calidad, en estado de latencia o en estado de saturación.

Las condiciones de excedencia se presentan en el Artículo séptimo del D.S. N°53 (2013) donde se considerarán sobrepasadas las normas secundarias de calidad ambiental establecidas en el decreto a partir de los siguientes criterios:

- Cuando el percentil 95 de los valores de las concentraciones de las muestras analizadas para un parámetro, considerando un periodo de tres años calendarios consecutivos, supere los límites establecidos (Tabla 4.1).
- Para el control del oxígeno disuelto, cuando el percentil 5 de los valores de las concentraciones de las muestras analizadas, considerando un periodo de tres años calendarios consecutivos, sea menor a los límites establecidos (Tabla 4.1).
- En el caso del control de pH, cuando el percentil 5 y 95 de los valores de las muestras analizadas, considerando un periodo de tres años calendarios consecutivos, se encuentren fuera del rango establecido (Tabla 4.1).
- Se considerarán también sobrepasadas las normas secundarias de calidad ambiental establecidas en el presente decreto, si uno o más parámetros superan al menos en dos oportunidades consecutivas los límites establecidos en el artículo 5º del D.S. N°53/2013 (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Niveles de calidad ambiental por área de vigilancia Decreto Supremo N° 53.

Parámetro	MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MP-1	MP-2	AN-1	LA-1	PU-1	PU-2	Unidad
Oxígeno Disuelto	8	8	8	8	6	8	6	6	5	8	5	mg/L
Conductividad Eléctrica	1900	1900	1900	1600	1600	400	1600	1600	1900	400	1750	μ S/cm
pH	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	
Cloruro	300	240	240	180	180	30	240	180	240	30	240	mg/L
Sulfato	430	380	380	380	380	150	380	380	480	150	380	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno	8	8	8	8	8	5	10	10	10	5	10	mg/L
Nitrato	0,5	0,5	0,5	4	8	1,5	10	4	4	1,5	10	mg/L N-NO3-
Ortofosfato	0,08	0,08	0,08	0,15	1	0,08	2,5	0,15	0,6	0,6	2,5	mg/L P-PO4-
Plomo Disuelto	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	mg/L
Niquel Disuelto	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	mg/L
Zinc Disuelto	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	mg/L
Cromo total	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	mg/L

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, (2014).

Tabla 4.2: Áreas de Vigilancia Resolución Nº 1799.

Cauce	Código Área de Vigilancia	Tramo	Estación	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Tipo de Estación
Río Maipo	MA-1	De: Naciente Río Maipo; Hasta: Confluencia Río Volcan	MA-1: Río Maipo en Las Melosas	05701002-9	389.123	6.253.669	Control
	MA-2	De: Confluencia Río Volcan; Hasta: Confluencia Río Colorado	MA-2: Río Maipo en San Jose de Maipo	05704008-4	374.482	6.277.844	Control
	MA-2	De: Confluencia Río Volcan; Hasta: Confluencia Río Colorado	MA-2 Obs: Río Maipo después de rstero Manzanito	05704012-2	379.767	6.265.905	Observación
	MA-3	De: Confluencia Río Colorado; Hasta: Confluencia Río Clarillo	MA-3: Río Maipo antes de junta río Clarillo	05710009-5	349.200	6.276.367	Control
	MA-3	De: Confluencia Río Colorado; Hasta: Confluencia Río Clarillo	MA-3 Obs: Río Maipo antes de canal San Carlos	05710011-7	361.823	6.281.734	Observación
	MA-4	De: Confluencia Río Clarillo; Hasta: Confluencia Río Mapocho	MA-4: Río Maipo en Naltahua	05717005-0	322.141	6.266.233	Control
	MA-5	De: Confluencia Río Mapocho; Hasta: Maipo aguas arriba puente Lo Gallardo	MA-5: Río Maipo en Cabimbao	05748001-7	265.650	6.260.741	Control
	MA-5	De: Confluencia Río Mapocho; Hasta: Maipo aguas arriba puente Lo Gallardo	MA-5 Obs: Río Maipo después de junta con rstero Cholqui	05740010-2	289.204	6.265.497	Observación
	MA-6	De: Maipo aguas arriba puente Lo Gallardo; Hasta: Desembocadura Maipo	MA-6: Río Maipo en Desembocadura	Sin código BNA	258.841	6.275.690	Observación
Río Angostura	AN-1	De: Naciente Río Angostura (desde confluencia con Río Peuco en Panamericana) ; Hasta: Confluencia Río Maipo	AN-1: Río Angostura en Valdivia de Paine	05716001-2	325.666	6.257.192	Control
	AN-1	De: Naciente Río Angostura (desde confluencia con Río Peuco en Panamericana) ; Hasta: Confluencia Río Maipo	AN-1 Obs: Río Angostura aguas arriba de puente Champa	05715006-8	337.181	6.251.722	Observación
Río Mapocho	MP-1	De: Confluencia Río San Francisco y Molina; Hasta: Confluencia Estero Arrayán	MP-1: Río Mapocho en los Almendros	05722002-3	365.034	6.306.676	Control
	MP-2	De: Confluencia Estero Arrayán; Hasta: Confluencia Río Maipo	MP-2: Río Mapocho en el Monte	05737005-k	316.634	6.271.315	Control
	MP-2	De: Confluencia Estero Arrayán; Hasta: Confluencia Río Maipo	MP-2.1 Obs: Río Mapocho después de junta con estero Hualtatas	05730060-4	357.994	6.306.341	Observación
	MP-2	De: Confluencia Estero Arrayán; Hasta: Confluencia Río Maipo	MP-2.2 Obs: Río Mapocho después de junta con estero Colina	05730058-2	330.571	6.297.609	Observación
	MP-2	De: Confluencia Estero Arrayán; Hasta: Confluencia Río Maipo	MP-2.3 Obs: Río Mapocho después de junta con Zanjón de la Aguada	05737020-3	328.280	6.286.259	Observación
Estero Lampa	LA-1	De: Naciente Estero TilTil; Hasta: Confluencia Río Maipo	LA-1: Estero Lampa antes río Mapocho	05736001-1	330.082	6.298.707	Control
Estero Puangue	PU-1	De: Naciente Estero Puangue; Hasta: Puangue en Curacaví	PU-1: Estero Puangue antes Puente Curacaví Nueva	05742002-2	299.385	6.302.738	Control
	PU-1	De: Naciente Estero Puangue; Hasta: Puangue en Curacaví	PU-1 Obs: Estero Puangue antes de junta con quebrada Las Lajas	05741003-5	299.624	6.318.119	Observación
	PU-2	De: Puangue en Curacaví; Hasta: Confluencia Río Maipo	PU-2: Estero Puangue en Ruta 78	05746001-6	283.311	6.272.919	Control
Río Volcan	VOL Obs	De: Nacimiento Río Volcán; Hasta: Confluencia Río Maipo	Vol Obs: Río Volcan antes río Maipo	05702006-7	387.236	6.258.616	Observación
Río Yeso	YESO Obs	De: Naciente en Embalse El Yeso; Hasta: Confluencia Río Maipo	YESO Obs: Río Yeso antes junta río Maipo	05703003-8	386.146	6.260.844	Observación
Río Olivares	OL Obs	De: Naciente en Parque Río Olivares ; Hasta: Confluencia Río Colorado	OL Obs: Río Olivares antes junta río Colorado	05706001-8	394.602	6.294.856	Observación
Río Colorado	COL Obs	De: Naciente Río Colorado ; Hasta: Confluencia Río Maipo	COL-1 Obs: Río Colorado antes junta río Olivares	05707004-8	394.882	6.293.537	Observación
	COL Obs	De: Naciente Río Colorado ; Hasta: Confluencia Río Maipo	COL-2 Obs: Río Colorado antes río Maipo	05707002-1	373.148	6.282.685	Observación
Río Clarillo	CLAR Obs	De: Reserva Nacional Río Clarillo ; Hasta: Confluencia Río Maipo	CLAR-1 Obs: Río Clarillo entre quebrada Encanado y quebrada La Tinaja	05711005-8	363.459	6.267.114	Observación
	CLAR Obs	De: Reserva Nacional Río Clarillo ; Hasta: Confluencia Río Maipo	CLAR-2 Obs: Río Clarillo antes junta río Maipo	05711001-5	348.814	6.275.845	Observación
Río Molina	MOL Obs	De: Naciente Río Molina ; Hasta: Confluencia Río San Francisco	MOL Obs: Río Molina antes junta río San Francisco	05720001-4	370.096	6.306.438	Observación
Estero Yerba Loca	EYL Obs	De: Naciente Estero Yerba Loca ; Hasta: Confluencia Río San Francisco	EYL Obs: Estero Yerba Loca antes junta río San Francisco	05721001-k	373.071	6.309.670	Observación
Río San Francisco	FRA Obs	De: Naciente Río San Francisco; Hasta: Confluencia Estero Yerba Loca	FRA Obs: Río San Francisco antes junta estero Yerba Loca	05721002-8	372.977	6.310.343	Observación
Estero	EA Obs	De: Naciente Estero Arrayán ; Hasta: Confluencia Río Mapocho	EA Obs: Estero Arrayán en la Montosa	05721001-5	364.173	6.311.257	Observación
Estero Colina	ECO Obs	De: Naciente Estero Colina; Hasta: Confluencia con Estero Lampa y Estero Las Cruces	ECO Obs: Estero Colina en compuerta Vargas	05735002-4	347.582	6.327.363	Observación
Estero Manzanito	MZ-1	De: Naciente Estero Manzanito ; Hasta: Confluencia Río San Francisco	MZ-1: Estero Manzanito en Puente Manzanito	05721018-4	376.153	6.309.378	Observación

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Superintendencia del Medio Ambiente, (2014).

En la Figura 4.1 se presenta una cartografía con las diferentes áreas de vigilancia y estaciones de monitoreo que componen la red de control y observación de la NSCA del Río Maipo. Para el caso del presente análisis solo se tomaron en cuenta las áreas vinculadas al cauce principal del río Maipo y las estaciones de monitoreo que se encuentren en este (6 áreas

de vigilancia, 5 estaciones de control y 4 de observación).

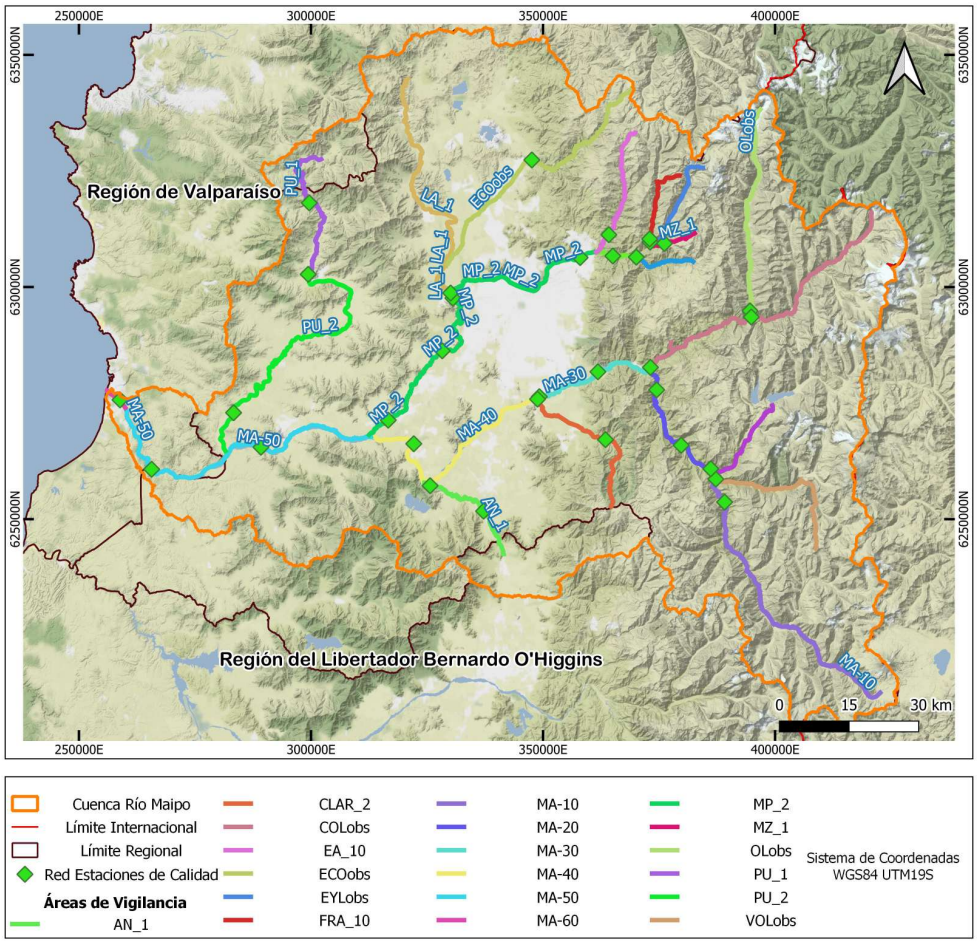


Figura 4.1: Áreas de vigilancia y estaciones de monitoreo red NSCA río Maipo.

4.2. Disponibilidad de Información

Para la evaluación de la calidad físico-química, se obtuvieron los datos históricos de concentración de los contaminantes y parámetros de calidad del agua regulados en el Decreto Supremo N°53 (Tabla 4.1). Se obtienen datos de 9 estaciones de monitoreo a lo largo del río Maipo. De estas, 5 pertenecen a la red de control y 4 a la red de observación de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA).

En la Tabla 4.3 se presentan los detalles de estas estaciones, como su ubicación, área de vigilancia de la NSCA, fechas de operación, número de registros, entre otros. También en la Figura 4.2 se presenta una cartografía con la ubicación de estas.

Tabla 4.3: Estaciones de monitoreo Norma Secundaria Calidad de Agua Superficial río Maipo.

ESTACIÓN	ÁREA DE VIGILANCIA	AÑO INSTALACIÓN	REGISTRO DISPONIBLE	RED
RIO MAIPO EN LAS MELOSAS	MA-1	1966	1966-2022	Control
RIO MAIPO DESPUES DE ESTERO MANZANITO	MA-2	2017	2018-2022	Observación
RIO MAIPO EN SAN JOSE DE MAIPO	MA-2	2015	2015-2022	Control
RIO MAIPO ANTES DE JUNTA RIO CLARILLO	MA-3	2015	2015-2022	Control
RIO MAIPO ANTES DE CANAL SAN CARLOS	MA-3	2016	2018-2022	Observación
RIO MAIPO EN NALTAHUA	MA-4	1990	1990-2021	Control
RIO MAIPO DESPUES DE JUNTA E.CHOLQUI	MA-5	2016	2018-2021	Observación
RIO MAIPO EN CABIMBAO	MA-5	1986	1986-2021	Control
RIO MAIPO EN DESEMBOCADURA (CA)	MA-6	1972	1972-1979	Observación

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

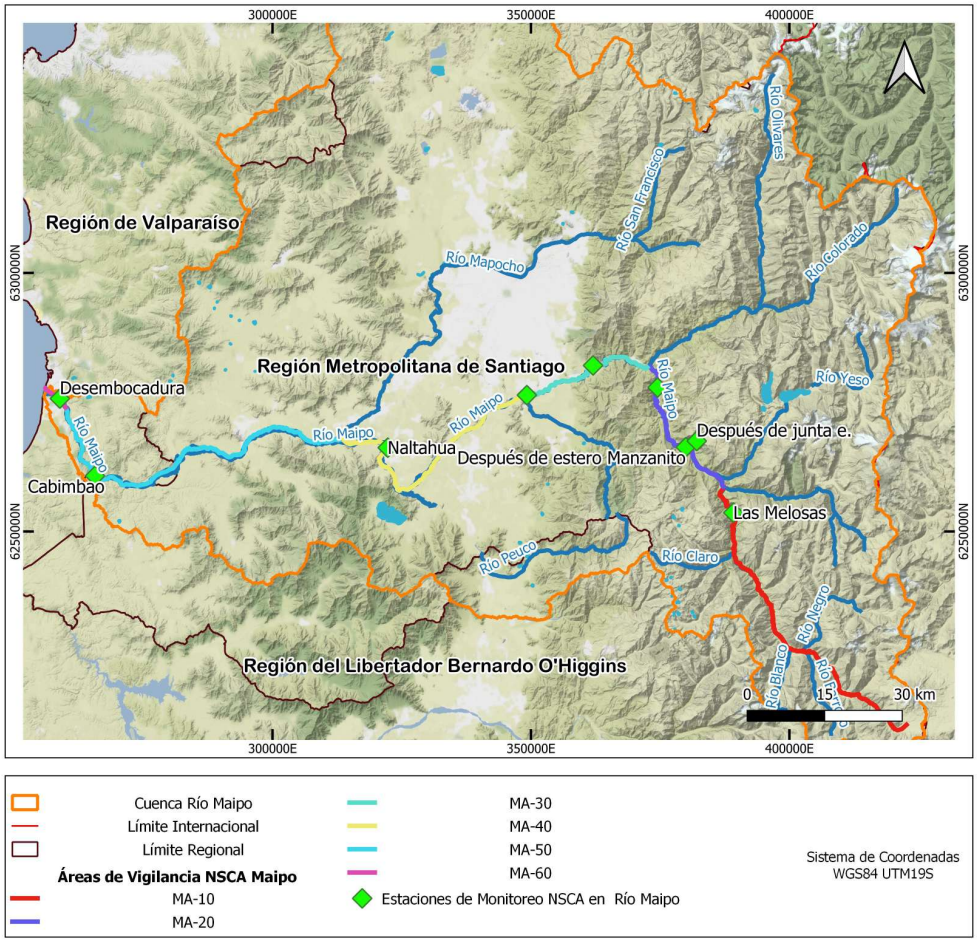


Figura 4.2: Estaciones seleccionadas de calidad de agua superficial NSCA río Maipo.

4.3. Metodología de Análisis

Para la evaluación de la calidad físico-química del río Maipo se revisaron las concentraciones y valores de los parámetros de control establecidos en la Tabla 4.1 para las estaciones de la NSCA en el cauce principal del río Maipo. Esta revisión incluye una validación de los datos según el Artículo N°12 de la Resolución Exenta N°1799 (2020):

- Si el resultado de un parámetro resulta bajo el límite de detección (LD), los datos son validados en base a lo siguiente:
  - Si el LD $\geq$ al 80 % del límite normativo, se considera que el resultado corresponde a un valor no válido para efectos de la evaluación de cumplimiento.
  - Si LD $<$ al 80 % del límite normativo, se considera que el valor es válido para efectos de la evaluación de cumplimiento y que el resultado es igual al LD.
- Para los parámetros que corresponden a la suma de sus fracciones orgánicas, inorgánicas o disueltas, tales como: fósforo total y ortofosfato; nitrógeno total, nitrato y nitrógeno amoniacal y los metales aluminio; arsénico; cadmio; cobre; hierro; níquel; plomo y zinc en sus fracciones disueltas y total, los datos son validados en base a lo siguiente:
  - Los análisis de todas las fracciones deben ser realizados por un mismo laboratorio de ensayo.
  - En el caso de los metales, el dato será válido sí y solo si la fracción disuelta es menor o igual al valor del parámetro total.
- Solo se considerarán válidos los datos obtenidos en campañas de monitoreo realizadas conforme a la representatividad estacional definida en el Artículo N°7 de la Resolución Exenta N°1799 (2020).

También se realiza una validación de datos en base a un análisis de consistencia, donde se eliminan datos considerados fuera de rango o inconsistentes.

Posterior a la validación de los datos, se presentan los resultados tanto por estación de monitoreo como por área de vigilancia donde, se muestran en gráficos las concentraciones y valores históricos, estadísticos como promedio aritmético, mínimos y máximos, y porcentajes de muestras dentro de los niveles establecidos en la normativa.

Para el caso de los resultados representativos por área de vigilancia, se presenta en la Tabla 4.4 las estaciones de control seleccionadas como representativas de las áreas de vigilancia. En el caso de disponer de poca información en una estación de control, se complementa con la información de otra estación de monitoreo siempre y cuando cumpla los siguientes requisitos:

- La estación complementaria pertenece a la misma área de vigilancia y se encuentra cercana a la estación complementada.
- Las estaciones no poseen diferencias significativas en caudales y/o intervenciones significativas en el cauce entre estas, como por ejemplo un afluente o efluente del cauce principal entre estas.

Tabla 4.4: Estaciones representativas por área de vigilancia analizadas.

ÁREA DE VIGILANCIA	ESTACIÓN REPRESENTATIVA	Nº REGISTROS
MA-1	RIO MAIPO EN LAS MELOSAS	176
MA-2	RÍO MAIPO DESPUÉS DE ESTERO MANZANITO Y RÍO MAIPO EN SAN JOSE DE MAIPO	78
MA-3	RIO MAIPO ANTES DE JUNTA RIO CLARILLO	70
MA-4	RIO MAIPO EN NALTAHUA	169
MA-5	RIO MAIPO EN CABIMBAO	169

4.4. Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica sobre las características principales de los diferentes contaminantes y parámetros de control regulados en el D.S. N°53. Esto incluye características generales, fuentes de contaminación y posibles efectos perjudiciales en la salud y medio ambiente.

4.4.1. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (OD) se refiere a oxígeno en forma de gas que se disuelve en el agua. Los niveles de OD se utilizan a menudo para indicar la calidad del agua dulce, la salud de los arroyos y ríos y la intensidad de la contaminación acuática (Kibria, 2017).

El oxígeno gaseoso se disuelve en el agua por diversos procesos como la difusión entre la atmósfera y el agua, oxigenación por el flujo del agua sobre las rocas y otros detritos, la agitación del agua por las olas y el viento y la fotosíntesis de plantas acuáticas. Hay muchos factores que afectan la concentración del oxígeno disuelto en un ambiente acuático, los que incluyen: temperatura, flujo de la corriente, presión del aire, plantas acuáticas, materia orgánica en descomposición y actividad humana (Vernier Software & Technology, 2006).

La abundancia de especies acuáticas está fuertemente asociada con las concentraciones de OD. Algunos organismos, como el salmón y las truchas, requieren altas concentraciones de oxígeno disuelto. Otros organismos como las larvas de mosquito y la carpa, pueden sobrevivir en ambientes con bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Kibria, 2017; Vernier Software & Technology, 2006).

La contaminación de las fuentes de aguas y la eutrofización pueden causar una disminución del oxígeno disuelto y consecuentemente una disminución en la calidad de agua para la vida acuática. Lo primero se debe a que la materia orgánica proveniente de la descomposición es consumida por bacterias que durante la respiración consumen oxígeno, a mayor cantidad de materia orgánica, mayor la cantidad de oxígeno consumido. También la eutrofización contribuye a una disminución del OD, ya que el aumento de nutrientes provoca un bloom de crecimiento de algas y plantas acuáticas, que al morir se transforman en materia orgánica disponible para la descomposición (Natural Resources Wales, s.f.).

4.4.2. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del agua es una medida de la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica. En el Sistema Internacional de Unidades la CE se expresa como siemens por metro (S/m), pero en forma estandarizada se utiliza µS/cm a una temperatura de 25°C. La conductividad del agua está relacionada con la concentración de las sales en disolución, cuya disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua (Solís Castro et al., 2018). La conductividad está relacionada directamente con los sólidos disueltos.

Las sales y también otras sustancias afectan la calidad del agua potable o de riego. También

influyen en la vida acuática, donde cada organismo tolera una gama de valores de conductividad. La conductividad varía en función de la fuente de agua: agua subterránea, aguas superficiales, aguas marinas y aguas residuales. (The California Water Boards, s.f.).

La CE puede venir determinada naturalmente por la geología del lugar, donde la tierra y las rocas descargan iones en las aguas que fluyen a través y por encima de ellas (The California Water Boards, s.f.), pero también puede aumentar debido a fuentes antropogénicas como descargas residuales o escorrentía de agua utilizada en la agricultura o industria. Otras causas del aumento de conductividad pueden deberse a infiltración de aguas con mayor salinidad, como podría ser la infiltración de agua de mar debido a los descensos de los niveles freáticos en los acuíferos.

La conductividad eléctrica no presenta por sí misma un riesgo para la salud de las personas, solo puede indicar un aumento de la concentración de iones y sales, que podrían perjudicar la calidad y sabor del agua de consumo. Ahora bien, un aumento de conductividad eléctrica tiene efectos negativos en el agua para riego, aumentando la salinidad de los suelos, donde estos efectos dependerán de la tolerancia de los diferentes cultivos y de las características de los suelos.

4.4.3. pH

El pH es una medida que indica la acidez o la basicidad del agua. Se define como el logaritmo común negativo de la actividad de los iones de hidrógeno (The California Water Boards, 2004; World Health Organization, 2007).

Definición 4.1 *pH*

$$pH = -log(H^+)$$

La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica, equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno (The California Water Boards, 2004).

El pH afecta a la mayoría de los procesos químicos y biológicos en el agua. Es uno de los factores ambientales más importantes que limitan la distribución de especies en los hábitats acuáticos. Las diferentes especies prosperan dentro de diferentes rangos de pH, con un pH óptimo para la mayoría de los organismos acuáticos entre 6,5 y 8. Los criterios de calidad del agua de la EPA de EE. UU. para el pH en agua dulce sugieren un rango de 6,5 a 9. El pH fluctuante o sostenido fuera de este rango estresa fisiológicamente a muchas especies y puede resultar en una disminución de la reproducción, disminución del crecimiento, enfermedad o muerte. Esto puede conducir a una reducción de la diversidad biológica acuática (US EPA, 2017).

Incluso pequeños cambios en el pH pueden cambiar la composición de la vida acuática. Esto se debe a que el pH altera el estado químico de muchos contaminantes (ej: cobre, amoníaco), modificando su solubilidad, transporte y biodisponibilidad. Esto puede aumentar la exposición y la toxicidad de metales y nutrientes para plantas y animales acuáticos (US EPA, 2017).

La evidencia no muestra asociación entre el pH de la dieta (alimento o agua potable) y efectos adversos directos para la salud de las personas, aunque la irritación de la piel y las mucosas pueden ocurrir después de la exposición dérmica a valores de pH extremos. Sin embargo, el pH puede influir la solubilidad de ciertas sustancias en el sistema de distribución, aumentando el riesgo de exposición a contaminantes y potencialmente resultar en efectos adversos para la salud (Health Canada, 2016; World Health Organization, 2007).

El pH es una de varias variables generales de la calidad del agua que deben tenerse en cuenta al seleccionar y configurar las secuencias de tratamiento para una fuente de agua determinada. El pH puede tener un efecto importante en el rendimiento de los procesos de tratamiento (ej: coagulación, desinfección, ablandamiento por precipitación). Por ejemplo, puede afectar el rendimiento de los coagulantes, o en el caso de la desinfección, donde variaciones en el pH puede contribuir a la formación de subproductos de desinfección (SPD) (Health Canada, 2016).

4.4.4. Cloruro

El cloruro, en forma de ion Cl-, es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua, su contenido procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales. (García Vargas et al., 2012). En la naturaleza las sales de cloruro de sodio, cloruro de potasio, y cloruro de calcio están ampliamente distribuidas. Las principales fuentes antropogénicas de cloruro en el agua son algunos efluentes industriales, que pueden contener una alta concentración de cloruro, como por ejemplo las descargas de fundiciones de metales, desulfuración de gases de combustión y la desalinización de agua de mar (Li et al., 2022).

Aunque no tiene efectos negativos para la salud, debido a que son necesarios para diferentes procesos del organismo y considerando que el exceso de cloruros es desechado por el cuerpo a través de la orina, los límites establecidos para agua potable se basan más en el sabor salado que puede producir un alto contenido de cloruros (generalmente asociado a la presencia de iones sodio), que por cuestiones sanitarias. El cloruro es un micronutriente esencial y todos los seres vivos y los cultivos requieren cloruro en pequeñas cantidades. Aun así, niveles elevados de cloruro en las aguas de riego o en el suelo, pueden resultar tóxicos para las plantas, o reducir la calidad y rendimiento de cultivos. (Colmenares, 2017). Otros efectos indeseados que se pueden producir por la alta concentración de cloruro bajo ciertas condiciones de pH y temperatura son la corrosión y obturación en las tuberías de las redes de distribución.

4.4.5. Sulfato

El sulfato (SO_4^{2-}) es un ión inorgánico que se forma por la unión de un átomo de azufre y cuatro de oxígeno. Estos, son muy abundantes en la naturaleza y su presencia en el agua varía en algunas centenas de miligramos por litro. El sulfato es un compuesto que se encuentra presente en la mayoría de las aguas continentales, ya sea en aguas superficiales o en aguas subterráneas. Debido a que se encuentra presente en la mayoría de las fuentes, también se encuentra en el agua potable y en algunos alimentos (Millán T., 2008; Bolaños-Alfaro et al., 2017).

Los sulfatos se encuentran de forma natural en numerosos minerales, como la barita ($BaSO_4$), la epsomita ($MgSO_4{\cdot}7H_2O$) y yeso ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$). Estos minerales disueltos contribuyen al contenido mineral de muchas aguas. Los sulfatos de sodio, potasio y magnesio son altamente solubles en agua, mientras que los sulfatos de calcio y bario y varios sulfatos metálicos son menos solubles (Greenwood y Earnshaw, 1998; World Health Organization, 2004).

Las principales fuentes de contaminación antrópicas provienen de los productos de sulfatos y ácido sulfúrico que se utilizan en la producción de fertilizantes, productos químicos, tintes, vidrio, papel, jabones, textiles, fungicidas, insecticidas, astringentes y eméticos. También se utilizan en las industrias de minería, pulpa de madera, metalurgia y galvanoplastia, procesamiento del cuero y en tratamiento de aguas. Como por ejemplo el sulfato de aluminio que se utiliza como agente de sedimentación en el tratamiento del agua potable; o el sulfato de cobre que se utiliza para el control de algas en suministros de agua cruda y pública (Greenwood y Earnshaw, 1998; McGuire et al., 1984; World Health Organization, 2004).

Otra forma de contaminación puede ocurrir debido al fenómeno de la "lluvia ácida", el cual se produce cuando el dióxido de azufre atmosférico (formado por combustión de combustibles fósiles y procesos metalúrgicos) se oxida y forma trióxido de azufre que se combina con el vapor de agua para formar ácido sulfúrico diluido (Delisle y W., 1977; World Health Organization, 2004). Este último, al entrar en contacto con el agua, se separa en iones de hidrógeno y sulfato (Millán T., 2008).

Se han reportado varios efectos negativos del sulfato, estos van desde causar incrustaciones en las tuberías de agua y asociarse con un empeoramiento de la calidad de agua potable, otorgándole un gusto amargo. También, puede dificultar la limpieza de la ropa, ya que al usar blanqueador de cloro en agua que contiene azufre puede reducir el poder de limpieza de los detergentes (Skipton et al., 2010).

Sobre los efectos en la salud, el sulfato presente en el agua potable en bajas cantidades no produce problemas para el ser humano. Aun así, en concentraciones considerables puede tener un efecto laxante y causar deshidratación en las personas. Algunos compuestos de este pueden tener efectos más graves, como el sulfato de cobre, que puede producir irritaciones y quemaduras de tercer grado en la piel de las personas o el sulfato de aluminio, que al entrar en contacto con la piel y los ojos produce irritación y enrojecimiento (Skipton et al., 2010; Millán T., 2008).

4.4.6. DBO-5

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno requerido para la respiración de los microorganismos responsables de la estabilización u oxidación de la materia orgánica presente en una muestra de agua a través de su actividad metabólica en un medio aerobio (Angel Sánchez, 1994).

En condiciones estándar de laboratorio, la DBO se determina a una temperatura de 20°C en un tiempo de 5 días, siendo expresado en mg/l O2 y conocido como DBO_5. Este procedimiento fue adoptado en 1936 por la Asociación Americana de Salud Pública, y desde entonces ha permanecido como un indicador de la contaminación (Lecca y Lizama, 2014).

La DBO es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales (Lecca y Lizama, 2014). Aun así este indicador solo contabiliza la materia orgánica biodegradable.

Actualmente, al ser un parámetro referente de contaminación, las plantas de tratamiento convencionales de aguas residuales están diseñadas para disminuir la DBO.

4.4.7. Nitrato y Nitrito

Los nitratos y nitritos son compuestos solubles que contienen nitrógeno y oxígeno. En el ambiente el nitrito (NO_2^-) generalmente se convierte a nitrato (NO_3^-) (FAO/OMS, 2002). Estos dos compuestos de nitrógeno que las plantas y los animales necesitan para vivir y crecer. Se presentan de manera natural en la tierra, el agua y el aire. El nitrato y el nitrito también se producen en el cuerpo. En la industria comercial, la mayoría de los nitratos se usan como fertilizantes para cultivos o el césped. El nitrato y el nitrito también se usan en la conservación de alimentos, algunos medicamentos, y en la producción de municiones y explosivos (Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades, s.f.-c).

El nitrato y el nitrito provienen tanto de fuentes naturales, como de fuentes antropogénicas principalmente del uso de fertilizantes en la agricultura, los desechos animales y los efluentes de aguas residuales (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

En relación con la ingesta de nitratos y sus posibles consecuencias negativas en la salud humana, un consumo excesivo puede causar metahemoglobinemia, una enfermedad que principalmente se manifiesta en bebés de hasta 6 meses de edad y causa la disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de los glóbulos rojos; como consecuencia inmediata de ello, ocasiona una disminución del oxígeno en los órganos y tejidos de todo el cuerpo, con daños en ellos e, incluso, la muerte (Bolaños-Alfaro et al., 2017). Por otra parte, el nitrito reacciona con aminas formando nitrosaminas, de acción cancerígena demostrada en animales y en algunos estudios epidemiológicos en humanos. Asimismo, la formación de compuestos N-nitrosos se asocia con malformaciones congénitas (Vitoria et al., 2015).

4.4.8. Fósforo como Ortofosfato

El fósforo (P) es absolutamente esencial para todo organismo; interviene en el almacenamiento y transferencia de la energía en las células y debido a no ser considerado tan abundante en el medio ambiente puede llegar a ser un nutriente limitante para la productividad primaria tanto en un cuerpo de agua, como en tierra. (Maisterrena, 1999)

Un aumento en la concentración de fósforo en el agua puede provocar efectos indeseables asociados con la eutrofización, como la proliferación de algas, agotamiento de oxígeno y mortalidad de la biota (Maisterrena, 1999; Worsfold et al., 2016).

La presencia del fósforo, proviene en menor medida de fuentes naturales, pero la creciente industrialización y aumento de la población han traído consigo un aumento de las descargas de este nutriente a las aguas ya sea por descargar puntuales como efluentes de aguas

servidas o fuentes difusas como escorrentía, principalmente desde las zonas agrícolas, donde el fósforo forma parte de la gran parte de los fertilizantes utilizados (Worsfold et al., 2016).

Las especies de fósforo más comunes en aguas naturales incluyen compuestos inorgánicos y orgánicos disueltos o suspendidos. Las especies inorgánicas incluyen ortofosfatos, polímeros lineales o polifosfatos y polímeros cíclicos o metafosfatos. Los compuestos orgánicos comprenden ésteres, fosfonatos, ácidos nucleicos, fosfolípidos, azúcares, proteínas, ácido aminofosfórico, fosfoamidas y otros (Sánchez, 2001). Todas estas formas se presentan en solución, partículas o detritus. La relación entre las concentraciones de estas diferentes formas es variable y difícil de determinar pero se estima que en aguas residuales brutas los ortofosfatos llegan a representar entre el 15 al 35 % del fósforo total y este aumenta considerablemente alcanzando el 50 e incluso el 90 % posterior al tratamiento biológico de estas aguas residuales (Ronzano y Dapena Baqueiro, 1995). El ortofosfato ($PO_4{}^{3-}$) es muy soluble y es la fracción útil que absorben las plantas autótrofas (Maisterrena, 1999).

4.4.9. Plomo

El plomo (Pb) es un metal que se encuentra en forma natural en la corteza terrestre. Se puede encontrar en todas partes de nuestro medioambiente, como el aire, el agua y la tierra. El plomo se puede combinar con otras sustancias químicas para crear distintos compuestos. Se usa en la fabricación de pilas, municiones y productos de metal (soldaduras y tuberías). Debido a precauciones sanitarias, se ha reducido radicalmente el uso de plomo en pinturas, cerámicas, calafateo (caulking), soldadura de tuberías y como un aditivo de la gasolina (Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades, s.f.-d).

El plomo rara vez se produce de forma natural en los ríos, lagos y otras fuentes de agua (National Drinking Water Alliance, 2019). Las concentraciones de plomo en los ecosistemas marinos y terrestres, en la superficie de las partículas del suelo y en la atmósfera podrían relacionarse con la contaminación industrial (Erel et al., 1991). La minería y las operaciones de fundición de plomo también podrían ser una fuente de contaminación (McFarland y Dozier, 2004).

Este metal ha sido catalogado como un problema para el agua potable, donde la mayoría de las contaminaciones por plomo suceden en algún punto de la red de distribución, ya que el agua corroe las conexiones del servicio, la tubería, y los grifos soldados y de latón que contienen plomo. (McFarland y Dozier, 2004).

Se considera a este metal como un peligro para la salud debido a su toxicidad. En efecto, la EPA determinó que el nivel máximo objetivo de contaminante (MCLG en inglés) para el plomo en el agua potable es cero, ya que el plomo es un metal tóxico que puede dañar la salud humana, incluso en niveles de baja exposición. El plomo es persistente y puede bioacumularse en el cuerpo con el tiempo. Aun así, la EPA establece en sus regulaciones los niveles máximos de contaminante (MCL en inglés), basado en los MCLG, pero tomando en cuenta los beneficios y la capacidad de los sistemas públicos de agua para detectar y eliminar contaminantes utilizando tecnologías de tratamiento adecuadas. El MCL para el plomo es distinto de cero e igual a 15 µg/L (EPA 1991; EPA 2000b).

Los niños, bebés y fetos son los más vulnerables al plomo dado que los efectos adversos del plomo se producen en menores niveles de exposición en los niños que en los adultos. Una dosis de plomo que produciría poco efecto en un adulto puede producir un efecto significativo en un niño. En los niños, los bajos niveles de exposición se han relacionado con daños en el sistema nervioso central y periférico, problemas de aprendizaje, de crecimiento, discapacidad auditiva, y problemas de formación y función de los glóbulos. También en adultos el plomo genera efectos negativos como efectos cardiovasculares, presión arterial elevada e incidencia de hipertensión; disminución de la función renal ;y problemas de reproducción (tanto en hombres como en mujeres) (EPA, 2022).

4.4.10. Niquel

El níquel (Ni) es un elemento natural muy abundante. El níquel puro es un metal duro, blanco-plateado que puede combinarse con otros metales, tales como el hierro, cobre, cromo y cinc para formar aleaciones (Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades, s.f.-a).

En general, el níquel se encuentra en el medio ambiente en una amplia variedad de formas químicas y las concentraciones son muy variables, lo que refleja la influencia de emisiones de diferentes tipos de fuentes. También existen fuentes naturales, provenientes principalmente de la meteorización de rocas y minerales (Rao et al., 2021; World Health Organization, 2021).

El níquel es un oligoelemento esencial, pero puede ser tóxico en altas concentraciones (Rao et al., 2021), no tiene características organolépticas como sabor u olor. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que algunos compuestos de níquel son cancerígenos en seres humanos y que el níquel metálico es posiblemente cancerígeno en seres humanos (Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades, s.f.-a). También, la exposición oral al níquel se asoció con efectos en el sistema gastrointestinal, sistemas hematológico, neurológico e inmunológico. Síntomas gastrointestinales y neurológicos han sido reportados después de una exposición aguda. Esto sin incluir otros efectos negativos como dermatitis por contacto, afección al desarrollo, sistema reproductivo y sistema inmunológico. (World Health Organization, 2021).

La mayor parte del níquel vertido al medio ambiente proviene de actividades antropogénicas, de descargas de aguas residuales domésticas y escorrentía de aguas pluviales contaminadas como fuentes principales.

Dentro de las principales actividades asociadas a la contaminación con níquel se incluyen la industria del acero inoxidable y otras aleaciones, componentes tecnológicos, químicos, hierro y alimentos procesados, baterías, productos de madera, catalizadores, pigmentos, pavimentos, techumbre; emisiones de las operaciones de minería y disposición de efluentes.

4.4.11. Zinc

El zinc (Zn) es un metal brillante, moderadamente duro y de color blanco azulado (Piedra Marín, 2019). Este se caracteriza por ser un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, pero no es abundante, ya que representa sólo el 0,012 % de la corteza terrestre (Rubio et

al., 2007). El zinc está en la forma +2 en solución acuosa y exhibe propiedades anfóteras. Una pequeña parte del zinc disponible en la fase acuática puede pasar a la formación de compuestos solubles de cloruro y sulfato de zinc (Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades, s.f.-e).

El zinc es un oligoelemento esencial en nuestra dieta. Sin embargo, cantidades excesivas de zinc pueden resultar perjudiciales para la salud. La toxicidad del zinc en grandes cantidades causa náuseas y vómitos en los niños. Una mayor concentración de zinc puede causar anemia y problemas de colesterol en los seres humanos (Gautam et al., 2014).

La minería, el procesamiento metalúrgico de minerales de zinc y su aplicación industrial son las principales fuentes de zinc en el aire, suelo y agua. También proviene de la quema de carbón (Gautam et al., 2014). Sus principales aplicaciones industriales son la galvanización del hierro y acero, así como en la manufacturación del latón. Los objetos galvanizados (alambres, clavos, láminas, etc.) se emplean en la industria del automóvil, la construcción, equipamientos de oficinas y utensilios de cocina, etc. También se utilizan grandes cantidades de zinc en la obtención de aleaciones, y en polvo se utiliza como agente reductor. Dentro de los compuestos, el óxido de zinc es el más importante (Rubio et al., 2007).

4.4.12. Cromo

El cromo (Cr) es un metal de transición que exhibe una química compleja. En el agua, el cromo existe en estados de oxidación que van de +6 a -2. Las formas más estables son el hexavalente Cr (VI) y trivalentes de Cr (III) y pueden interconvertirse entre sí. Dependiendo de los valores de pH de la solución, el cromo se puede encontrar principalmente como Cr (III) o Cr (VI) (Tumolo et al., 2020).

Los efectos biológicos del cromo dependen en gran medida de su estado de oxidación. Cr (III) es un elemento nutricional traza esencial, no tóxico y poco absorbido. Cr (VI) en cambio, es la forma más tóxica, la cual puede producir daño hepático y renal, hemorragia interna y trastornos respiratorios. Ha sido caracterizado como cancerígeno para humanos (Grupo I) por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (Tumolo et al., 2020; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2012).

La contaminación del agua con cromo, puede provenir de fuentes naturales que dependen de la geología del lugar, erosión y transporte de este. También existen fuentes antropogénicas, donde se estima que más del 70 % del cromo en el medio ambiente proviene de estas. Esta contaminación viene de las actividades y efluentes industriales, como la galvanoplastia, fabricación de acero y automóviles, minería, curtido de cuero, refinerías, papeleras, pigmentos para pintura y los tintes, fungicidas, plantas de tratamiento, etcétera. Siendo la producción de ferrocromo la fuente industrial más importante (Soto Rueda et al., 2017; Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water, 2015).

4.5. Concentraciones y Resultados de Parámetros Regulados

En esta sección se muestran los resultados del análisis a la norma secundaria D.S. N°53 para cada uno de los contaminantes y parámetros para los cuales se establecen niveles de calidad. Se presentan de esta manera una serie con las concentraciones o valores históricos en las estaciones seleccionadas, los estadísticos y porcentaje de muestras dentro de los límites antes y después de la publicación de la NSCA río Maipo.

En la Tabla 4.5 se muestra un resumen de los resultados, donde se presentan los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la norma secundaria para los diferentes parámetros de control en las áreas de vigilancia asociadas al cauce principal del río Maipo para el periodo anterior y posterior a la publicación del D.S. N°53.

Tabla 4.5: Resumen porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la NSCA Río Maipo para las áreas de vigilancia en el cauce principal del Río Maipo por parámetros de control.

Parámetro	Periodo	MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5
Oxígeno Disuelto	**Antes**	92 %	S/I	S/I	89 %	99 %
	Después	75 %	92 %	82 %	59 %	81 %
Conductividad Electrica	**Antes**	98 %	S/I	S/I	100 %	95 %
	Después	78 %	74 %	84 %	100 %	50 %
pH	**Antes**	90 %	S/I	S/I	93 %	98 %
	Después	85 %	84 %	S/I	93 %	96 %
Cloruro	**Antes**	91 %	S/I	S/I	95 %	91 %
	Después	66 %	47 %	66 %	82 %	36 %
Sulfato	**Antes**	100 %	S/I	S/I	100 %	98 %
	Después	89 %	53 %	66 %	93 %	81 %
DBO	**Antes**	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
	Después	100 %	94 %	88 %	97 %	89 %
Nitrato	**Antes**	89 %	S/I	S/I	96 %	96 %
	Después	95 %	94 %	87 %	94 %	68 %
Ortofosfato	**Antes**	96 %	S/I	S/I	84 %	100 %
	Después	100 %	100 %	96 %	96 %	100 %
Plomo Disuelto	**Antes**	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
	Después	98 %	96 %	98 %	100 %	100 %
Níquel Disuelto	**Antes**	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
	Después	100 %	100 %	100 %	100 %	98 %
Zinc Disuelto	**Antes**	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
	Después	92 %	86 %	76 %	95 %	98 %
Cromo Total	**Antes**	89 %	S/I	S/I	100 %	100 %
	Después	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Escala de color verde a rojo representa porcentajes, donde verde son los mayores y rojo los menores. **S/I**: Sin Información.
Fuente: Elaboración Propia Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

A continuación, se presentan los resultados en detalle para cada parámetro y contaminante

regulado en la NSCA río Maipo.

4.5.1. Oxígeno Disuelto

Se presenta en la Figura 4.3 la serie histórica de concentraciones de oxígeno disuelto en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. N°53/2014. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

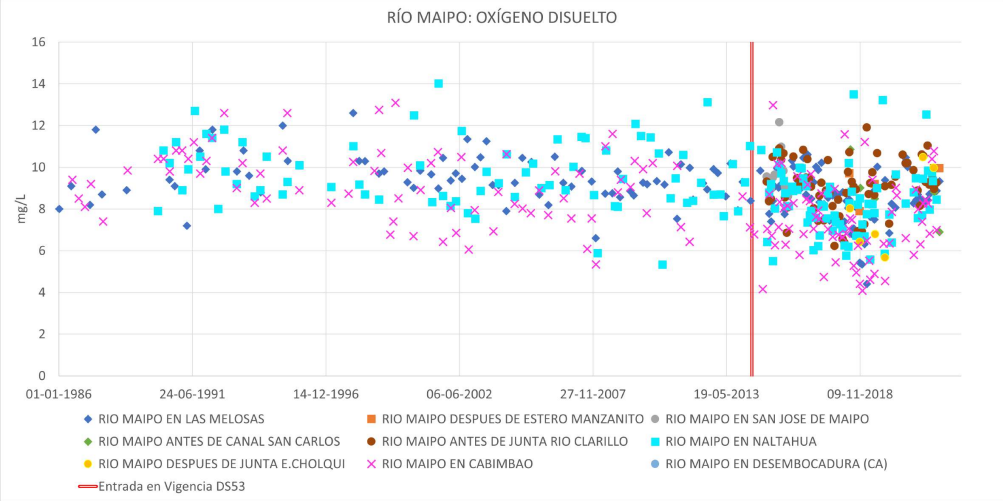


Figura 4.3: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Oxígeno Disuelto.

Se presentan en la Tabla 4.6 y la Figura 4.4 los estadísticos principales del oxígeno disuelto en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad similar de datos disponibles antes y después de la publicación del decreto para las áreas MA-1; MA-4 y MA-5. En el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-6 no se tiene ningún registro.

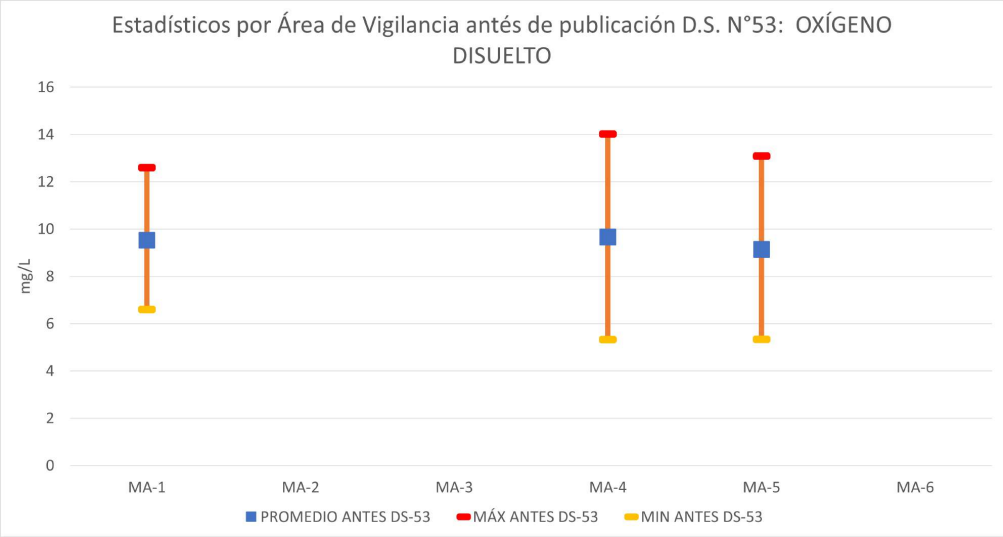
También se observa de los estadísticos, una disminución en las concentraciones promedio de datos disponibles de oxígeno disuelto en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-1; MA-4 y MA-5) en el periodo posterior. Por su lado, tanto los valores máximos, mínimos y promedio disminuyen para el periodo posterior.

Junto con lo anterior, en los estadísticos del periodo posterior se presenta una tendencia continua a disminuir la concentración de oxígeno disuelto aguas abajo del área MA-2.

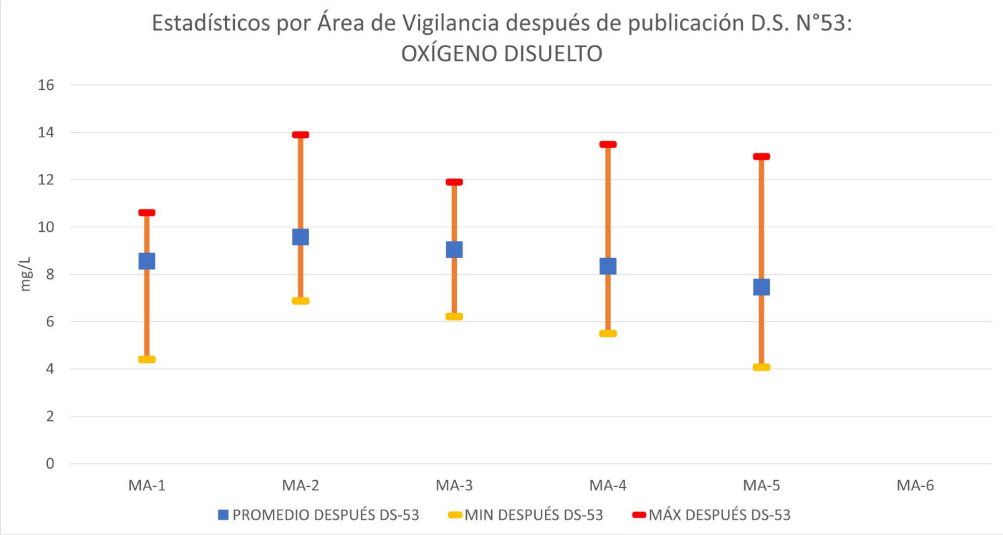
Tabla 4.6: Estadísticos Oxígeno Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]		PROMEDIO TEMPERATURA [C°]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	75	72	9,5	8,6	12,6	10,6	6,6	4,4	9,7	9,0
MA-2	0	75	S/I	9,6	S/I	13,9	S/I	6,9	S/I	9,2
MA-3	0	68	S/I	9,0	S/I	11,9	S/I	6,2	S/I	13,6
MA-4	76	74	9,7	8,3	14,0	13,5	5,3	5,5	15,5	14,9
MA-5	75	70	9,1	7,5	13,1	13,0	5,3	4,1	16,4	16,0
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



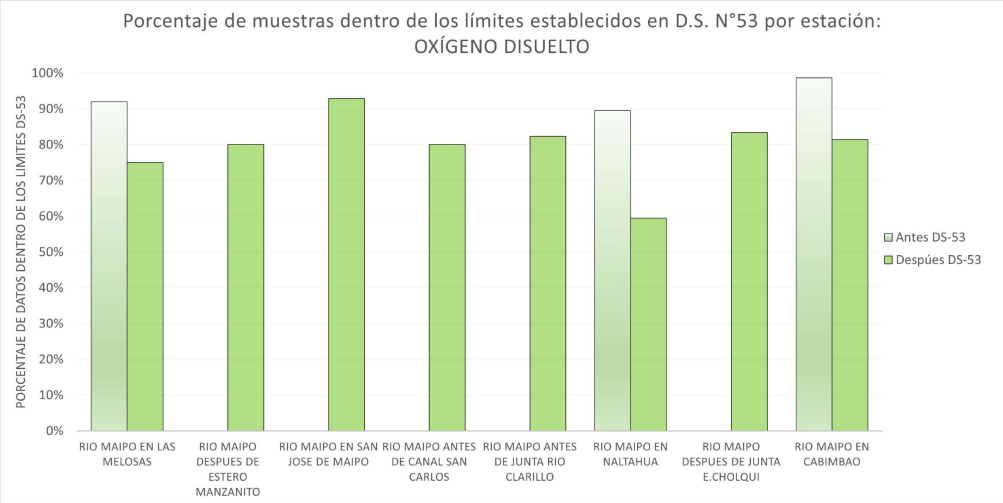
a Antes D.S. N°53.



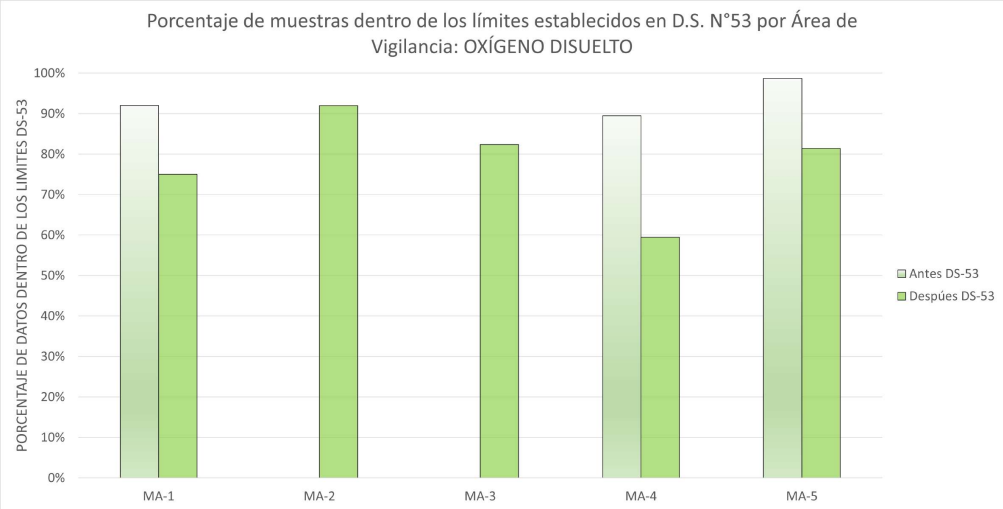
b Después D.S. N°53.

Figura 4.4: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Oxígeno Disuelto.

Se presenta en la Figura 4.5 los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos en ambos periodos. A partir de esto se observa una disminución para el periodo posterior en las áreas con información de ambos periodos. También se observa en el periodo posterior una tendencia a aumentar el porcentaje de muestras dentro de los límites en el área MA-2 para luego disminuir en MA-3 y MA-4 y finalmente aumentar aguas abajo en MA-5. Se tienen porcentajes bajo el 80 % para MA-1 (76 %) y el menor para MA-4 (59 %).



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.5: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Oxígeno Disuelto.

4.5.2. Conductividad Eléctrica

Se presenta en la Figura 4.6 la serie histórica de valores de conductividad eléctrica en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. N°53/2014. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

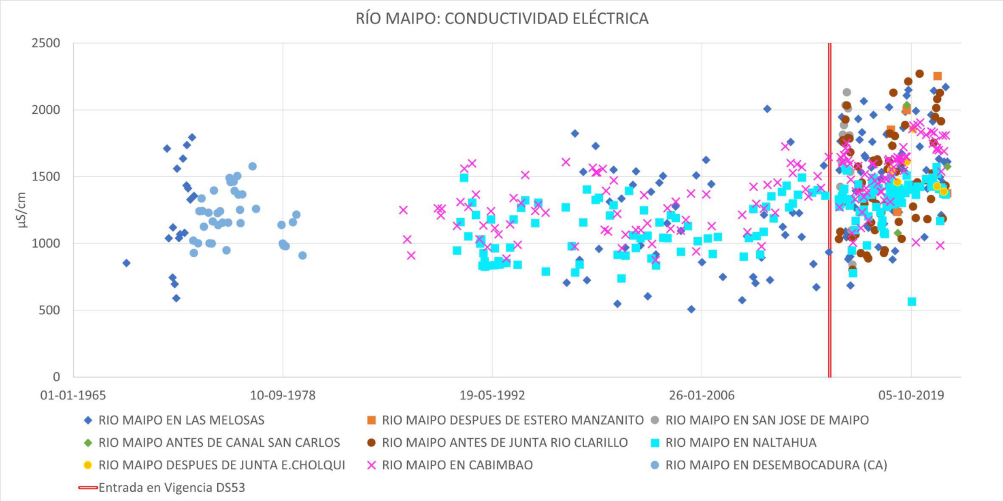


Figura 4.6: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Conductividad Eléctrica.

Se presentan en la Tabla 4.7 y la Figura 4.7 los estadísticos principales de la conductividad eléctrica en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad levemente mayor de datos disponibles en el periodo anterior a la publicación del decreto para las áreas MA-1; MA-4 y MA-5. En el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-6 se cuentan con registros solo en el periodo anterior.

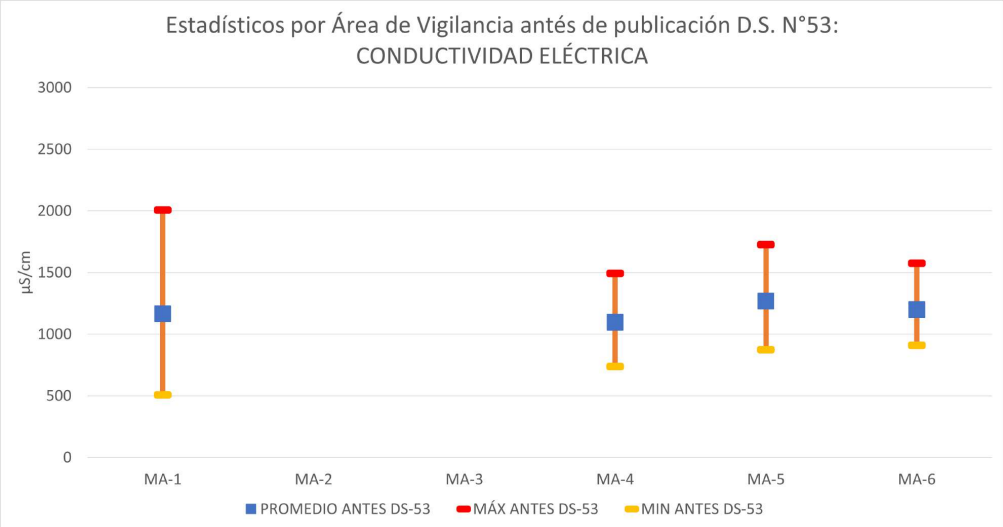
También se observa de los estadísticos, un aumento en el periodo posterior en el promedio de datos disponibles de conductividad eléctrica en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-1; MA-4 y MA-5).

Junto con lo anterior, se presenta en los estadísticos del periodo posterior una tendencia a aumentar los valores promedio de conductividad eléctrica en el área MA-2 para luego disminuir continuamente aguas abajo hasta MA-4 y finalmente aumentar levemente en MA-5.

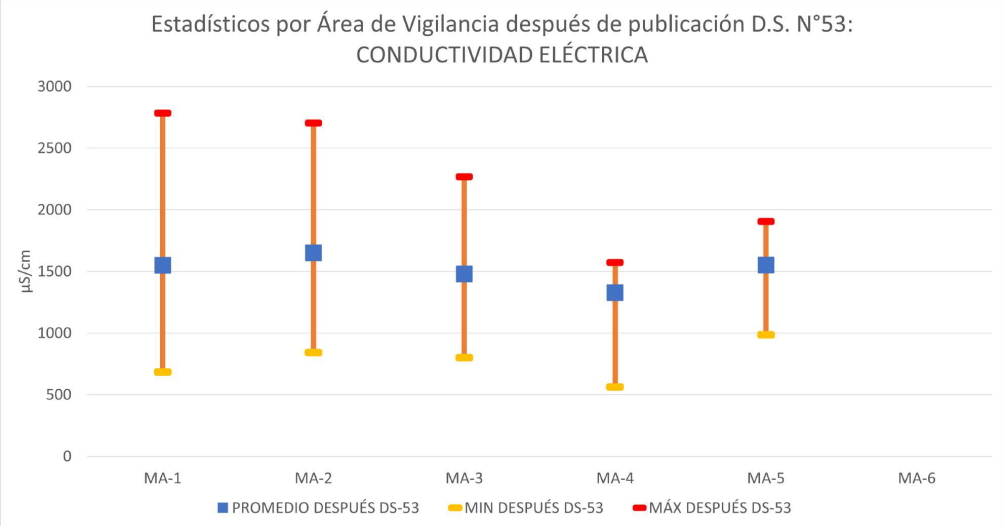
Tabla 4.7: Estadísticos Conductividad Eléctrica por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	65	68	1165	1551	2007	2785	508	685
MA-2	0	76	S/I	1650	S/I	2704	S/I	841
MA-3	0	62	S/I	1480	S/I	2269	S/I	801
MA-4	78	72	1097	1328	1493	1572	737	564
MA-5	74	70	1268	1552	1726	1906	875	985
MA-6	36	0	1199	S/I	1576	S/I	909	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



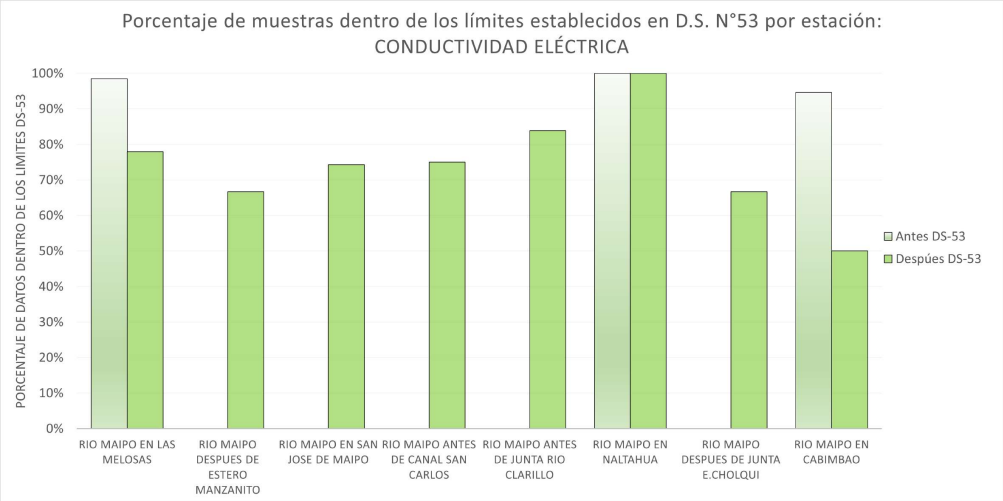
a Antes D.S. N°53.



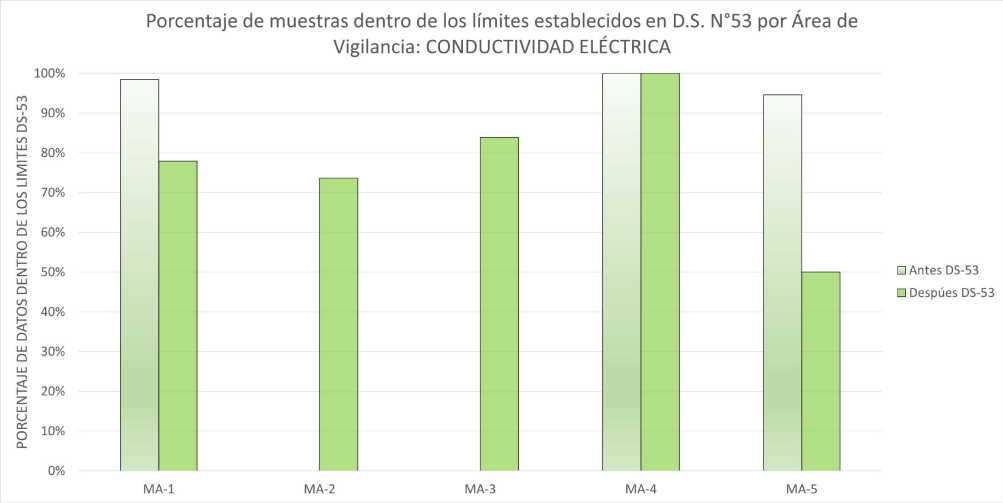
b Después D.S. N°53.

Figura 4.7: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Conductividad Eléctrica.

Se presenta en la Figura 4.8 los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos en ambos periodos. A partir de esto se observa una disminución para el periodo posterior en las áreas con información de ambos periodos (especialmente el caso de MA-5), salvo en el área MA-4 donde aumento levemente el porcentaje. También se observa una tendencia en el periodo posterior a disminuir levemente el porcentaje de muestras dentro de los límites en el área MA-2, para luego aumentar en MA-3 y MA-4 y finalmente disminuir considerablemente aguas abajo en MA-5. Se tienen porcentajes menores al 80 % en MA-2 (74 %) y el menor en MA-5 con un porcentaje de 51 %.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.8: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Conductividad Eléctrica.

4.5.3. pH

Se presenta en la Figura 4.9 la serie histórica de valores de pH en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. N°53/2014, con un periodo sin información en gran parte de la década de 1980. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

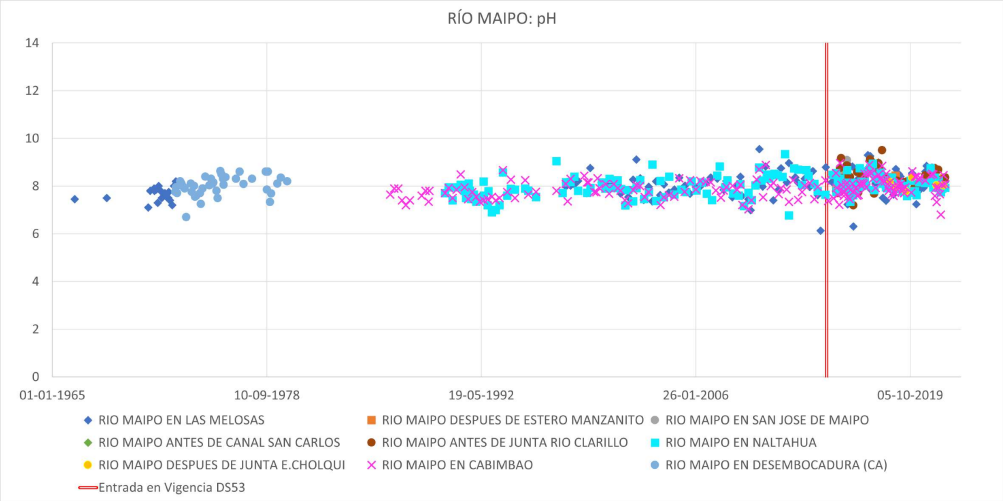


Figura 4.9: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: pH.

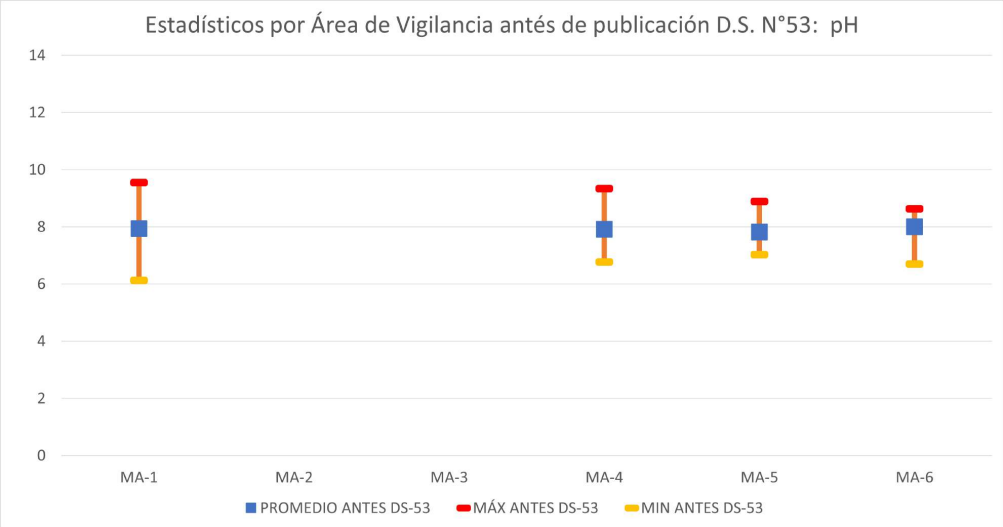
Se presentan en la Tabla 4.8 y la Figura 4.10 los estadísticos principales de pH en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad levemente mayor de datos en el periodo anterior a la publicación del decreto para las áreas MA-1; MA-4; MA-5 y MA-6. En el caso de MA-2 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-3 no se cuenta con información en ambos periodos y en el caso de MA-6 solo se cuenta con registros en el periodo anterior.

También se observa de los estadísticos, un aumento en el promedio del valor de pH de acuerdo a los datos disponibles para el periodo posterior en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-1; MA-4 y MA-5).

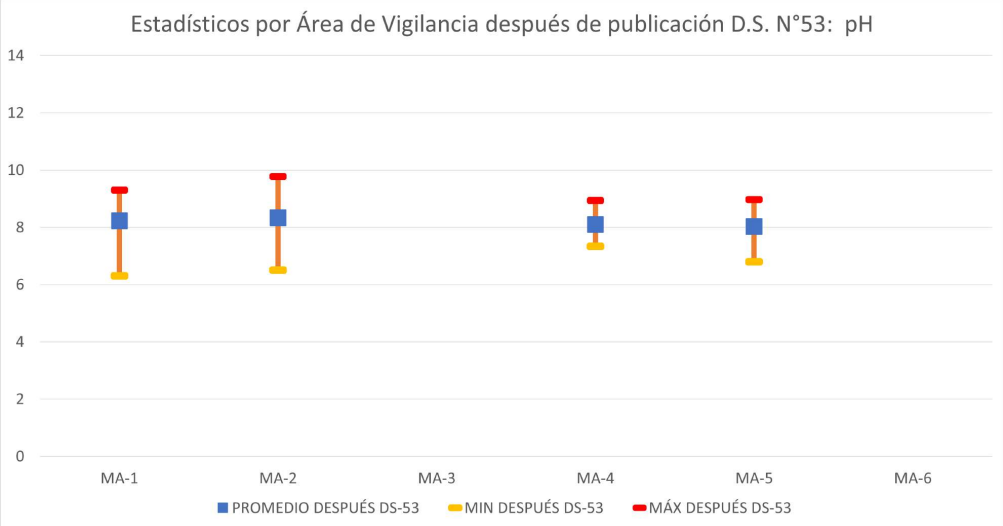
Tabla 4.8: Estadísticos pH por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	79	72	7,9	8,2	9,6	9,3	6,1	6,3
MA-2	0	75	S/I	8,3	S/I	9,8	S/I	6,5
MA-3	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
MA-4	92	76	7,9	8,1	9,3	8,9	6,8	7,3
MA-5	94	74	7,8	8,0	8,9	9,0	7,0	6,8
MA-6	40	0	8,0	S/I	8,6	S/I	6,7	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



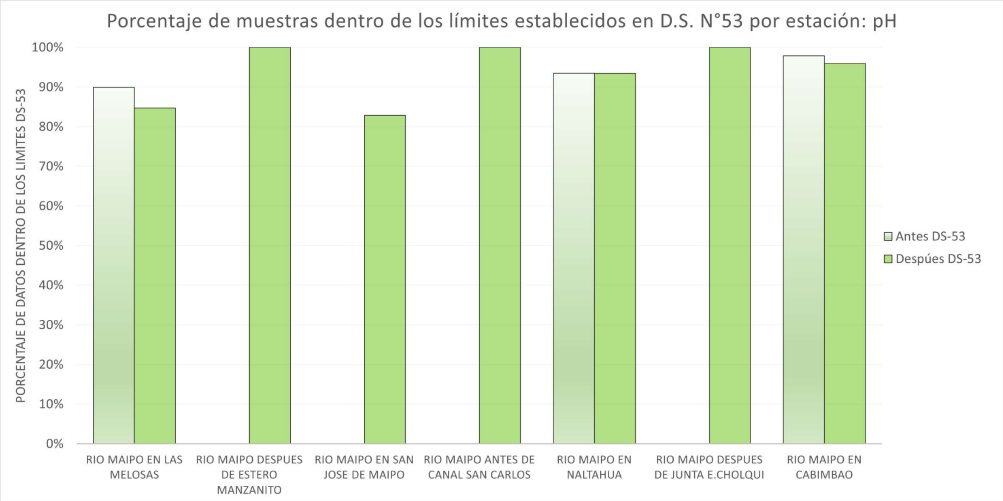
a Antes D.S. N°53.



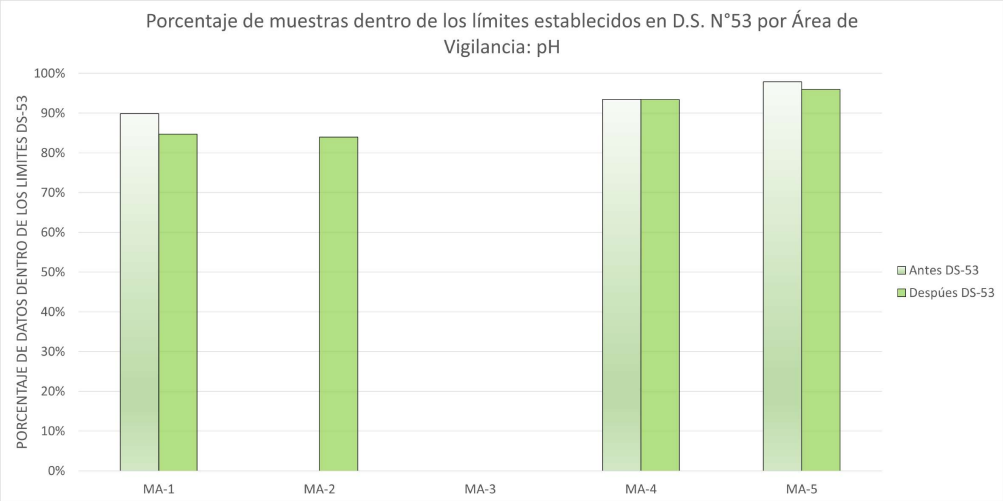
b Después D.S. N°53.

Figura 4.10: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : pH.

Se presenta en la Figura 4.11 los valores para los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en ambos periodos. A partir de esto se observa una leve disminución para el periodo posterior en las áreas con información de ambos periodos (MA-1, MA-4 y MA-5). También se observa una tendencia en el periodo posterior a aumentar el porcentaje de muestras dentro de los límites en aguas abajo de MA-1. Se tienen porcentajes sobre el 80 % para todas las áreas salvo MA-3 que no posee información.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.11: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: pH.

4.5.4. Cloruro

Se presenta en la Figura 4.12 la serie histórica de concentraciones de cloruro en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. N°53/2014. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

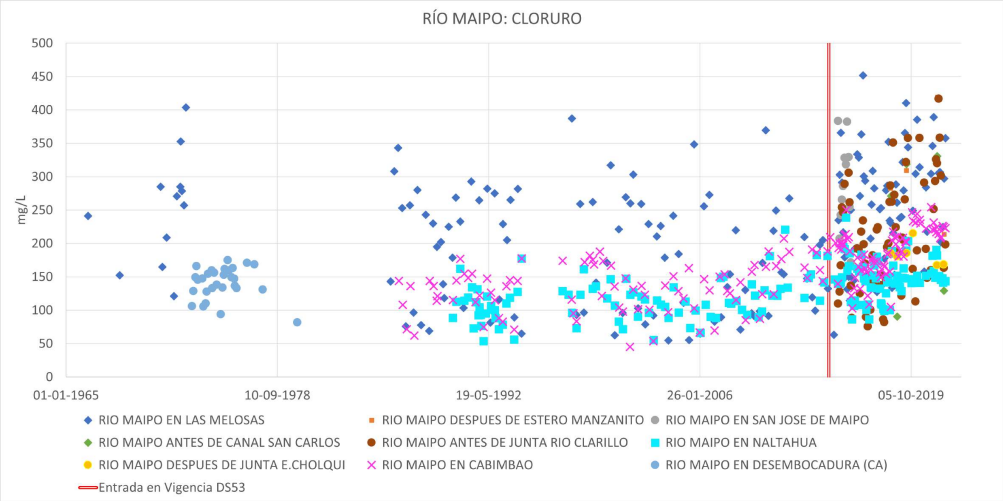


Figura 4.12: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Cloruro.

Se presentan en la Tabla 4.9 y la Figura 4.13 los estadísticos principales de cloruro en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad levemente mayor de datos en el periodo anterior a la publicación del decreto para las áreas MA-1; MA-4; MA-5 y MA-6. En el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-6 solo se cuenta con registros en el periodo anterior.

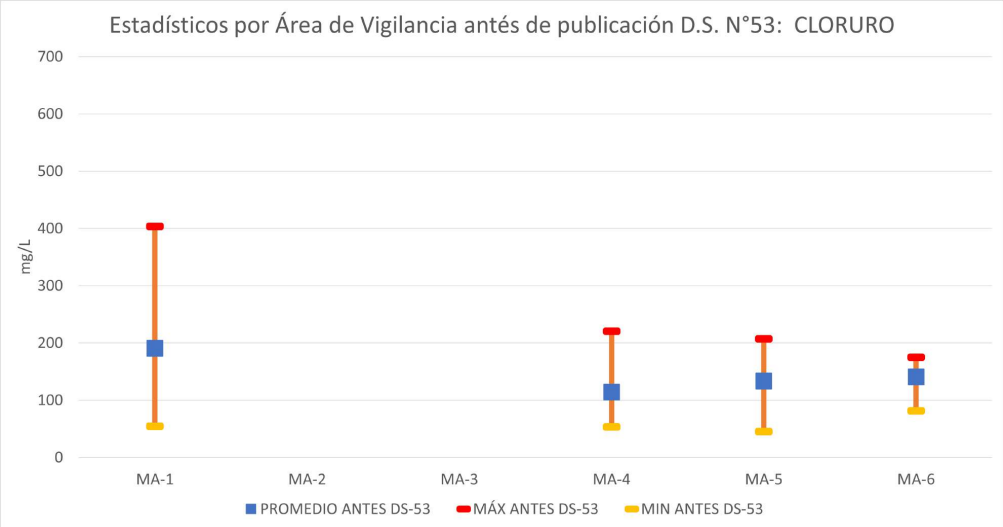
También se observa de los estadísticos, un aumento en el periodo posterior en el promedio de datos, valores máximos y mínimos disponibles de cloruro en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-1; MA-4 y MA-5).

Junto con lo anterior, se presenta en los estadísticos del periodo posterior una tendencia a disminuir la concentración promedio de cloruro aguas abajo de MA-1 para luego aumentar levemente en MA-5.

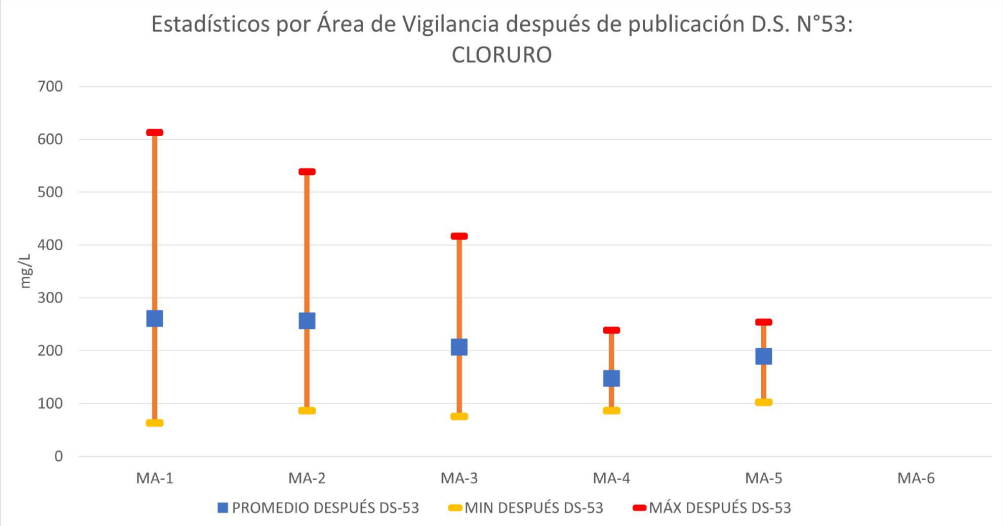
Tabla 4.9: Estadísticos Cloruro por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	102	74	191	261	404	613	55	63
MA-2	0	76	S/I	257	S/I	539	S/I	86
MA-3	0	68	S/I	207	S/I	417	S/I	76
MA-4	86	74	114	148	221	239	54	86
MA-5	87	74	133	189	207	254	45	103
MA-6	29	0	141	S/I	175	S/I	82	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



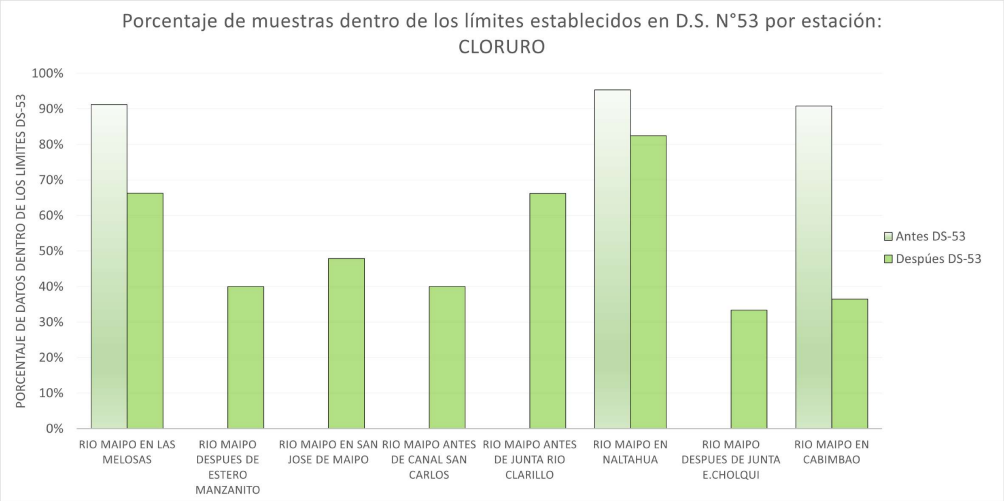
a Antes D.S. N°53.



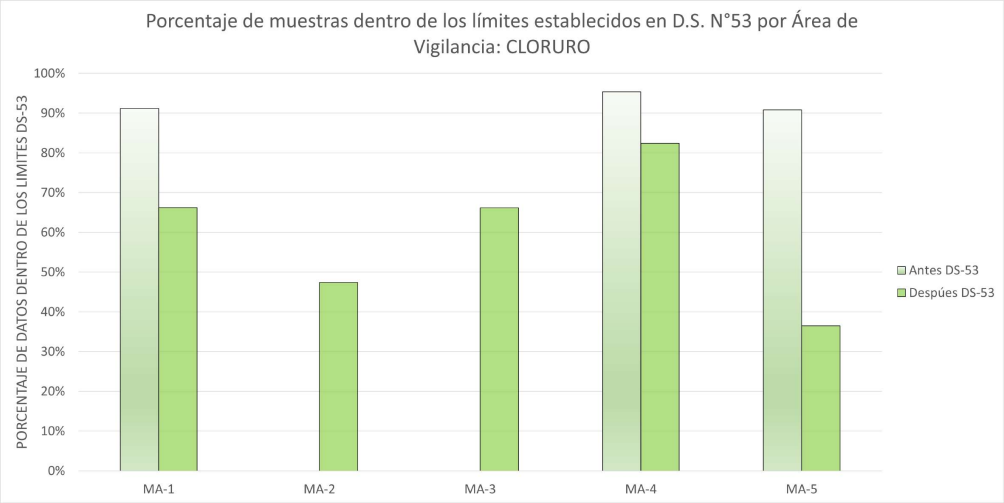
b Después D.S. N°53.

Figura 4.13: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Cloruro.

Se presenta en la figura 4.14 los valores de los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en ambos periodos. A partir de esto se observa una clara disminución para el periodo posterior en las áreas con información de ambos periodos (MA-1, MA-3, MA-4 y MA-5), especialmente en el caso de MA-5 que pasa de 91 % a 36 %. También se observa una disminución del porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1, para luego aumentar aguas abajo de MA-2 y finalmente disminuir notoriamente en MA-5. Se tienen porcentajes bajo el 80 % en todas las áreas salvo MA-4.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.14: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Cloruro.

4.5.5. Sulfato

Se presenta en la Figura 4.15 la serie histórica de concentraciones de sulfato en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. N°53/2014, con un periodo sin información en la década de 1980. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

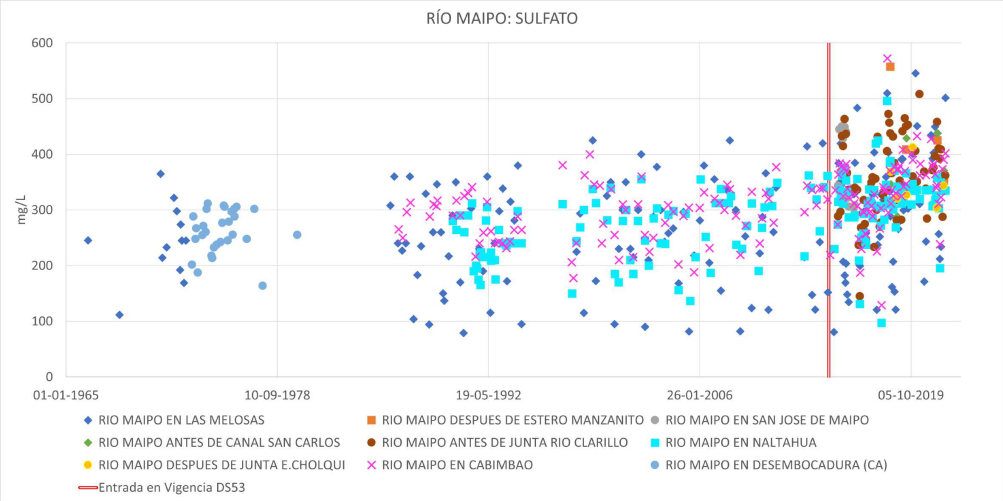


Figura 4.15: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Sulfato.

Se presentan en la Tabla 4.10 y la Figura 4.16 los estadísticos principales de sulfato en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad levemente mayor de datos en el periodo anterior a la publicación del decreto para las áreas MA-1; MA-4; MA-5 y MA-6. En el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-6 solo se cuenta con registros en el periodo anterior.

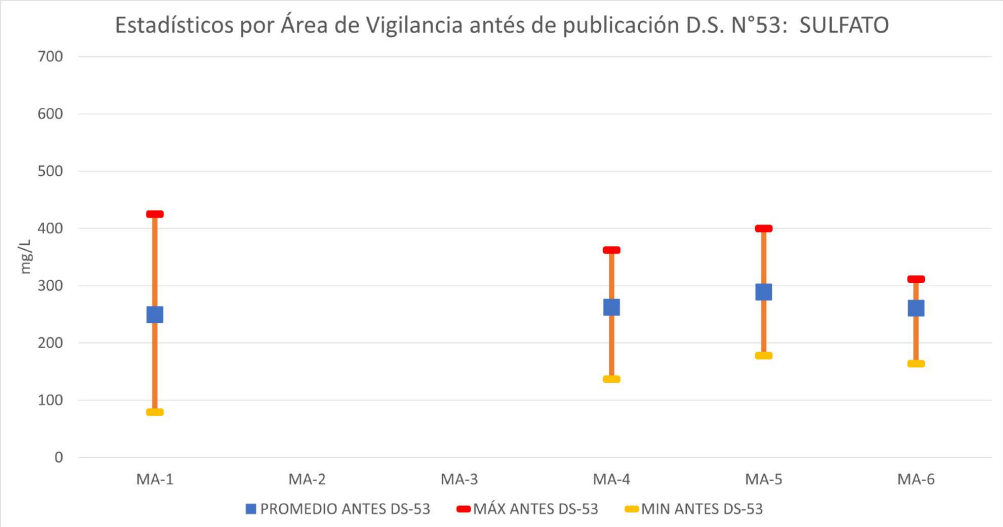
También se observa de los estadísticos, un aumento en el periodo posterior en el promedio de los datos y valores máximos disponibles de sulfato en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-1; MA-4 y MA-5).

Junto con lo anterior, se observa de los estadísticos del periodo posterior una leve tendencia a aumentar las concentraciones promedio de sulfato aguas abajo de MA-1 para luego disminuir aguas abajo de MA-2 y finalmente aumentar levemente en MA-5.

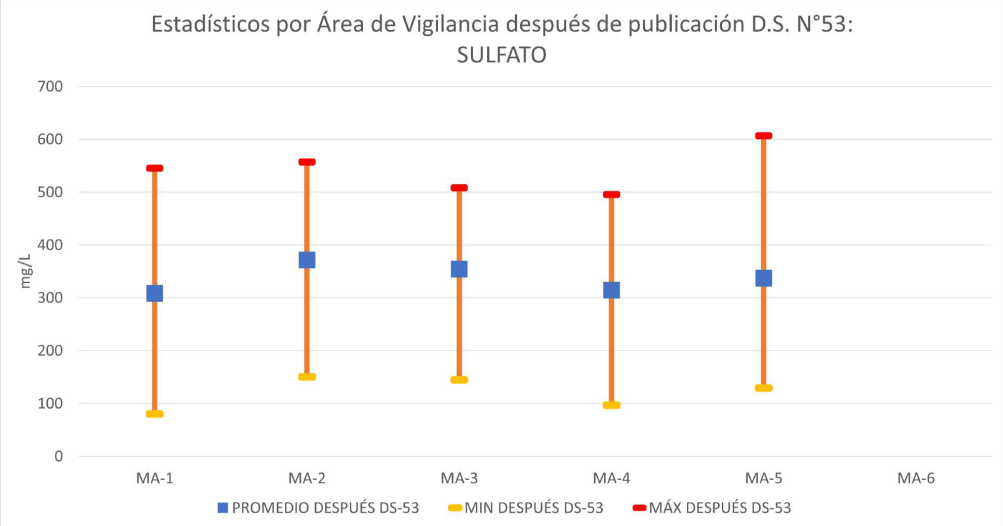
Tabla 4.10: Estadísticos Sulfato por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	97	70	249	309	425	546	79	81
MA-2	0	72	S/I	372	S/I	557	S/I	150
MA-3	0	65	S/I	354	S/I	508	S/I	145
MA-4	81	71	262	315	362	496	137	97
MA-5	80	70	289	337	400	607	178	129
MA-6	29	0	261	S/I	311	S/I	164	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



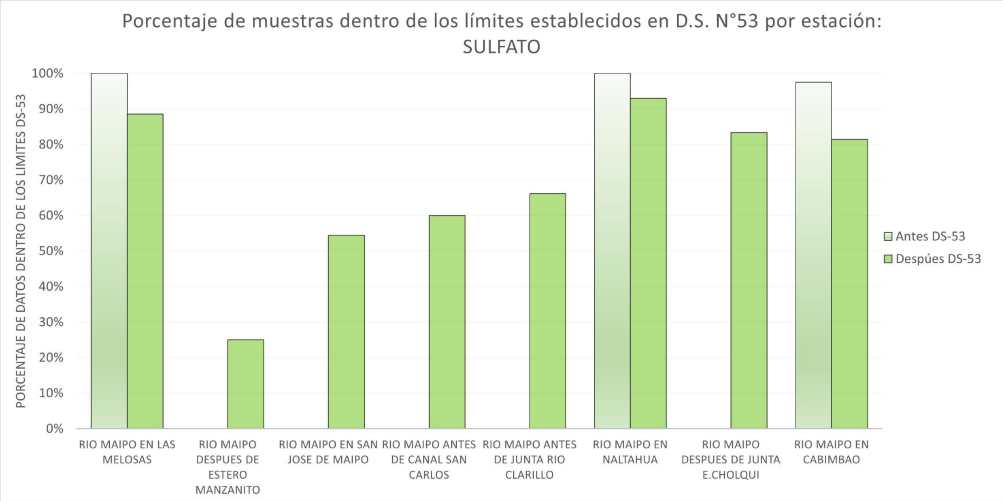
a Antes D.S. N°53.



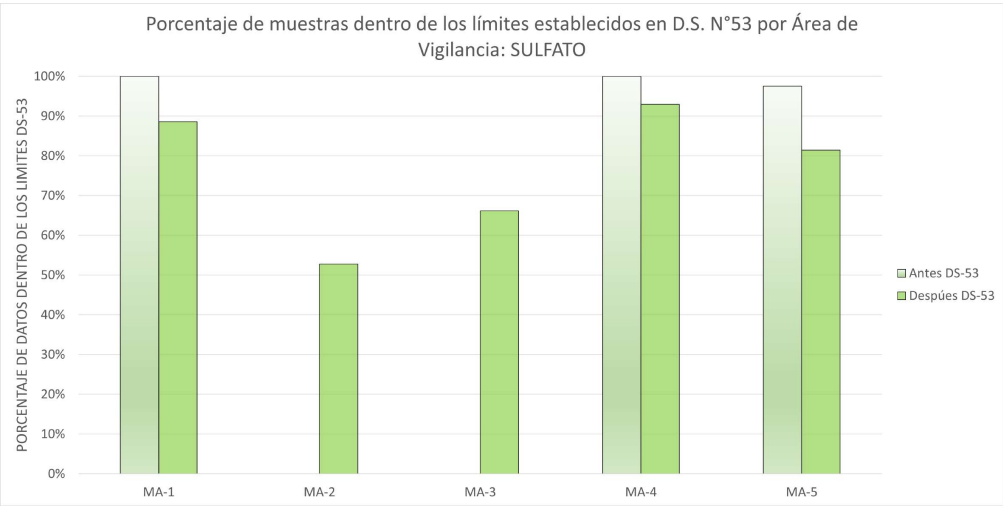
b Después D.S. N°53.

Figura 4.16: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Sulfato.

Se presenta en la Figura 4.17 los valores de los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en ambos periodos. A partir de esto se observa una clara disminución para el periodo posterior en las áreas con información de ambos periodos (MA-1, MA-4 y MA-5). También se observa una disminución del porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1, para luego aumentar aguas abajo de MA-2 y finalmente disminuir levemente en MA-5. Se tienen porcentajes bajo el 80 % en las áreas MA-2 y MA-3.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.17: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Sulfato.

4.5.6. Demanda Biológica de Oxígeno

Se presenta en la Figura 4.18 la serie histórica de concentraciones de DBO5 en las estaciones seleccionadas. Donde se tienen tan solo 2 datos antes de la publicación del D.S. N°53/2014, se tiene una mayor cantidad de datos para el periodo posterior.

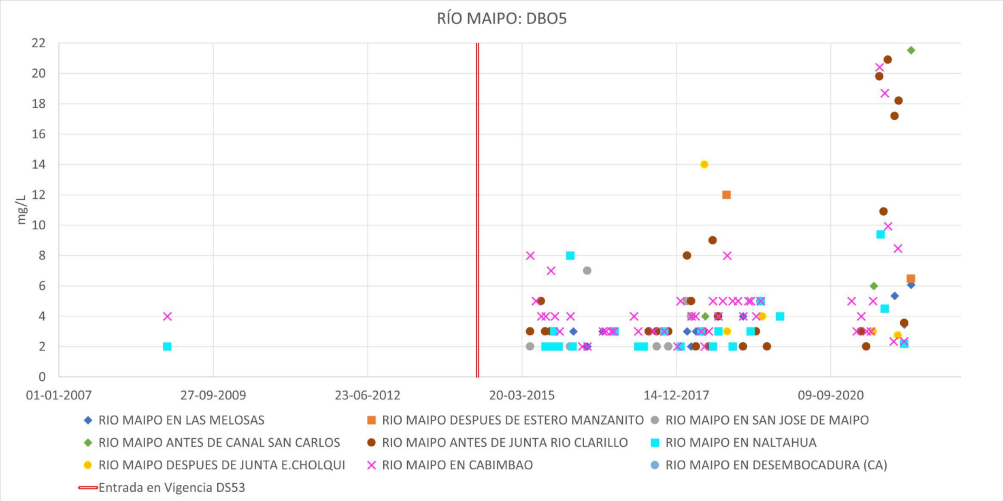


Figura 4.18: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53.

Se presentan en la Tabla 4.11 y la Figura 4.19 los estadísticos principales de DBO5 en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad de datos casi nula en el periodo anterior (tan solo 1 dato en para MA-1, MA-4 y MA-5). De esta forma, los registros de DBO5 comenzaron con la publicación del decreto, por tanto no se pueden realizar comparaciones con el periodo anterior.

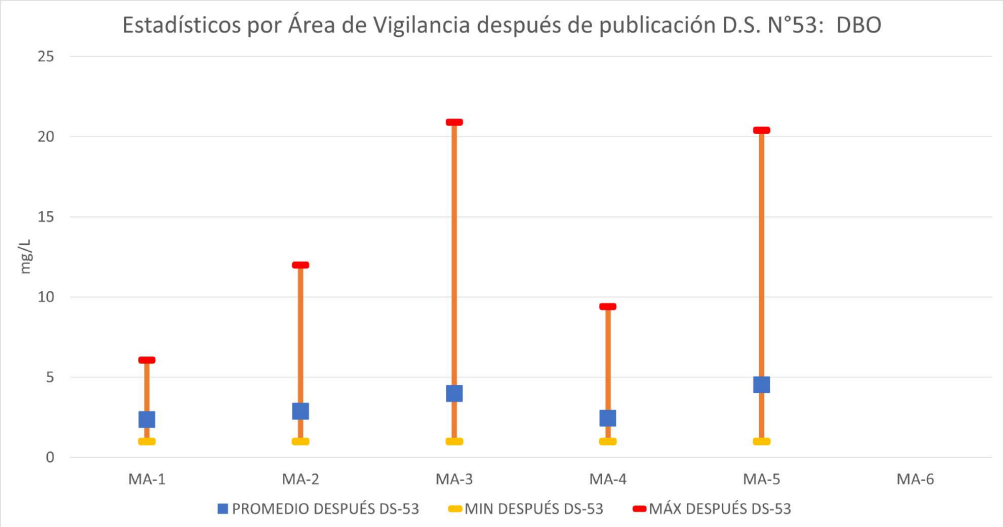
Se cuenta con una amplia cantidad de datos en el periodo posterior, salvo para el área de observación MA-6, donde no se cuenta con información.

Junto con lo anterior, se presenta en los estadísticos del periodo posterior una tendencia a aumentar la concentración promedio de DBO5 aguas abajo de MA-1 con un aumento considerable en MA-3 para luego disminuir aguas abajo en MA-4 y finalmente aumentar nuevamente en MA-5.

Tabla 4.11: Estadísticos DBO5 por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	1	55	S/I	2,4	S/I	6,1	S/I	L/D = 1
MA-2	0	62	S/I	2,9	S/I	12,0	S/I	L/D = 1
MA-3	0	56	S/I	4,0	S/I	20,9	S/I	L/D = 1
MA-4	1	59	S/I	2,4	S/I	9,4	S/I	L/D = 1
MA-5	1	53	S/I	4,5	S/I	20,4	S/I	L/D = 1
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

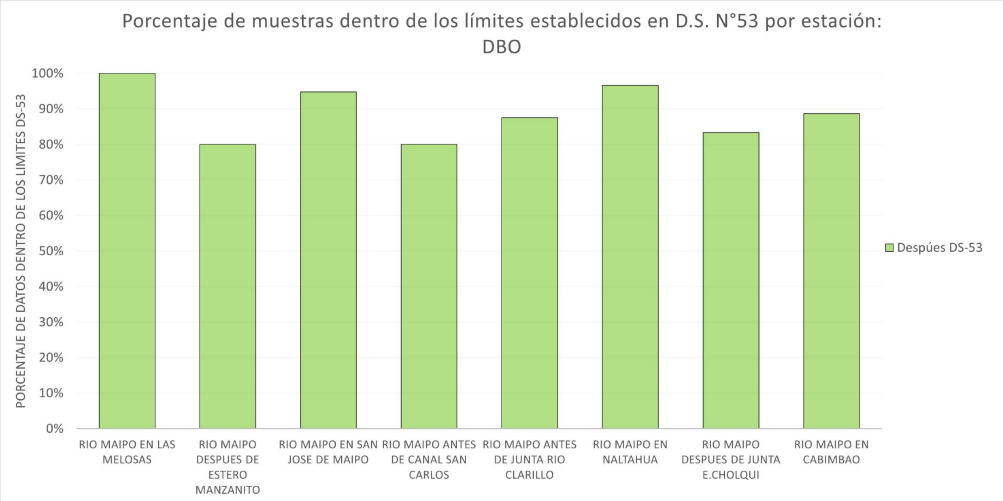
S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



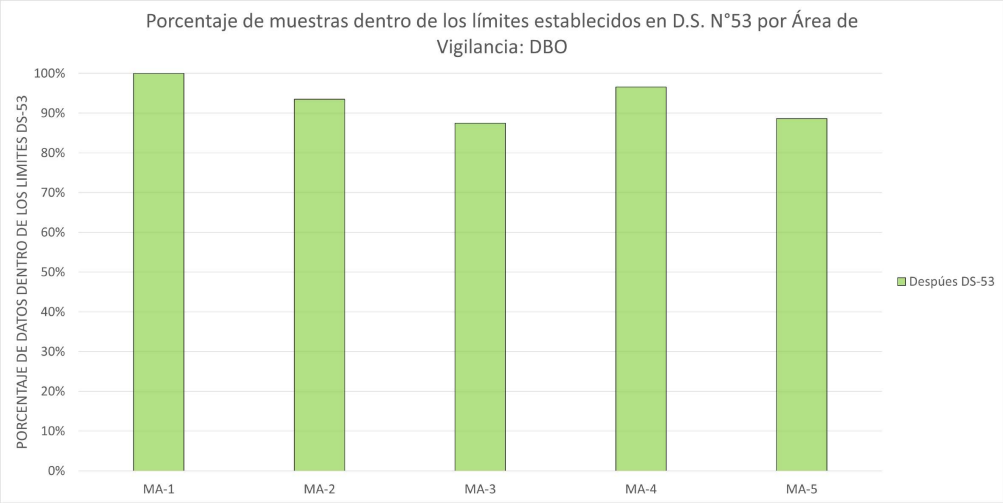
a Después D.S. N°53.

Figura 4.19: Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : DBO5.

Se presenta en la Figura 4.17 los valores de los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos solo en el periodo posterior, ya que el periodo anterior no cuenta con información suficiente. También se observa una tendencia a disminuir el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1 hasta MA-3, para luego aumentar en MA-4 y disminuir nuevamente en MA-5. Se tienen porcentajes sobre el 80 % en todas las áreas.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.20: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. Nº53: DBO5.

4.5.7. Nitrato

Se presenta en la Figura 4.21 la serie histórica de concentraciones de nitrato en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. Nº53/2014. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

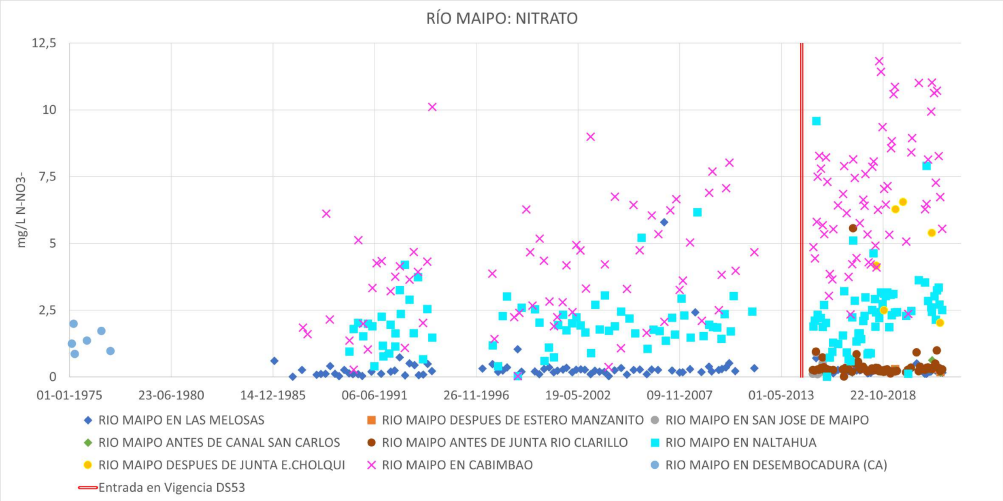


Figura 4.21: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Nitrato.

Se presentan en la Tabla 4.12 y la Figura 4.22 los estadísticos principales de nitrato en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad levemente mayor de datos en el periodo anterior a la publicación del decreto para las áreas MA-1; MA-4 y MA-5. En el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-6 solo se cuenta con pocos registros en el periodo anterior.

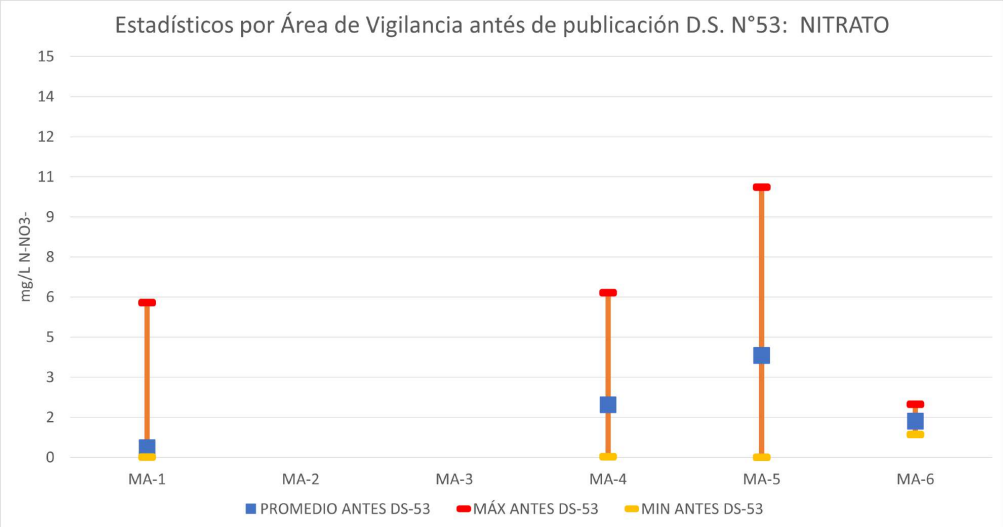
También se observa de los estadísticos, un aumento en el periodo posterior en el promedio de los valores para los datos disponibles de nitrato en las áreas aguas abajo que se tiene información de ambos periodos (MA-4 y MA-5).

Junto con lo anterior, en los estadísticos del periodo posterior se presenta una clara tendencia a aumentar la concentración promedio de nitrato aguas abajo de MA-1, donde a partir de MA-4 y MA-5 se tiene un aumento significante en las concentraciones.

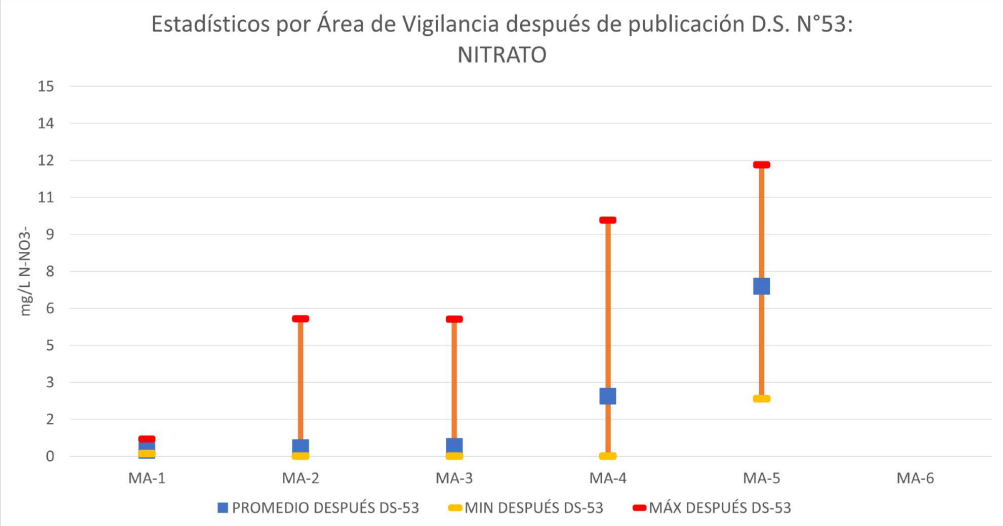
Tabla 4.12: Estadísticos Nitrato por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	74	64	0,36	0,25	5,79	0,70	0,01	0,11
MA-2	0	70	S/I	0,36	S/I	5,59	S/I	L/D = 0,01
MA-3	0	63	S/I	0,41	S/I	5,56	S/I	L/D = 0,01
MA-4	70	64	1,97	2,44	6,16	9,58	0,03	L/D = 0,01
MA-5	67	63	3,81	6,90	10,11	11,83	0,03	2,34
MA-6	6	0	1,35	S/I	1,99	S/I	0,86	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



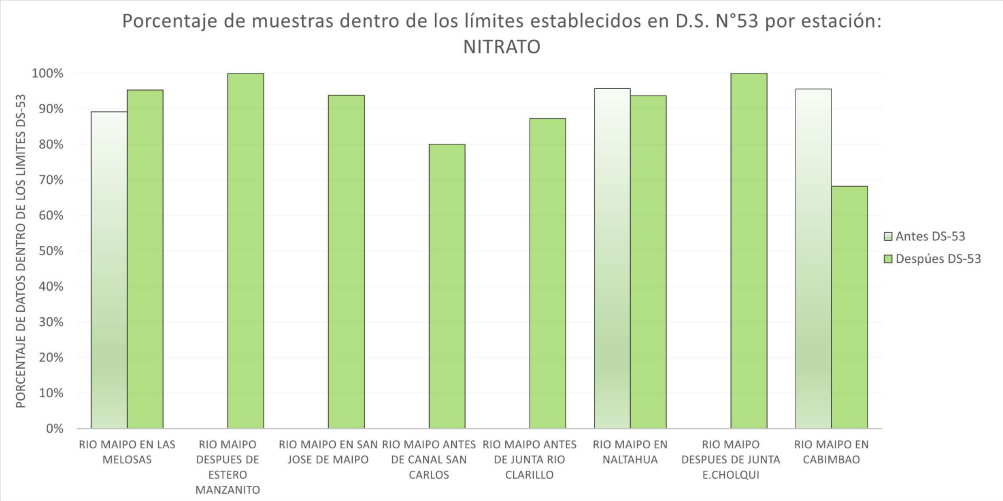
a Antes D.S. N°53.



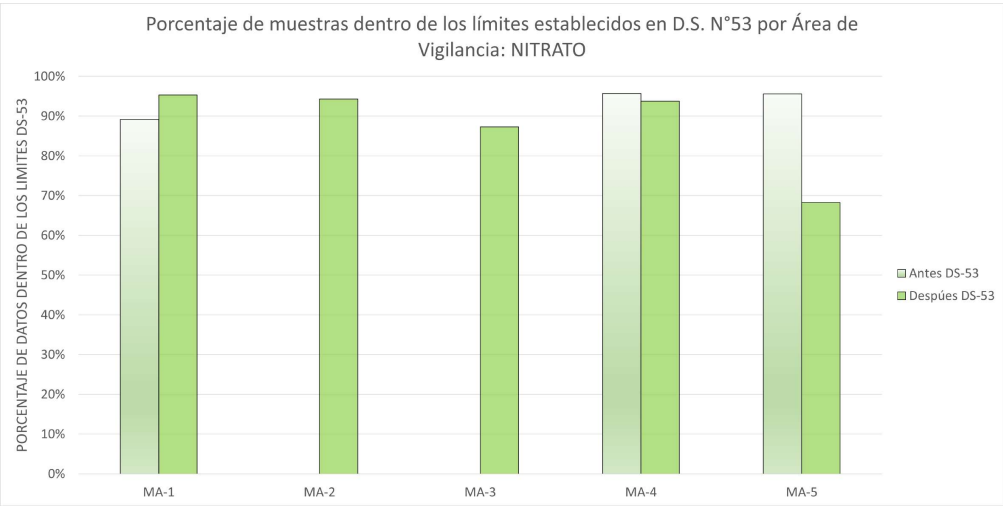
b Después D.S. N°53.

Figura 4.22: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Nitrato.

Se presenta en la Figura 4.23 los valores de los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en ambos periodos, donde se observa una disminución de los porcentajes para el periodo posterior en MA-4 y MA-5. También se observa una tendencia a disminuir el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1 hasta MA-3, para luego aumentar en MA-4 y disminuir nuevamente en MA-5. Se tienen porcentajes bajo el 80 % solo en MA-5.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.23: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Nitrato.

4.5.8. Ortofosfato

Se presenta en la Figura 4.24 la serie histórica de concentraciones de ortofosfato en las estaciones seleccionadas. Donde se observa una amplia cantidad de datos incluso antes de la publicación del D.S. N°53/2014. También se observa un aumento considerable en la densidad de datos posterior a la publicación.

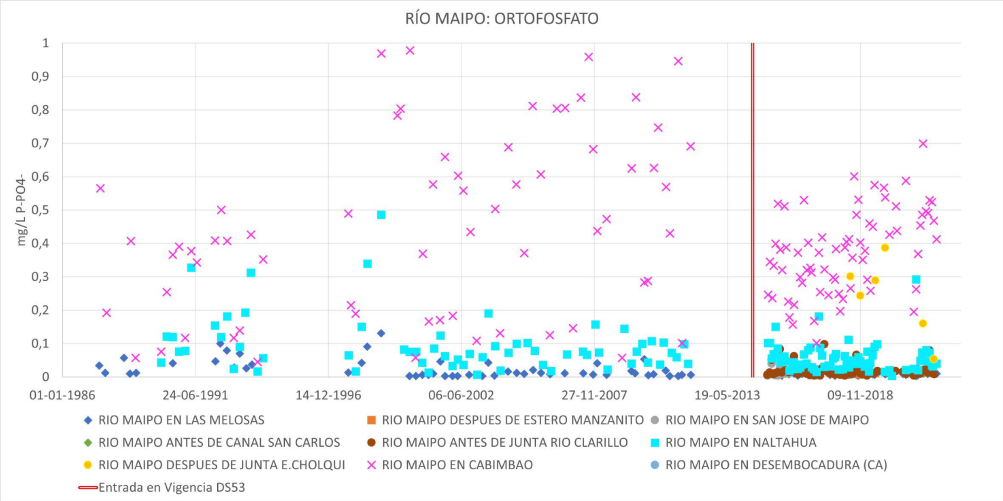


Figura 4.24: Serie de Concentración Histórica en Estaciones de Monitoreo río Maipo D.S. N°53: Ortofosfato.

Se presentan en la Tabla 4.13 y la Figura 4.25 los estadísticos principales de ortofosfato en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos se observa una cantidad similar de datos en ambos periodos para las áreas MA-1; MA-4 y MA-5. En el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el periodo anterior. Para MA-6 no se tienen registros en ambos periodos.

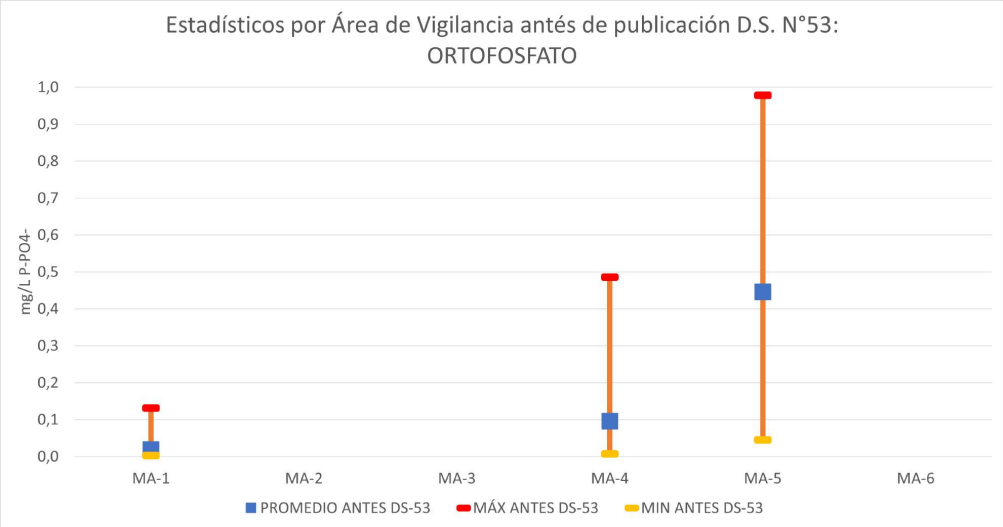
También se observa de los estadísticos, una disminución en los valores promedios y máximos de ortofosfato, de acuerdo a los datos disponibles en el periodo posterior en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-4 y MA-5).

Junto con lo anterior, se presenta en los estadísticos del periodo posterior un aumento continuo en los valores promedio de concentraciones de ortofosfato aguas abajo de MA-2, teniendo un aumento considerable en MA-5.

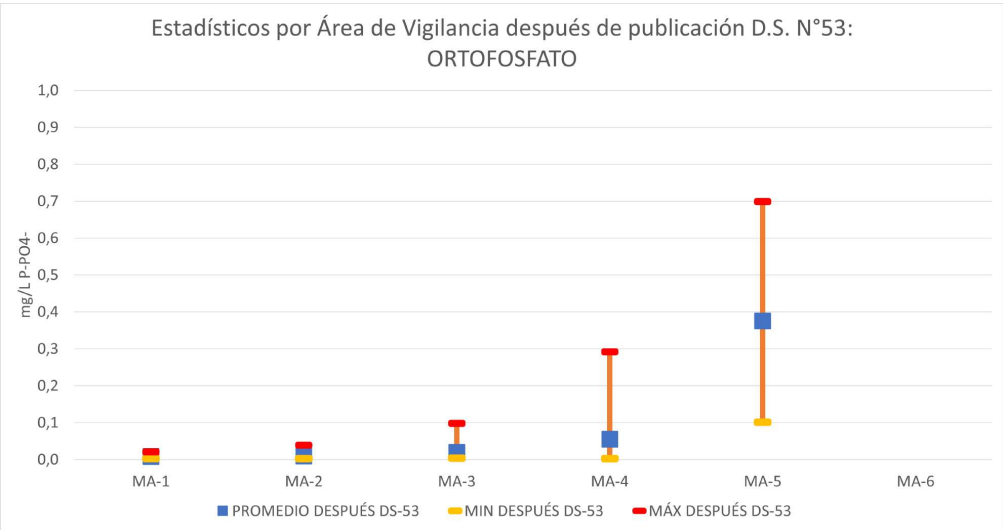
Tabla 4.13: Estadísticos Ortofosfato por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	70	63	0,02	0,01	0,13	0,02	L/D = 0,003	L/D = 0,003
MA-2	0	68	S/I	0,01	S/I	0,04	S/I	L/D = 0,003
MA-3	0	67	S/I	0,02	S/I	0,10	S/I	0,004
MA-4	61	69	0,10	0,06	0,49	0,29	0,007	L/D = 0,003
MA-5	65	69	0,45	0,38	0,98	0,70	0,045	0,101
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



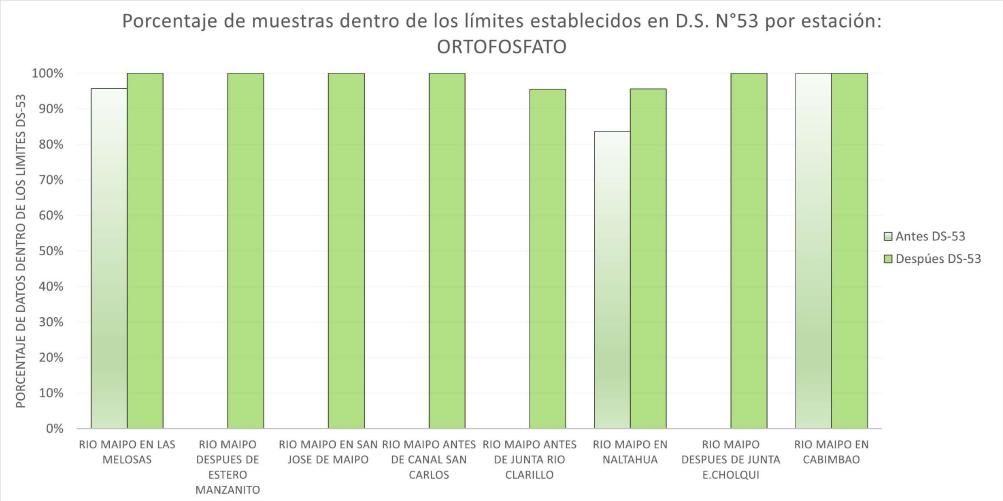
a Antes D.S. N°53.



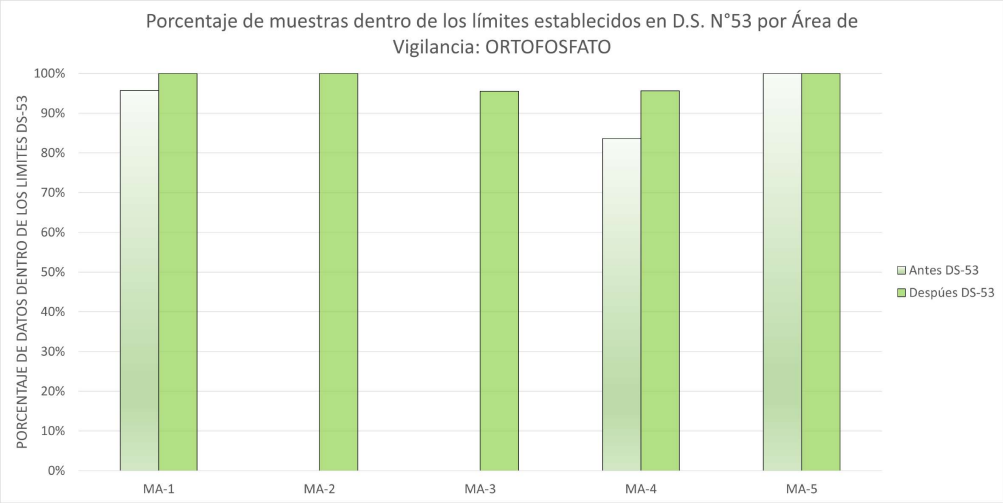
b Después D.S. N°53.

Figura 4.25: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Ortofosfato.

Se presenta en la Figura 4.26 los valores de los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en ambos periodos, donde se observa un aumento de los porcentajes para el periodo posterior, salvo en el caso de MA-3. También se observa una leve tendencia a disminuir el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-2, para luego aumentar aguas abajo de MA-4. No se tienen porcentajes bajo el 90 % para el periodo posterior.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.26: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Ortofosfato.

4.5.9. Plomo Disuelto

No se presenta la serie histórica de concentraciones de plomo disuelto en las estaciones seleccionadas debido a que se tienen mayormente concentraciones bajo los límites de detección de las metodologías empleadas para su medición.

Se presentan en la Tabla 4.14 y la Figura 4.27 los estadísticos principales de plomo disuelto en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos, se observa que no existe información en el periodo anterior a la publicación del D.S. N°53/2014. Solo existe información sobre concentraciones de plomo disuelto posterior a la publicación del decreto en el año 2015, por tanto no se pueden realizar comparaciones con el periodo anterior.

Se cuenta con una amplia cantidad de datos en el periodo posterior, salvo para el área de

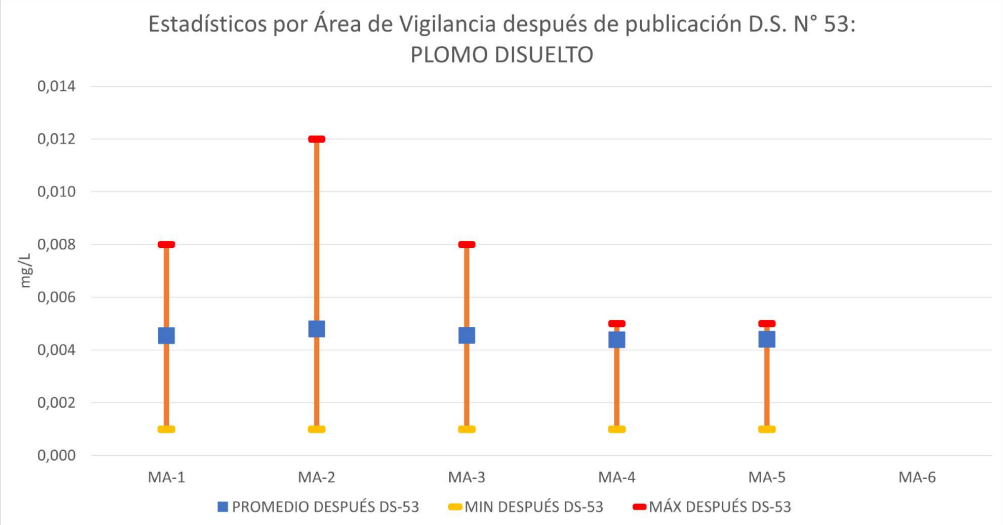
observación MA-6, donde no se cuenta con información.

Junto con lo anterior, no se presentan en el periodo posterior tendencias claras en los valores promedio de concentraciones de plomo disuelto aguas abajo, teniendo valores similares. Esto debido a que la mayoría de las concentraciones reales se encuentran bajo los límites de detección de las metodologías empleadas.

Tabla 4.14: Estadísticos Plomo Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	3	46	S/I	0,005	S/I	L/D = 0,008	S/I	L/D = 0,001
MA-2	5	51	S/I	0,005	S/I	L/D = 0,012	S/I	L/D = 0,001
MA-3	0	47	S/I	0,005	S/I	L/D = 0,008	S/I	L/D = 0,001
MA-4	4	46	S/I	0,004	S/I	L/D = 0,005	S/I	L/D = 0,001
MA-5	4	47	S/I	0,004	S/I	L/D = 0,005	S/I	L/D = 0,001
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

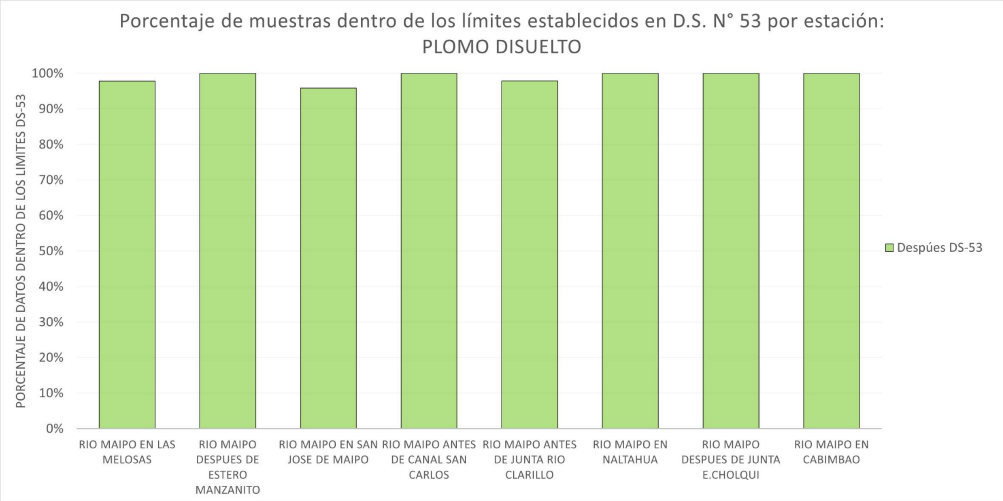


a Después D.S. N°53.

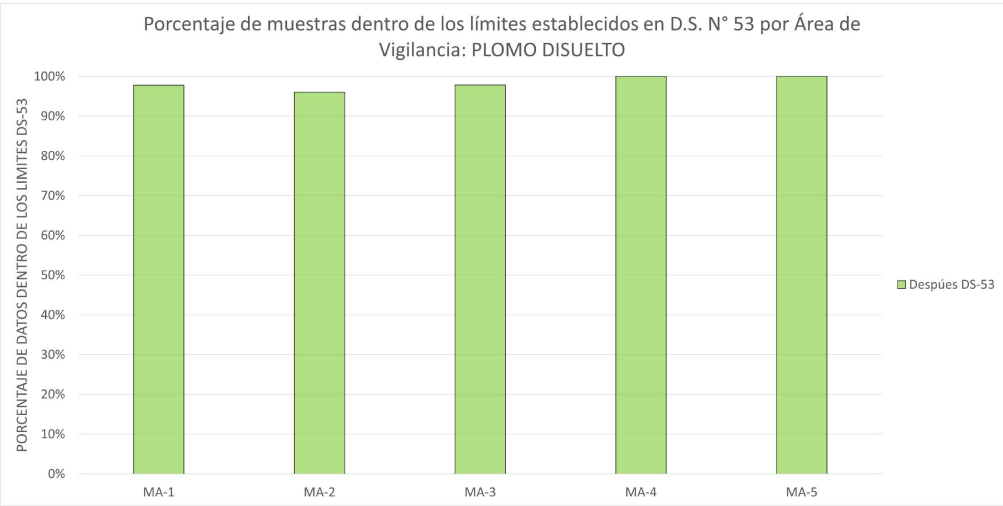
Figura 4.27: Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : Plomo Disuelto.

Se presenta en la Figura 4.28 los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos solo en el periodo posterior, ya que el periodo anterior no cuenta con información.

A partir de esta figura se observa una tendencia a disminuir el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1 hasta MA-2, para luego aumentar aguas abajo de MA-3 hasta MA-5. Se tienen porcentajes sobre el 90 % en todas las áreas.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.28: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Plomo Disuelto.

4.5.10. Níquel Disuelto

No se presenta la serie histórica de concentraciones de níquel disuelto en las estaciones seleccionadas debido a que se tienen mayormente concentraciones bajo los límites de detección de las metodologías empleadas para su medición.

Se presentan en la Tabla 4.15 y la Figura 4.29 los estadísticos principales de níquel disuelto en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos, se observa que no existe información en el periodo anterior a la publicación del D.S. N°53/2014. Solo existe información sobre concentraciones de níquel disuelto posterior a la publicación del decreto en el año 2015, por tanto no se pueden realizar comparaciones con el periodo anterior.

Se cuenta con una amplia cantidad de datos en el periodo posterior, salvo para el área de

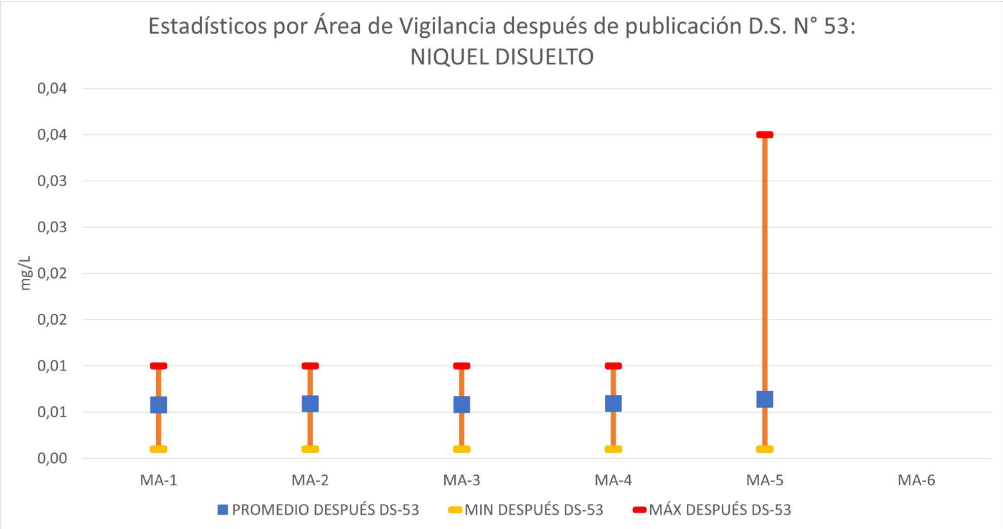
observación MA-6, donde no se cuenta con información.

Junto con lo anterior, no se presentan en el periodo posterior tendencias claras en las concentraciones promedio de níquel disuelto aguas abajo, teniendo valores similares. Esto debido a que la mayoría de las concentraciones reales se encuentran bajo los límites de detección de las metodologías empleadas.

Tabla 4.15: Estadísticos Níquel Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	3	52	S/I	0,01	S/I	L/D = 0,01	S/I	L/D = 0,001
MA-2	4	59	S/I	0,01	S/I	L/D = 0,01	S/I	L/D = 0,001
MA-3	0	54	S/I	0,01	S/I	L/D = 0,01	S/I	L/D = 0,001
MA-4	4	51	S/I	0,01	S/I	L/D = 0,01	S/I	L/D = 0,001
MA-5	4	53	S/I	0,01	S/I	0,04	S/I	L/D = 0,001
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

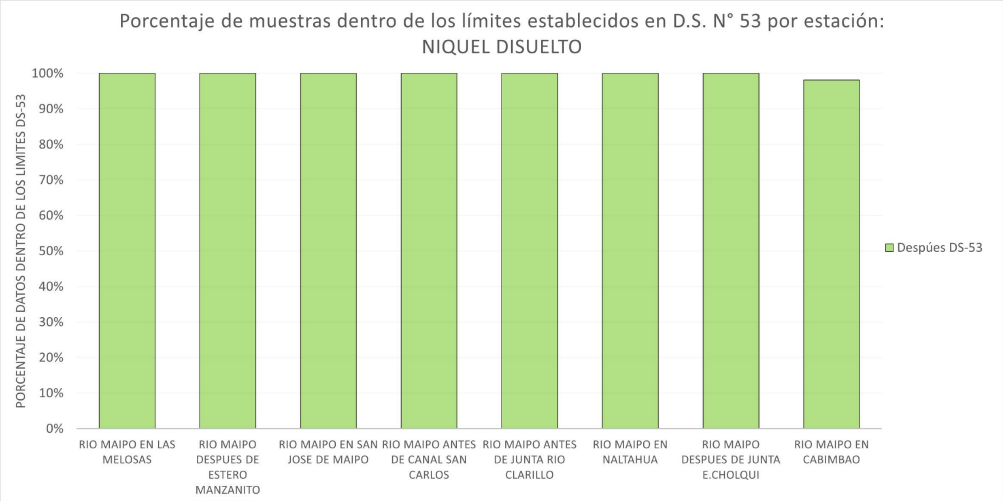


a Después D.S. N°53.

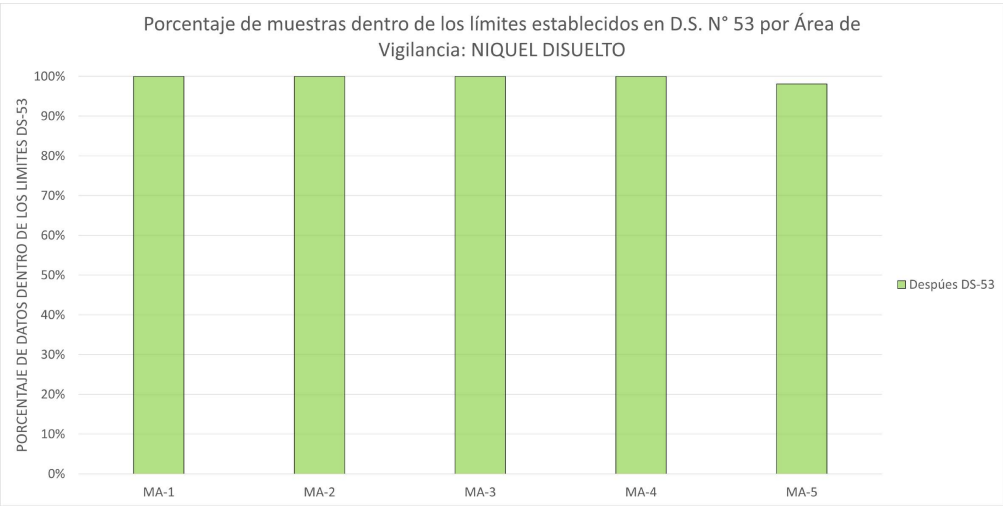
Figura 4.29: Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : Níquel Disuelto.

Se presenta en la Figura 4.30 los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos solo en el periodo posterior, ya que el periodo anterior no cuenta con información.

A partir de esta figura se observa una tendencia leve a disminuir el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1 hasta MA-5. Se tienen porcentajes sobre el 90 % en todas las áreas.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.30: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Níquel Disuelto.

4.5.11. Zinc Disuelto

No se presenta la serie histórica de concentraciones de zinc disuelto en las estaciones seleccionadas debido a que se tienen mayormente concentraciones bajo los límites de detección de las metodologías empleadas para su medición.

Se presentan en la Tabla 4.16 y la Figura 4.31 los estadísticos principales de zinc disuelto en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos, se observa que no existe información en el periodo anterior a la publicación del D.S. N°53/2014. Solo existe información sobre concentraciones de zinc disuelto posterior a la publicación del decreto en el año 2015, por tanto no se pueden realizar comparaciones con el periodo anterior.

Se cuenta con una amplia cantidad de datos en el periodo posterior, salvo para el área de

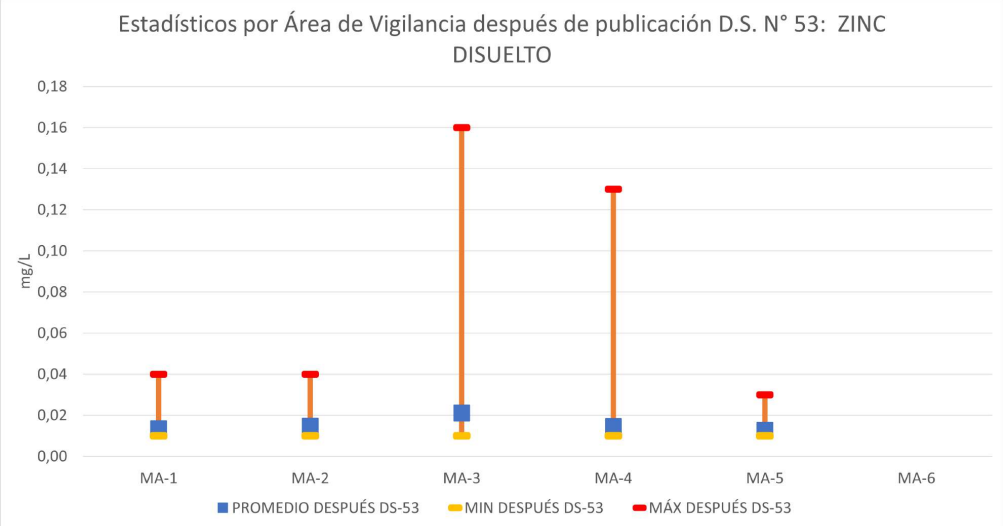
observación MA-6, donde no se cuenta con información.

Junto con lo anterior, se presenta en los estadísticos del periodo posterior un leve aumento de los valores promedio de concentración de zinc disuelto aguas abajo de MA-1 hasta MA-3, para luego disminuir aguas abajo hasta MA-5, aun así los valores no poseen grandes variaciones y se mantienen casi estables. Esto debido a que la mayoría de las concentraciones reales se encuentran bajo los límites de detección de las metodologías empleadas.

Tabla 4.16: Estadísticos Zinc Disuelto por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	0	63	S/I	0,01	S/I	0,04	S/I	L/D = 0,01
MA-2	0	70	S/I	0,01	S/I	0,04	S/I	L/D = 0,01
MA-3	0	63	S/I	0,02	S/I	0,16	S/I	L/D = 0,01
MA-4	0	65	S/I	0,01	S/I	0,13	S/I	L/D = 0,01
MA-5	0	64	S/I	0,01	S/I	0,03	S/I	L/D = 0,01
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

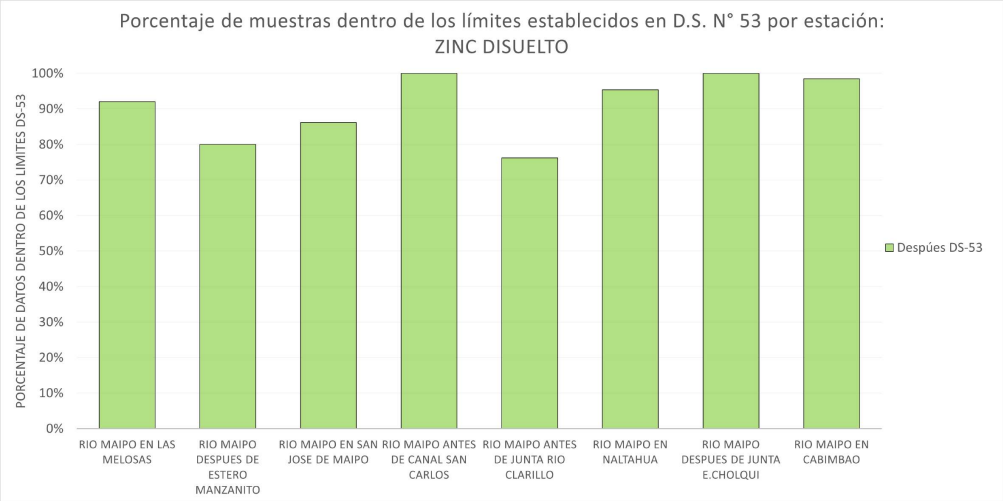


a Después D.S. N°53.

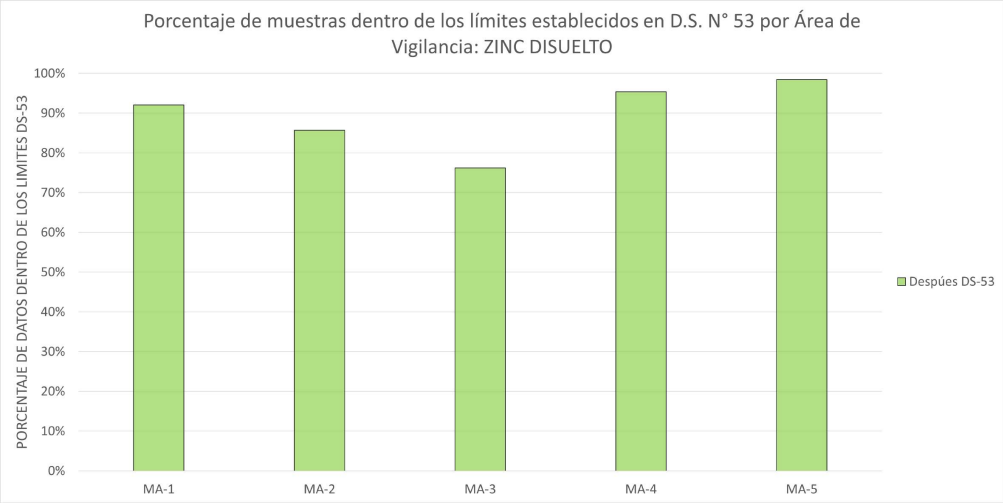
Figura 4.31: Estadísticos Áreas de Vigilancia Después Publicación D.S. N°53 : Zinc Disuelto.

Se presenta en la Figura 4.32 los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos solo en el periodo posterior, ya que el periodo anterior no cuenta con información.

A partir de esta figura se observa una tendencia a disminuir el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-1 hasta MA-3, para luego aumentar aguas abajo hasta MA-5. Se tienen porcentajes bajo el 80 % solo en MA-3 con un 76 %.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.32: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Zinc Disuelto.

4.5.12. Cromo Total

No se presenta la serie histórica de concentraciones de cromo total en las estaciones seleccionadas debido a que se tienen mayormente concentraciones bajo los límites de detección de las metodologías empleadas para su medición.

Se presentan en la Tabla 4.17 y la Figura 4.33 los estadísticos principales de cromo total en las 6 áreas de vigilancia. A partir de estos, se observa que se tiene poca información en el periodo anterior a la publicación del D.S. N°53/2014, donde los registros son recientes y comenzaron en el año 2011. Se tiene mayor información y densidad de datos en el periodo posterior a la publicación del decreto.

De estos se observa que en el caso de MA-2 y MA-3 no se cuenta con información para el

periodo anterior. Para MA-6 no se cuenta con registros en ambos periodos.

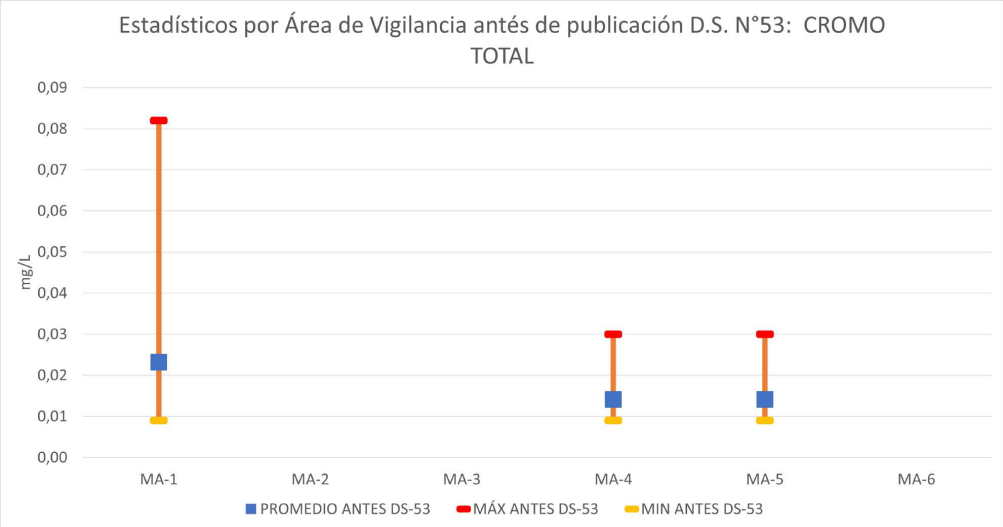
También se observa de los estadísticos, una disminución en el periodo posterior en el promedio de datos disponibles de cromo total en las áreas que se tiene información de ambos periodos (MA-1; MA-4 y MA-5).

Junto con lo anterior, no se presentan en el periodo posterior tendencias claras en los valores promedio de concentraciones de cromo total aguas abajo, teniendo valores similares. Esto debido a que la mayoría de las concentraciones reales se encuentran bajo los límites de detección de las metodologías empleadas.

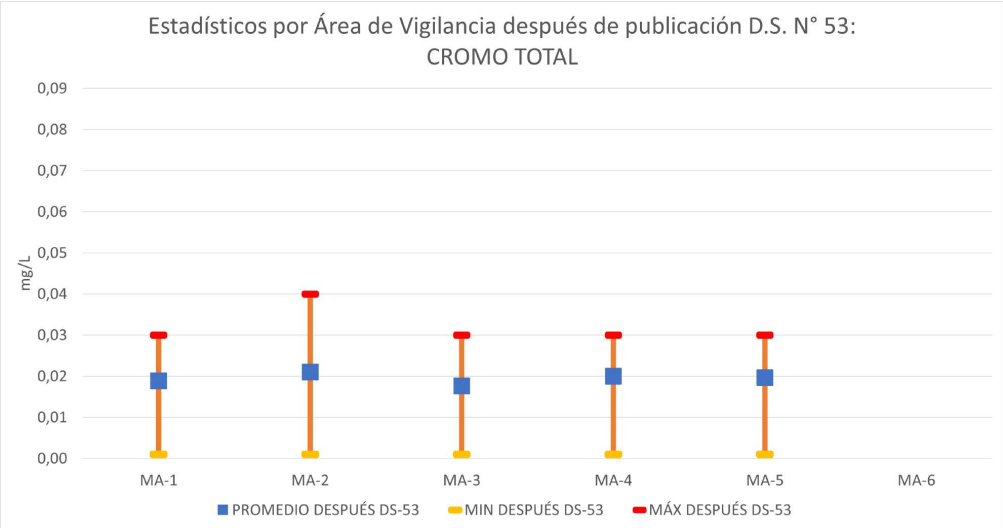
Tabla 4.17: Estadísticos Cromo Total por área de vigilancia, antes y después publicación D.S. N°53.

ÁREA	TOTAL DATOS		PROMEDIO [mg/l]		MÁXIMO [mg/l]		MÍNIMO [mg/l]	
	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
MA-1	9	58	0,02	0,02	0,08	L/D = 0,03	L/D = 0,009	L/D = 0,001
MA-2	0	60	S/I	0,02	S/I	L/D = 0,04	S/I	L/D = 0,001
MA-3	0	60	S/I	0,02	S/I	L/D = 0,03	S/I	L/D = 0,001
MA-4	9	53	0,01	0,02	L/D = 0,03	L/D = 0,03	L/D = 0,009	L/D = 0,001
MA-5	9	54	0,01	0,02	L/D = 0,03	L/D = 0,03	L/D = 0,009	L/D = 0,001
MA-6	0	0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.



a Antes D.S. N°53.

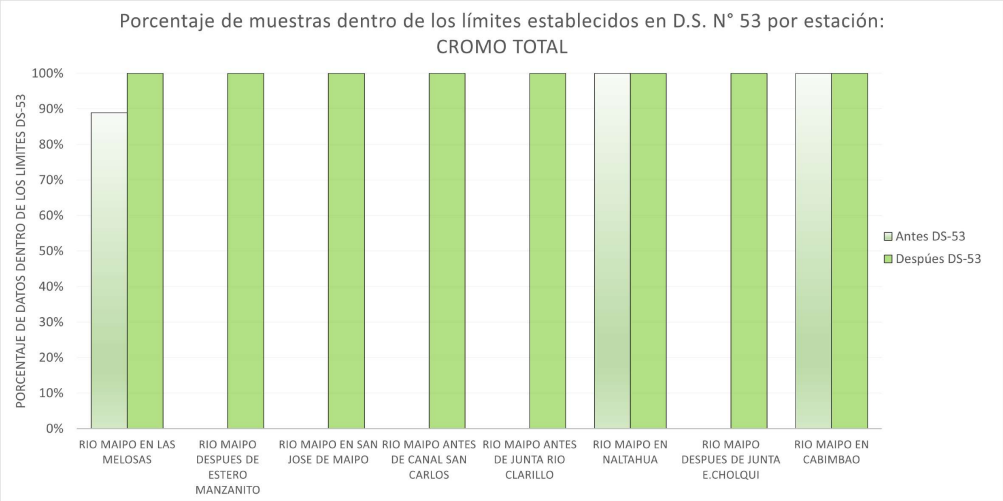


b Después D.S. N°53.

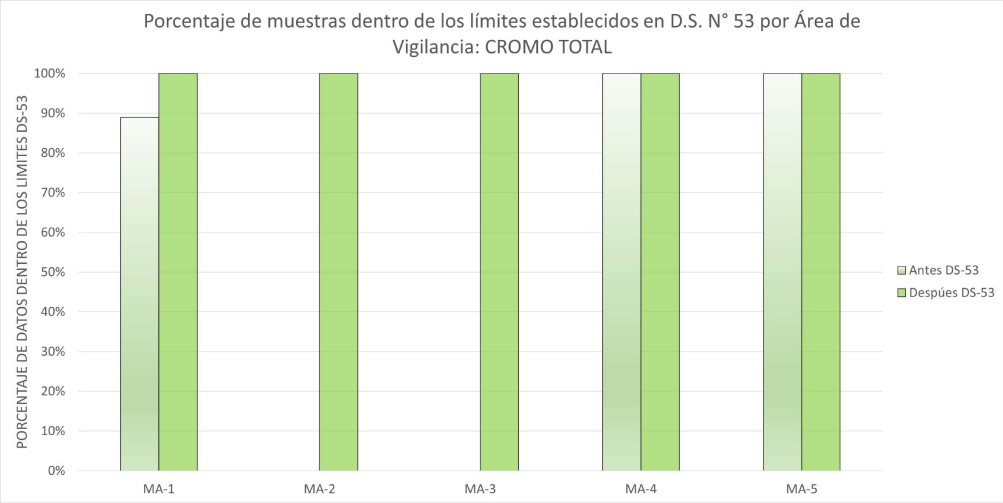
Figura 4.33: Estadísticos Áreas de Vigilancia Antes y Después Publicación D.S. N°53 : Cromo Total.

Se presenta en la Figura 4.34 los porcentajes de muestra dentro de los límites establecidos solo en el periodo posterior, ya que el periodo anterior no cuenta con información.

A partir de esta figura se observa un aumento del porcentaje para el periodo posterior, salvo en el caso de MA-3. También se observa una tendencia a disminuir levemente el porcentaje de muestras dentro de los límites aguas abajo de MA-3. Se tienen porcentajes sobre el 90 % en todas las áreas.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 4.34: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en D.S. N°53: Cromo Total.

4.6. Comentarios

Sobre los contaminantes regulados en la NSCA río Maipo, se observa que esta establece distintos niveles de calidad para diferentes parámetros dependiendo del área de vigilancia. En el caso del cauce principal del Maipo y a pesar de contener 6 áreas de vigilancia, no se establecen niveles de calidad para el caso del área MA-6, esto debido a que no se considera dentro de la red de control. Aun así, sería recomendable establecer esta área dentro de la red de control debido a su importancia como tramo final del cauce. Además, podría proporcionar información valiosa sobre concentraciones y valores de parámetros contaminantes en un área que contiene escasa información y donde desembocan todos los cauces de la cuenca, y por ende podría bien recibir la contaminación de todos los afluentes de la cuenca, en una zona donde se utiliza el agua para consumo de agua potable y riego y donde existe un importante humedal (Humedal Río Maipo).

También se observa que la exigencia de algunos parámetros como la conductividad eléctrica, cloruro y sulfato aumenta aguas abajo de MA-3, mientras que para el caso del nitrato y ortofosfato disminuye. Los primeros, son parámetros que tienen concentraciones significativas en las aguas naturales del río, tienen efectos organolépticos sobre la calidad del agua potable y podrían reducir el rendimiento en los cultivos. Los segundos son contaminantes cuya presencia en el río esta más asociada a la contaminación antropogénica, producto por ejemplo de la contaminación difusa generada por la industria agrícola en el caso del nitrato y que igualmente pueden generar efectos negativos en la salud de las personas.

Lo anterior coincide con el hecho de que a partir del área MA-3 el cauce principal del Maipo comienza a verse influenciado por la zona urbana del Gran Santiago y por el comienzo de la zona de riego, tal como se muestra en la Figura 4.35. Donde las marcas verdes indican las estaciones representativas de las áreas de vigilancia, las marcas amarillas las dos mayores PTAS de la cuenca y en lineas punteadas el inicio de las áreas de influencia del Gran Santiago y de cultivo.

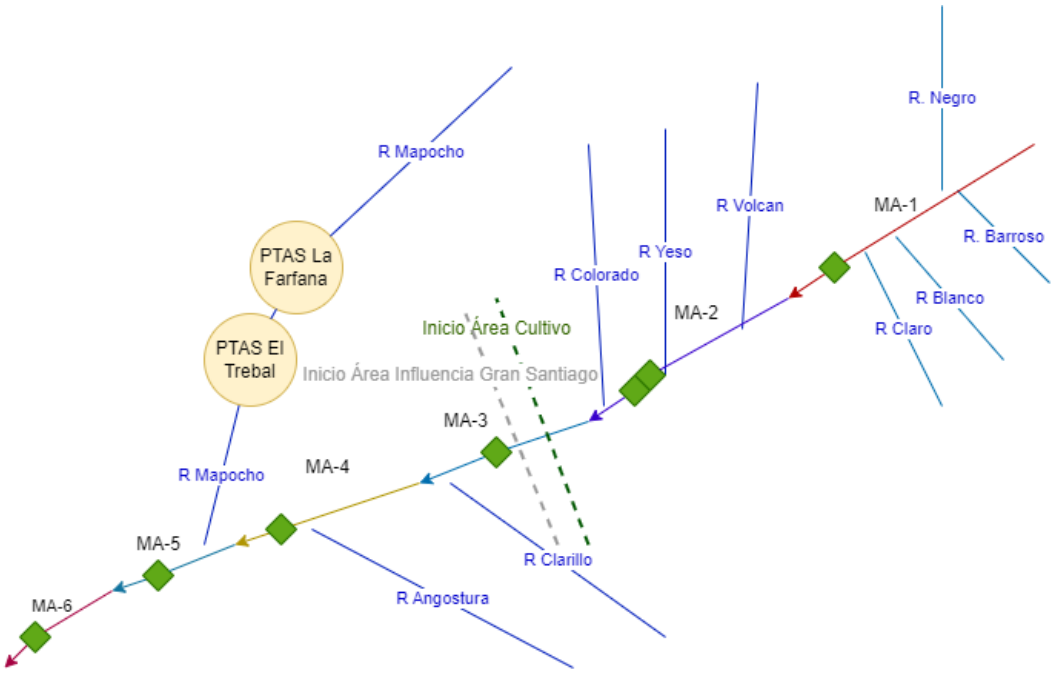


Figura 4.35: Diagrama Unifilar Río Maipo.

Otro punto a considerar, es el aumento en la densidad de muestras para todos los parámetros y contaminantes de control establecidos en la NSCA a partir de su publicación el año 2014, lo cual demuestra la mejora en la calidad y disponibilidad de información posterior a la publicación de la norma y su programa de vigilancia que aumenta la representatividad de las muestras. Sumado a esto, se incluyeron en el muestreo parámetros de los cuales no se poseía información en el periodo anterior a la publicación del decreto, como el caso de la demanda biológica de oxígeno, plomo, níquel y zinc disuelto.

Comparando las concentraciones y valores promedio del periodo anterior y posterior, se

observa una tendencia a aumentar en parámetros como la conductividad eléctrica, pH, cloruro, sulfato, nitrato y ortofosfato y una disminución para el caso del oxigeno disuelto. Esta tendencia podría reflejar un empeoramiento en la calidad del agua vinculado a la disminución de los caudales naturales de los cauces producto de la sequía y la mantención o incluso aumento de las descargas de residuos líquidos y otros contaminantes.

Se observa también un aumento en las concentraciones de cromo total para el periodo posterior en todas las áreas con información en ambos periodos y una disminución de ortofosfato en el área MA-1. Esto se debe más probablemente a un aumento en la precisión de la metodología y los instrumentos utilizados para la medición, que a un aumento de la concentración real de estos contaminantes.

Se observan tendencias claras de aumento o disminución de valores promedio aguas abajo de MA-1 en pocos casos. En el caso del oxígeno disuelto se observa una disminución continua aguas abajo de MA-2, en el caso del cloruro se observa una tendencia a disminuir hasta MA-4 y en el caso del ortofosfato y nitrato que aumentan sus concentraciones promedio notoriamente aguas abajo de MA-3, ambos compuestos utilizados en la agricultura por lo tanto podría evidenciar la contaminación agrícola difusa producida a partir del área MA-3.

Por otro lado, se observan tendencias a aumentar los valores y concentraciones promedio aguas abajo de MA-4 para los casos de la conductividad eléctrica, cloruro, sulfato y DBO5 y notoriamente para el nitrato y ortofosfato. Esto podría estar vinculado a la desembocadura del río Mapocho en MA-5, uno de los principales afluentes que pasa por la ciudad de Santiago y en el cual se descargan las aguas tratadas en las plantas de tratamiento de aguas servidas con mayor volumen de operación de la cuenca, La Farfana y el Trebal.

Por tanto, el cauce del Mapocho podría aportar en el aumento de la concentración de contaminantes al cauce principal del Maipo a partir del área MA-5, a pesar de tener un menor caudal que el del río Maipo. Se requiere un análisis de contaminación en el cauce principal del Mapocho para determinar niveles de contaminación y observar si las descargas de las PTAS aportan sustancialmente en esta, aunque los resultados físico-químicos presentados en el Anexo J del Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maipo podrían indicar un aporte de las descargas de PTAS en la contaminación (ICASS S.P.A., 2021). En este informe se observa un empeoramiento en la calidad de agua aguas abajo del Mapocho, especialmente en la estación Río Mapocho en El Monteaguas que se encuentra aguas abajo de las descargas de PTAS, con un aumento en los valores promedio de parámetros como la conductividad eléctrica y sulfato.

La mayoría de los parámetros tienen porcentajes altos de muestras dentro de los límites (sobre el 70 %). No obstante, se observa que existen parámetros con porcentajes bajos de muestras dentro de los límites establecidos en la NSCA. Como el caso del oxígeno disuelto en el área MA-4 con un porcentaje de 59 %; la conductividad eléctrica en MA-5 con 50 %; el nitrato con 68 % en MA-5; el sulfato con porcentajes de 53 % y 66 % en MA-2 y MA-3 respectivamente; y el cloruro que cuenta con 4 áreas con porcentajes bajo el 70 % y con porcentajes en MA-2 y MA-5 de 47 % y 36 % respectivamente.

Capítulo 5

Usos del Agua y Marco Regulatorio

En el presente capítulo se presentan los principales usos de las aguas superficiales del río Maipo, junto a la normativa asociada a cada uno de estos. Posteriormente se presentan los resultados de un análisis sobre diferentes parámetros y contaminantes seleccionados, incluidos en una o varias de estas normativas. Este incluye los límites establecidos en las normativas para cada parámetro o contaminantes seleccionado junto a los estadísticos de las concentraciones o valores como máximos, mínimos y promedios. También, se incluyen los porcentajes de muestras que se encuentran dentro de estos límites para un periodo aproximado de 30 años (1990-2022).

5.1. Uso Agua Potable

En la cuenca del río Maipo, existen varias plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) operadas por diferentes compañías, dentro de las cuales destacan sanitarias como el grupo Aguas Andinas, Cordillera y Manquehue en la región Metropolitana encargadas del suministro y producción de agua potable de gran parte del Gran Santiago y ESVAL en la región de Valparaíso. También se encuentran en la cuenca diferentes operadores privados menores y pequeñas plantas de Agua Potable Rural (APR). En la Figura 5.1 se presentan las diferentes plantas de agua potable y APR presentes en la cuenca y en la Tabla 5.1 se presenta mayor información sobre las PTAP en la cuenca del Maipo.

Tabla 5.1: Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo.

Empresa	Sistema	Nombre Obra	UTM E [m]	UTM N [m]	Caudal [l/s]	Fuente	Parámetro Removidos	Tecnología
COOPAGUA	COOPAGUA	Santo Domingo	257.862	6.274.802	200	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
ESVAL S.A	LITORAL SUR	San Juan	260.536	6.274.181	1.050	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
ALBERTO PLANELLA ORTIZ.	SANTA ROSA DEL PERAL	Principal	355.742	6.285.070	20	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS MANQUEHUE S.A.	ALTO LAMPA	Alto Lampa	338.657	6.315.375	50	Subterránea	Arsénico	Adsorción

Tabla 5.1: Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo.

Empresa	Sistema	Nombre Obra	UTM E [m]	UTM N [m]	Caudal [l/s]	Fuente	Parámetros Removidos	Tecnología
AGUAS MANQUEHUE S.A.	CIUDAD DE CHICUREO	Lo Pinto	340.147	6.313.242	120	Subterránea	Arsénico	Adsorción
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	Arrayán	363.721	6.310.494	190	Superficial Estero el Arrayán	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS ANDINAS S.A.	EL CANELO - LAS VERTIENTES - LA OBRA	El Canelo	364.782	6.283.696	90	Superficial Estero El Canelo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS MANQUEHUE S.A.	LOTEO EL CHAMISERO	Chamisero	344.812	6.313.968	500	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS ANDINAS S.A.	GRAN SANTIAGO	Complejo Vizcachas	357.266	6.281.736	17.000	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	El Sendero	359.236	6.304.749	250	Superficial Río Mapocho	Turbiedad, Fe, Mn	Presedimentación, Oxidación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	La Dehesa	357.750	6.311.186	350	Superficial Esteros Hualtatas y Arrayán	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS ANDINAS S.A.	GRAN SANTIAGO	La Florida	356.305	6.287.325	4.000	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Flocodecantación, Filtración
SACYR AGUA CHACABUCO.	COLINA-ESMERALDA	Colina Lo Seco	342.982	6.326.233	93	Subterránea	Arsénico	Adsorción
SACYR AGUA CHACABUCO.	COLINA-ESMERALDA	Colina Esmeralda	345.984	6.327.783	41	Subterránea	Arsénico	Adsorción
SACYR AGUA CHACABUCO.	COLINA-ESMERALDA	Colina Aconcagua	344.060	6.325.580	90	Subterránea	Arsénico	Adsorción
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	Lo Gallo	356.583	6.305.658	800	Superficial Río Mapocho	Turbiedad, Fe, Mn	Oxidación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	Montecasino	359.236	6.304.749	180	Superficial Río Mapocho	Turbiedad, Fe, Mn	Presedimentación, Oxidación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	Padre Hurtado	356.873	6.299.773	1.300	Superficial Río Maipo	Turbiedad	Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS MANQUEHUE S.A.	LOS TRAPENSES	Punta de Águila	355.866	6.311.105	300	Superficial Estero Hualtatas y Río Mapocho	Turbiedad	Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
EMPRESA PARTICULAR DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO LA LEONERA S.A	LA LEONERA	Filtros	380.161	6.310.725	8,33	Superficial	Sin Información	Filtración

Tabla 5.1: Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo.

Empresa	Sistema	Nombre Obra	UTM E [m]	UTM N [m]	Caudal [l/s]	Fuente	Parámetros Removidos	Tecnología
EMPRESA DE AGUA POTABLE EL COLORADO S.A.	EL COLORADO	Planta AP	379.678	6.309.263	15	Superficial	Sin Información	Filtración
E.S.S.A.	LOTEO INDUSTRIAL	Calle Uno	340.899	6.309.826	30	Subterránea	Sin Información	Filtración
E.S.S.A.	LOTEO INDUSTRIAL	Galvarino	341.344	6.310.516	20	Subterránea	Sin Información	Filtración
E.S.S.A.	LOTEO INDUSTRIAL	C San Cristobal	335.659	6.311.619	20	Subterránea	Sin Información	Filtración
E.S.S.A.	LOTEO INDUSTRIAL	C Los Condores	336064	6.310.945	25	Subterránea	Sin Información	Filtración
E.S.S.A.	LOTEO INDUSTRIAL	Las Esteras	339.742	6.309.365	40	Subterránea	Sin Información	Filtración
E.S.S.A.	LOTEO INDUSTRIAL	El Juncal	339.215	6.310.326	30	Subterránea	Sin Información	Filtración
AGUAS ANDINAS S.A.	GRAN SANTIAGO	Quebrada de Ramon	359.592	6.299.645	543	Superficial Quebrada de Ramon	Turbiedad	Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS ANDINAS S.A.	GRAN SANTIAGO	Quilicura	335.543	6.307.524	250	Subterránea	Arsénico	Oxidación, coagulación, filtración, adsorción
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	San Antonio	359.372	6.306.952	500	Subterránea	Arsénico	Oxidación, coagulación, filtración, adsorción
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	San Enrique	362.036	6.307.340	500	Superficial Río Mapocho	Turbiedad, Fe, Mn	Oxidación, Coagulación, Flocodecantación, Filtración
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	Vitacura	356.610	6.305.459	200	Superficial Río Mapocho	Turbiedad, Fe, Mn	Oxidación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración
AGUAS ANDINAS S.A.	POMAIRE	Pomaire	300.211	6.272.833	9	Subterránea	Nitratos	Ósmosis Inversa
AGUAS CORDILLERA S.A.	AGUAS CORDILLERA	Pretratamiento Predecantadores	357.059	6.305.698	1.200	Superficial Río Mapocho	Turbiedad	Presedimentación
EMPRESA DE AGUA POTABLE IZARRA DE LO AGUIRRE S.A.	IZARRA DE LO AGUIRRE	Planta Abatimiento Nitrato (PAN01)	327.267	6.297.401	19	Subterránea	Nitratos	Intercambio Iónico
BCC S.A.	LOTEO SANTO TOMAS	PFAS1	333.061	6.309.627	90	Subterránea	Arsénico	Adsorción
BCC S.A.	LOTEO SANTO TOMAS	PFAS2	333.061	6.309.627	60	Subterránea	Arsénico	Adsorción
SACYR AGUA SANTIAGO.	LO BARNECHEA	Tratamiento Arsénico Lo Barnechea	359.414	6.311.771	130	Subterránea	Arsénico	Adsorción
SACYR AGUA SANTIAGO.	VALLE ESCONDIDO	Tratamiento Arsénico Valle Escondido	361.609	6.310.112	31	Subterránea	Arsénico	Adsorción
SACYR AGUA SANTIAGO.	PAN DE AZÚCAR SECTORES B1-C-D	Tratamiento Arsénico Valle Alegre	342.734	6.313.580	10	Subterránea	Arsénico	Adsorción

Tabla 5.1: Plantas de Tratamiento de Agua Potable Cuenca del río Maipo.

Empresa	Sistema	Nombre Obra	UTM E [m]	UTM N [m]	Caudal [l/s]	Fuente	Parámetros Removidos	Tecnología
AGUAS ANDINAS S.A.	SAN GABRIEL	Sistemas de Filtración Pozos San Gabriel 1 y 2	384.941	6.261.327	10	Subterránea	Turbiedad	Filtración

Fuente: Elaboración propia a partir de datos S.I.S.S. (2022).

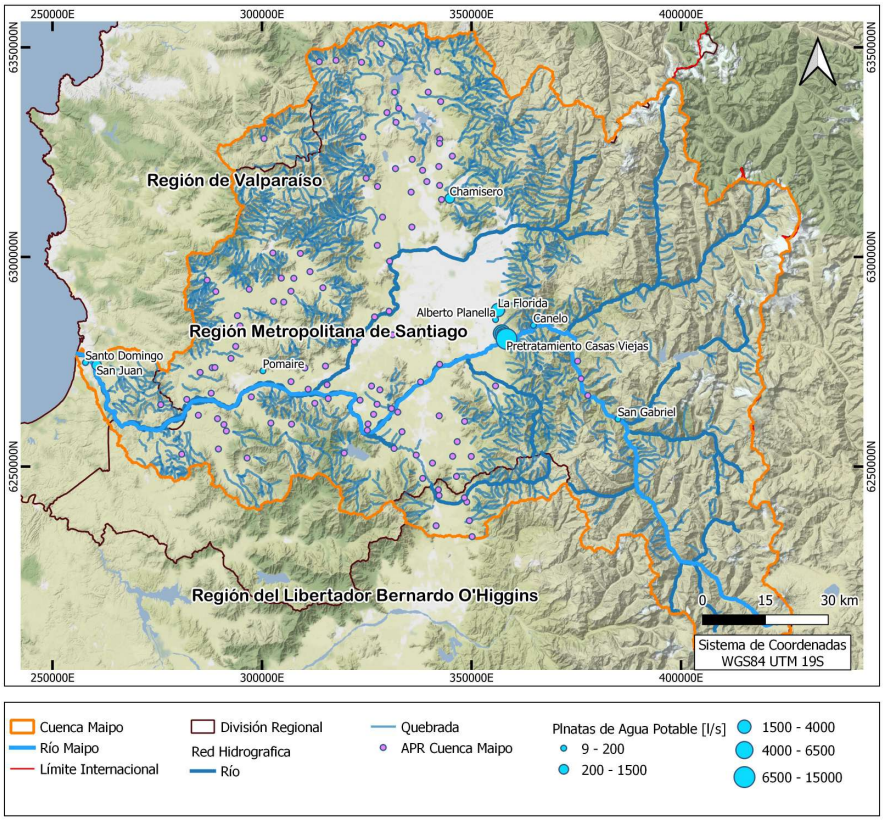


Figura 5.1: Plantas de Agua Potable y Agua Potable Rural (APR) Cuenca Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos S.I.S.S. (2022).

Las principales PTAP extraen el agua de fuentes superficiales como el río Maipo y el río Mapocho. También se tienen pequeñas plantas con fuentes subterráneas principalmente en el sector Norte y Oriente de Santiago y en localidades de la región Metropolitana.

Se presenta en la Figura 5.2, las PTAP cuya fuente de abastecimiento es directamente el río Maipo e indirectamente a través del canal San Carlos como en el caso de la Planta La Florida y el canal Batuco para la Planta Chamisero.

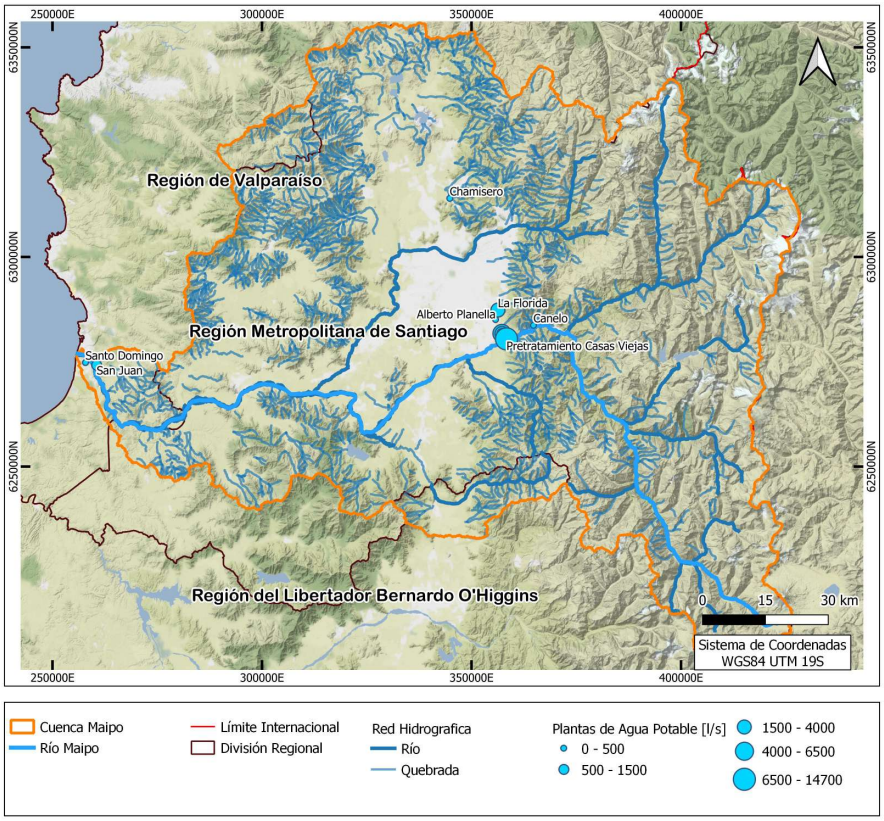


Figura 5.2: Plantas de Agua Potable cuya fuente es el Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos S.I.S.S. (2022).

En Chile, la normativa vinculada al uso de agua potable es la NCh 409, que establece parámetros de calidad con los que que debe cumplir el agua potable. Esta se presenta a continuación.

5.1.1. NCh 409: Agua Potable

La norma NCh 409 ha sido preparada por la División de Normas del Instituto Nacional de Normalización (INN) en base a un anteproyecto preparado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios. En su redacción participaron diferentes organismos y actores vinculados al tema. Esta norma inicialmente fue declarada oficial por Decreto N°11, con fecha 16 de enero de 1984, del Ministerio de Salud Pública. Fue modificada y reemplazada el 26 de julio de 2005 y declarada oficial por Decreto Exento N°446, con fecha 16 de junio de 2006, del Ministerio de Salud (INN, 2006).

Esta establece los parámetros de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional. Estos parámetros se han dividido en 5 categorías: Parámetros microbiológicos y de turbiedad; Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud; Elementos radiactivos; Parámetros relativos a las características organolépticas; y Parámetros de desinfección (INN, 2006). A continuación se presentan con mayor detalle estas categorías:

- Parámetros microbiológicos y de turbiedad:
  En esta categoría se establecen criterios como concentraciones permisibles de coliformes

totales, ausencia de Escherichia coli y turbiedad.

- Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud:
  En esta categoría se establecen límites máximos de concentraciones de diferentes sustancias químicas que puedan tener efectos nocivos en al salud (Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6).

Tabla 5.2: Tabla 1 NCh 409: Elementos esenciales.

Elemento	Expresado como elementos totales	Límite Máximo [mg/L]
Cobre	Cu	2
Cromo Total	Cr	0,05
Fluoruro	F^-	1,5
Hierro	Fe	0,3
Manganeso	Mn	0,1
Magnesio	Mg	125
Selenio	Se	0,01
Zinc	Zn	3

Fuente: NCh 409/1, INN (2006).

Tabla 5.3: Tabla 2 NCh 409: Elementos o sustancias no esenciales.

Elemento o Sustancia	Expresado como elementos o sustancias totales elementos totales	Límite Máximo [mg/L]
Arsenico	As	0,01
Cadmio	Cd	0,01
Cianuro	CN^-	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Nitrato	NO_3^-	50
Nitrito	NO_2^-	3
Razón Nitrato + nitrito		1
Plomo	Pb	0,05

Fuente: NCh 409/1, INN (2006).

Tabla 5.4: Tabla 3 NCh 409: Sustancias orgánicas.

Sustancia	Límite Máximo [μg/L]
Tetracloroeteno	40
Benceno	10
Tolueno	700
Xilenos	500

Fuente: NCh 409/1, INN (2006).

Tabla 5.5: Tabla 4 NCh 409: Plaguicidas.

Plaguicida	Límite Máximo [μg/L]
DDT + DDD + DDE	2
2,4 - D	30
Lindano	2
Metoxicloro	20
Pentaclorofenol	9

Fuente: NCh 409/1, INN (2005).

Tabla 5.6: Tabla 5 NCh 409: Productos secundarios de la desinfección.

Producto	Límite Máximo [mg/L]
Monocloroamina	3
Dibromoclorometano	0,1
Bromodiclorometano	0,06
Tribromometano	0,1
Triclorometano	0,2
Trihalometanos	1

Fuente: NCh 409/1, INN (2006).

- Elementos radiactivos:
  En esta categoría se establecen límites máximos permisibles para elementos radiactivos (Tabla 5.7).

Tabla 5.7: Tabla 6 NCh 409: Límites máximos para elementos radiactivos.

Elemento	Limite Máximo [Bq/L]
Estroncio 90	0,37
Radio 226	0,11
Actividad base total (Excluyendo Sr-90, Ra-226 y otros emisores alfa)	37
Actividad beta total (Incluyendo Sr-90, corregida para el K-40 y otros radioemisores naturales)	1,9
Actividad alfa total (Incluyendo Ra-226 y otros emisores alfa)	0,55

Fuente: NCh 409/1, INN (2006).

- Parámetros relativos a las características organolépticas:
  En esta categoría se establecen parámetros físicos como color, olor, sabor; inorgánicos como amoniaco, cloruro, pH, sulfato y solidos disueltos totales; y orgánicos como compuestos fenólicos (Tabla 5.8).

Tabla 5.8: Tabla 7 NCh 409: Parámetros relativos a características organolépticas.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
Físicos:			
Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20
Olor	-	-	inodora
Sabor	-	-	insípida
Inorgánicos:			
Amoníaco	NH_3	mg/L	1,5
Cloruro	CL^-	mg/L	400
pH	-	-	6,5 <pH <8,5
Sulfato	SO_4^-	mg/L	500
Solidos disueltos totales	-	mg/L	1500
Orgánicos:			
Compuestos fenólicos	Fenol	μg/L	2

Fuente: NCh 409/1, INN (2006).

- Parámetros de desinfección:
  En esta categoría se establecen concentraciones máximas y mínimas de cloro residual en el agua potable que garanticen una concentración residual de desinfectante permanente sin comprometer la calidad del agua.

5.2. Uso Riego

La cuenca del Maipo, al igual que muchas otras cuencas de la zona central de nuestro país, cuenta con una notable actividad agrícola, esta principalmente se da en la zona media

y baja de la cuenca. Un proyecto elaborado por la Comisión Nacional de Riego (CNR) y ejecutado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) estimó que el 14,1 % de los suelos en la cuenca del río Maipo corresponde a terrenos agrícolas (CIREN, 2022). En la Figura 5.3 se presentan las zonas de riego de la cuenca.

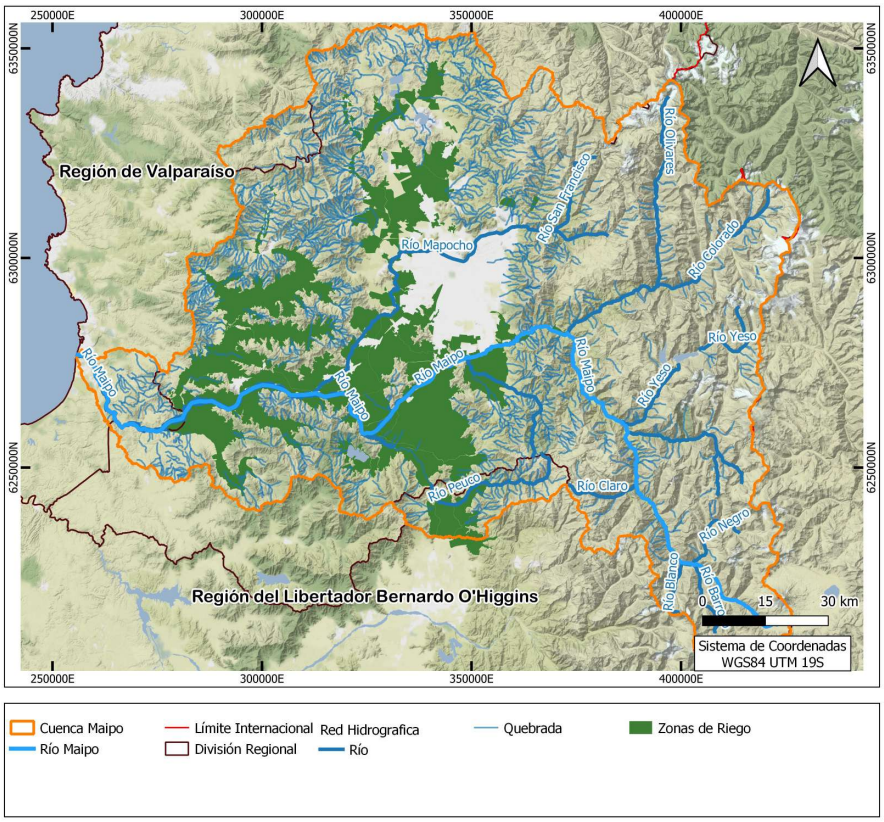


Figura 5.3: Zonas de Riego Cuenca Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos ICASS SPA (2021).

En Chile, la normativa vinculada al uso de agua para riego es la NCh 1333, que presenta recomendaciones técnicas sobre la calidad del agua para diferentes usos, entre estos el riego. Esta se presenta a continuación.

5.2.1. NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos

La norma NCh 1333 ha sido preparada por la División de Normas del Instituto Nacional de Normalización (INN), y en su estudio participaron diferentes organismos y actores vinculados al tema. Esta norma fue aprobada por el consejo del INN EL 7 DE abril de 1978 y declarada Oficial de la República de Chile por el Decreto Nº 867 con fecha 15 de junio de 1978. Fue sometida a última modificación en mayo de 1987 (INN, 1987), aunque esta fue una modificación menor de un párrafo.

Esta norma fija criterios de calidad de agua para distintos usos, de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos. Tiene como objetivo proteger

la calidad del agua para distintos usos de la degradación producida por la contaminación. Los criterios establecidos son fijados según el tipo de uso, que incluye agua para consumo humano, animal, riego, recreación y estética y vida acuática (INN, 1987).

A continuación se presentan los diferentes usos considerados en esta norma. Solo se presentan especificados los criterios para uso de riego, en base a los alcances del presente trabajo y a su relación con el uso de riego.

- Agua para consumo humano:
  Debe cumplir con la norma NCh 409 que regula calidad del agua potable.
- Agua para bebida de animal:
  Debe cumplir con la norma NCh 409 que regula calidad del agua potable.
- Agua para riego:
  Debe cumplir con ciertos criterios que incluye:
  - pH entre 5,5 y 9,0.
  - Valores máximos de elementos químicos establecidos en la tabla 1 de la Norma (Tabla 5.9).
  - Razón de adsorción de sodio. Establecido por la Autoridad competente.
  - Conductividad especifica y salinidad establecido en la tabla 2 de la Norma (Tabla 5.10).
  - Pesticidas, incluye Herbicidas e Insecticidas. Establecido por la Autoridad competente.
  - Requisitos bacteriológicos. Agua destinada a riego de verduras y frutas que se cultiven a ras de suelo y sean consumidas crudas debe cumplir con contenido de coliformes fecales menor o igual a 1 000 coliformes fecales / 100 ml.

Tabla 5.9: Tabla 1 NCh 1.333: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego.

Elemento	Unidad	Limite Máximo
Aluminio (Al)	mg/l	5
Arsénico (As)	mg/l	0,1
Bario (Ba)	mg/l	4
Berilio (Be)	mg/l	0,1
Boro (B)	mg/l	0,75
Cadmio (Cd)	mg/l	0,01
Cianuro (CN-)	mg/l	0,2
Cloruro (Cl-)	mg/l	200
Cobalto (Co-)	mg/l	0,05
Cobre (Cu)	mg/l	0,2
Cromo (Cr)	mg/l	0,1
Fluoruro (F-)	mg/l	1
Hierro (Fe)	mg/l	5

Litio (Li)	mg/l	2,5
Litio (cítricos) (Li)	mg/l	0,075
Manganeso (Mn)	mg/l	0,2
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,01
Níquel (Ni)	mg/l	0,2
Plata (Ag)	mg/l	0,2
Plomo (Pb)	mg/l	5
Selenio (Se)	mg/l	0,02
Sodio Porcentual (Na)	mg/l	35
Sulfato (SO4=)	mg/l	250
Vanadio (V)	mg/l	0,1
Zinc (Zn)	mg/l	2

Fuente: INN (1987).

Tabla 5.10: Tabla 2 NCh 1.333: - Clasificación de aguas para riego según su salinidad.

Clasificación	**Conductividad especifica, c, μ mhos/cm a 25°C**	**Sólidos disueltos totales, s, mg/l a 105°C**
Agua con la que generalmente no se observan efectos perjudiciales	c <750	s <500
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	750 <c <1500	500 <s <1000
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	1500 <c <3000	1000 <s <2000
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	3000 <c <7500	2000 <s <5000

Fuente: INN (1987).

- Agua para estética y recreación:
  La NCh 1333 también establece parámetros para el uso del agua para estética y recreación. Estos incluyen desechos flotantes, aceites, grasas, color, olor, sabor, coliformes fecales, etc... No se presentan estos parámetros de manera detallada ya que el Decreto Supremo N°143/2009 establece normas de calidad primaria para las aguas continentales

superficiales para las actividades de recreación con contacto directo, siendo este decreto en base al cual se realizara el análisis de uso recreacional.

- Agua destinada para vida acuática:
  Se establecen criterios generales para preservar la vida acuática. Esta incluye oxigeno disuelto, pH, alcalinidad, turbiedad, temperatura, solidos sedimentables y flotantes, etc... También establece requisitos biológicos como protozoos, quistes y huevos; Sustancias toxicas como pesticidas, cianuros y metales pesados y nutrientes.

5.3. Uso Recreacional

La cuenca del Maipo posee varios cuerpos de aguas continentales superficiales que son utilizados de forma recreacional. Ejemplo de estos son lagos, lagunas, embalses, ríos y cursos de agua naturales y artificiales, entre otros. En la Figura 5.4 se presentan los principales cuerpos de aguas continentales superficiales.

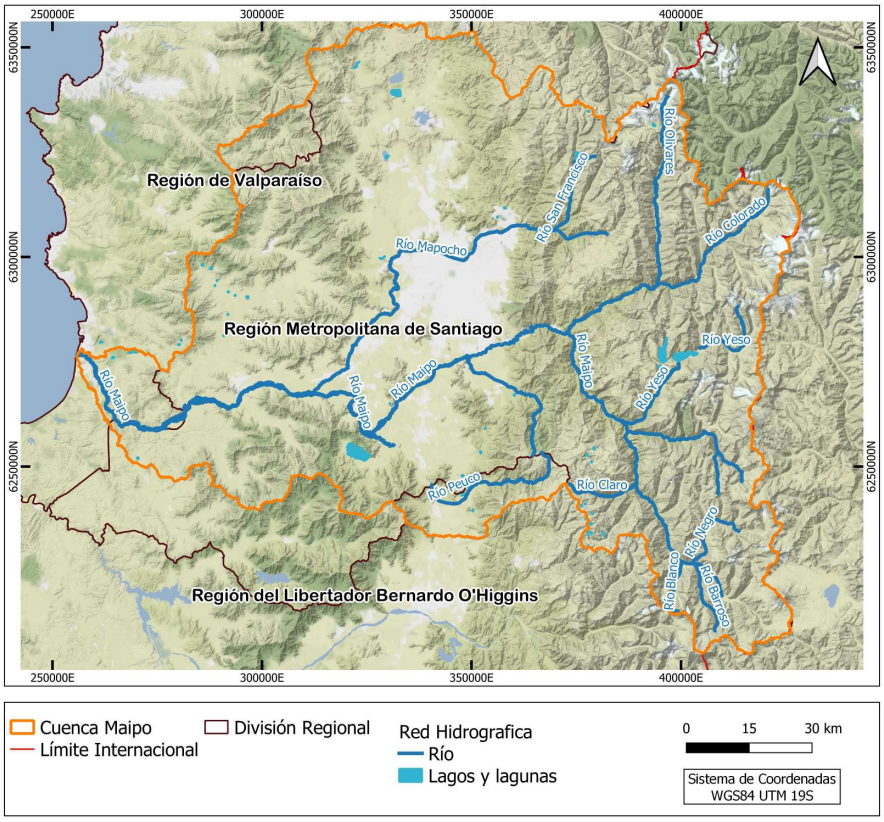


Figura 5.4: Principales aguas continentales superficiales cuenca río Maipo.

En Chile, la normativa vinculada a regular la calidad del agua para uso recreacional es el Decreto Supremo N°143/2009. Este se presenta a continuación.

5.3.1. Decreto Supremo N°143: Establece normas de calidad primaria para las aguas continentales superficiales aptas para actividades de recreación con contacto directo

El Decreto Supremo N°143, promulgado el 30 de diciembre de 2008 y publicado el 27 de marzo de 2009, establece las normas primarias de calidad ambiental de las aguas continentales superficiales, aptas para actividades de recreación con contacto directo.

Estas normas tienen por objetivo general proteger la calidad de las aguas continentales superficiales de manera de salvaguardar la salud de las personas. Para cumplir con este objetivo, se establecen valores máximos permitidos para diferentes compuestos y elementos, valores que establecen niveles de emergencia diarios, frecuencias de monitoreo y metodología de análisis para el muestreo de estos compuestos o elementos.

La Tabla 5.11 presenta los valores máximos permitidos en situaciones normales y de emergencia.

Tabla 5.11: Niveles de calidad ambiental para aguas continentales superficiales determinadas por la norma en situaciones normales y de emergencia Tabla 1 y 2 D.S. Nº143/2009.

Compuestos o Elementos	Unidad	Percentil	Valor Máximo Permitido en situaciones normales	Nivel de Emergencia Diario
Color	Escala Pt-Co	80	100	200
pH	Unidad de pH	95	6,0 - 8,5	5,5 - 9,0
Cianuro	mg/L	95	0,77	1,2
Bifenilos policlorados (PCBs)	mg/L	90	0,0055	0,005
Diclorometano	mg/L	90	0,22	0,6
Benzo (a)pireno	mg/L	90	0,0022	0,06
Tetracloruro de carbono	mg/L	90	0,022	0,071
Ácido 2, 4 diclorofenoxiacético (2, 4 D)	mg/L	90	0,33	1
Aldrín y Dieldrín	mg/L	80	0,00033	0,01
Atrazina	mg/L	90	0,022	0,05
Carbofurano	mg/L	90	0,055	0,167
Clordano	mg/L	80	0,0022	0,05
Clorotalonil	mg/L	90	1,21	3
Cyanazina	mg/L	90	0,0066	0,02
Heptaclor	mg/L	80	0,00033	0,01
Lindano	mg/L	80	0,022	0,5
Simazina	mg/L	90	0,022	0,052
Trifluralina	mg/L	90	0,22	0,75
Arsénico	mg/L	95	0,11	0,2
Cadmio	mg/L	95	0,033	0,1
Cromo Total	mg/L	95	0,55	1
Mercurio	mg/L	95	0,011	0,071
Plomo	mg/L	95	0,11	0,36
Coliformes fecales (NMP)	NMP/100 ml	100	1000	>1000

Fuente: Ministerio Secretaria General de la Presidencia (2009).

Según el Artículo Nº6 del decreto, cuando la Autoridad Sanitaria respectiva no disponga de antecedentes suficientes para establecer la frecuencias mínimas de monitoreo, estas serán

las que se indican en la Tabla 5.12 (MINSEGPRES, 2009).

Tabla 5.12: Frecuencias mínimas de monitoreo Tabla 3 D.S. N°143/2009.

Compuestos o elementos	Frecuencia de monitoreo mínima anual	Frecuencia de monitoreo mínima en epoca de baño
Color	1 vez cada 3 meses	1 vez cada 15 días
pH	1 vez al mes	1 vez por semana
Cianuro	1 vez cada 3 meses	1 vez por temporada
Bifenilos policlorados (PCBs)	1 vez cada 3 meses	1 vez por temporada
Diclorometano	1 vez cada 3 meses	1 vez por temporada
Benzo (a)pireno	1 vez cada 3 meses	1 vez por temporada
Tetracloruro de carbono	1 vez cada 3 meses	2 vez por temporada
Ácido 2, 4 diclorofenoxiacético (2, 4 D)	1 vez cada 3 meses	3 vez por temporada
Aldrín y Dieldrín	1 vez cada 6 meses	4 vez por temporada
Atrazina	1 vez cada 3 meses	5 vez por temporada
Carbofurano	1 vez cada 3 meses	6 vez por temporada
Clordano	1 vez cada 6 meses	7 vez por temporada
Clorotalonil	1 vez cada 3 meses	8 vez por temporada
Cyanazina	1 vez cada 3 meses	9 vez por temporada
Heptaclor	1 vez cada 6 meses	10 vez por temporada
Lindano	1 vez cada 6 meses	11 vez por temporada
Simazina	1 vez cada 3 meses	12 vez por temporada
Trifluralina	1 vez cada 3 meses	13 vez por temporada
Arsénico	1 vez cada 3 meses	14 vez por temporada
Cadmio	1 vez cada 3 meses	15 vez por temporada
Cromo Total	1 vez cada 3 meses	16 vez por temporada
Mercurio	1 vez cada 3 meses	17 vez por temporada
Plomo	1 vez cada 3 meses	18 vez por temporada
Coliformes fecales (NMP)	1 vez al mes	1 vez por semana

Fuente: Ministerio Secretaria General de la Presidencia (2009).

Finalmente sobre el cumplimiento de la normativa, esta se considerara cumplida según el articulo N°8 del decreto cuando: El percentil señalado para cada compuesto o elemento, de las muestras analizadas durante un año, para cada uno de ellos, sea menor o igual a los valores establecidos en la presente norma y en su caso, cada una de las muestras que excedan dichos límites, no superen lo establecido en la Tabla 5.13 (MINSEGPRES, 2009).

Tabla 5.13: Valores máximos de excedencia Tabla 4 D.S. N°143/2009.

Compuestos o Elementos	Unidad	Excedencia	Valor Máximo de Excedencia
Color	Escala Pt-Co	50 %	150
pH	Unidad de pH	-/+ 0,5	5,5 - 9,0
Cianuro	mg/L	30 %	1,00
Bifenilos policlorados (PCBs)	mg/L	50 %	0,008
Diclorometano	mg/L	50 %	0,33
Benzo (a)pireno	mg/L	50 %	0,003
Tetracloruro de carbono	mg/L	50 %	0,033
Ácido 2, 4 diclorofenoxiacético (2, 4 D)	mg/L	50 %	0,5
Aldrín y Dieldrín	mg/L	50 %	0,0005
Atrazina	mg/L	50 %	0,033
Carbofurano	mg/L	50 %	0,0825
Clordano	mg/L	50 %	0,0033
Clorotalonil	mg/L	50 %	1,57
Cyanazina	mg/L	50 %	0,0099
Heptaclor	mg/L	50 %	0,0005
Lindano	mg/L	50 %	0,033
Simazina	mg/L	30 %	0,0286
Trifluralina	mg/L	50 %	0,33
Arsénico	mg/L	20 %	0,132
Cadmio	mg/L	50 %	0,05
Cromo Total	mg/L	20 %	0,66
Mercurio	mg/L	50 %	0,0165
Plomo	mg/L	50 %	0,165
Coliformes fecales (NMP)	NMP/100 ml	—	—

Fuente: Ministerio Secretaria General de la Presidencia (2009).

5.4. Uso como cuerpo receptor

La cuenca del Maipo contiene varias plantas de tratamiento de aguas servidas PTAS ubicadas en las principales zonas urbanas que descargan sus efluentes en la cuenca del Maipo. En la Figura 5.5 se presentan las ubicaciones de estas y en la Tabla 5.14 se presentan las características de estas como la empresa operadora, año construcción, tipo de tratamiento, cuerpo receptor y caudal medio mensual de diseño.

Dentro de estas PTAS, destacan La Farfana y El Trebal, ambas diseñadas para un caudal medio mensual de 8,8 m^3/s, operadas por Aguas Andinas S.A. y que tienen como cuerpo receptor al Río Mapocho, uno de los principales afluentes del Maipo.

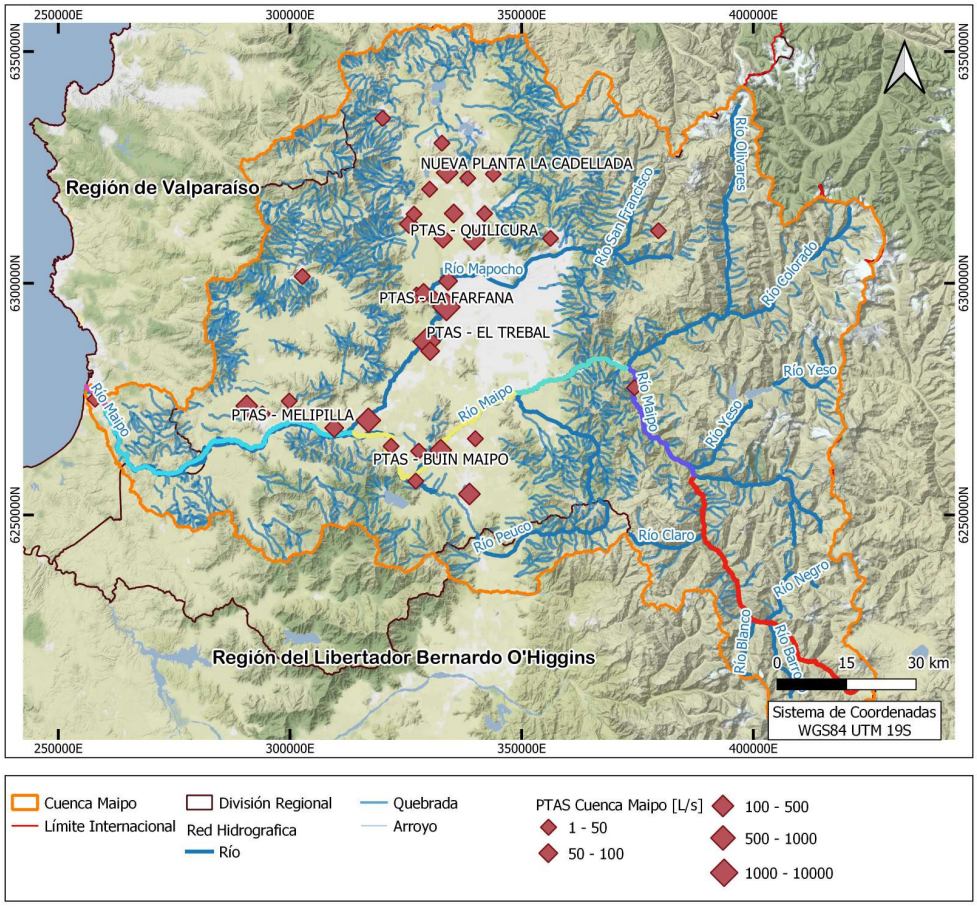


Figura 5.5: Plantas de Aguas Servidas Cuenca Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos S.I.S.S. (2022).

Tabla 5.14: Descripción Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Cuenca río Maipo.

Obra	Empresa	Sistema	Año Construcción	Tipo Tratamiento	Cuerpo Receptor	Caudal Diseño Medio Mensual [l/s]	UTM N [m]	UTM E [m]
Santo Domingo	Cooperativa de Agua Potable Santo Domingo Ltda.	Coopagua	2001	Lodos Activados	Río Maipo	30	6.274.980	257.927

Tabla 5.14: Descripción Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Cuenca río Maipo.

Obra	Empresa	Sistema	Año Construcción	Tipo Tratamiento	Cuerpo Receptor	Caudal Diseño Medio Mensual [l/s]	UTM N [m]	UTM E [m]
Pomaire	Aguas Andinas S.A.	Pomaire	1991	Lag. Estabilización precedida con sistema de extracción. espesado. acumulación.	Canal Picano - Estero Puangue	26	6.274.567	299.830
El Trebal	Aguas Andinas S.A.	Gran Santiago	2001	Lodos Activados	Río Mapocho	8.800	6.287.410	329.495
El Manzano	Huertos Familiares S.A.	Huertos Familiares	2007	Lodos Activados	Quebrada Los Maitenes	8	6.330.219	332.788
Santo Tomás	BCC S.A.	Loteo Santo Tomas	2009	Lodos Activados	Estero Colina	70	6.309.622	333.058
Santa Elena	Aguas De Colina S.A.	Aguas Colina	2009	Lodos Activados	Quebrada Totorillas	20	6.322.670	338.357
La Leonera	Empresa Particular De Agua Potable Y Alcantarillado La Leonera S.A.	La Leonera	2013	Lodos Activados	Quebrada de Las Flores	13	6.311.311	379.524
Jardines de la Estación	Servicios Sanitarios De La Estación S.A.	Jardines De La Estacion	2008	Lodos Activados	Canal El Traqueral	85	6.315.053	335.346
Trachisa	Aguas San Pedro S.A.	San Luis Brisas Norte	2015	Lodos Activados	Estero Colina	21	6.323.552	343.883
Isla De Maipo	Aguas Andinas S.A.	Isla De Maipo	2018	Lodos Activados	Río Maipo	36	6.264.819	321.822
Cantillana	Empresa De Servicios Sanitarios San Isidro S.A.	Altos De Cantillana	2018	Lombrifiltro	Acequia	1	6.263.764	327.766
El Parronal	Empresa De Agua Potable Melipilla Norte S.A.	Melipilla Norte	2009	Lodos Activados	Canal Puangue	30	6.271.801	294.038
La Cadellada	Sacyr Agua Chacabuco	Colina - Esmeralda	2017	Lodos Activados	Sector aislado infiltración San Rafael	330	6.323.852	333.926
Izarra de Lo Aguirre	Empresa De Agua Potable Izarra De Lo Aguirre S.A.	Izarra De Lo Aguirre	2010	Lodos Activados	Laguna Carén	13	6.297.451	327.318
Hacienda Batuco	Aguas Santiago Norte S.A.	Hacienda Batuco	2015	Lodos Activados	Canal Lo Fontecilla	5	6.320.284	330.136
Barrancas	Aguas Santiago Poniente S.A.	Barrancas	1999	Lodos Activados	Canal las Vertientes y Rio Mapocho	53	6.300.459	334.122
Puertas de Padre Hurtado	Empresa De Servicios Sanitarios San Isidro S.A.	Puertas De Padre Hurtado	2013	Lodos Activados	Río Mapocho	67	6.285.363	330.249
Larapinta	Servicios Sanitarios Larapinta S.A.	Ciudad Satelite Larapinta	2005	Lodos Activados	Estero Seco	56	6.312.789	325.686
Estacion Buin	Aguas San Pedro S.A.	Estacion Buin	2010	Lodos Activados	Canal	18	6.266.444	340.005
Jardin Lo Prado	Empresa De Servicios Sanitarios Lo Prado S.A.	Lo Prado	2005	Lodos Activados	Laguna Carén	79	6.297.918	328.841

Tabla 5.14: Descripción Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Cuenca río Maipo.

Obra	Empresa	Sistema	Año Construcción	Tipo Tratamiento	Cuerpo Receptor	Caudal Diseño Medio Mensual [l/s]	UTM N [m]	UTM E [m]
Lomas de Lo Aguirre	Empresa De Agua Potable Lo Aguirre S.A.	Lo Aguirre	2009	Lodos Activados	Río Mapocho	9	6.296.534	331.216
Quilicura	Explotaciones Sanitarias S.A	Loteo Industrial	1981	Laguna Aireada	Estero Las Cruces	181	6.309.476	339.761
Santa Luz	Sacyr Agua Santiago	Pan De Azucar Sectores B1-C-D	2003	Lodos Activados	Estero Los Patos	21	6.315.024	341.998
Buin Maipo	Aguas Andinas S.A.	Buin - Paine - Linderos - Maipo - Alto Jahuel	2009	Lodos Activados	Río Maipo	160	6.263.970	332.539
Las Higueras	Sacyr Agua Lampa	Lampa	2000	Lodos Activados	Estero Lampa	35	6.314.897	326.767
Los Trapenses	Aguas Manquehue S.A.	Los Trapenses	1997	Lodos Activados	Estero Las Hualtatas	40	6.309.667	356.239
Til Til	Aguas Andinas S.A.	Til Til	2007	Lodos Activados	Estero Til-Til	13	6.335.589	319.997
Valdivia De Paine	Aguas Andinas S.A.	Valdivia De Paine	2003	Tratamiento Primario con Desinfección	Rio Angostura	25	6.257.291	327.149
Paine	Aguas Andinas S.A.	Buin - Paine - Linderos - Maipo - Alto Jahuel	2002	Lodos Activados	Estero Paine	119	6.254.510	338.734
San jose Lo Maipo	Aguas Andinas S.A.	San Jose De Maipo - Guayacan - El Campito	2002	Lodos Activados	Río Maipo	21	6.277.456	374.374
El Monte	Aguas Andinas S.A.	Talagante - Padre Hurtado - Peñaflor - Malloco - Calera De Tango - El Monte - El Paico	2004	Lodos Activados	Río Maipo	95	6.268.771	309.537
Talagante	Aguas Andinas S.A.	Talagante - Padre Hurtado - Peñaflor - Malloco - Calera De Tango - El Monte - El Paico	2006	Filtros Biológicos	Río Mapocho	612	6.270.417	316.918
Curacaví	Aguas Andinas S.A.	Curacavi	2006	Lodos Activados	Estero Puangue	48	6.301.456	302.674
Melipilla	Aguas Andinas S.A.	Melipilla	2007	Lodos Activados	Estero La Línea	192	6.273.513	290.671
La Farfana	Aguas Andinas S.A.	Gran Santiago	2003	Lodos Activados	Río Mapocho	8.800	6.294.861	333.761

Fuente: Elaboración propia a partir de datos SISS (2022).

Como se observa de las tablas anteriores, la mayor parte de las PTAS del Maipo operan con tratamientos convencionales como Lodos Activados y en algunos casos con Laguna Aireada. Otros tratamientos incluyen Lombrifiltros y Filtros Biológicos.

Junto con las PTAS, existen diferentes empresas que descargan Residuos Líquidos Industriales (RILES) en la cuenca. En la Tabla 5.15 se presentan las descargas de RILES con un caudal diario mayor a 1000 m3/día durante el mes de enero del año 2022. Se presenta en esta el nombre de la empresa, cuerpo receptor y caudales diarios de descarga.

Tabla 5.15: Emisiones RILES mayores a 1000 m3/día Cuenca Río Maipo Enero 2022.

Empresa	Cuerpo Receptor	Caudal Diario (m3/dia)	Región	Comuna
FABRICAS Y MAESTRANZAS DEL EJERCITO	RIO MAPOCHO	65.763	Metropolitana	Talagante
PAPELES CORDILLERA S A	RIO MAIPO	15.747	Metropolitana	Puente Alto
AGROINDUSTRIAL EL PAICO S.A.	ESTERO EL PAICO	4.656	Metropolitana	El Monte
EMPRESAS LOURDES S A	RIO MAIPO	4.455	Metropolitana	Isla de Maipo
ACONCAGUA FOODS S.A.	CANAL PAINE	3.133	Metropolitana	Buin
SCA CHILE S.A.	CANAL DE DERRAME LAMPA	2.923	Metropolitana	Lampa
CERVECERA CCU CHILE LIMITADA	ESTERO LAS CRUCES	2.914	Metropolitana	Quilicura
LESAFFRE INDUSTRIAL CHILE S.A	ESTERO LAS CRUCES	2.868	Metropolitana	Quilicura
CMPC TISSUE SA	ESTERO EL GATO	2.186	Metropolitana	Talagante
PAIMASA SA	ESTERO EL GATO	1.795	Metropolitana	Isla de Maipo
ALGINATOS CHILE SA	ESTERO PAINE	1.511	Metropolitana	Paine

Fuente: Elaboración propia a partir de datos SMA (2022).

En Chile, la normativa vinculada al uso como cuerpo receptor es el Decreto Supremo N°90/2001, que regula las emisiones de descargas de residuos líquidos a los cuerpos de agua superficiales. Este se presenta a continuación.

5.4.1. Decreto Supremo N°90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales

El Decreto Supremo N°90, promulgado el 30 de mayo de 2000 y publicado el 7 de marzo de 2001 por el Ministerio Secretaria General de la Presidencia, establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (MINSEGPRES, 2001).

Tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores (MINSEGPRES, 2001).

Este decreto establece la concentración máxima de contaminantes permitida para residuos líquidos descargados por las fuentes emisoras, considerando los diferentes cuerpos de agua marinos y continentales superficiales (MINSEGPRES, 2001). Se incluyen así cuerpos de agua fluviales (considerando o no capacidad de dilución), agua lacustre y agua marina dentro y fuera de la zona de protección litoral.

En relación con los alcances del presente trabajo, se presenta únicamente los límites máximos establecidos para descargas en cuerpos de aguas fluviales considerando o no la capacidad de dilución de estos (Tabla 5.16).

Tabla 5.16: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales Tablas 1 y 2 D.S. N°90/2001.

Contaminantes	Unidad	Expresión	Limite Máximo	Limite Máximo considerando Dilución
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20	50
Aluminio	mg/L	Al	5	10
Arsénico	mg/L	As	0,5	1
Boro	mg/L	B	0,75	3
Cadmio	mg/L	Cd	0,01	0,3
Cainuros	mg/L	CN-	0,2	1
Cloruros	mg/L	Cl-	400	2000
Cobre Total	mg/L	Cu	1	3
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP / 100 ml	Coli/ 100 ml	1000	1000
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5	1
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr5+	0,05	0,2
DBO5	mg O2/L	DBO5	35	300
Fósforo	mg/L	P	10	5
Fluoruro	mg/L	F-	1,5	15
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	10	50
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5	10
Manganeso	mg/L	Mn	0,3	3
Mercurio	mg/L	Hg	0,001	0,01
Molibdeno	mg/L	Mo	1	2,5
Níquel	mg/L	Ni	0,2	3
Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50	75
Pentaclorofenol	mg/L	C6OHC15	0,009	0,01
pH	Unidad	pH	6,0-8,5	6,0-8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05	0,5
Poder Espumógeno	mm	PE	7	7
Selenio	mg/L	Se	0,01	0,1
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80	300
Sulfatos	mg/L	SO42-	1000	2000
Sulfuros	mg/L	S2-	1	10
Temperatura	C°	T°	35	40
Tetracloroeteno	mg/L	C2Cl4	0,04	0,4
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7	7
Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,2	0,5
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5	5
Zinc	mg/L	Zn	3	20

Fuente: Ministerio Secretaria General de la Republica (2001).

5.5. Análisis Contaminantes y Parámetros Regulados en Normativa de Uso

En esta sección se presenta un análisis sobre contaminantes y parámetros regulados similar al realizado en el capítulo "Calidad Físico-Química" , pero a diferencia de este, se realiza un análisis en base a 3 normativas vinculadas al uso directo de las aguas superficiales del río Maipo: NCh 409/2009, NCh 1.333/1978 y D.S. N°153/2009. Se excluye de este análisis el D.S. N°90/2001, ya que esta normativa establece límites para el uso del río como receptor de descargas y no para el uso directo de las aguas de este.

5.5.1. Disponibilidad de Información

Para el análisis de contaminantes regulados incluidos en las normativas de uso, se obtuvieron los datos de concentración de contaminantes y parámetros de calidad del agua seleccionados de 17 estaciones a lo largo del río Maipo. Alguna de estas estaciones pertenecen a la red de observación y control de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) del río Maipo (estaciones de monitoreo NSCA en la Tabla 4.2).

La Tabla 5.17 presenta los detalles de estas estaciones, como su ubicación, subcuenca, área de vigilancia NSCA, fechas de operación, número de registros, entre otros. También en la Figura 5.6 se presenta una cartografía con la ubicación de estas.

Tabla 5.17: Estaciones de calidad de agua superficial seleccionadas Río Maipo.

ESTACIÓN	SUBCUENCA	ÁREA DE VIGILANCIA	REGISTRO	Nº REGISTROS	UTM WGS84 NORTE (m)	UTM WGS84 ESTE (m)
RÍO MAIPO EN LAS MELOSAS	Río Maipo Alto	MA-1	1966-2022	176	6.253.617	389.152
RÍO MAIPO DESPUÉS DE ESTERO MANZANITO	Río Maipo Alto	MA-2	2018-2022	6	6.265.859	379.837
RÍO MAIPO EN SAN JOSE DE MAIPO	Río Maipo Alto	MA-2	2015-2022	72	6.277.834	374.493
RÍO MAIPO EN LAS LAJAS (CA)	Río Maipo Medio	MA-3	1966-1980	143	6.283.639	368.365
RÍO MAIPO EN LA OBRA (CA)	Río Maipo Medio	MA-3	1969-1979	6	6.282.647	363.704
RÍO MAIPO ANTES DE CANAL SAN CARLOS	Río Maipo Medio	MA-3	2018-2022	6	6.282.182	363.606
RÍO MAIPO EN PUENTE SAN RAMON (CA)	Río Maipo Medio	MA-3	1966-1977	32	6.278.134	353.918
RÍO MAIPO ANTES DE JUNTA RIO CLARILLO	Río Maipo Medio	MA-3	2015-2021	70	6.276.361	349.206
RÍO MAIPO EN PUENTE LOS MORROS (CA)	Río Maipo Medio	MA-4	1997-2018	74	6.274.997	346.805
RÍO MAIPO EN PANAMERICANA (CA)	Río Maipo Medio	MA-4	1972-1975	13	6.270.977	340.349
RÍO MAIPO EN VILUCO (CA)	Río Maipo Medio	MA-4	1972-1975	19	6.263.648	331.543
RÍO MAIPO EN EL ROSARIO	Río Maipo Medio	MA-4	1966-1972	14	6.262.512	321.641
RÍO MAIPO EN NALTAHUA	Río Maipo Medio	MA-4	1990-2021	169	6.266.194	322.281
RÍO MAIPO EN CHIGNIGUE (JUNCAL)	Río Maipo Bajo	MA-5	1968-1972	11	6.268.847	304.406
RÍO MAIPO DESPUÉS DE JUNTA E.CHOLQUI	Río Maipo Bajo	MA-5	2018-2021	6	6.264.633	290.354
RÍO MAIPO EN CABIMBAO	Río Maipo Bajo	MA-5	1986-2021	169	6.260.738	265.651
RÍO MAIPO EN DESEMBOCADURA (CA)	Río Maipo Bajo	MA-6	1972-1979	40	6.276.770	257.050

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

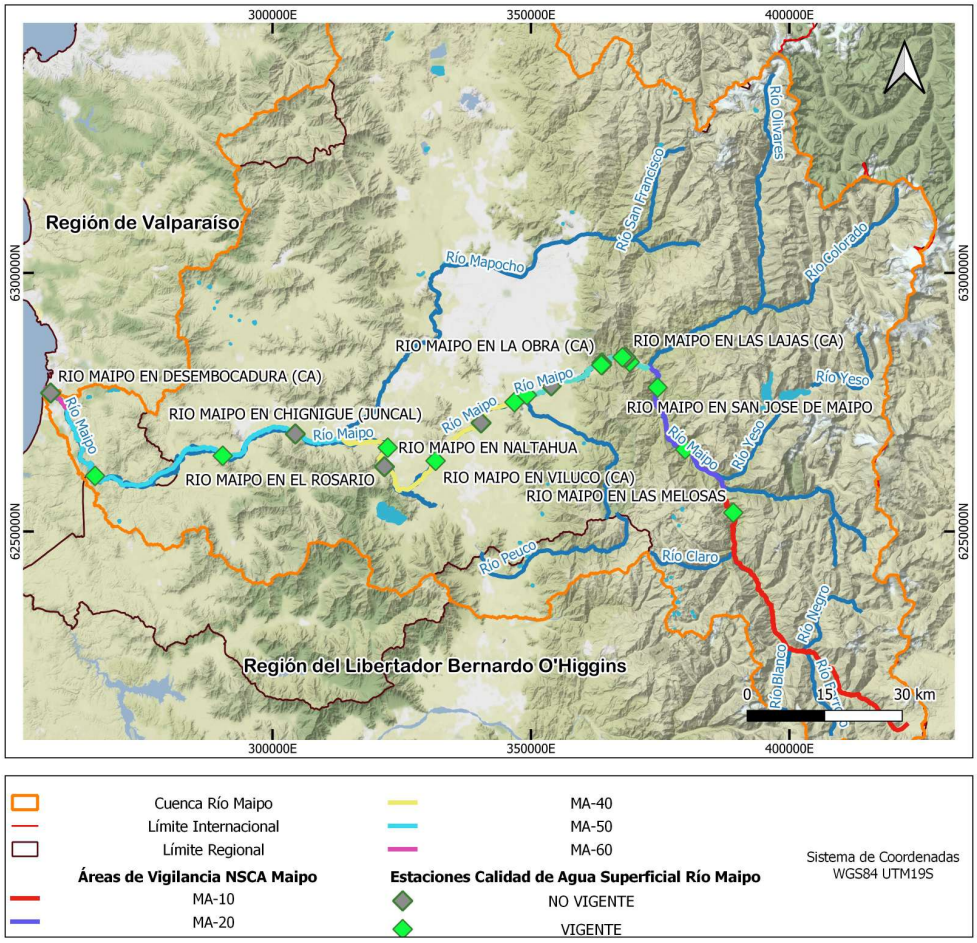


Figura 5.6: Estaciones seleccionadas de calidad de agua superficial Río Maipo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

5.5.2. Metodología de Análisis

Se realiza una evaluación sobre la calidad físico-química del río Maipo asociado a las 3 normativas de uso presentadas anteriormente: NCh 409/2006: agua potable; NCh 1.333/1978: Diferentes Usos (con énfasis en uso riego); y D.S. N°143/2009: Uso Recreacional. Para esto se seleccionan y caracterizan diferentes contaminantes incluidos en estas normativas y luego se obtienen los datos de calidad físico-química del agua superficial del río Maipo disponibles a través de la DGA.

Estos datos son validados a partir de un análisis de consistencia , donde se eliminan los datos considerados fuera de rango o inconsistentes. No se realiza la evaluación frente a una normativa cuando los límites de detección de las metodologías empleadas para medir concentraciones o valores sean mayores al 80 % del límite normativo, en ese caso los datos se consideran inválidos.

Posteriormente se obtienen las series temporales de concentraciones y valores de estos parámetros y contaminantes regulados seleccionados. Una vez obtenidos se presentan los es-

tadísticos de la serie para las 6 áreas de vigilancia (Establecidas en el D.S. N°53) que incluyen valores promedio, máximo y mínimos, junto con la cantidad de muestras. Posteriormente se presentan los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 3 diferentes normativas tanto para las estaciones seleccionadas que contengan información del parámetro a analizar como para las 6 áreas de vigilancia. No se consideran las estaciones que no contengan información.

Se tomaron las estaciones de control de la NSCA río Maipo como representativos de las áreas de vigilancia. En caso de falta de información en una estación de control, se complementa con la información de otra estación de monitoreo siempre y cuando cumpla los siguientes requisitos:

- La estación complementaria pertenece a la misma área de vigilancia y se encuentra cercana a la estación complementada.
- Las estaciones no poseen diferencias significativas en caudales y/o intervenciones significativas en el cauce entre estas, como por ejemplo un afluente o efluente del cauce principal entre estas.

Se presentan en la Tabla 5.18 las estaciones representativas seleccionadas por área de vigilancia.

Tabla 5.18: Estaciones representativas por área de vigilancia (NSCA Río Maipo) en análisis por norma de uso.

ÁREA DE VIGILANCIA	ESTACIÓN REPRESENTATIVA	Nº REGISTROS
MA-1	RIO MAIPO EN LAS MELOSAS	176
MA-2	RÍO MAIPO DESPUÉS DE ESTERO MANZANITO Y RÍO MAIPO EN SAN JOSE DE MAIPO	78
MA-3	RIO MAIPO ANTES DE JUNTA RIO CLARILLO	70
MA-4	RIO MAIPO EN NALTAHUA	169
MA-5	RIO MAIPO EN CABIMBAO	169

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

5.5.3. Contaminantes y Parámetros Regulados Seleccionados

Se analizan catorce (14) parámetros y contaminantes presentes en las normativas. En la Tabla 5.19 se presentan estos junto a los límites establecidos en las diferentes normativas de uso.

Se considera relevante mencionar para efectos del análisis que a diferencia de varios parámetros establecidos en el Decreto Supremo N°53/2014, las concentraciones de los contaminantes en las normativas de uso consideran concentraciones totales, no disueltas.

Tabla 5.19: Contaminantes y parámetros seleccionados análisis normativa uso.

Parámetro	NCh 409	NCh 1333 (riego)	DS-143	Unidad
Arsénico Total	0,01	0,1	0,11	mg/L
Boro Total	no aplica	0,75	no aplica	mg/L
Cadmio Total	0,01	0,01	0,033	mg/L
Cloruro	400	200	no aplica	mg/L
Cobre Total	2	0,2	no aplica	mg/L
Conductividad Eléctrica	no aplica	según diferentes criterios	no aplica	μS/cm
Cromo Total	0,05	0,1	0,55	mg/L
Magnesio Total	125	no aplica	no aplica	mg/L
Manganeso Total	0,1	0,2	no aplica	mg/L
Mercurio Total	0,001	0,001	0,011	mg/L
Plomo Total	0,05	5	0,11	mg/L
Sodio Porcentual	no aplica	35 %	no aplica	[%]
Sulfato	500	250	no aplica	mg/L
Zinc Total	3	2	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

5.5.3.1. Arsénico

El arsénico (As) es un elemento químico que se puede encontrar en diferentes formas, ya sea en compuestos naturales, compuestos sintéticos o en su estado elemental (Gasque Silva, 2013). Este se encuentra ampliamente distribuido en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera. La mayor cantidad del As en el medio ambiente proviene de fuentes naturales (meteorización, actividad biológica, emisiones volcánicas). Existe también una importante contribución de actividades antrópicas provenientes de procesos industriales (minería, fundición de metales, pesticidas, conservantes de la madera, etcétera) (Litter, 2018).

Este elemento se considera un problema para la salud pública, y es conocido junto a sus compuestos por su toxicidad. Según organismos científicos como la International Agency for Research on Cancer (IARC), que clasifica a este como un agente cancerígeno para humanos con base en estudios epidemiológicos que relacionan la ingesta de arsénico en el agua de consumo con cáncer en la piel y estudios ocupacionales que relacionan la exposición al arsénico con cáncer al pulmón (Book, 2004; Carabantes y de Fernicola, 2003) . Se considera que la principal vía de exposición al arsénico es la ingestión de agua o alimentos contaminados (Kapp, 2005) .

En el caso de Chile, el arsénico esta presente en el norte y en algunas partes de la zona central, debido a fuentes naturales ligadas principalmente a la actividad volcánica en la cordillera de los Andes durante los periodos Terciario y Cuaternario y a fuentes antropogénicas, principalmente la actividad minera (Ferreccio y Sancha, 2006).

5.5.3.2. Boro

El boro (B) es un metaloide con propiedades intermedias entre el carbono y el aluminio. Tal como el aluminio, tiene un estado de oxidación de +3 en todos sus compuestos químicos, y es un conductor eléctrico en su forma pura (A. M. Sancha et al., 2005).

Se encuentra en fuentes naturales ligados principalmente a minerales de boro (boratos), estos están asociados a fuentes termales vinculadas a actividad volcánica (Departamento de Salud Ambiental, Instituto de Salud Pública, s/f). Las mayores concentraciones de boro se encuentran en los sedimentos y la roca sedimentaria, particularmente, en los sedimentos marinos ricos en arcilla. Las fuentes antropogénicas de boro incluyen efluentes de aguas residuales, combustión de carbón, cristal, componentes de limpieza y agroquímicos (A. M. Sancha et al., 2005).

A nivel nacional existen diferencias significativas en las concentraciones de Boro en agua naturales. En la zona norte éstas varían entre 1 y 78 mg/L, mientras que en el resto del país es menor a 1 mg/L (Departamento de Salud Ambiental, Instituto de Salud Pública, s/f).

Hasta el momento no existe evidencia concluyente sobre los efectos nocivos del boro en las aguas sobre la salud humana, pero se relaciona la exposición a una cantidad significante a irritación e incluso efectos adversos en estómago, intestino, hígado, riñón y cerebro (Agencia Para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, s.f.).

Las aguas contaminadas con boro pueden causar toxicidad en las plantas y afectar diferentes cultivos, siendo la tolerancia frente a este diferente según el tipo de cultivo, encontrándose cultivos sensibles como el durazno, ciruela, cerezos y cebollas con limites de hasta 1 mg/L y cultivos tolerantes como el tomate y betarraga con limites de hasta 6 mg/L (A. M. Sancha et al., 2005).

5.5.3.3. Cadmio

El cadmio (Cd) es un elemento natural de la corteza terrestre, considerado un metal pesado. Generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos como el oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio) (Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades, s.f.-b).

Es un metal que puede ser incorporado al agua por medio de fuentes naturales y antrópicas. Dentro de las primeras encontramos la actividad volcánica, incendios forestales y transporte por el viento de partículas del suelo. Las fuentes antrópicas incluyen la minería, uso de fertilizantes fosfatados, fundición de metales, quema de combustibles fósiles, fabricación de baterías, pigmentos, cemento y plásticos (Mariuxi et al., 2019).

El cadmio no se degrada en el medio ambiente y solo cambia de forma. Tiende a acumularse en los suelos haciéndose disponible para las plantas, algunas de estas que pueden absorber cantidades significativas, entrando así a la cadena alimenticia y luego siendo consumido por herbívoros (Mariuxi et al., 2019). Por lo cual, el Cd podría tener un efecto negativo para los ecosistemas.

Este metal pesado no tiene una función fisiológica y suele considerarse tóxico y con efectos nocivos en la salud humana. Los datos epidemiológicos sugieren que la exposición ocupacional y ambiental al cadmio puede estar relacionada con varios tipos de cáncer. También se ha demostrado que el cadmio ambiental puede ser un factor de riesgo para la osteoporosis. El hígado y los riñones son órganos extremadamente sensibles a los efectos tóxicos del cadmio (Genchi et al., 2020).

5.5.3.4. Conductividad Eléctrica

Ver sección "Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados" , Capítulo 4.

5.5.3.5. Cloruro

Ver sección "Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados" , Capítulo 4.

5.5.3.6. Cobre

El cobre (Cu) es un elemento químico, un metal de transición conocido por sus propiedades de conductividad eléctrica y térmica, maleabilidad y ductibilidad. Ampliamente usado en la industria para cables y componentes eléctricos y electrónicos, otros usos incluyen muchos productos tales como amalgamas con diversas aplicaciones, griferías, agroquímicos (especialmente fungicidas y micostáticos), esmaltes y pigmentos, reactivos para curtiembre, alguicidas de uso profuso en cuerpos de agua dulce, prótesis médicoquirúrgicas y dispositivos intrauterinos (DIU), entre otros (Arnal et al., 2010).

La contaminación con cobre se puede dar a partir de fuentes naturales, especialmente en el caso de Chile que tiene alta presencia en el medio natural, aun así en ambientes acuáticos naturales el cobre se presentará, principalmente, como cobre (II). De esta especie divalente, sólo una pequeña fracción se presentará como "libre" (Cu^{2+}), la mayor parte estará adsorbida en partículas suspendidas o formando complejos con diversos ligandos. Esto explica su escasa presencia en fuentes naturales (Azcarategui et al., 2004). Por otro lado se tienen fuentes antropogénicas de contaminación ligadas a la actividad industrial y minera, que se produce mayoritariamente en la cercanía de las minas donde se extrae y procesa, y en las refinerías durante su purificación (Arnal et al., 2010). También, es común la contaminación de fuentes de agua de consumo por lixiviación/corrosión en cañerias de cobre.

Este metal se considera de alto interés en calidad de agua de consumo porque tiene un doble carácter, es un metal esencial para el ser humano y puede, tanto por deficiencia como por exceso, producir efectos perjudiciales en la salud que incluyen nauseas, vómitos y/o dolor abdominal, pérdida del cabello, anemia y daños renal y hepático. También en agua potable puede ocasionar problemas de sabor y color y producir manchas en los artefactos sanitarios y la ropa durante el lavado (Azcarategui et al., 2004; Rodríguez-Gámez et al., 2020).

5.5.3.7. Cromo

Ver sección "Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados" , Capítulo 4.

5.5.3.8. Hierro

El hierro (Fe) es un metal de transición y el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. Posee 2 estados principales de oxidación +2 y +3. Se utiliza principalmente en la industria como material de construcción. También los óxidos de hierro son utilizados como pigmentos en pinturas y plásticos y otros compuestos se utilizan como colorantes alimentarios y para la tratamiento de la deficiencia de hierro en humanos. Varias sales de hierro se utilizan como coagulantes en para el tratamiento de agua (OMS, 1996).

Se presenta naturalmente en agua en forma soluble como hierro bivalente en forma disuelta Fe(II) o hidroxido de hierro Fe(OH)+ o en forma compleja como hierro trivalente Fe(III) encontrado en la precipitación Fe(OH)3) o también en forma bacteriana. El hierro en el agua puede provenir de fuentes naturales por contacto con rocas o sedimentos, pero también por fuentes antropogénicas relacionadas con la industria de la minería, la siderurgia, corrosión de metales en contacto con el agua, etc... (Chaturvedi y Dave, 2012).

El hierro es considerado un metal esencial en la nutrición humana y solo se reportan efectos adversos para la salud para consumo en altas dosis de entre 0,4 a 1 mg/kg del peso corporal al día (OMS, 1996). Este metal causa problemas en la calidad del agua potable ligados al sabor, olor y puede provocar manchas rojizas en los artefactos de cocina y ropa durante el lavado (Chaturvedi y Dave, 2012; Dozier y McFarland, 2004). También puede afectar la eficiencia de los cultivos cuando la absorción de hierro es excesiva, volviéndose tóxico para algunas plantas y alterando la homeostasis celular, además de favorecer el crecimiento de microorganismos patógenos (Onyango et al., 2020; Cazorla, 2021).

5.5.3.9. Magnesio

El magnesio (Mg) es un elemento químico perteneciente al grupo de metales alcalinotérreos. Forma minerales y compuestos que se disocian más o menos fácil en el agua. El magnesio no existe libre en la naturaleza, encontrándose combinado como carbonato, MgCO3, constituyendo el mineral llamado magnesita o giobertita. Como sulfato y cloruro forma parte de las sales dobles en diversos yacimientos. También lo encontramos asociado en silicatos corrientes como el talco (piedra de jabón), el asbesto, la sepiolita o espuma de mar, la serpentina y el olivino o peridoto (Ramírez Ortega et al., 1999; Zamora, 2009).

El magnesio es considerado indispensable para la salud en las dosis correctas, pero puede resultar perjudicial por déficit o por exceso.

Este es considerado indispensable por su importancia biológica, ya que es necesario en el desarrollo de ciertos sistemas enzimáticos, actuando igualmente en la constitución de los huesos. El magnesio es el cuarto catión más abundante en el cuerpo humano y el segundo más abundante en el fluido intracelular. Una persona adulta debe de tomar por término medio 200 a 300 mg por día. Una ingesta adecuada de magnesio puede ayudar a prevenir aterosclerosis, eclampsia y resistencia a la insulina, y mantener la salud ósea, previniendo así la aparición de osteoporosis (Maraver et al., 2015; Zamora, 2009).

Si la concentración de magnesio en el agua es muy grande, este puede actuar como laxante e incluso disminuir la calidad del agua adquiriendo un sabor amargo (Zamora, 2009). Una

ingesta diaria de varios cientos adicionales miligramos de magnesio del agua o suplementos puede causar diarrea y calambres abdominales en individuos susceptibles. Después de altas dosis de aplicación, se puede producir una fuerte caída en tensión arterial, hiporreflexia y parálisis respiratoria debido a la posible ocurrencia de una depresión del sistema nervioso central (Marx y Neutra, 1997).

También, otro de los efectos negativos de este mineral se debe a que, los iones de magnesio son uno de los principales cationes bivalentes que constituyen la dureza del agua. Niveles elevados de dureza traen consigo efectos en la calidad de agua de consumo como mal sabor e incrustaciones en las redes de distribución y aparatos domésticos (Neira Gutiérrez, 2006).

5.5.3.10. Manganeso

El manganeso (Mn) es un elemento químico y considerado un metal de transición. El manganeso es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre, sin embargo en el agua se encuentra con menor frecuencia (Valencia Espinoza, 2011).

Este es utilizado en la producción de acero para aumentar su dureza, rigidez y solidez. También, se puede encontrar en algunos productos de consumo como ocurre naturalmente en la mayoría de los alimentos. El manganeso también es usado para fabricar diferentes productos como fuegos artificiales, baterías secas, abonos, pinturas, agente para visualizar imágenes médicas, cosméticos, etcétera (Valencia Espinoza, 2011).

La alta presencia de este elemento en el agua se consideran indeseables ya que la interacción de este componente con el aire provoca la oxidación a Mn (IV) el cual otorga un sabor amargo o metálico y coloraciones que en interacciones con ciertos materiales provoca manchas en estos, afectando la calidad de agua para su consumo (Kwakye-Awuah et al., 2019; Guillen-Rivas et al., 2021). Otros efectos negativos incluyen la formación de incrustaciones en las lineas de suministro debido a la precipitación química de este.

El manganeso se considera un elemento nutritivo esencial para el ser humano, por lo cual se debe asegurar su ingesta diaria en pequeñas cantidades (Valencia Espinoza, 2011). También existe evidencia que este podría traer efectos negativos en la salud, donde altas concentraciones de manganeso por periodos prolongados están asociadas a enfermedades del sistema nervioso como el Parkinson (Aschner et al., 2009; Guillen-Rivas et al., 2021). Aun así la evidencia sobre efectos negativos en la salud es deficiente e incluso hay autores que postulan que el manganeso no tiene efectos tóxicos y no causa daños en la salud (Valencia Espinoza, 2011).

5.5.3.11. Mercurio

El mercurio (Hg) es un elemento considerado dentro de los metales pesados, de color plateado que se encuentra en estado liquido a temperatura ambiente. Se presenta en el medio ambiente en diferentes formas, ya sea en forma metálica, gaseosa o combinada con otros elementos para formar sales inorgánicas o compuestos orgánicos (Ramírez et al., 2004).

En el medio ambiente puede provenir de fuentes tanto naturales como antrópogenicas. Las fuentes naturales incluyen la desgasificación de la corteza terrestre a través de los gases

volcánicos y la evaporación del océano. Las fuentes antropogénicas de contaminación están relacionadas principalmente con el uso y explotación de este metal en la industria minera, y la producción de cloro, papel, pulpa, componentes eléctricos, pinturas y utilización de combustibles fósiles (Ramírez et al., 2004).

Por otro lado, las fuentes industriales, urbanas y agrícolas (fertilizantes), la escorrentía superficial y la deposición atmosférica son las principales vías de ingreso que este metal pesado tiene al agua. El mercurio en el agua puede ser encontrado en sus tres formas oxidativas (elemental, inorgánica y orgánica). Los cuerpos de agua superficiales junto a sus sedimentos se caracterizan por ser los medios en donde principalmente se dan los procesos de transformación del mercurio inorgánico (Hg2+) a metilmercurio (CH3Hg+). Este ultimo, la forma orgánica del mercurio más tóxica tanto para las personas como para los organismos del ecosistema afectado, ya que tiende a difundirse en la columna de agua y a bioaconcentrarse y biomagnificarse fuertemente a lo largo de la cadena trófica del sistema acuático, pudiendo ser acumulado en los tejidos de los organismos que lo absorban (Badilla, 2018).

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS), este metal es uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública. La exposición al mercurio (incluso a pequeñas cantidades) puede causar efectos negativos en la salud y es peligrosa para el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida. También el mercurio puede resultar tóxico para los sistemas nervioso e inmune, el aparato digestivo, la piel, pulmones, riñones y ojos (Fisher et al., 2003).

5.5.3.12. Plomo

Ver sección “Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados” , Capítulo 4.

5.5.3.13. Sodio porcentual

En la NCh 1333/1978 se define el sodio porcentual como la relación entre la concentración del ion sodio y la suma de las concentraciones de los iones sodio, calcio, magnesio y potasio, expresadas en miliequivalentes por litro (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

Definición 5.1 *Sodio Porcentual*

$$Na\,\% = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} \cdot 100$$

El sodio es un elemento relativamente abundante en la naturaleza, que podemos encontrar mayoritariamente formando parte de la sal marina y mineral halita, y también en algunos suelos y rocas a concentraciones variables. Puesto que este elemento es el principal catión extracelular, interviene en diversos mecanismos fisiológicos que regulan el volumen y la presión sanguínea, además, juega un papel importante en la absorción y transporte de nutrientes (Domínguez Mesa, 2018).

El criterio de Sodio Porcentual, se establece principalmente en relación a la calidad de agua para riego, que depende del contenido y tipo de sales. Los efectos de las sales y el sodio son descritos por García (2015):

- A medida que aumenta el contenido de sales en la solución del suelo, se incrementa la tensión osmótica y, por tanto, la planta tiene que hacer mayor esfuerzo para absorber el agua.
- Contenidos relativamente altos de sodio y bajos de calcio provocan que las partículas de suelo tiendan a disgregarse, ocasionando una reducción en la velocidad de infiltración del agua, que puede implicar poca disponibilidad de agua en el suelo.
- Iones como el sodio, se pueden acumular en los cultivos en concentraciones suficientemente altas que pueden provocar toxicidad y una reducción del rendimiento de las cosechas.
- Un aumento en el contenido de sal puede provocar corrosión y obstrucción de equipos de riego.

El sodio porcentual es una medida de la sodicidad, que se determina en función a la concentración de sodio (Na^+). Además del sodio porcentual existen otras relaciones para estimar sodicidad como la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) en base a los cationes divalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}). También se encuentra Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), que relaciona la concentración de sodio con la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), que cuando asumimos esta como la suma de las concentraciones de sodio, calcio, magnesio y potasio obtenemos el sodio porcentual definido en la NCh 1333/1978.

Definición 5.2 *Relación de Adsorción de Sodio*

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{2}}}$$

Definición 5.3 *Porcentaje de Sodio Intercambiable*

$$PSI = \frac{Na^+}{CIC} \cdot 100$$

Diferentes autores han propuesto relaciones entre estas dos medidas de sodicidad, una de estas fue formulada por Richards et al. (1954) (Richards, 1954):

Definición 5.4 *Relación entre PSI y RAS*

$$PSI = \frac{100(-0.0126 + 0.01475RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475RAS)} \cdot 100$$

5.5.3.14. Sulfato

Ver sección “Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados” , Capítulo 4.

5.5.3.15. Zinc

Ver sección “Caracterización Contaminantes y Parámetros Regulados” , Capítulo 4.

5.5.4. Resultados

A continuación se muestran los resultados del análisis físico-químico con respecto a algunos parámetros y contaminantes regulados en 3 normativas de uso: NCh 409/2006, NCh 1333/1978 (riego) y D.S. N°143/2009. Se presentan las series con las concentraciones o valores en un periodo aproximado de 30 años (1990-2022) en las estaciones seleccionadas, los estadísticos y porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las normativas de uso.

La Tabla 5.20 presenta el resumen de los resultados, con los porcentajes de muestras que se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas de uso evaluadas, y en la Tabla 5.21 se presenta un resumen de porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos según clasificación de agua por conductividad eléctrica en NCh 1333/1978.

Tabla 5.20: Resumen porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en 3 normativas de uso para diferentes parámetros y contaminantes regulados seleccionados.

Norma Uso	Área NSCA	As Total	Br Total	Cd Total	Cloruro	Cu Total	Cr Total	Fe Total	Mg Total	Mn Total	Hg Total	Pb Total	%Na	Sulfato	Zn Total
NCh 409	MA-1	39%		L/D	97%	100%	99%	23%	100%	44%	L/D	L/D		98%	100%
	MA-2	7%		L/D	89%	100%	100%	0%	S/I	60%	L/D	L/D		93%	100%
	MA-3	33%		L/D	99%	100%	100%	0%	S/I	20%	L/D	L/D		98%	100%
	MA-4	64%		L/D	100%	100%	100%	7%	100%	45%	L/D	L/D		100%	100%
	MA-5	80%		L/D	100%	100%	100%	8%	100%	22%	L/D	L/D		99%	100%
	MA-6	S/I		S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I		S/I	S/I
NCh 1333	MA-1	100%	L/D	L/D	42%	99%	100%	59%		58%	L/D	100%	24%	38%	100%
	MA-2	100%	L/D	L/D	29%	100%	100%	71%		100%	L/D	100%	S/I	7%	100%
	MA-3	100%	L/D	L/D	56%	100%	100%	0%		20%	L/D	100%	S/I	6%	100%
	MA-4	100%	L/D	L/D	98%	100%	100%	67%		63%	L/D	100%	68%	28%	100%
	MA-5	100%	L/D	L/D	76%	98%	100%	84%		57%	L/D	100%	72%	19%	100%
	MA-6	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I		N/D	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
D.S. N°143	MA-1	100%		100%			100%				100%	100%			
	MA-2	100%		100%			100%				100%	100%			
	MA-3	100%		100%			100%				100%	100%			
	MA-4	100%		100%			100%				100%	100%			
	MA-5	100%		99%			100%				100%	100%			
	MA-6	S/I		S/I			S/I				S/I	S/I			

S/I: Sin información suficiente; **L/D**: Límites de detección mayores o igual a límites establecidos en normativa.
%Na: Sodio porcentual definido en NCh 1333.
Fuente: Elaboración Propia Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

Tabla 5.21: Resumen porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos según clasificación de agua por Conductividad Eléctrica en NCh1333.

Clasificación NCh 1333 (riego)	Área	[%]
Generalmente no se observan efectos perjudiciales: c <750 [μ mhos/cm]	MA-1	10 %
	MA-2	0 %
	MA-3	0 %
	MA-4	1 %
	MA-5	0 %
	MA-6	N/D
Efectos perjudiciales cultivos sensibles: 750 <c <1500 [μ mhos/cm]	MA-1	57 %
	MA-2	37 %
	MA-3	52 %
	MA-4	97 %
	MA-5	57 %
	MA-6	N/D
Efectos adversos muchos cultivos: 1500 <c <3000 [μ mhos/cm]	MA-1	100 %
	MA-2	100 %
	MA-3	100 %
	MA-4	100 %
	MA-5	100 %
	MA-6	N/D

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

A continuación se presentan los resultados en detalle del análisis de parámetros y contaminantes incluidos en la normativa de uso seleccionados.

5.5.4.1. Arsénico Total

La Tabla 5.22 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el arsénico total. Podemos observar que estos son más exigentes para la NCh 409, seguido por la NCh 1333 y finalmente el D.S. N°143.

Tabla 5.22: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Arsénico.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Arsénico	0,01	0,1	0,11	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.7 la serie de concentración de arsénico para el periodo 1990-2022. Se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones durante este período.

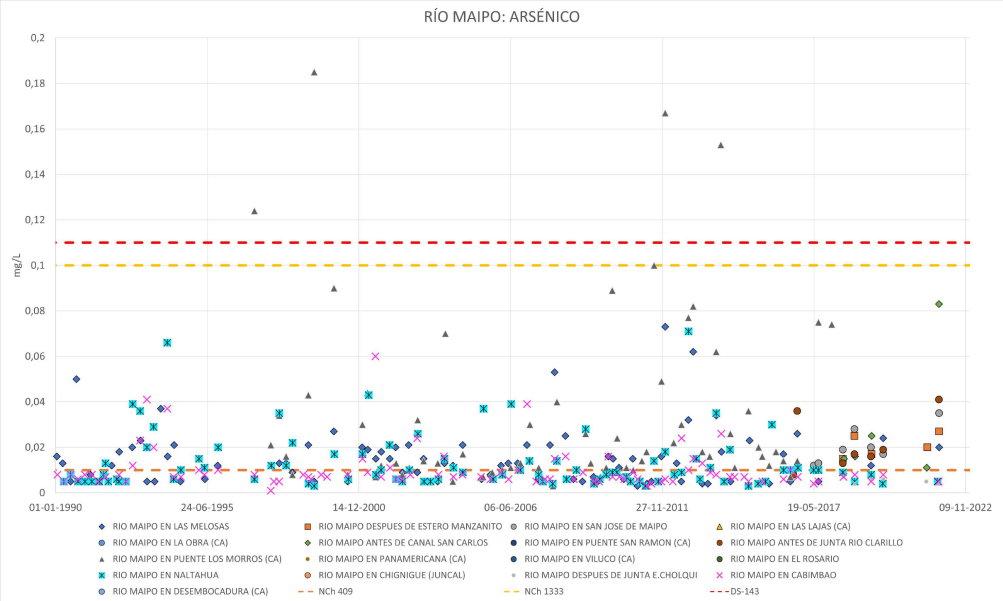


Figura 5.7: Serie de Concentración (1990-Actualidad) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Arsénico Total.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

La Figura 5.8 y la Tabla 5.23 presentan los estadísticos de las concentraciones de arsénico total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa una tendencia a aumentar las concentraciones promedio y mínimos aguas abajo de MA-1 para luego disminuir aguas abajo de MA-3 hasta MA-5.

También se observa un mayor número de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y menor información disponible para las de MA-2 y MA-3. No se cuenta con información para MA-6.

Tabla 5.23: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Arsénico.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	87	0,015	0,073	0,003
MA-2	14	0,019	0,035	0,010
MA-3	9	0,019	0,041	0,008
MA-4	94	0,013	0,071	0,003
MA-5	91	0,010	0,060	L/D = 0,001
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

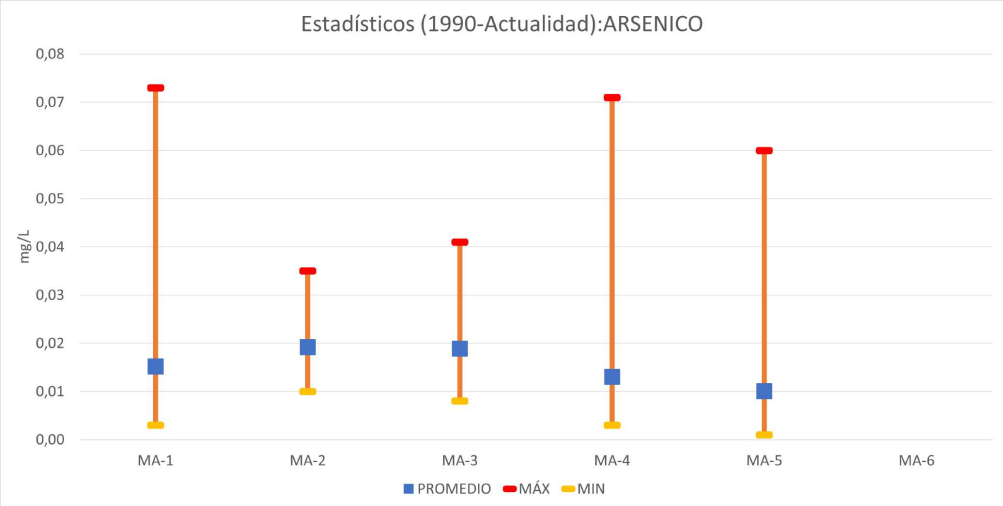
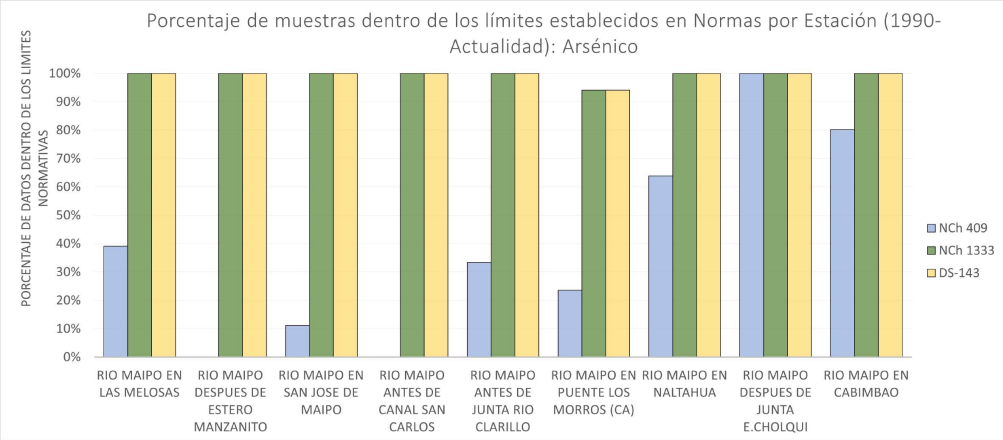


Figura 5.8: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-Actualidad) : Arsénico Total.

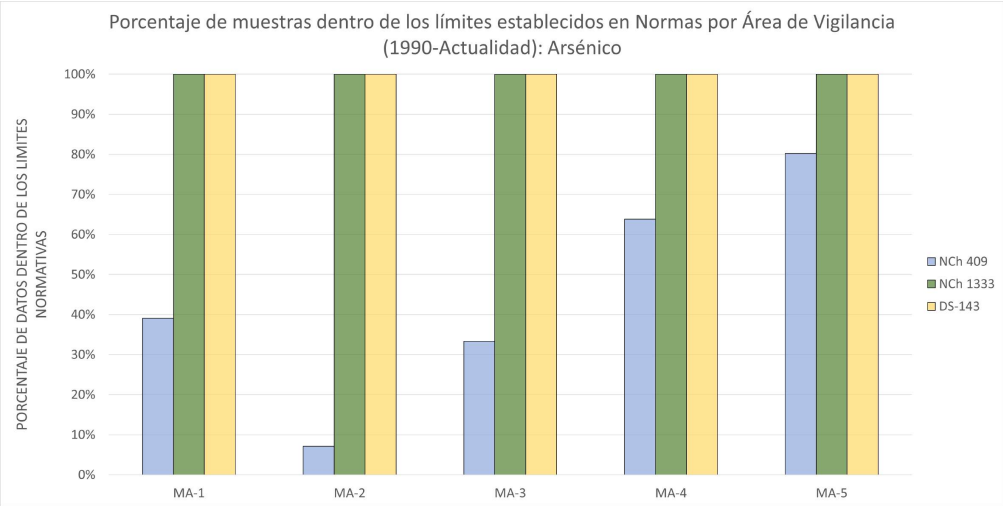
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

La Figura 5.9 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 3 normativas de uso, donde se observan porcentajes menores para NCh 409 seguido de NCh 1333 y el D.S. N°143, conforme a las exigencias establecidas en las diferentes normativas.

También se observa que el 100 % de las muestras representativas por área de vigilancia se encuentra sobre los límites establecidos en la NCh 1333 y el D.S. N°143. Por otro lado, se observa que la NCh 409, más exigente, se tienen porcentajes menores. El porcentaje de cumplimiento para esta norma tiende a disminuir aguas abajo de MA-1 para luego aumentar continuamente aguas abajo de MA-2 hasta MA-5, logrando su mayor porcentaje en esta ultima (80 %). El resto tiene porcentajes bajo el 70 % llegando a un mínimo en MA-2 con tan solo 7 %.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.9: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Arsénico Total.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA (2022).

5.5.4.2. Boro Total

La Tabla 5.24 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el boro total donde, podemos observar que solo la NCh 1333 establece un límite, de 0,75 mg/L.

Tabla 5.24: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Boro Total.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Boro Total	no aplica	0,75	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

No se presentan la serie de concentraciones para el periodo 1990-2022 y los estadísticos de las concentraciones de boro total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo ya

que el 97 % de los datos (de un total de 290) corresponde a concentraciones menores al límite de detección de 1 mg/L de la metodología mayormente empleada. Este límite de detección se encuentran por sobre el límites establecido en la norma NCh 1333 por tanto, no se presenta una evaluación sobre el porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en esta norma.

5.5.4.3. Cadmio Total

La Tabla 5.25 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el cadmio total donde, podemos observar que la NCh 409 y NCh 1333 establecen el mismo límite máximo de 0,01 mg/L. Por su lado, el D.S. N°143 establece un límite menos exigente de 0,033 mg/L.

Tabla 5.25: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cadmio Total.

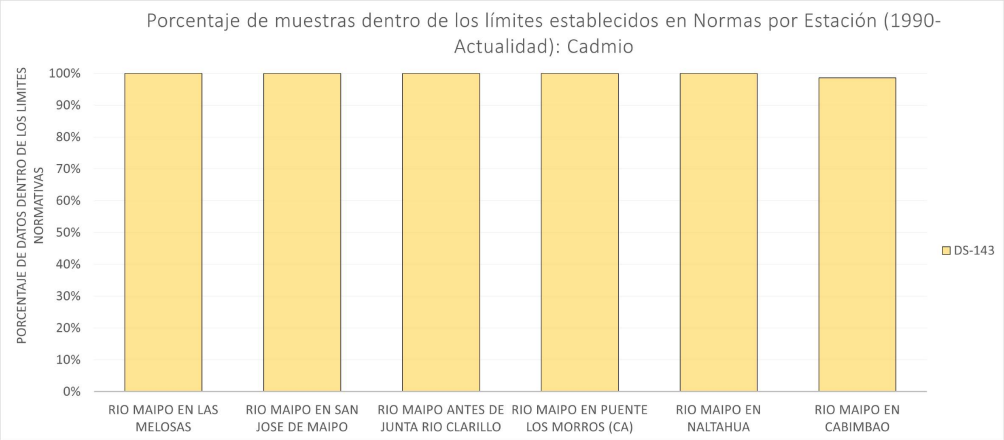
Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Cadmio	0,01	0,01	0,033	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

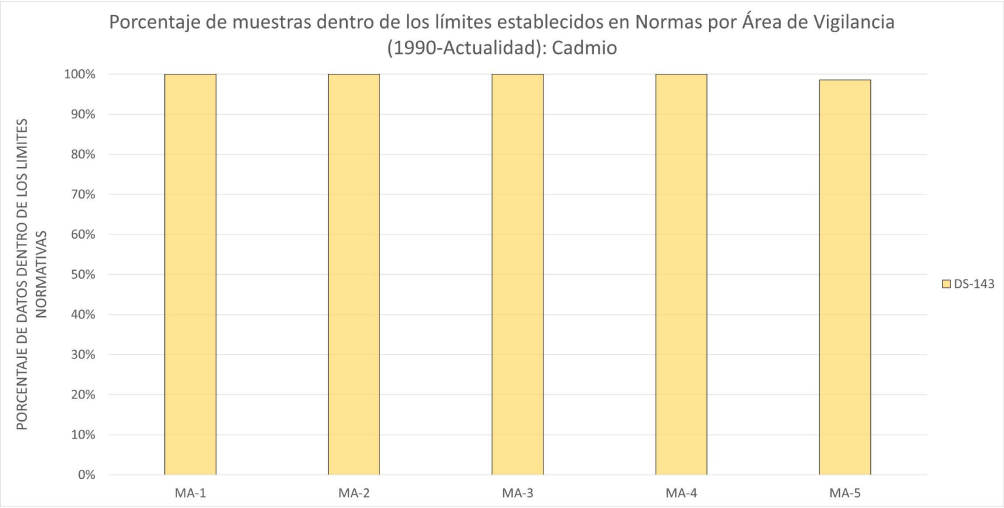
No se presenta la serie de concentraciones de cadmio total para el periodo 1990-2022 y los estadísticos de las concentraciones de cadmio total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo debido a que la mayoría de las concentraciones son inferiores a los límites de detección de las metodologías empleadas para medir la concentración de este parámetro. Un 93 % de los datos corresponde al límite de detección 0,01 mg/L y un 99 % corresponden a los límite de detección 0,01 mg/L, 0,004 mg/L O 0,002 mg/L de un total de 287 datos.

La Figura 5.10, presenta únicamente los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos establecidos en el D.S. N°143, ya que los límites establecidos en la NCh 409 y la NCh 1333 son iguales a los límites de detección de la metodología empleada en la mayoría de las muestras.

De esta figura se observa que el 100 % de las muestras se encuentran bajo los límites establecidos en el D.S. N°143.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.10: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cadmio Total.

5.5.4.4. Conductividad Eléctrica

La Tabla 5.26 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para la conductividad eléctrica donde, solo se establecen límites en la NCh 1333, y estos dependen de la clasificación del agua de riego. Estas 4 clasificaciones se presentan en la Tabla 5.27. También se presentan en la Tabla 5.28 los cultivos de acuerdo a las clasificaciones de sensibilidad frente a este parámetro.

Tabla 5.26: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Conductividad Eléctrica.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Conductividad Eléctrica	no aplica	Según clasificación riego	no aplica	μS/cm

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Tabla 5.27: Tabla 2 NCh 1.333: - Clasificación de aguas para riego según su salinidad. Fuente: INN (1987)

Clasificación	Conductividad especifica, c, μ mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales, s, mg/l a 105°C
Agua con la que generalmente no se observan efectos perjudiciales	c <750	s <500
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	750 < c <1500	500 < s <1000
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	1500 < c <3000	1000 < s <2000
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	3000 < c <7500	2000 < s <5000

Fuente: NCh 1333/1978.

Tabla 5.28: Clasificación de cultivos de acuerdo a sus sensibilidad frente a conductividad eléctrica

Clasificación	Cultivos
Muy sensibles	Limón, Mora
Sensibles	Palta, Pomelo, Naranja, Damasco, Durazno, Cereza, Ciruela, Caqui, Higo, Uva, Nuez, Cebolla, Ajo, Camote, Trigo, Cebada, Girasol, Porotos, Sesamo, Lupino, Frutilla, Alcachofa, Haba, Mani, Olmo, Pera, Manzana
Moderadamente sensible	Pimiento, Arveja, Zanahoria, Rábano, Papa, Pepino
Moderadamente tolerante	Lechuga, Repollo, Apio, Nabo, Avena, Maiz, Tabaco, Mostaza, Zapallo, Melón, Aceituna, Calabaza
Tolerante	Tomate, Alfalfa, Perejil, Remolacha, Betarraga, Palma
Muy tolerante	Algodón, Esparragos

Fuente: (Abrol et al., 1988).

Se presenta en la Tabla 5.29 las hectáreas sembradas de diferentes hortalizas en la Región Metropolitana durante el año 2022. También se presenta la superficie cosechada de diferentes cultivos para el año agrícola 2021-22 en la Tabla 5.30. A partir de estas tablas se observa la

amplia variedad de cultivos considerados sensibles que son cultivados en la cuenca.

Tabla 5.29: Siembra de Hortalizas Región Metropolitana Año 2022.

Especie	Superficie sembradas 2022 (hectareas)
Acelga	596,6
Ají	124,1
Ajo	533,5
Alcachofa	361,5
Apio	190,5
Arveja verde	169,4
Betarraga	1.023,4
Brócoli	1.045,3
Cebolla de guarda	1.716,0
Cebolla temprana	1.671,5
Choclo	3.324,8
Coliflor	936,8
Espinaca	628,5
Haba	1.273,4
Lechuga	2.094,6
Melón	794,2
Orégano	138,2
Pepino de ensalada	193,2
Pimiento	188,3
Poroto granado	1.328,4
Poroto verde	919,8
Repollo	638,6
Sandía	294,6
Tomate consumo fresco	854,0
Zanahoria	931,7
Zapallo italiano	502,7
Zapallo temprano y de guarda	1.359,9
Otras hortalizas	1.656,2
Total	**25.489,7**

Fuente: (INE, 2022a).

Tabla 5.30: Superficie cosechada Región Metropolitana año 2021-22.

Cultivo	Superficie cosechada año 2021-22 (hectáreas)
Trigo	3.358
Avena	3.188
Maíz	2.295
Poroto	284
Papa	2.208
Raps	199
Maravilla	501
TOTAL	**12.033**

Fuente: (INE, 2022b).

Sobre los datos disponibles de conductividad eléctrica, se presenta en la Figura 5.11 la serie de valores para el periodo 1990-2022. Se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones durante este período, con mayor densidad de datos a partir de la entrada en vigencia del D.S. N°53/2014 (ver análisis conductividad eléctrica en capítulo Calidad Físico-Química).

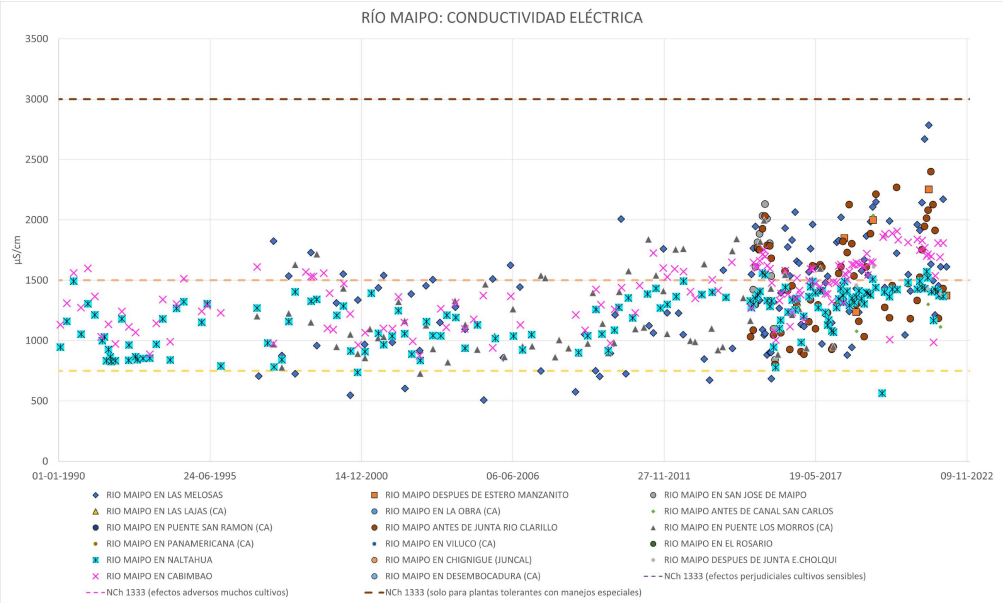


Figura 5.11: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Conductividad Eléctrica.

La Figura 5.12 y la Tabla 5.31 presentan los estadísticos de los valores de conductividad eléctrica en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa una tendencia a aumentar las concentraciones promedio y mínimos aguas abajo de MA-1 para luego disminuir aguas abajo de MA-2 hasta MA-4 y finalmente aumentar en MA-5.

También se observa un mayor número de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y un número considerable para las de MA-2 y MA-3. No se

cuenta con información para MA-6.

Tabla 5.31: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Conductividad Eléctrica.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [μS/cm]	MÁX [μS/cm]	MIN [μS/cm]
MA-1	115	1382	2785	508
MA-2	76	1650	2704	841
MA-3	63	1494	2400	801
MA-4	150	1208	1572	564
MA-5	138	1417	1906	875
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

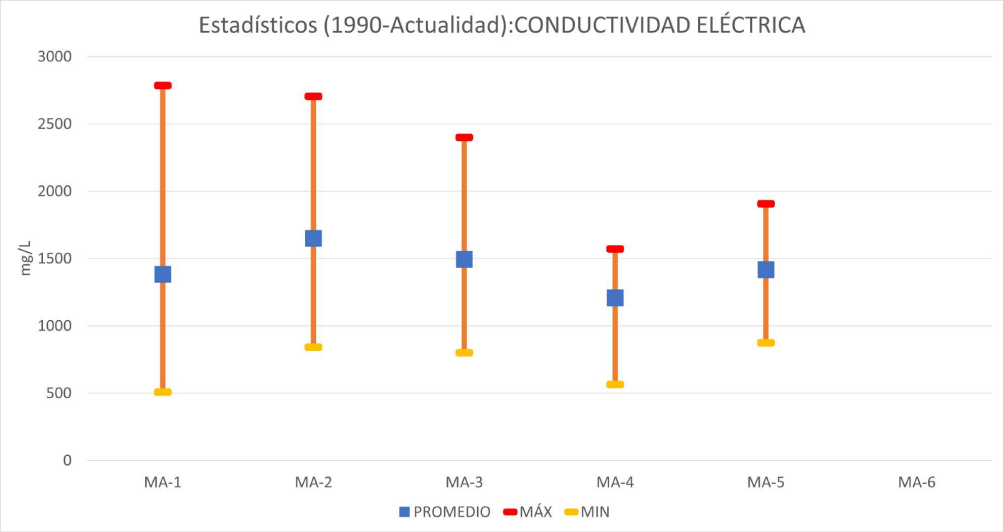
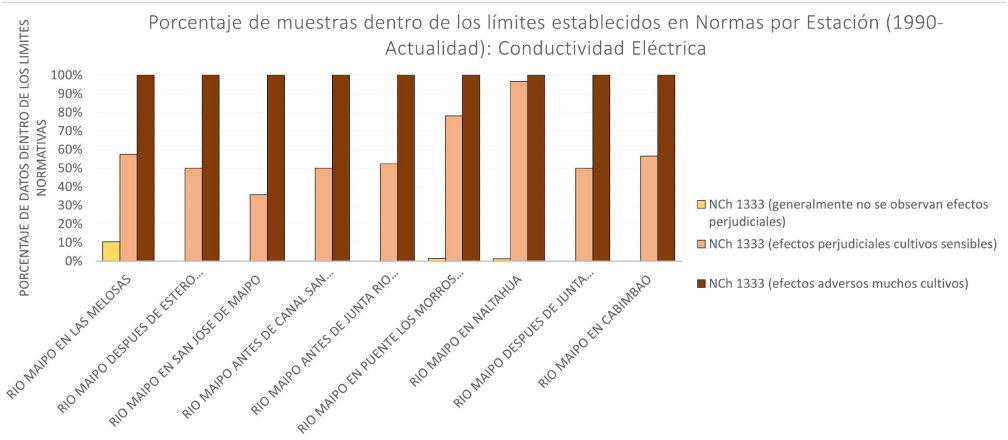
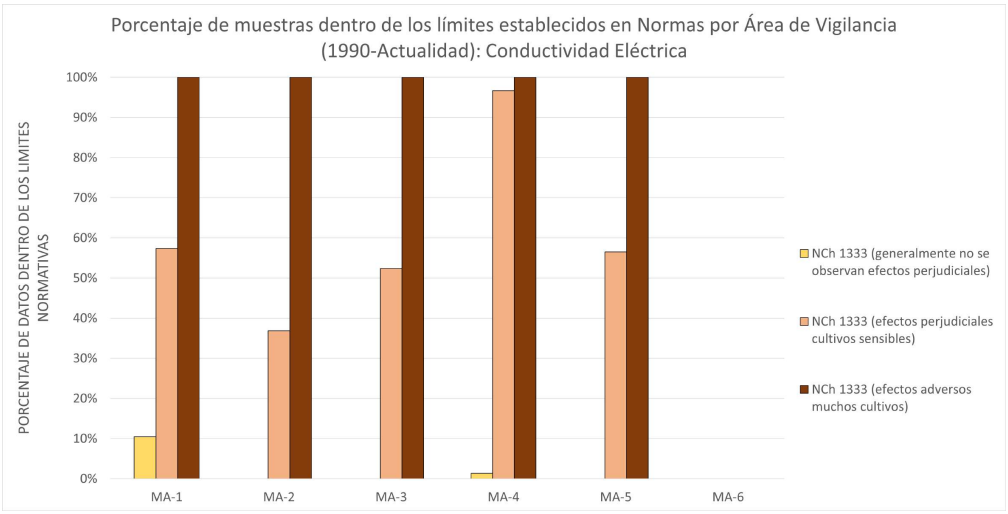


Figura 5.12: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Conductividad Eléctrica.

La Figura 5.13 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos para las 3 primeras clasificaciones de la normativas de uso para riego (NCh 1333/1978), donde se observan porcentajes menores y bajo el 10 % para todas las áreas e incluso llegando a 0 % en MA-2, MA-3 y MA-5 para la clasificación más exigente (agua con la que no se observan efectos perjudiciales). Para la segunda clasificación más exigente, se observan porcentajes mayores pero bajo el 60 % en todas las áreas salvo MA-4 (97 %) y con valores bajo el 40 % en MA-2. Finalmente para la tercera clasificación se observan porcentajes del 100 % para todas las áreas y estaciones.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.13: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Conductividad Eléctrica.

5.5.4.5. Cloruro

La Tabla 5.32 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el cloruro donde, podemos observar que el límite establecido en la NCh 1333 es el más exigente con 200 mg/L, seguido por la NCh 409 con 400 mg/L. Por su parte, el D.S. N°143 no establece límites para este parámetro.

Tabla 5.32: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cloruro.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Cloruro	400	200	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.14 la serie de concentración de cloruro para el periodo 1990-2022 donde, se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones durante este

período, con mayor densidad de datos posterior a la publicación de la NSCA río Maipo (2014).

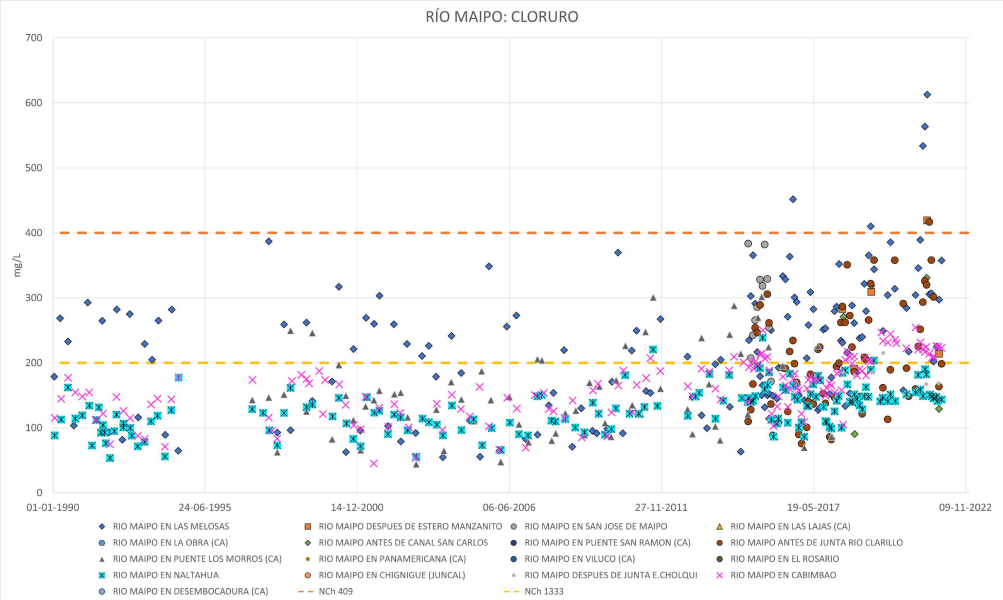


Figura 5.14: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Cloruro.

La Figura 5.15 y la Tabla 5.33 presentan los estadísticos de las concentraciones de Cloruro en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa una tendencia a aumentar las concentraciones promedio y mínimos levemente aguas abajo de MA-1 para luego disminuir aguas abajo de MA-2 hasta MA-4 y posteriormente aumentar en MA-5.

También se observa un mayor numero de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y un número considerable de información para las de MA-2 y MA-3. No se cuenta con información para MA-6.

Tabla 5.33: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Cloruro.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	147	221	613	55
MA-2	76	257	539	86
MA-3	68	206	417	76
MA-4	160	130	239	54
MA-5	152	162	254	45
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

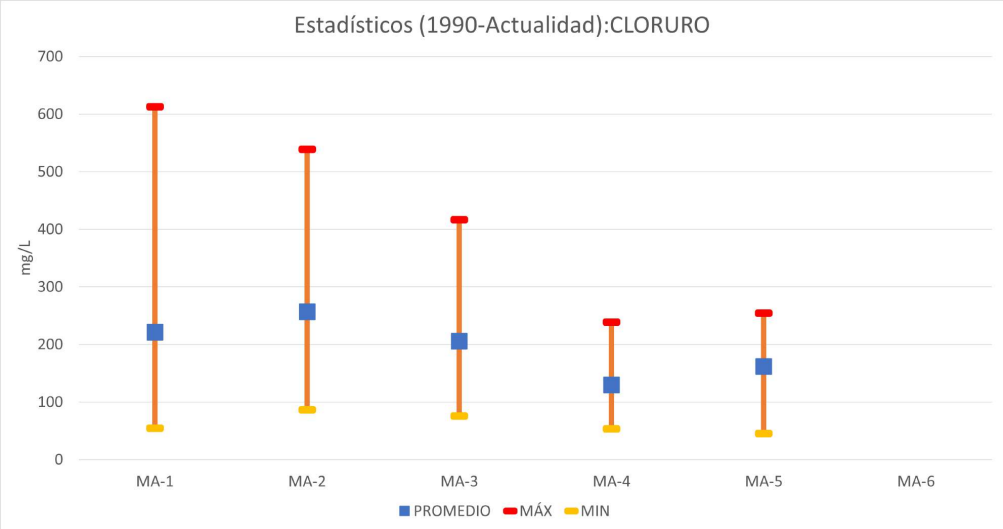
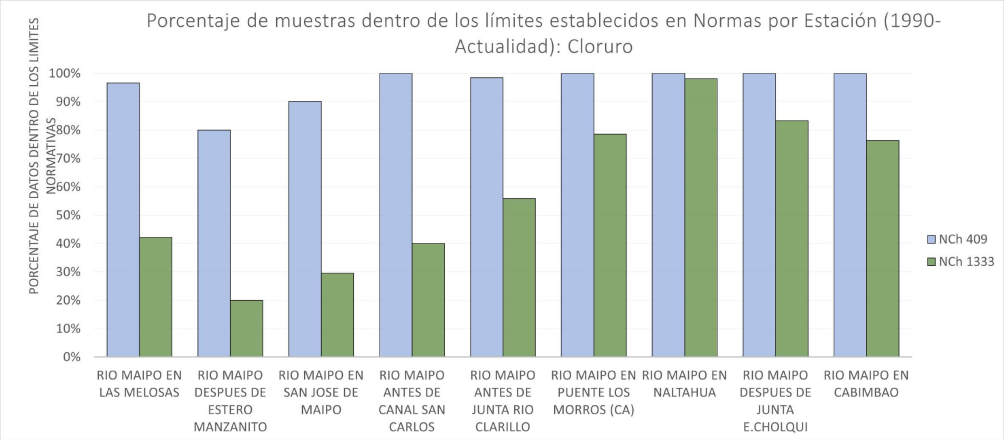
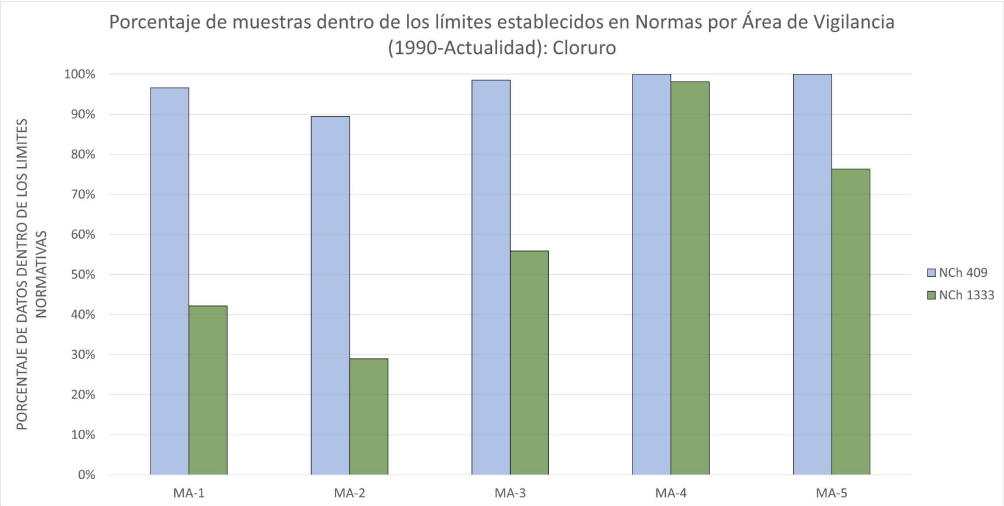


Figura 5.15: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Cloruro.

La Figura 5.16 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la NCh 409 y NCh 1333, donde se observan porcentajes menores para NCh 1333, principalmente en las áreas MA-1, MA-2 y MA-3 con valores de 42, 29 y 56 % respectivamente, en el caso de MA-4 y MA-5 se obtienen porcentajes sobre el 70 % con 98 y 76 % respectivamente. Para el caso de la NCh 409, se obtienen porcentajes sobre el 89 % en todas las áreas con el menor porcentaje en MA-2.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.16: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cloruro.

5.5.4.6. Cobre Total

La Tabla 5.34 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el cobre total donde, podemos observar que la NCh 1333 es la más exigente con un limite máximo de 0,2 mg/L, seguido por la NCh 409 con 2 mg/L. El D.S. N°143 no establece límites para este parámetro.

Tabla 5.34: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cobre Total. Fuente: Elaboración Propia

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Cobre	2	0,2	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.17 la serie de concentración de cobre total para el periodo 1990-

2022 donde, se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones durante este período.

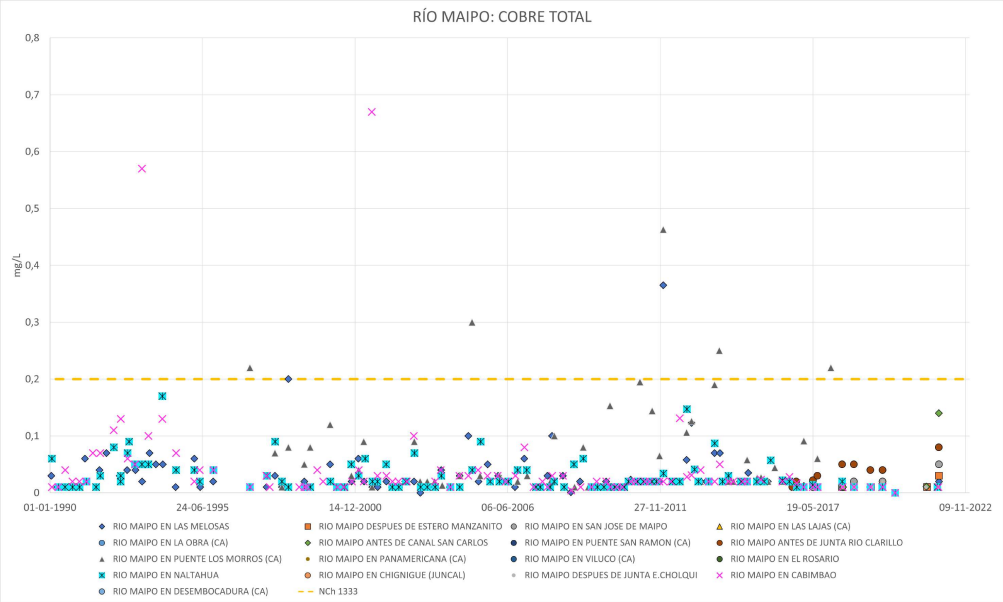


Figura 5.17: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Cobre Total.

La Figura 5.18 y la Tabla 5.35 presentan los estadísticos de las concentraciones de Cobre Total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde no se observa una tendencia clara. Disminuye la concentraciones promedio aguas abajo de MA-1 para luego aumentar aguas abajo de MA-2, disminuir nuevamente aguas abajo de MA-3 y finalmente aumentar aguas abajo de MA-4 hasta MA-5.

También se observa un mayor número de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y menor información disponible para las de MA-2 y MA-3. No se cuenta con información para MA-6.

Tabla 5.35: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Cobre Total.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	91	0,03	0,37	L/D = 0,01
MA-2	14	0,02	0,05	L/D = 0,01
MA-3	9	0,04	0,08	L/D = 0,01
MA-4	98	0,03	0,17	L/D = 0,01
MA-5	92	0,04	0,67	L/D = 0,01
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

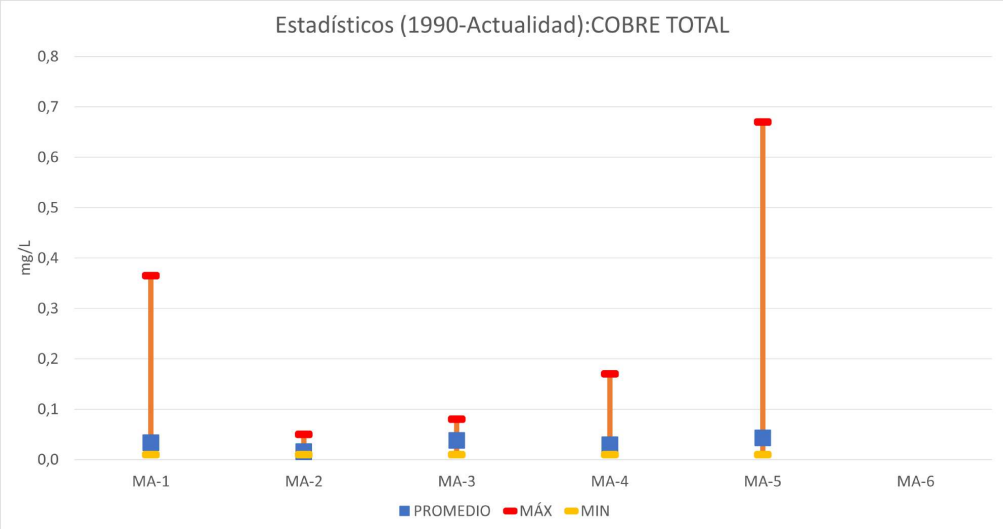
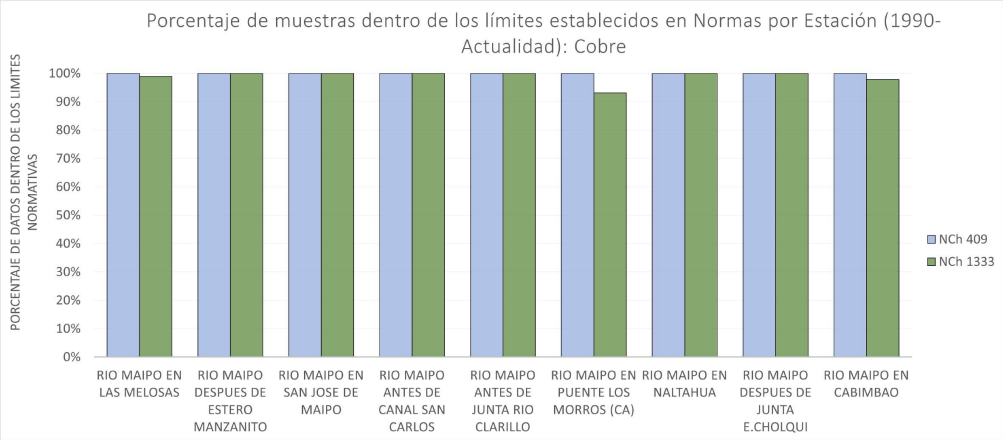


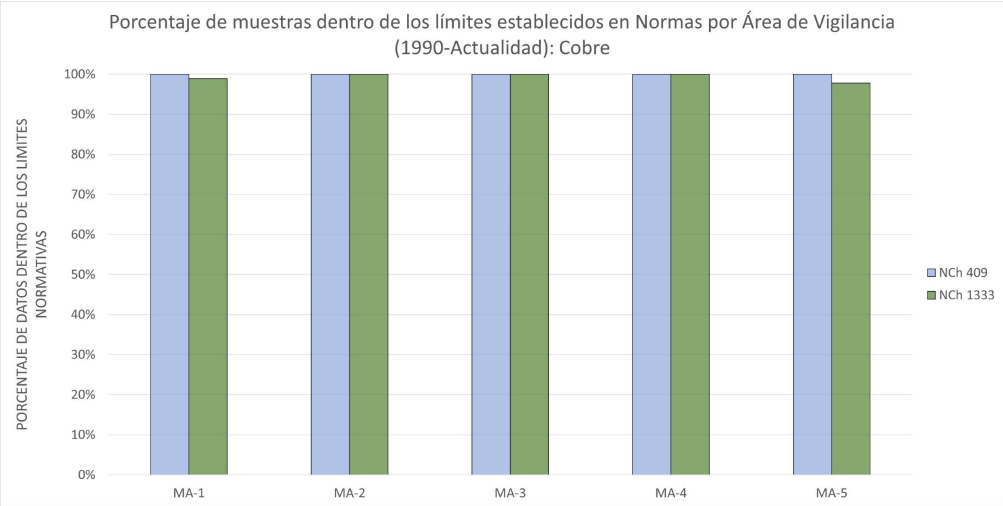
Figura 5.18: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Cobre Total.

La Figura 5.19 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 2 normativas de uso, donde se observan porcentajes menores para NCh 1333 seguido por la NCh 409, conforme a las exigencias establecidas en ambas normativas.

También se observa que el 100 % de las muestras representativas por área de vigilancia se encuentra sobre los limites establecidos en la NCh409. Por otro lado, se observa que la Nch1333, más exigente, tiene cumplimientos sobre el 98 % para todas las áreas de vigilancia.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.19: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cobre Total.

5.5.4.7. Cromo Total

La Tabla 5.36 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el cromo total donde, se observa que la NCh 409 es la más exigente con un límite máximo de 0,05 mg/L, seguida por la NCh 1333 con 0,1 mg/L y finalmente el D.S. N°143 con 0,55 mg/L.

Tabla 5.36: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Cromo Total.

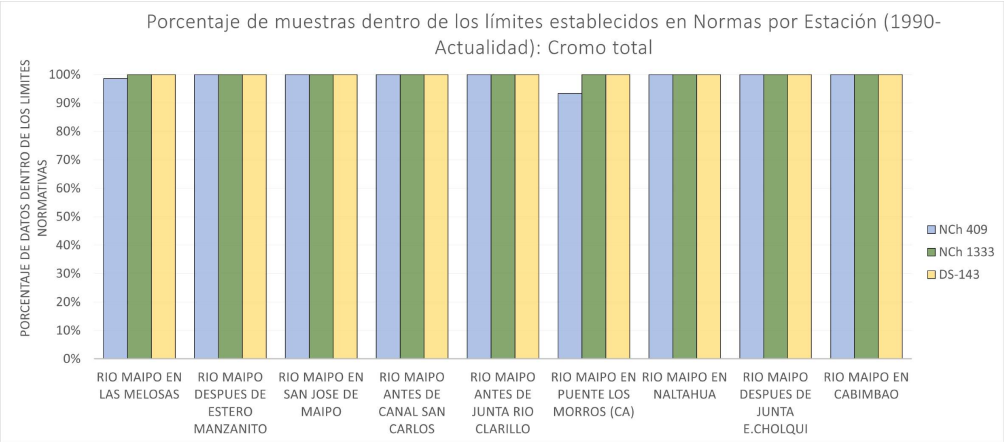
Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Cromo Total	0,05	0,1	0,55	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

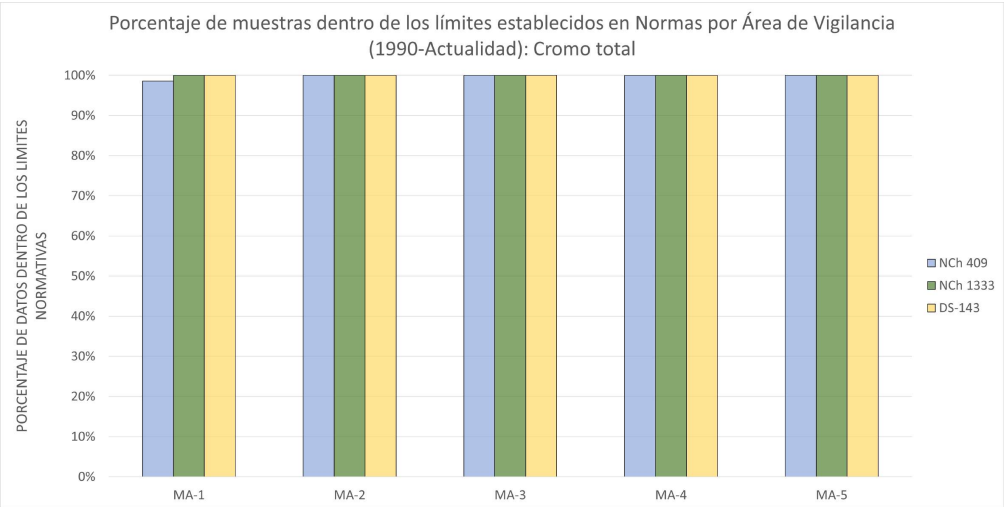
No se presenta la serie de concentraciones y los estadísticos para el cromo total para el periodo 1990-2022 debido a que la mayoría de la concentraciones son menores que los límites

de detección de las metodologías empleadas para medir la concentración de este parámetro, donde un 88 % de los datos corresponden a los límites de detección de 0,05 mg/L, 0,01 mg/L, 0,03 mg/L y 0,001 mg/L representando el 6 %, 26 %, 48 % y 8 % de las muestras respectivamente de un total de 356 registros.

La Figura 5.20, se presentan los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 3 normativas de uso, donde se observan porcentajes del 100 % para todas las muestras con respecto a la NCh 1333 y D.S. N°153. En el caso de la NCh 409, se tienen porcentajes con valores sobre el 99 % para todas las áreas sin tomar en cuenta los registros que representan el límite de detección de 0,05 mg/L (igual al límite establecido en esta norma).



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.20: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Cromo Total.

5.5.4.8. Hierro Total

La Tabla 5.37 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el hierro total. De esta podemos observar que la NCh 409 es la más exigente con un límite máximo

de 0,3 mg/L, seguido por la NCh 1333 con 5 mg/L. El D.S. N°143 no establece límites para este parámetro.

Tabla 5.37: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Hierro Total.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Hierro Total	0,3	5	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.38 la serie de concentración de hierro total en el periodo 1990-2022.

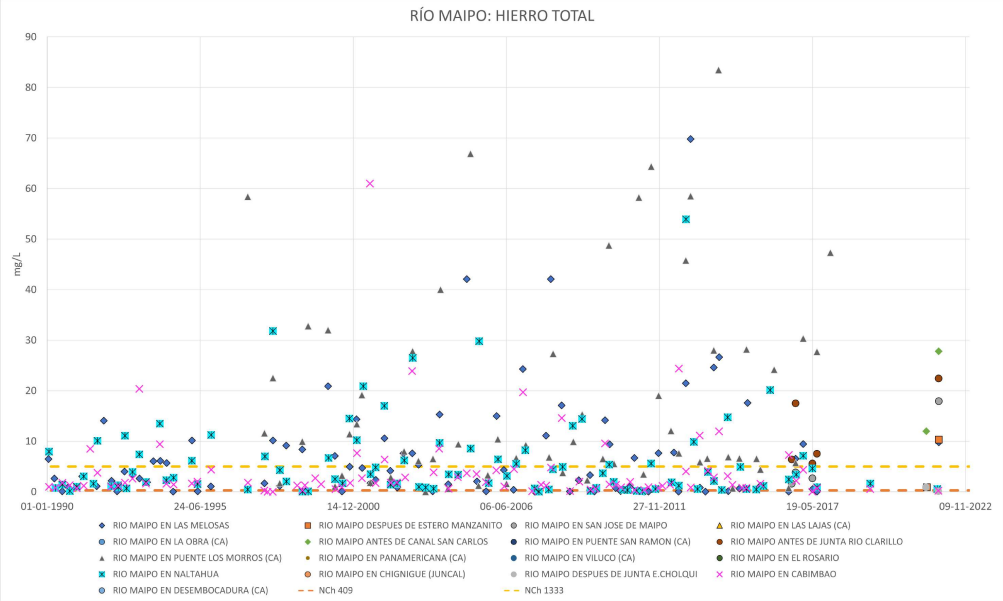


Figura 5.21: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Hierro Total.

La Figura 5.22 y la Tabla 5.38 presentan los estadísticos de las concentraciones de hierro total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, Pese a observarse un aumento en la concentraciones promedio aguas abajo de MA-1 para luego disminuir aguas abajo de MA-3 hasta MA-5, no se puede asegurar esta tendencia debido a que las estaciones MA-2 y MA-3 contienen pocos registros en comparación a las otras estaciones, por tanto podrían son poco representativas del periodo 1990-2022.

Se observa un mayor número de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y menor información disponible para las de MA-2, MA-3 y sin información para MA-6.

También se observan valores promedio, máximos e incluso mínimos en algunos casos muy por encima de los límites establecidos en la NCh 409 y la NCh 1333.

Tabla 5.38: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Hierro Total

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO	MÁX	MIN
MA-1	87	7,08	69,80	0,01
MA-2	7	5,45	17,93	0,90
MA-3	5	11,88	22,42	5,60
MA-4	94	5,65	53,91	0,03
MA-5	91	4,10	61,00	0,01
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

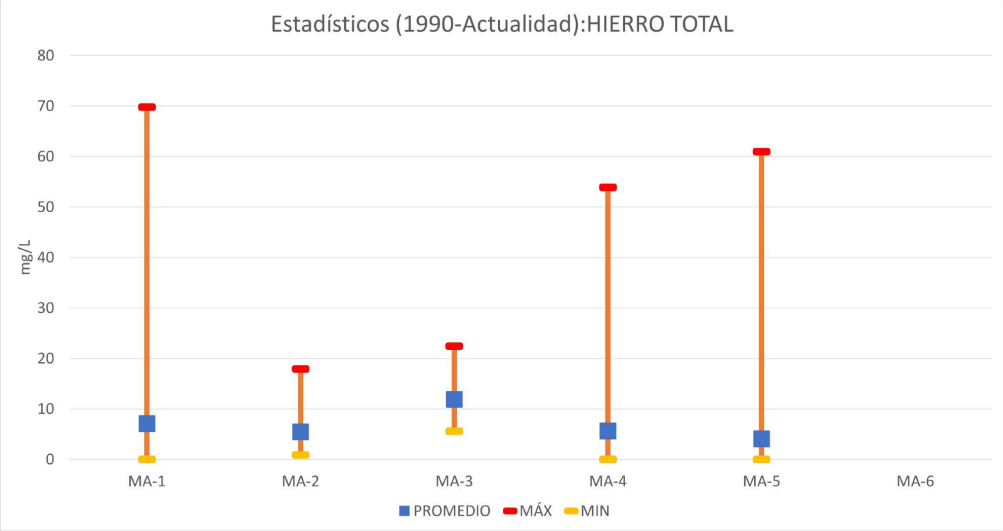
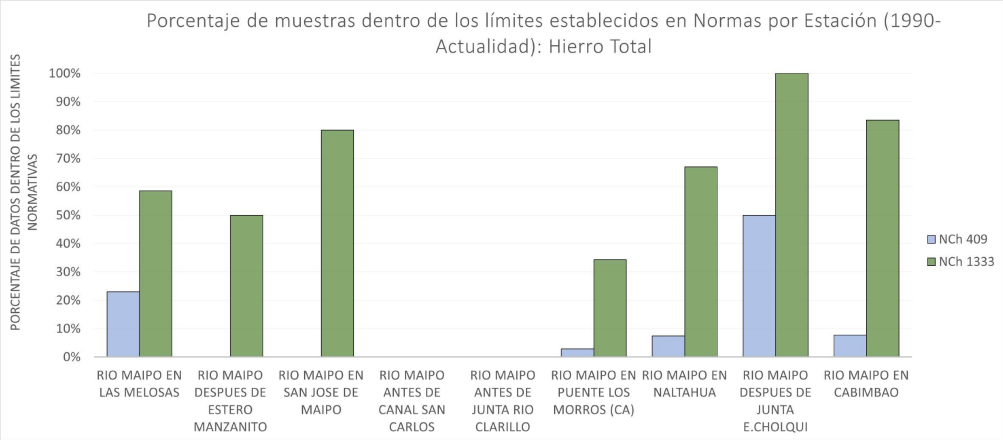
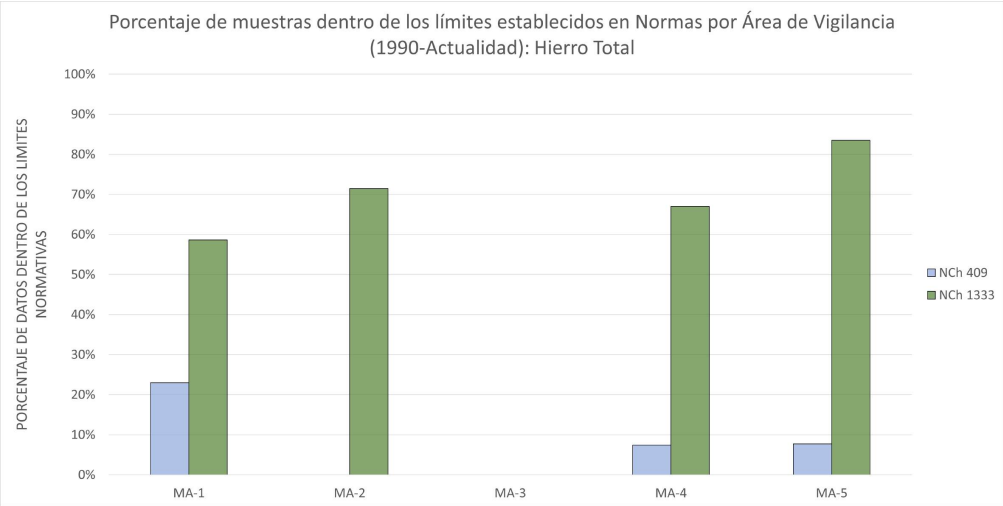


Figura 5.22: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Hierro Total.

La Figura 5.23 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 2 normativas de uso donde se observan bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la NCh 409, con un valor máximo de 23 % para la estación representativa de MA-1, y con valores bajo el 8 % para las estaciones representativas de MA-4 y MA-5 e incluso del 0 % para las de MA-2 y MA-3. Para la NCh 1333 se obtienen porcentajes mayores, con porcentajes sobre el 59 % para MA-1, MA-2, MA-4 y MA-5, pero con 0 % para el caso de MA-3.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.23: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Hierro Total.

5.5.4.9. Magnesio Total

La Tabla 5.39 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el magnesio total. De esta podemos observar solo la NCh 409 establece un límite para este parámetro de 125 mg/L. Por otro lado, la NCh 1333 y el D.S. N°143 no establecen límites para este parámetro.

Tabla 5.39: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Magnesio Total.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Magnesio Total	125	no aplica	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.24 la serie de concentración de magnesio total en el periodo 1990-2022 donde, se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones du-

rante este período, que se ve interrumpido a partir del año 2012.

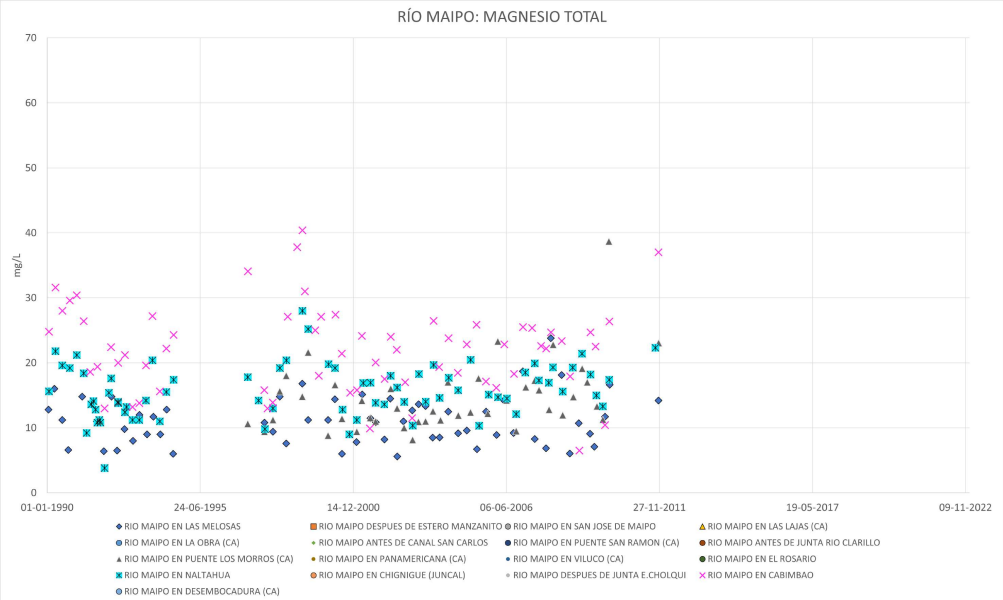


Figura 5.24: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Magnesio Total.

La Figura 5.25 y la Tabla 5.40 presentan los estadísticos de las concentraciones de magnesio total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa una tendencia a aumentar las concentraciones promedio aguas abajo de MA-1 hasta MA-5.

También se observa un número considerable de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y sin información disponible para las de MA-2, MA-3 y MA-6.

Tabla 5.40: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Magnesio Total.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	60	11	24	6
MA-2	0	S/I	S/I	S/I
MA-3	0	S/I	S/I	S/I
MA-4	73	16	28	4
MA-5	65	22	40	7
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

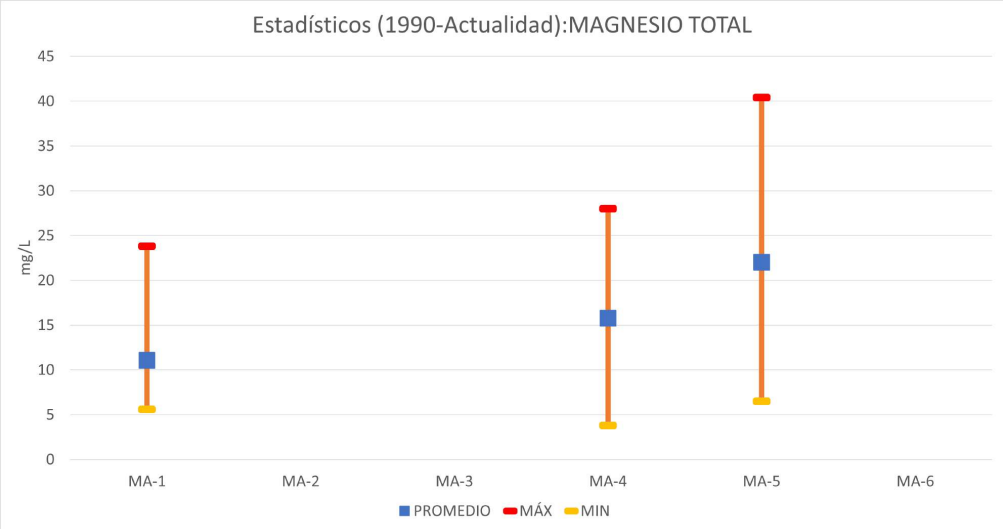
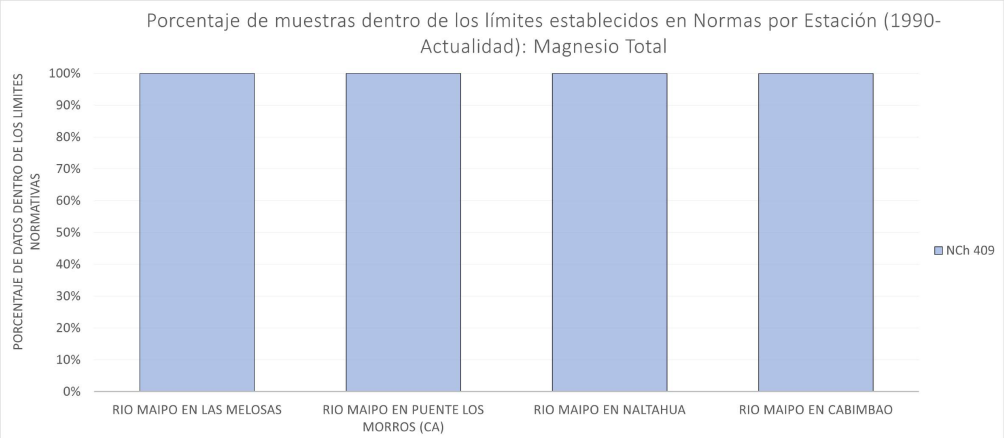
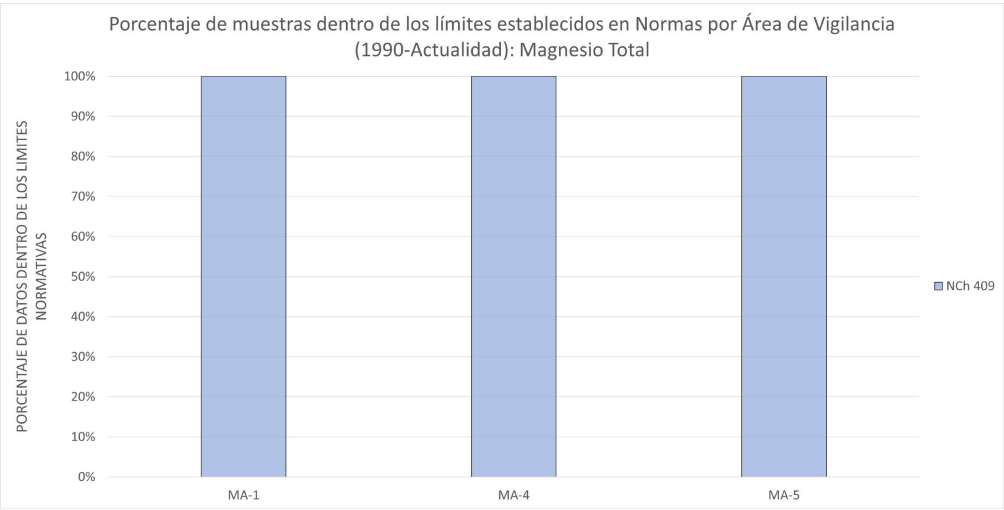


Figura 5.25: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Magnesio Total.

La Figura 5.26 presenta los porcentajes de muestras dentro de los limites establecidos en la normativa de uso NCh 409, donde se observan porcentajes sobre el 100 % para todas las muestras correspondientes a las áreas MA-1, MA-4 y MA-5. No se evalúan las áreas MA-2, MA-3 y MA-6 al no contar con información.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.26: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Magnesio Total.

5.5.4.10. Manganeso Total

La Tabla 5.41 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el manganeso total, donde se observa que la NCh 409 es la más exigente con un límite máximo de 0,1 mg/L, seguido por la NCh1333 con 0,2 mg/L y finalmente el D.S. N°143 no establece un límite para este parámetro.

Tabla 5.41: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Manganeso Total.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Manganeso Total	0,1	0,2	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.27 la serie de concentración de manganeso total en el periodo 1990-2022. Se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones durante este

período hasta el año 2018, a partir del cual se tienen escasos registros.

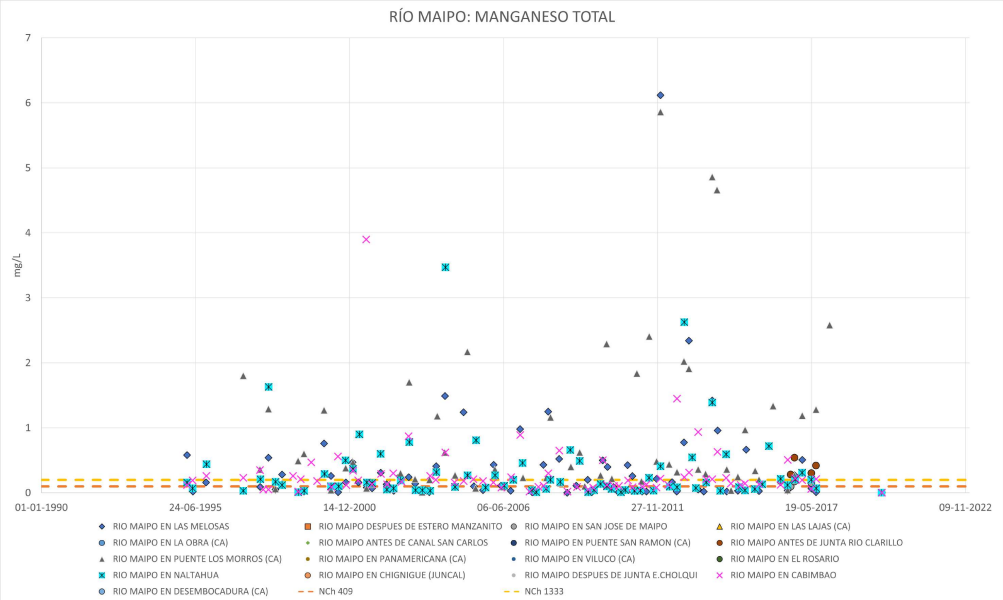


Figura 5.27: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Manganeso Total.

La Figura 5.28 y la Tabla 5.42 presentan los estadísticos de las concentraciones de manganeso total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde no se observa una tendencia clara en los promedios de las concentraciones aguas abajo.

También se observa un mayor número de registros para las estaciones representativas de MA-1, MA-4 y MA-5, y menor información disponible para las de MA-2 y MA-3. No se cuenta con información suficiente para MA-6.

Tabla 5.42: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Manganeso Total.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	72	0,39	6,12	L/D = 0,001
MA-2	5	0,10	0,17	L/D = 0,003
MA-3	5	0,31	0,54	L/D = 0,003
MA-4	76	0,31	3,47	L/D = 0,003
MA-5	74	0,30	3,90	L/D = 0,003
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

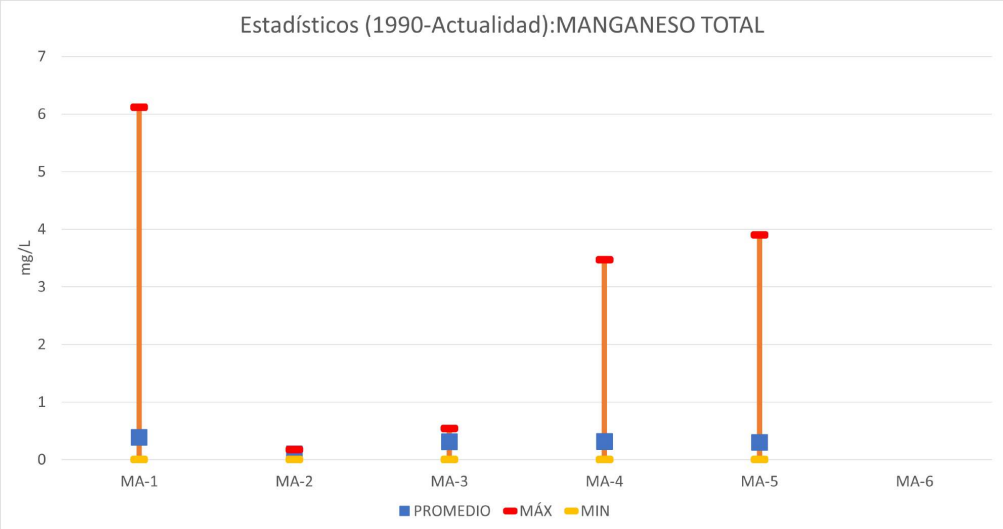
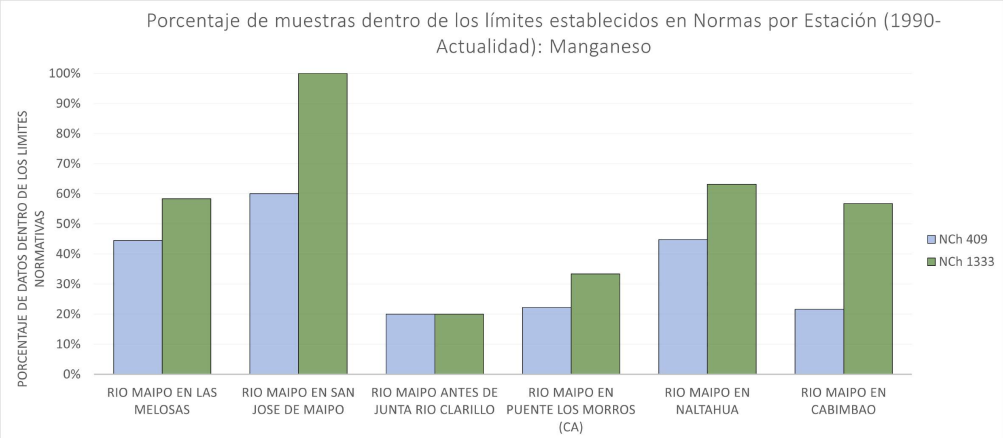


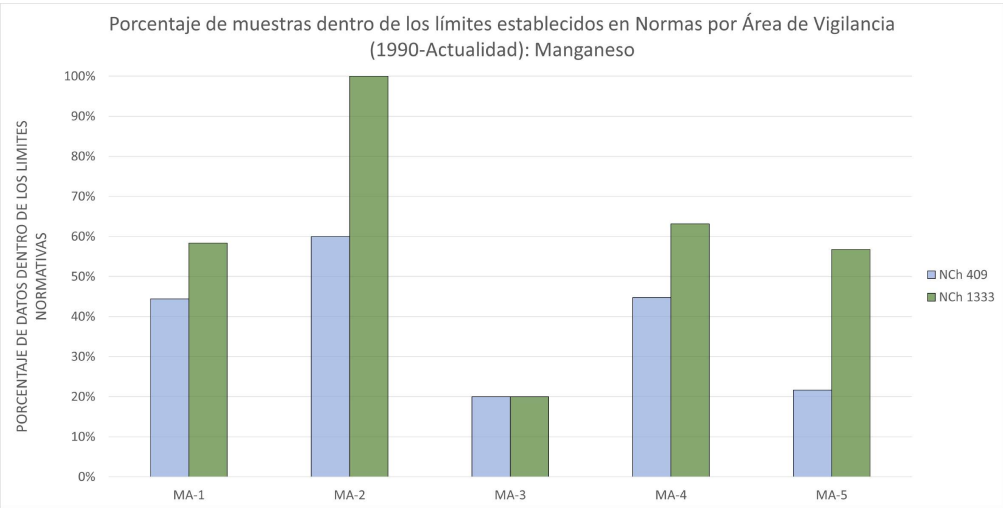
Figura 5.28: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Manganeso Total.

La Figura 5.29 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en 2 normativas de uso, donde se observan porcentajes menores para NCh 409, que no sobrepasan el 60 % en todas sus muestras, y con porcentajes bajo el 50 % en las áreas MA-1, MA-3, MA-4 y MA-5, teniendo un mínimo de 20 % en MA-3.

En el caso de la NCh 1333, esta tiene porcentajes mayores, con un porcentaje máximo en MA-2 del 100 %. Aun así, las áreas MA-1, MA-3, MA-4 y MA-5 tienen porcentajes menores al 65 % con un mínimo de 20 % en MA-3.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.29: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Manganeso Total.

5.5.4.11. Mercurio Total

La Tabla 5.43 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el mercurio total. De esta podemos observar que la NCh 409 y la NCh 1333 son las más exigente, con un límite máximo igual de 0,001 mg/L, seguido por la el D.S. N°143, con 0,011 mg/L.

Tabla 5.43: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Mercurio Total.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Mercurio	0,001	0,001	0,011	mg/L

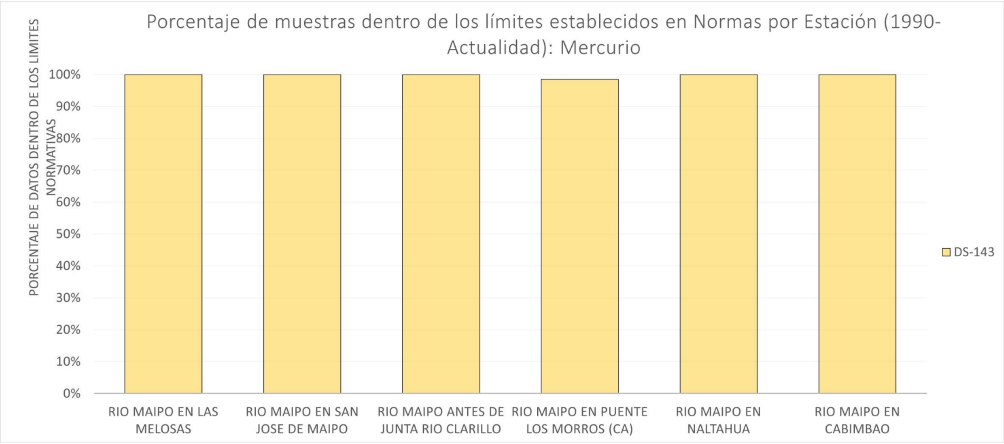
Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

No se presenta la serie de concentraciones y los estadísticos para el mercurio total durante el periodo 1990-2022 debido a que la mayoría de las concentraciones son menores a los límites

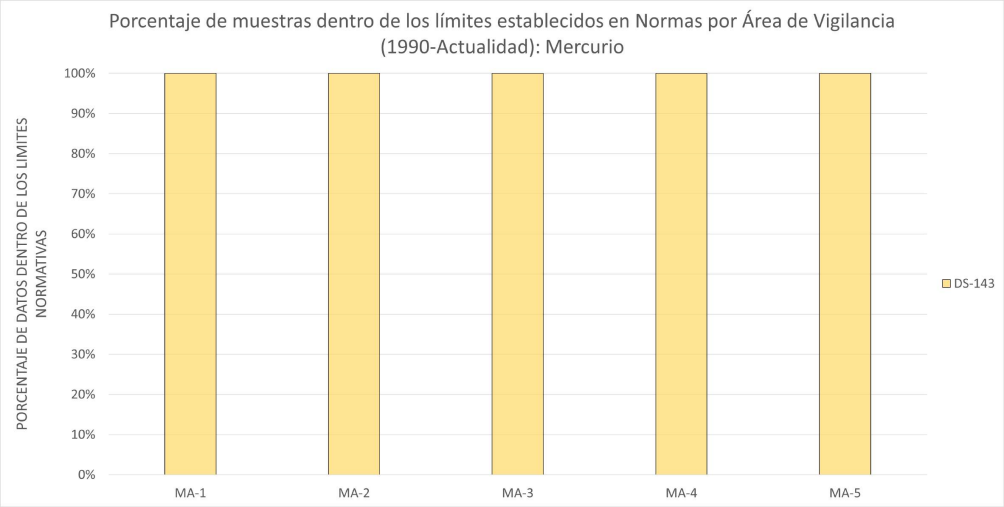
de detección de las metodologías empleadas para medir la concentración de este parámetro. Un 98 % de los datos corresponden a límites de detección de 0,001 mg/L y 0,002 mg/L con porcentajes del 78 % y 19 % respectivamente de un total de 272 registros.

La Figura 5.30 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos únicamente en el D.S. N°143, debido a que el 78 % de las muestras corresponden a concentraciones menores que los límites de detección que son iguales o mayores al límite establecido en la NCh 409 y NCh 1333.

Se observa que el 100 % de las muestras representativas por área de vigilancia se encuentra dentro de los límites establecidos en el D.S. N°143.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.30: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Mercurio Total.

5.5.4.12. Plomo Total

La Tabla 5.44 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para plomo total, donde se observa que la NCh 409 es la más exigente con un límite máximo de 0,05

mg/L, seguido por el D.S. N°143 con 0,11 mg/L y finalmente la NCh 1333 con 5 mg/L.

Tabla 5.44: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Plomo Total.

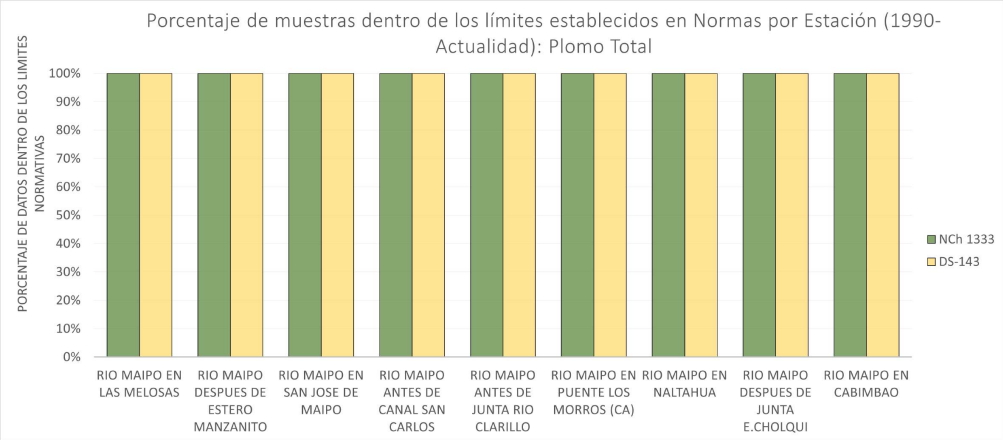
Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Plomo Total	0,05	5	0,11	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

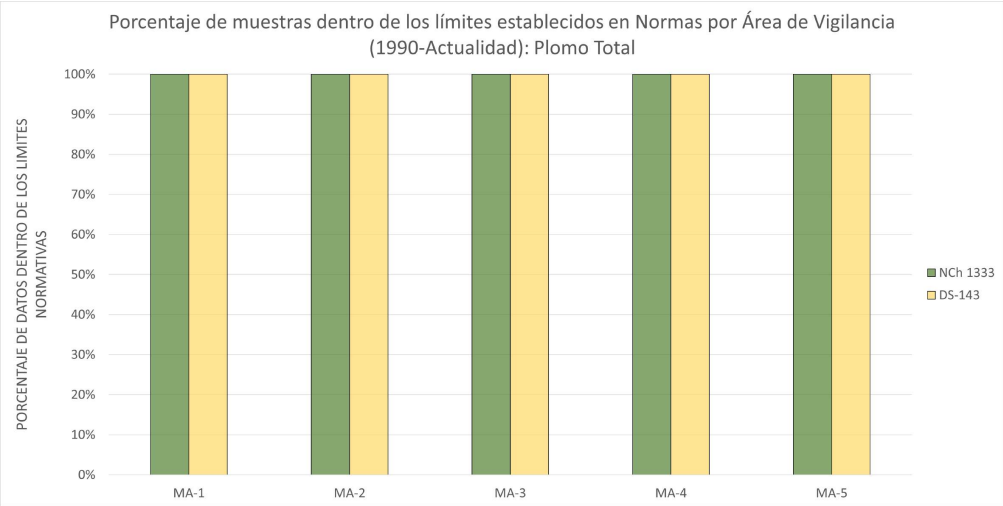
No se presenta la serie de concentraciones y los estadísticos para el plomo total durante el periodo 1990-2022 debido a que la mayoría de los datos (83 % de un total de 333) corresponde a límites de detección de las metodologías empleadas para medir la concentración de este parámetro .

La Figura 5.31 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en el D.S. N°143 y la NCh 1333 donde se observan porcentajes sobre el 100 % en todas las muestras para estas dos normativas.

No se evalúan los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la NCh 409 debido a que muchas muestras representan concentraciones menores a los límites de detección que son mayores o iguales al límite establecido en esta normativa.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.31: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Plomo Total.

5.5.4.13. Sodio porcentual

La Tabla 5.45 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el sodio porcentual. De esta podemos observar que únicamente la NCh 1333 establece un límite máximo para este parámetro correspondiente a 35 %.

Tabla 5.45: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Sodio Porcentual.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Sodio Porcentual	no aplica	35 %	no aplica	[%]

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Este parámetro no es controlado directamente en la estaciones físico-química, depende de las concentraciones de sodio, calcio, magnesio y potasio total. A pesar de depender de los registros de otros 4 parámetros, se tiene un número considerable de registros interrumpidos

el año 2017 (al igual que el magnesio), como se observa en la Figura 5.32. Esta presenta la serie de concentración de sodio porcentual en el periodo 1990-2022.

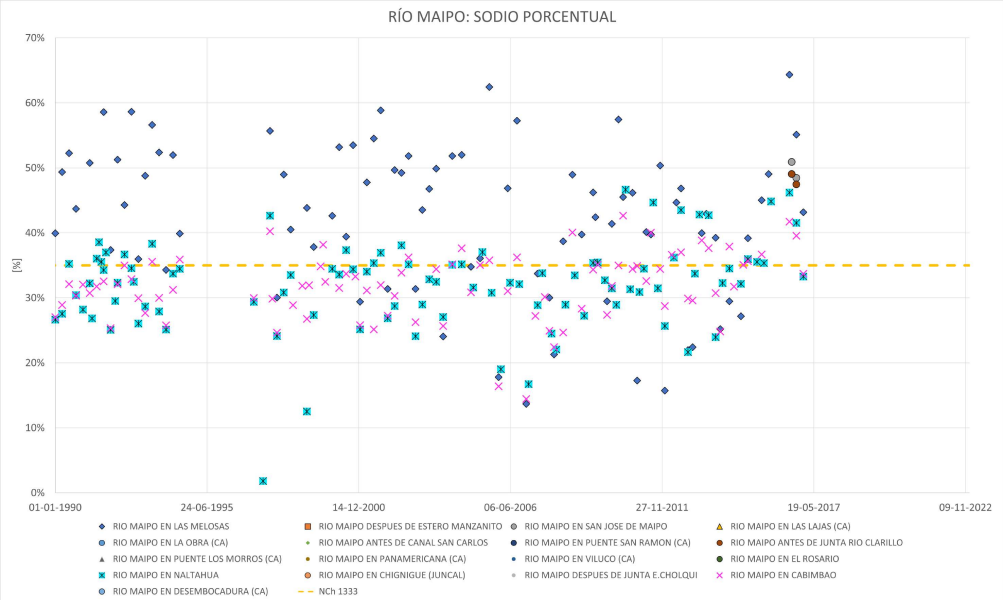


Figura 5.32: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Sodio porcentual.

La Figura 5.33 y la Tabla 5.46 presentan los estadísticos de las concentraciones de sodio porcentual en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa una tendencia a disminuir el sodio porcentual aguas abajo de MA-1, tomando en cuenta las áreas con información suficiente.

Se observa un número considerable de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5. Por otro lado, se cuenta con escasa información para el caso de MA-2, MA-3 (sólo 2 registros) y sin información para MA-6.

Tabla 5.46: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Sodio Porcentual.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [-]	MÁX [-]	MIN [-]
MA-1	82	42 %	64 %	14 %
MA-2	2	S/I	S/I	S/I
MA-3	2	S/I	S/I	S/I
MA-4	94	32 %	47 %	2 %
MA-5	87	32 %	43 %	14 %
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin información suficiente.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

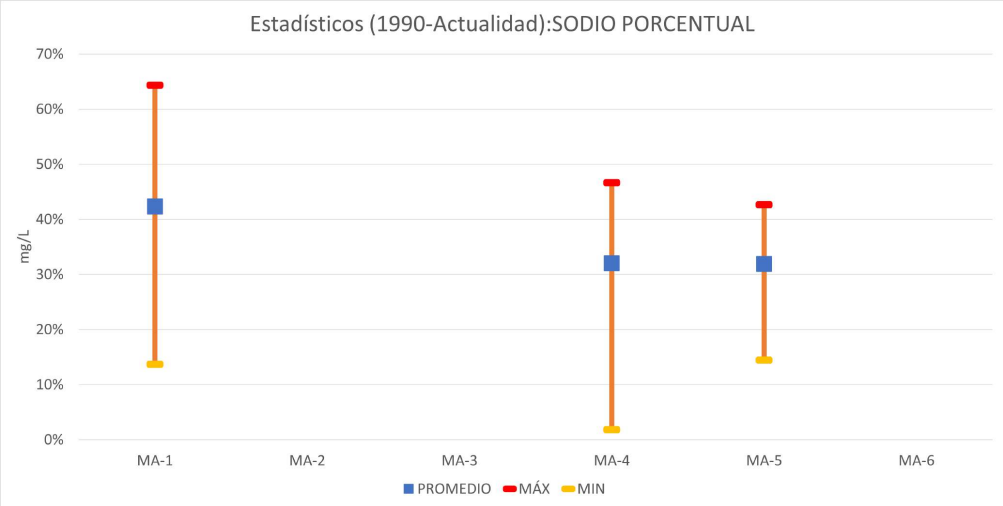
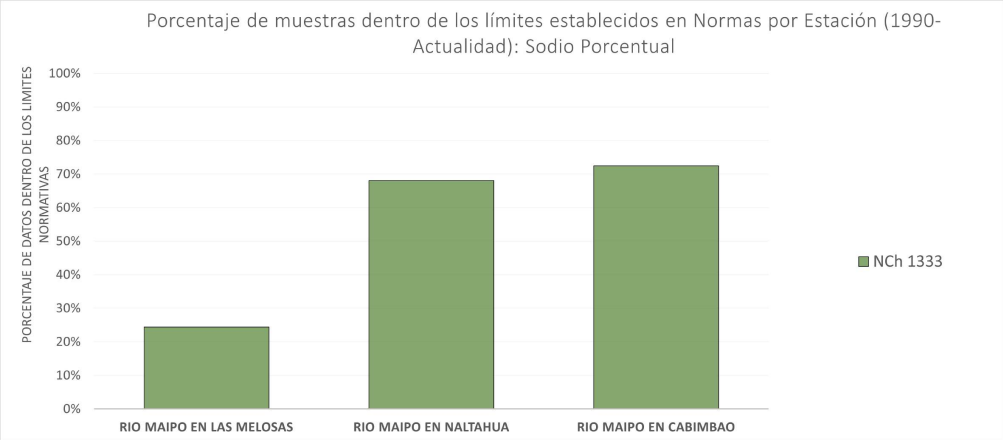
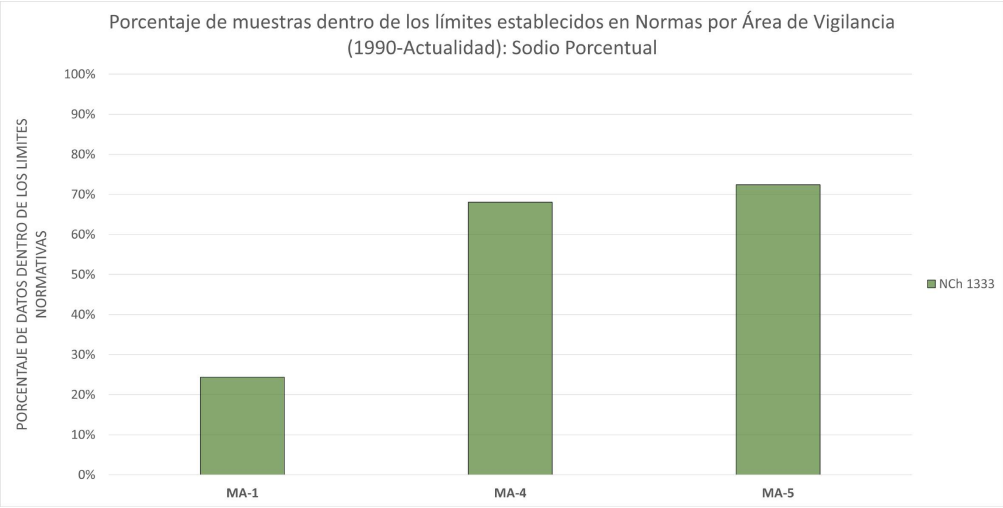


Figura 5.33: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Sodio porcentual.

La Figura 5.34 presenta los porcentajes de muestras dentro de los limites establecidos en la NCh 1333 donde, se observan porcentajes bajos para el caso de MA-1 con 24 %. El caso de MA-4 y MA-5 es menos desfavorable con porcentajes de 68 y 73 % respectivamente.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.34: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Sodio porcentual.

5.5.4.14. Sulfato

La Tabla 5.47 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el sulfato. De esta podemos observar que la NCh 1333 es la más exigente con un límite máximo de 250 mg/L, seguido por la NCh 409 con 500 mg/L. El D.S. N°143 no establece límites para este parámetro.

Tabla 5.47: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Sulfato.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Sulfato	500	250	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.35 la serie de concentración de sulfato en el periodo 1990-2022.

Se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones durante este período, con una mayor densidad en el periodo posterior a la publicación de la NSCA río Maipo.

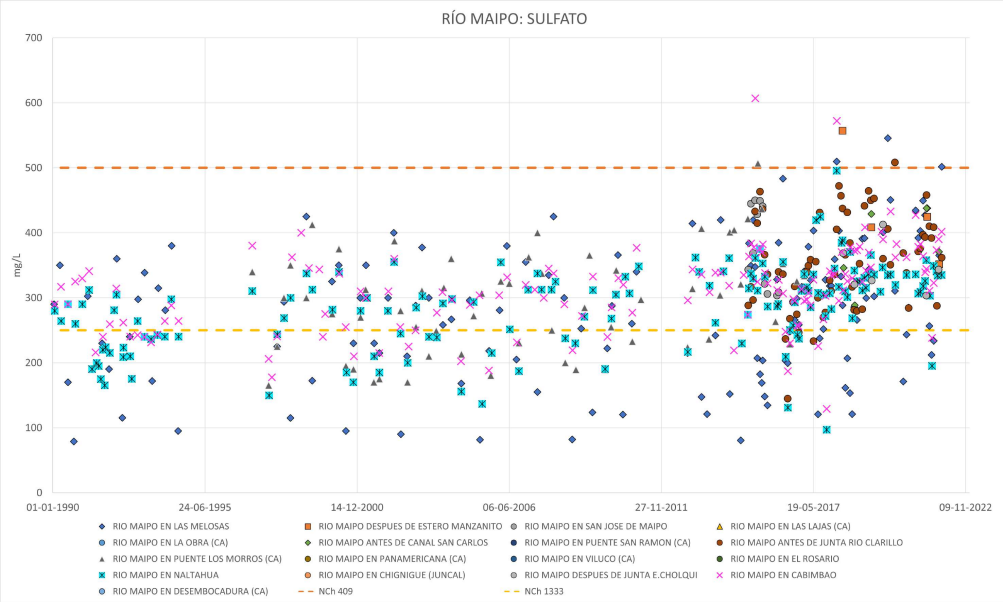


Figura 5.35: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Sulfato.

La Figura 5.36 y la Tabla 5.48 presentan los estadísticos de las concentraciones de sulfato en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa un aumento en la concentración promedio aguas abajo de MA-1 para luego disminuir aguas abajo de MA-2 hasta MA-4 y finalmente aumentar en MA-5.

También se observa un amplio número de registros para todas las para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y menor para las de MA-2 y MA-3. No se cuenta con información para MA-6.

Tabla 5.48: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Sulfato.

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	138	281	546	79
MA-2	72	372	557	150
MA-3	66	355	508	145
MA-4	152	287	496	97
MA-5	142	312	607	129
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

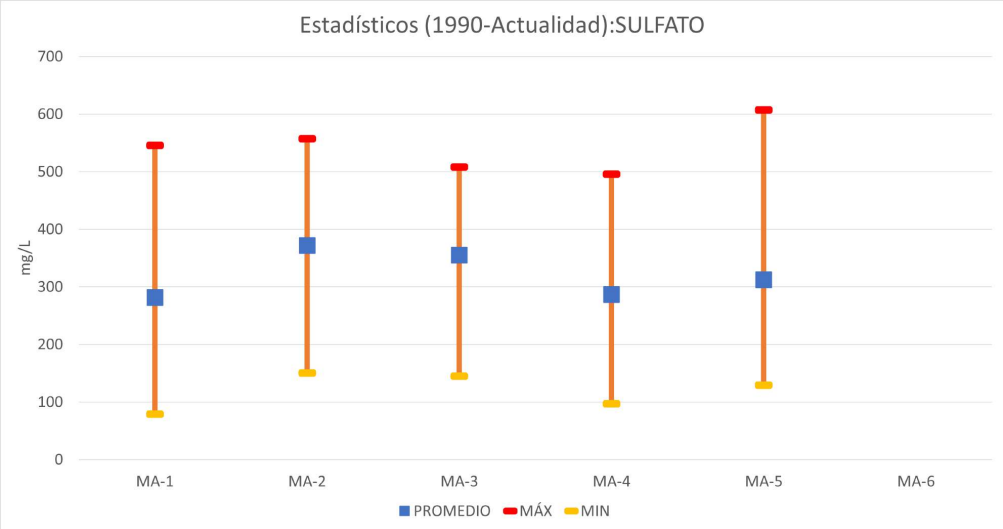
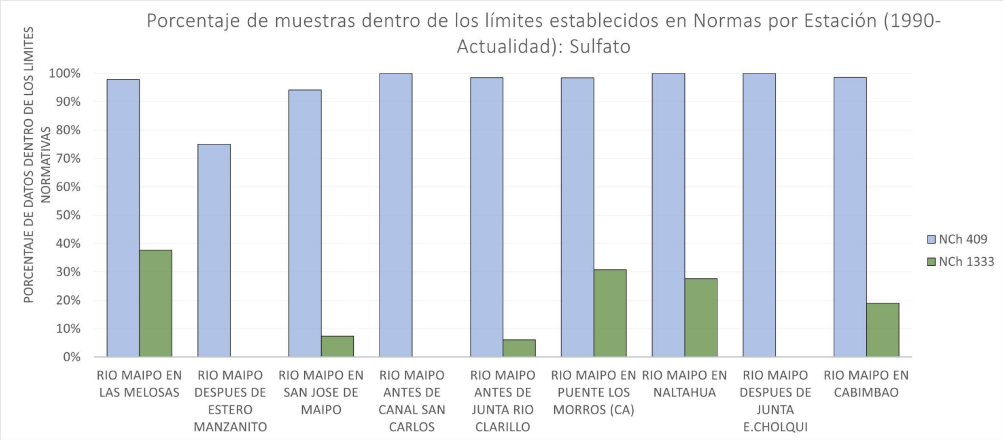


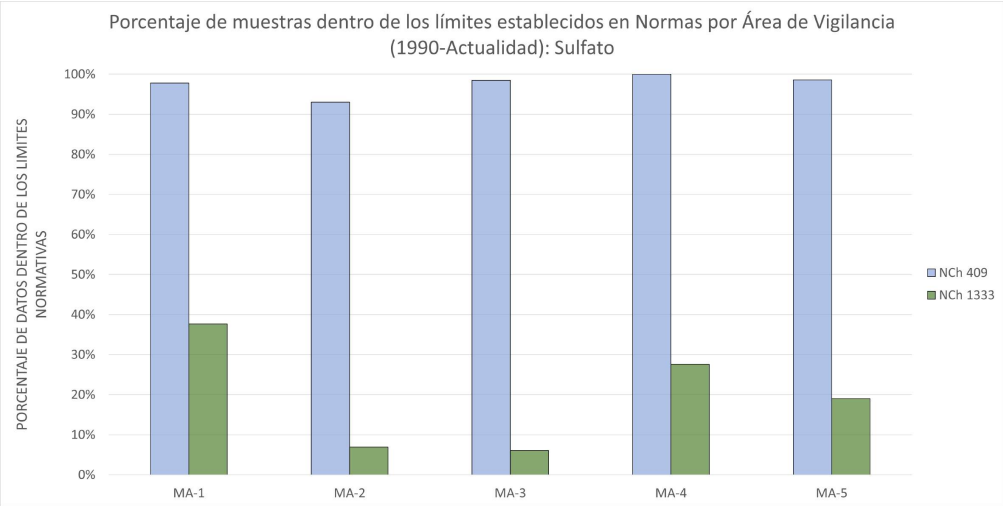
Figura 5.36: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Sulfato.

La Figura 5.37 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 2 normativas de uso donde, se observan porcentajes bajo el 40 % para la NCh 1333 en todas las áreas, con valores mínimos en MA-2 y MA-3 de 7 % y 6 % respectivamente. También se observan porcentajes del 0 % para estaciones como Río Maipo después de Manzanito, Río Maipo antes de Canal San Carlos y Río Maipo después de Junta Estero Cholqui.

Para la NCh 409, el número de muestras dentro de los límites establecidos presenta porcentajes mayores y sobre el 90 % en todas las áreas, con un valor mínimo del 93 % en MA-2.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.37: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Sulfato.

5.5.4.15. Zinc Total

La Tabla 5.49 presenta los límites establecidos en las 3 normativas de uso para el zinc total. De esta podemos observar que la NCh 1333 es la más exigente con un límite máximo de 2 mg/L, seguido por la NCh 409 con 3 mg/L. El D.S. N°143 no establece límites para este parámetro.

Tabla 5.49: Límites máximos establecidos en normativas de uso: Zinc Total.

Parámetro	Normativa Uso			
	NCh 409	NCh 1333	D.S. N°143	Unidad
Zinc Total	3	2	no aplica	mg/L

Fuente: NCh 409/2006; NCh 1333/1978; y D.S. N°143/2009.

Se presenta en la Figura 5.38 la serie de concentración de zinc total en el periodo 1990-2022 donde, se observa un amplio número de registros en las diferentes estaciones a partir del año

1995.

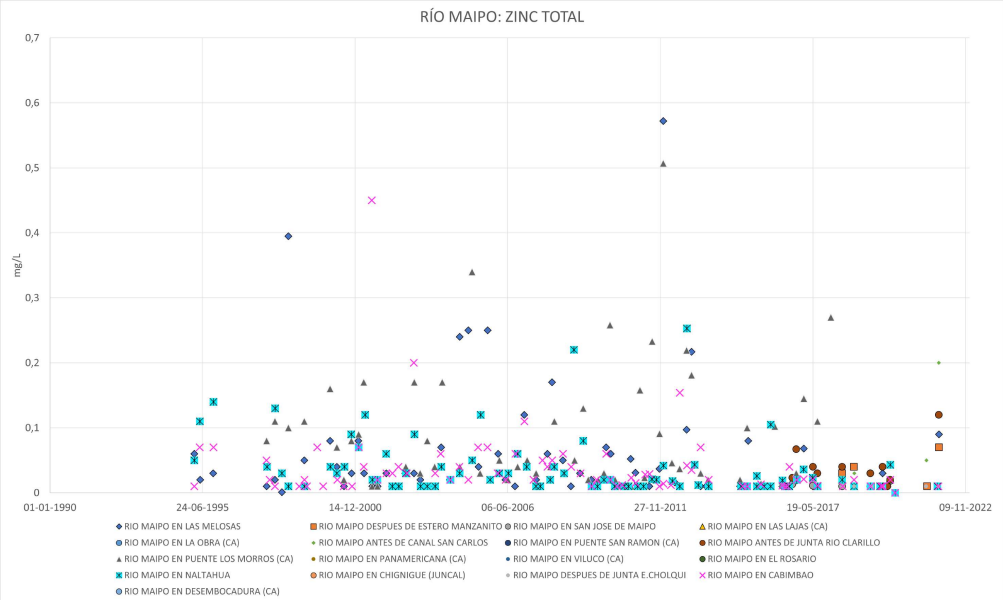


Figura 5.38: Serie de Concentración (1990-2022) en Estaciones de Calidad Físico-Química río Maipo: Zinc Total.

La Figura 5.39 y la Tabla 5.50 presentan los estadísticos de las concentraciones de zinc total en las diferentes áreas de vigilancia NSCA del río Maipo, donde se observa una tendencia a disminuir la concentraciones promedio y valores máximos aguas abajo de MA-1 para luego aumentar aguas abajo de MA-3 hasta MA-5. Los valores mínimos corresponden a límites de detección y estos son considerablemente menores a los límites establecidos en las normativas evaluadas.

También se observa un mayor número de registros para las estaciones representativas de las áreas MA-1, MA-4 y MA-5, y menor información disponible para las de MA-2 y MA-3. No se cuenta con información para MA-6.

Tabla 5.50: Estadísticos por Área de Vigilancia NSCA Río Maipo Periodo 1990-2022: Zinc Total

ÁREA DE VIGILANCIA	TOTAL DATOS	PROMEDIO [mg/L]	MÁX [mg/L]	MIN [mg/L]
MA-1	74	0,06	0,57	L/D = 0,01
MA-2	17	0,03	0,15	L/D = 0,01
MA-3	12	0,04	0,12	L/D = 0,01
MA-4	81	0,04	0,25	L/D = 0,01
MA-5	77	0,04	0,45	L/D = 0,01
MA-6	0	S/I	S/I	S/I

S/I: Sin Información; **L/D**: Límite Detección.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos estaciones físico-químicas DGA.

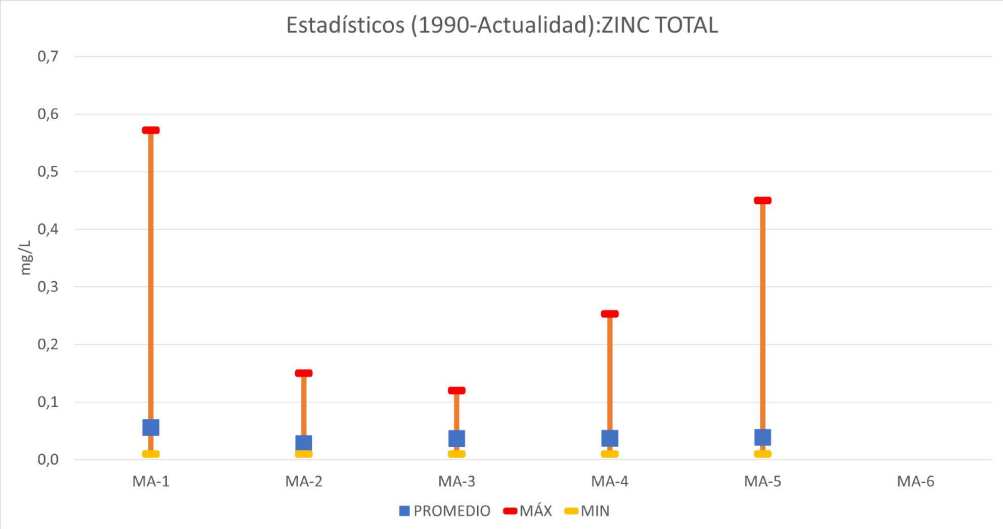
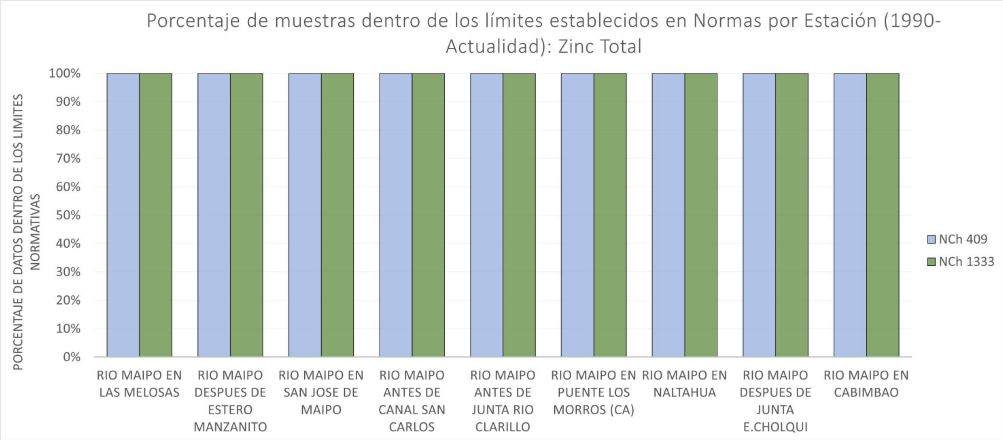
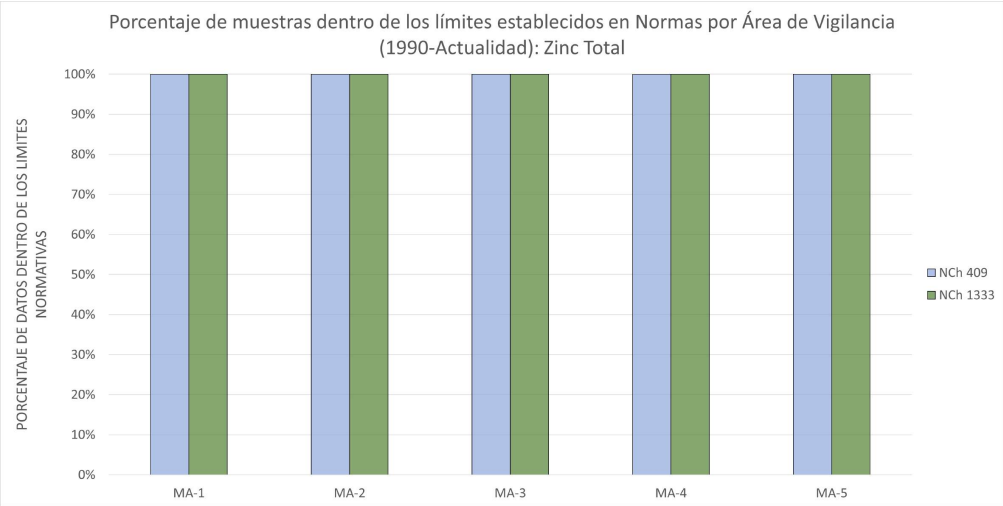


Figura 5.39: Estadísticos Áreas de Vigilancia (1990-2022) : Zinc Total.

La Figura 5.40 presenta los porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las 2 normativas de uso donde, todas las muestras se encuentran dentro de los límites establecidos en la NCh 1333 y la NCh 409.



a Estaciones de Monitoreo.



b Áreas de Vigilancia.

Figura 5.40: Porcentaje de muestras dentro de los límites establecidos en normativa uso (1990-2022): Zinc Total.

5.6. Tecnologías de Tratamientos Recomendadas para Usos del Agua

Se presentan las diferentes tecnologías para la remoción de diferentes contaminantes o disminución de parámetros que tienen bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las normas de uso para consumo humano y riego para el periodo evaluado (1990-2022).

Así se recomiendan algunas tecnologías de tratamiento para contaminantes que tienen porcentajes menores de muestras dentro de los límites establecidos en la NCh 409 como arsénico, hierro y manganeso.

También se presentan tecnologías para contaminantes y parámetros con porcentajes bajos de muestras dentro de los límites establecidos en la norma técnica NCh 1333 para riego como

cloruro, conductividad eléctrica, hierro, manganeso, sodio porcentual y sulfatos. Aún así, en la practica se debe evaluar la implementación de tratamientos para las aguas de riego y alcanzar los criterios recomendados en esta norma técnica, ya que el efecto no depende solamente de un elemento en particular, sino también de otras variables como las características de los suelos, climas , tasas de riego, etc...

En la actualidad no se aplican estas tecnologías para el tratamiento del agua para riego debido a que no existe una necesidad real que justifique implementar estas. Aun así, se presentan de igual forma las tecnologías que permiten disminuir las concentraciones y valores de contaminantes y parámetros con bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en la norma técnica de riego.

Para el caso de la conductividad eléctrica, el sodio porcentual, los cloruros y sulfatos, se presentan tecnologías para la remoción de solidos disueltos totales que debido a la estrecha relación con estos parámetros y contaminantes, permitan disminuir sus valores o concentraciones.

5.6.1. Arsénico

Existen varios métodos para la eliminación de arsénico. Estos métodos incluyen la precipitación química, la adsorción, el intercambio iónico y la filtración por membrana (Choong et al., 2007).

Actualmente existen plantas de tratamiento de agua potable diseñadas para remover As en todos los continentes. Los procesos de tratamiento más comúnmente utilizados son la coagulación con sales férricas (también llamada precipitación química) combinada con filtración; y adsorción generalmente en medios a base de Fe (Hering et al., 2017).

En Chile las aguas superficiales han sido tratadas mediante ajuste de pH con ácido, preoxidación con cloro, coagulación con FeCl3, sedimentación, filtración y desinfección final. Para las aguas subterráneas, en general se omite la sedimentación. En la Figura 5.51 se presentan las plantas de tratamientos diseñadas para la remoción de As con capacidades de entre 2.600 y casi 90.000 m3/día tratando aguas superficiales y subterráneas con concentraciones de As entre 16 y 500 μg/L. Además de los procesos de precipitación química, la eliminación de As también se logra mediante filtración en un lecho adsorbente utilizando Bayoxide 3 (Hering et al., 2017).

Tabla 5.51: Plantas de tratamientos diseñadas para la remoción de Arsénico en Chile.

Ciudad	Compañía	Planta	Fuente del agua	Otros contaminantes	Caudal [m3/día]	As [ug/Ll	Tratamiento
Arica	Aguas del Altiplano	Pago de Gómez	Subterránea	-	13000	18	Coagulación con $FeCl_3$ - Filtración - osmosis inversa
Iquique-Alto Hospicio	Aguas del Altiplano	Santa Rosa	Subterránea	-	20700	60-80	Oxidación - ajuste de pH - coagulación con $FeCl_3$ - filtración - post tratamiento con ultrafiltración
Iquique-Alto Hospicio	Aguas del Altiplano	El Carmelo	Subterránea	-	65000	16	Ajuste de pH - $FeCl_3$ - filtración
Pozo Almonte	Aguas del Altiplano	Pozo Almonte	Subterránea	Sulfatos	2900	16	Osmosis inversa
Calama	Aguas Antofagasta	Cerro Topáter	Superficial	Turbiedad	43000	400-450	Oxidación - coagulación - floculación - sedimentación - filtración
Antofagasta	Aguas Antofagasta	Salar del Carmen	Superficial	Turbiedad	86000	400-450	Oxidación - coagulación - floculación - sedimentación - filtración
Taltal	Aguas Antofagasta	Taltal	Subterránea	-	2600	60-80	Oxidación - filtración directa
Diego de Almagro	Aguas Chañar	Diego de Almagro	Superficial	Turbiedad, cloruro, SDT, sulfatos	3000	100-500	Coagulación con $FeCl_3$ - sedimentación - filtración - ósmosis inversa
Santiago Oriente	Aguas Cordillera	Lo Gallo	Superficial y subterránea	Turbiedad, hierro, manganeso	56000	10-50	Oxidación - coagulación - floculación - sedimentación - filtración
Santiago Oriente	Aguas Cordillera	San Antonio	Subterránea	-	43000	17-34	Oxidación - filtración - filtración en lecho adsorbente
Lampa	Aguas Manquehue	Alto Lampa	Subterránea	-	4300	20	Oxidación - filtración en lecho adsorbente
Santiago (Quilicura)	Aguas Andinas	Quilicura	Subterránea	-	8600	60	Oxidación - filtración en lecho adsorbente
Santiago (Colina)	Aguas Manquehue	Lo Pinto	Subterránea	-	10400	25	Oxidación - filtración en lecho adsorbente
Rancagua	ESSBIO	Nogales	Superficial	Turbiedad	65000	20	Oxidación - coagulación - floculación - sedimentación - filtración

Fuente: Hering et. al. (2017) y SISS (2022).

A continuación, se presentan los métodos más utilizados e instalados en la actualidad para la remoción del arsénico en el tratamiento de agua a los cuales se suma la preoxidación como paso inicial y ajuste de pH para incrementar la eficiencia de remoción:

- **Preoxidación:**
  La preoxidación puede mejorar significativamente el rendimiento del tratamiento si el As está presente en la fuente de agua como As(III) (arsenito) y así permitir su transformación a As(IV). Aunque la aireación es generalmente bastante económica, no siempre es suficiente. En estos casos se utilizan oxidantes químicos para la preoxidación. (Hering et al., 2017).

  En Chile, aunque el As se presenta principalmente en el estado de oxidación +V, las concentraciones de As(III) pueden ser lo suficientemente altas como para requerir preoxidación, generalmente con cloro, aunque también se usa permanganato. (Hering et al., 2017).

- **Precipitación Química:**
  En los procesos de eliminación de arsénico, la coagulación y la floculación (precipitación

química) se encuentran entre los métodos empleados más comunes (Choong et al., 2007).

Se utiliza con mayor frecuencia para instalaciones de mayor capacidad. Las opciones para mejorar el rendimiento de las plantas de coagulación/filtración para la remoción de As incluyen el ajuste del pH y la dosis de coagulante (Hering et al., 2017).

Las sales de aluminio o hierro (III) se han utilizado ampliamente para eliminar el arsénico. Ambas son igualmente eficaces en la remoción de arsénico cuando se compara en base a los moles, pero cuando se compara en base al peso, las sales férricas han demostrado ser más efectivas que las de aluminio (Katsoyiannis y Zouboulis, 2006).

En plantas chilenas se han utilizado dosis de cloruro férrico FeCl3 de hasta 56 mg/L con adición de ácido sulfúrico H2SO4 para ajuste de pH (A. Sancha, 2006).

Generalmente se poseen mayores eficiencias de remoción frente al As(V). En la experiencia chilena con la coagulación con FeCl3, las eficiencias de eliminación de As(III) fueron solo del 40 % al 70 %; Se logran eficiencias de eliminación sustancialmente más altas (80–100 %) para el As(V) (Cortina et al., 2016; Hering et al., 2017).

- **Medios Adsorbentes** La adsorción es uno de los métodos más efectivos para eliminar el arsénico del agua. El proceso de adsorción consiste en la acumulación de material en una interfaz o en la capa límite líquida/sólida. La capacidad de adsorción depende de las propiedades del material que se utiliza como adsorbente como la superficie específica y energía superficial del adsorbente (Anjum et al., 2009; Choong et al., 2007).

  Carbón activado, alúmina activada, adsorbentes a base de hierro, zeolitas y otros adsorbentes tradicionales se utilizan en el tratamiento del agua. Numerosas otras sustancias, incluyendo arena, biomateriales, carbones activados modificados y minerales arcillosos se han estudiado como adsorbentes de bajo costo para la eliminación de As (Hassan, 2023).

  Se han desarrollado medios adsorbentes en base a hierro específicos para la remoción del As como Bayoxide 33 y SORB 33 (Choong et al., 2007). Los medios de adsorción en base de aluminio, no son efectivos para remover As(III) (Hering et al., 2017).

  Los sistemas de adsorción cuentan con la ventaja de ser más fáciles de operar en comparación a los sistemas de coagulación/floculación y filtración que requieren de pasos separados y de la adición de productos químicos.

- **Intercambio Iónico:**
  En este proceso los iones se unen electrostáticamente en una superficie de una fase sólida y estos son intercambiados por iones de carga similar disueltos en agua. Este proceso es efectivo frente al As (V) pero no frente al As (III) que requiere ser oxidado para una mayor remoción (Hering et al., 2017). Para remover arsénico existen resinas fuertemente básicas en forma de cloruro, o también se pueden utilizar resinas iónicas sintéticas de

matriz polimérica (Córdova, 2013).

Las resinas de intercambio iónico son generalmente cargadas con iones de cloruro en los "sitios de intercambio". El agua que contiene arsénico pasa a través de los recipientes y el arsénico se “intercambia” por los iones de cloruro. El agua que sale del recipiente tiene menos arsénico pero más cloruro que el agua que entra al recipiente. Eventualmente, la resina se “agota”; es decir, todos o la mayoría de los “sitios de intercambio” que estaban cargados con iones de cloruro se cargan con arsénico u otros aniones. Los iones de cloruro que solían estar en la resina se intercambiaron por el arsénico y otros aniones que estaban en el agua que se estaba tratando. El efecto de la presencia de sulfato, la competencia con otros aniones es un factor importante para el tratamiento del arsénico con intercambiadores de iones (Choong et al., 2007).

El agotamiento de la resina y la competencia con otros aniones son las desventajas que limitan el uso de esta tecnología para la remoción de As.

- **Membranas:**
  Existen numerosos antecedentes de tratamiento de As en sistemas a escala operativa con aguas naturales reales utilizando nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI). Los resultados muestran que tanto el As(V) como el As(III) son eliminados eficazmente del agua por las membranas de OI y NF en una variedad de condiciones operativas. Ambas membranas pueden lograr rechazos del 99 % (Waypa et al., 1997). Estas tecnologías son muy poco utilizadas cuando el objetivo es remover solo el arsénico, y cuando este elemento es el único contaminante en el agua cruda debido a sus altos costos. Las membranas se justifican cuando existe la alta presencia de otros contaminantes que puedan disminuir la eficiencia de otras tecnologías (Hering et al., 2017).

Existen tratamientos alternativos que se han investigado para la remoción de arsénico que no requieren productos químicos como la fitoremediación basada en plantas que son capaces de hiperacumular cantidades significativas de As; o la electrocoagulación que genera agentes floculantes por electrooxidación sobre un ánodo, que está constituido por metal, generalmente hierro o aluminio. La principal ventaja de este método es que es capaz de eliminar ambas especies de arsénico (As(III) y As(V)) (Hassan, 2023; Anjum et al., 2009). Aun asi, estas tecnologías no son utilizadas en el tratamiento de agua para consumo y tienen escalas de operación menores.

5.6.2. Hierro y Manganeso

La mayoría de los tratamientos para remover hierro y manganeso emplean el proceso de oxidación/filtración y este comprende dos etapas: un proceso de oxidación en el que las formas solubles de Fe y Mn se oxidan para formar precipitados insolubles y un proceso de separación sólida, en el que el material precipitado se elimina del agua corriente (Casey, 2009; Khadse et al., 2015).

El proceso de oxidación puede ser una reacción química directa, donde el aceptor de electrones puede ser oxígeno o un agente oxidante fuerte como cloro, dióxido de cloro, ozono

o KMnO4. Este método es particularmente útil cuando el hierro se combina con materia orgánica o cuando hay presencia de bacterias de hierro/manganeso. El hierro y el manganeso precipitados químicamente se eliminan en un proceso rápido de filtración por gravedad o presión (Khadse et al., 2015).

El intercambio de iones debe considerarse sólo para la eliminación de pequeñas cantidades de hierro y manganeso porque existe el riesgo de una rápida saturación. Las plantas de tratamiento de aguas superficiales que utilizan coagulación, floculación, sedimentación y la filtración, también son capaces de remover el hierro y el manganeso siempre y cuando estos sean oxidados (NDWC, 1998).

Otros procesos de remoción de Fe y Mn incluyen la utilización de medios filtrantes, adsorción y electrocoagulación (Guillen-Rivas et al., 2021).

También se ha utilizado ultrafiltración (UF) para remover óxidos de hierro y manganeso logrando tasas de remoción del 99,9 %. (Guillen-Rivas et al., 2021).

Las fuentes de agua que contienen hierro y/o manganeso y arsénico como el caso del río Maipo, pueden tratarse con procedimientos convencionales para la remoción de Fe/Mn. Estos procesos pueden reducir significativamente el arsénico y remover el hierro y el manganeso de la fuente de agua, con base en los mecanismos que ocurren con la adición de hierro. El As(V), se adsorbe fácilmente en el hidróxido de hierro. Cuando la concentración natural de Fe/Mn no es suficiente para alcanzar el nivel necesario para la remoción de arsénico, se puede adicionar hierro (EPA, 1997; Castro, 2006; Hassan, 2023).

La oxidación para remover Fe+2 y Mn+2, conduce a la formación de hidróxidos que remueven el arsénico soluble por reacciones de coprecipitación y adsorción. La producción de especies oxidadas de Fe-Mn y la precipitación seguida de los hidróxidos son análogas a la método de coagulación “in situ” (la cantidad de Fe o Mn removidos se traduce como la dosis de coagulante). Con Fe+2 o Mn+2 sin oxidar no se produce la remoción de arsénico (Castro, 2006).

5.6.3. Sólidos Disueltos Totales

Los sólidos disueltos incluyen sales, metales, cationes o aniones disueltos en agua. Los sólidos disueltos totales (SDT) comprenden sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y algunas pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en agua (Singh y Kishor, 2020).

Los SDT determinan la conductividad eléctrica (CE) de las aguas, donde un aumento de los iones disueltos trae consigo un aumento en la CE.

Para disminuir la conductividad eléctrica, los porcentajes de sodio y las concentraciones de cloruro y sulfato en las aguas crudas, es necesario aplicar un tratamiento para remover los SDT.

La separación por membrana mediante nanofiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis son tecnologías de tratamiento que pueden emplearse para la eliminación de SDT. Sin embargo,

estos métodos generan una cantidad significativa de desechos sólidos en forma de sales (Basha et al., 2008).

5.7. Comentarios

Sobre las normas de uso, se observa que el D.S. N°143 sobre uso recreacional, no ha sufrido modificaciones desde su publicación en el año 2008. Por su lado la NCh 409 sobre agua potable fue modificada en el año 2005. En el caso de la NCh 1333, a pesar de ser una norma técnica, no ha sufrido grandes modificaciones desde su publicación en el año 1978 pasando ya más de 40 años (fue modificada de forma mínima en 1987 sustituyendo un párrafo).

Las tres normativas de uso seleccionadas para el análisis regulan o establecen criterios técnicos para diferentes parámetros y contaminantes con el fin de cumplir con distintos objetivos. Se seleccionaron para el análisis contaminantes y parámetros regulados en una o más de las normativas, con prioridad en los parámetros incluidos en más normativas y con mayor información disponible en las estaciones físico-químicas.

De esta forma se tienen parámetros seleccionados como el arsénico, cadmio, mercurio y plomo total que son 4 metales pesados regulados en las 3 normativas. También se analiza el caso de la conductividad eléctrica y el sodio porcentual regulados solo en la NCh 1333 y vinculados estrechamente a la calidad de agua de riego, o el magnesio para el caso de la NCh 409. Todos los elementos regulados en las normativas de uso consideran concentraciones totales, a diferencia del D.S. N°53 que regula algunos elementos considerando concentraciones disueltas.

Cabe destacar que en parámetros considerados tóxicos, tal el caso de los metales pesados como arsénico, cromo, manganeso y plomo, la NCh 409 es más exigente que la NCh 1333 o igual de exigente en el caso del cadmio y mercurio. En otros parámetros considerados con efectos perjudiciales en los cultivos como el cloruro, sulfato, la NCh 1333 resulta más exigente. En el caso del D.S. N°143, este resulta generalmente menos exigente que las dos normativas anteriores, salvo en el caso del mercurio y plomo que es más exigente que la NCh 1333 pero en todos los casos menos exigente que la NCh 409. Esto es coincidente con que los efectos negativos por contacto directo con estos contaminantes son menores a los efectos por ingesta directa y consumo directo.

Sobre la información disponible, generalmente se cuenta con un amplio registro de información para el periodo seleccionado de 30 años aproximado (1990-2022), especialmente en los parámetros regulados en la NSCA Río Maipo para el periodo posterior a su publicación (año 2014). Se observa también, una mayor disponibilidad de datos en las estaciones de control de las áreas de vigilancia NSCA MA-1, MA-4 y MA-5 y escasa información para la estación de observación del área MA-6 (Río Maipo en Desembocadura).

Sobre la calidad de la información, la metodología de análisis y L/D asociados es suficiente para la evaluación de todos los parámetros frente las normas relacionadas al uso, salvo el caso del boro , cadmio, mercurio y plomo, donde en el caso del boro el 97 % de sus muestras representan concentraciones menores al límite de detección que es mayor al límite establecido en la NCh 1333. Para el caso del cadmio y mercurio, el 93 % y el 78 % respectivamente re-

presentan concentraciones menores a los límites de detección que son iguales o mayores a los límites establecidos en la NCh 409 y NCh 1333. En el caso del plomo casi el 40 % de los datos corresponde a concentraciones menores a los límites de detección que son iguales o mayores al límite establecido en la NCh 409. También se observan cambios en las metodologías y límites de detección, donde se emplean metodologías menos precisas que periodos anteriores para el caso del cromo y plomo.

Frente a lo anterior se recomienda adoptar y establecer únicamente el uso de metodologías analíticas adecuadas para medir con confiabilidad y reproductibilidad en los rangos definidos como límites normativos para los casos del boro , cadmio, mercurio y plomo, que permitan evaluar la calidad del agua frente a las normativas vinculadas a los diferentes usos.

No se observan tendencias claras en la mayoría de los parámetros seleccionados como el caso de los metales. En el caso del conductividad eléctrica, cloruro, sodio porcentual, estos siguen un comportamiento similar, donde los valores promedio aumentan aguas abajo de MA-1 y posteriormente disminuyen aguas abajo de MA-2 para luego aumentar aguas abajo de MA-5. Este comportamiento similar se debe con mayor probabilidad al hecho de que están relacionados directamente, el sodio disuelto en forma de iones contribuye directamente en aumentar los valores de conductividad eléctrica.

Sobre el porcentaje de muestras dentro de los límites para el periodo 1990-2022 presentados en la Tabla 5.20, se observa que parámetros como el cobre, cromo, magnesio y zinc totales tienen porcentajes altos (sobre el 89 %) frente a los límites establecidos en las normativas de uso que los regulan. Frente al D.S. N°143 se tienen porcentajes del 100 % para todos los parámetros regulados en este como el arsénico, cadmio , cromo, mercurio y plomo totales.

En el caso de la NCh 409 que regula la calidad del agua potable y que es una norma de carácter obligatoria que debe cumplirse en toda la red de distribución de agua potable, se evalúan los porcentajes de muestras dentro de los límites para varios parámetros y contaminantes regulados en esta en las aguas del río Maipo, que son la fuente de agua cruda para varias plantas importantes de la cuenca.

De esta forma se obtienen porcentajes bajos de muestras dentro de los límites establecidos en la NCh 409 en las aguas del río Maipo para el arsénico y manganeso totales; y también para el hierro total. Para el arsénico total se tienen porcentajes bajo el 40 % para MA-1, MA-2 y MA-3; con un 7 % en el área MA-2. Para el manganeso total se tienen porcentajes bajo el 50 % para todas las áreas salvo MA-2 y porcentajes del 20 % y 22 % para MA-3 y MA-5. El hierro total tiene porcentajes bajo el 23 % en todas las áreas con información (MA-6 no cuenta con información) e incluso tiene porcentajes nulos para el caso de MA-2 y MA-3 pero que cuentan con poca información (7 y 5 registros respectivamente).

A partir de los datos disponibles a través de la SISS para el año 2022, se tienen porcentajes de cumplimiento del 100 % de la NCh 409 para las concesionarias que operan las plantas cuya fuente es el río Maipo, por tanto estas plantas estarían cumpliendo con los límites establecidos para los parámetros cuyos niveles superan los límites en las aguas crudas del Maipo como el arsénico, hierro y manganeso y los procesos que utilizan estas PTAP serian suficientes para cumplir con la norma (principalmente presedimentación-coagulación-

floculación-sedimentación-filtración)

Para la construcción de nuevas plantas de agua potable (PTAP o APR) que tengan como fuente superficial las aguas del río Maipo se recomienda realizar un análisis frente a estos 3 contaminantes al momento de diseñar los procesos de tratamiento.

Finalmente, en el caso de la NCh 1333 para riego, al igual que en el análisis realizado en base a la norma secundaria establecida en el D.S. N°53, el cloruro y sulfato tienen bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos, en el primer caso con porcentajes bajo el 40 % en las áreas MA-1 y MA-2 y en el segundo caso, con porcentajes menores aun con el 30 % en todas las áreas salvo MA-6 (sin información), con 8 % y 7 % en las áreas MA-2 y MA-3 respectivamente. Otros parámetros con porcentajes bajos son dos metales, el hierro y el manganeso, el primero con un 0 % para el área MA-2, aunque esto podría no ser representativo debido a la poca cantidad de registros (7 datos). El segundo con porcentajes bajo el 60 % en 3 áreas y con un porcentaje de 20 % en MA-3.

También se tienen porcentajes bajos frente a los límites establecidos para el caso del sodio porcentual para el área MA-1 (24 %), donde este parámetro no es medido directamente en las estaciones de calidad del agua y para calcularlo se requieren las concentraciones de sodio, calcio, magnesio y potasio.

Por otro lado, la conductividad eléctrica, para la cual se establecen diferentes límites en la NCh1333 (riego) dependiendo del uso y efectos perjudiciales sobre los cultivos, posee diferentes porcentajes dependiendo de la clasificación. Así, para las clasificación más exigente, en las cuales no se observan efectos perjudiciales en cultivos, se tienen porcentajes nulos o muy bajos con máximos del 10 % y mínimos del 0 %. En la segunda clasificación, en la cual se observan efectos perjudiciales en cultivos sensibles, se observan porcentajes más favorables pero también bajos, con porcentajes bajo el 60 % para 4 áreas de vigilancia. Finalmente, para la clasificación en la cual se observan efectos adversos, todas las muestras se encuentran bajo los límites máximos establecidos en esta clasificación.

Según las diferentes clasificaciones del agua para conductividad eléctrica según la NCh 1333, se podría considerar que el agua en el río Maipo puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles.

Finalmente, según los límites establecidos en la norma NCh 1333 se debiese considerar la implementación de tratamientos de remoción frente al cloruro y sulfato, manganeso, hierro y solidos disueltos totales que permitan reducir el sodio porcentual y la conductividad eléctrica para el caso de cultivos sensibles dependiendo del área de captación para el uso de las aguas del río Maipo para riego. Aun así en la practica, debido al carácter técnico y no obligatorio de la normativa; y a la inexistencia de una necesidad real de implementación de estas tecnologías, no se utilizan generalmente tratamientos para riego en la cuenca del Maipo. En la actualidad se cosecha una gran variedad de cultivos considerados sensibles, lo cual pondría en evidencia que los criterios solo basados en la presencia de metales son rígidos y no absolutos para definir la aptitud de un agua para riego. En este contexto, es necesario evaluar en forma global junto al tipo de suelo, clima, tasas de riego, etc... La experiencia práctica de más de un siglo de agricultura en la zona muestra este hecho.

Capítulo 6

Contaminantes Emergentes

El desarrollo industrial y económico ha traído consigo la aparición de nuevas sustancias químicas contaminantes, alguna de las cuales, debido a sus propiedades fisicoquímicas no permiten que sean degradadas en el medio ambiente, persistiendo por años e incluso generando efectos negativos para la salud (Vidal y Araya, 2014).

Algunos de estos son los Contaminantes Emergentes (CEs). Estos son contaminantes, tanto naturales como sintéticos, que pueden causar efectos ecológicos o en la salud humana y que no están generalmente regulados en las normativas (Water Quality Program, 2021).

Los contaminantes emergentes (CEs) o contaminantes de preocupación emergente (CEC) han ganado cada vez más relevancia para la comunidad científica a nivel mundial. Donde ya son varias las organizaciones que han tomado cartas en el asunto, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Unión Europea (UE), el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Programa Internacional de Seguridad Quimica (IPCS) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) (Vásquez, 2018).

Esta última ha incluido a estos contaminantes como posibles candidatos a la regulación de calidad de agua potable (USEPA, 2015). Por su parte, en el continente europeo, ya comienzan a hacer lo propio, con el reglamento REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), donde ya se ha propuesto incluir más sustancias peligrosas y contaminantes emergentes en las listas de candidatos (de la Sota, 2016).

Para el caso de los CEs, en Chile aún no existe normativa que los regule apropiadamente, y por parte del gobierno, tan solo el Ministerio de Salud solicita un llamado al uso racional de medicamentos (Rozas, 2016). Estos constituyen uno de los principales contaminantes emergentes presentes en las aguas superficiales.

Como se mencionó anteriormente, la preocupación por los CEs es relativamente nueva, pero no así la presencia de estos contaminantes en el medio ambiente. La tecnología disponible y la capacidad de detectar estas sustancias ha visibilizado la presencia de estas y por tanto el tema ha generado mayor preocupación en la comunidad científica. Un análisis bibliométrico realizado por Chen et al. (2022) pone en evidencia la importancia actual del problema:

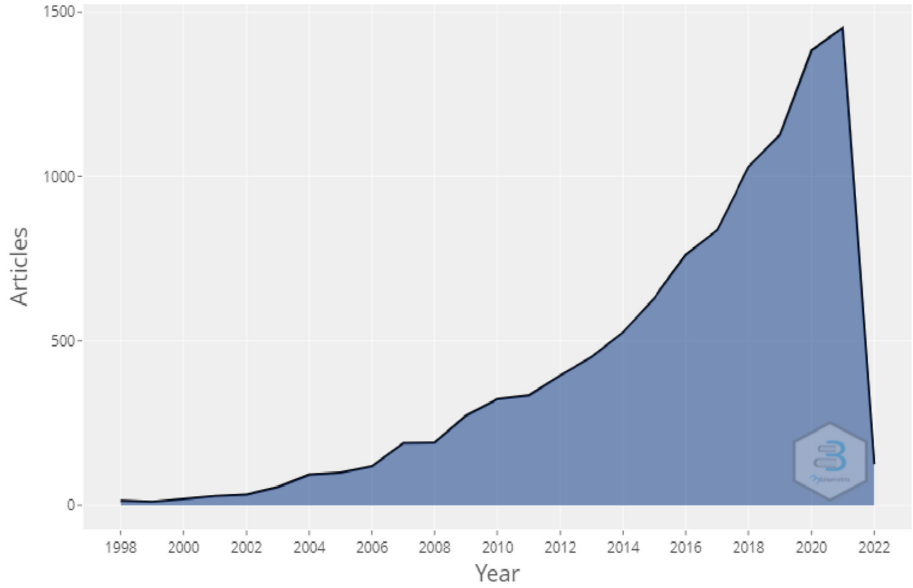


Figura 6.1: Evolución publicación de documentos relacionados con Contaminantes Emergentes.

Fuente: Chen et al., 2022.

Para efectos de este trabajo se define a los contaminantes emergentes como:

Definición 6.1 ***Contaminantes Emergentes:***
Contaminantes que no se encuentran regulados en alguna normativa local de calidad del agua y que han sido mencionados como de interés por sus efectos tóxicos.

Los contaminantes emergentes son generalmente microcontaminantes, con concentraciones de orden $\frac{\mu g}{L}$ o $\frac{ng}{L}$, los cuales debido a sus bajas concentraciones son más difíciles de detectar e identificar.

La presencia de estos en los principales cuerpos de agua, se debe al consumo y abuso de diferentes productos y sustancias y al desarrollo de la industria, que ha traído consigo la aparición de nuevos microcontaminantes.

Actualmente la irrupción de nuevas tecnologías y técnicas de separación como cromatografía y detección selectiva de masas ha permitido analizar y estimar concentraciones de microcontaminantes orgánicos. Los estudios a nivel mundial son limitados, y se concentran principalmente en 30 países , la mayor parte de ellos ubicados en Europa y América del Norte (Chávez-Mejía et al., 2008).

En el contexto local, en Latinoamerica son escasos los laboratorios capaces de realizar estos análisis y por tanto hay poca información sobre la presencia de estos contaminantes. También, son escasos los estudios realizados sobre el tema en Latinoamerica y Chile, donde actualmente no se le ha asignado gran importancia ni recursos a esta problemática. En Chile se han realizado pocos estudios exhaustivos sobre el tema, existiendo solo algunos como en la cuenca del Biobío y en el Río Mapocho.

6.1. Principales Fuentes

Las principales fuentes de contaminación emergente son de origen antropogénico y afectan tanto a aguas superficiales como subterráneas. Estas se pueden clasificar en dos: fuentes puntuales y difusas. Las fuentes puntuales, que son las descargas directas y atribuibles a un punto especifico y las fuentes difusas, las cuales están dispersas y no tienen un único punto de origen.

Dentro de las fuentes puntuales están las descargas de residuos líquidos industriales (RILES), aguas domesticas no tratadas e incluso de plantas de tratamiento de aguas servidas. En las fuentes difusas encontramos contaminación por plaguicidas y nutrientes usados en la agricultura, y material liberado por la industria que es transportado de diferentes maneras (como por ejemplo escorrentía por eventos de precipitación) hasta las principales fuentes hídricas.

La descarga de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) en las aguas superficiales se considera como una de las principales fuentes de microcontaminantes en estas debido, a que los procesos de tratamiento en las plantas convencionales no están diseñados para remover estos contaminantes (Cuevas, 2015). Además algunos de ellos pueden incluso transformarse en compuestos más dañinos en el proceso de cloración, afectando la salud de los organismos, presentando un potencial riesgo al ser humano (Rozas, 2016).

También, otras fuentes importantes son los efluentes de hospitales, industrias y actividad agropecuaria (Cuevas, 2015).

A continuación, en la figura 6.2 se presenta un diagrama sobre las fuentes de contaminantes emergentes y sus efectos en el ciclo de agua para consumo.

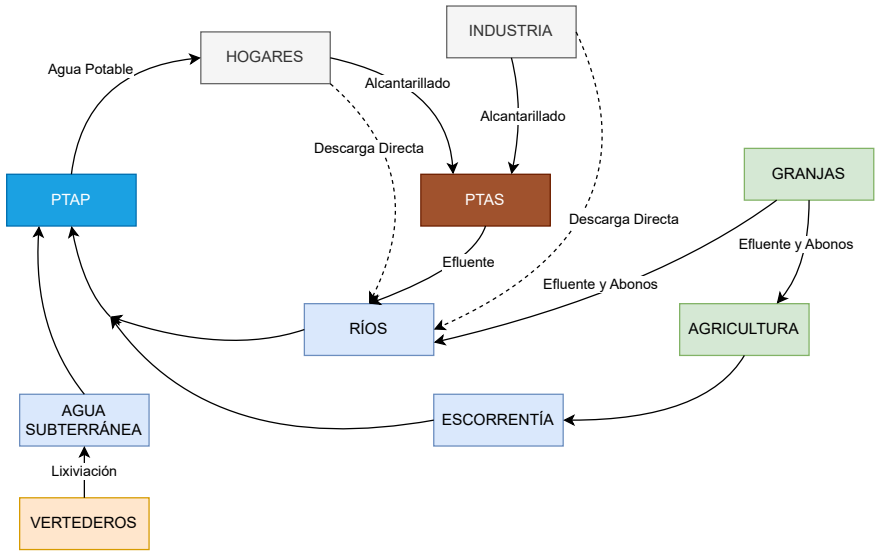


Figura 6.2: Fuentes de Contaminantes Emergentes.

Fuente: Petrovic, 2003.

Estos contaminantes sufren diversos grados de atenuación natural, por ejemplo, dilución, adsorción sobre sólidos suspendidos y sedimentos, fotólisis directa o indirecta y biodegradación aeróbica, debido a esto en las aguas superficiales encontramos contaminantes en menor magnitud que los niveles encontrados en los efluentes de PTAS, industrias y hospitales (Pal et al., 2010; Gros et al., 2007; Cuevas, 2015).

6.2. Clasificación y Caracterización

Dentro del término genérico de contaminantes emergentes se encuentran una gran variedad de productos de diverso origen y naturaleza química, derivados tanto del uso personal como de diversas industrias (Patiño et al., 2014). Estos se pueden clasificar en: Macrocontaminantes y Microcontaminantes con concentraciones típicas de $\frac{mg}{l}$ y $\frac{\mu g}{l}/\frac{ng}{l}$ respectivamente. Estos son por lo general microcontaminantes orgánicos de origen natural o sintético que se encuentran en las aguas en concentraciones pequeñas, que pueden causar efectos negativos en los ecosistemas y toxicidad para la salud humana (Murphy et al., 2012; Vásquez, 2018). Estos son más difíciles de ser detectados pero nuevas técnicas de separación cromatográfica y detección selectiva de masas nos permiten realizar análisis sobre su presencia y estimar sus concentraciones.

Los microcontaminantes se suelen dividir en seis categorías: productos farmacéuticos, productos de higiene personal, hormonas, agentes tensio-activos (también conocidos como surfactantes), productos químicos y plaguicidas. Aunque estas clasificaciones o categorías no son únicas y dependen de diferentes autores debido a la gran amplitud y diversidad de estos contaminantes y pueden no incluir a todos estos microcontaminantes que existen en la actualidad. Los productos farmacéuticos, como por ejemplo carmabacepina, diclofenaco, ibuprofeno, gemfibrozil, atenolol, propranolol, eritromicina, ciprofloxacino, ofloxacino, sulfametoxazol y amoxicilina son los que se encuentran con mayor frecuencia en el medio ambiente acuático (Cuevas, 2015).

En la Tabla 6.1 se presentan diferentes clasificaciones de microcontaminantes recurrentes en la literatura especializada.

Tabla 6.1: Clasificación de microcontaminantes.

Categoría	Ejemplos
Productos Farmacéuticos	Anti-convulsionantes, antibióticos, β-bloqueantes, estimulantes, reguladores lipídicos, etc...
Productos de Higiene Personal	Fragancias, desinfectantes, filtros solares, repelente de insectos
Hormonas	Estrógenos
Productos Químicos	Retardantes de llama, sustancias plastificadoras
Plaguicidas	Insecticidas, herbicidas y fungicidas
Agentes Tensioactivos	Agentes tensio-activos aniónicos y no iónicos
Productos Estilo de Vida	Cafeína, Nicotina, Endulcorantes

Fuente: Cuevas, 2015.

Se describen a continuación las principales clasificaciones microcontaminantes.

6.2.1. Productos Farmacéuticos y de Higiene Personal

Los productos farmacéuticos y de higiene personal son un amplio grupo de compuestos químicos empleados en el cuidado de la salud humana y animal. Los productos farmacéuticos

(PF) son los contaminantes emergentes que más interés ha suscitado y han sido objeto de estudios más exhaustivos, cogiendo fuerza en la década de los 90 (Patiño et al., 2014). Representan una amplia variedad de compuestos biológicos que se utilizan para el tratamiento de infecciones y enfermedades. Estos tienen estructuras variables y poseen compuestos específicos desarrollados para absorberse y distribuirse dentro del cuerpo humano. El uso de estos depende de varios factores como las condiciones socioeconómicas de un país, ubicación y región, instalaciones de atención médica y variación estacional, etc... (Samal et al., 2022).

Se ha detectado la presencia de analgésicos, hormonas anticonceptivas, estrógenos y otros medicamentos en diferentes cuerpos de agua, donde incluso los contaminantes farmacológicos activos son persistentes en medios acuosos y muestran resistencia contra la degradación. (Samal et al., 2022). Las vías de entrada principales de productos farmacéuticos en el medio ambiente son a través de la excreción humana, la eliminación de los productos no utilizados y por el uso agrícola. Estos compuestos poseen diferentes tasas de excreción del cuerpo humano, donde fármacos ampliamente utilizados como la amoxicilina tienen altas tasas de excreción y la aspirina y el ibuprofeno tienen bajas tasas (Tabla 6.2). Las excreciones son eliminadas a través de las descargas sanitarias que terminan en plantas de tratamiento de aguas servidas PTAS (Gil et al., 2012).

Tabla 6.2: Tasas de Excreción Productos Farmacéuticos.

Tasa de Excreción	Productos farmacéuticos
Baja (<5 %)	Aspirina, carbamazepina, gemfibrocil, ibuprofeno
Moderadamente Baja (6-39 %)	Diclofenaco, metaprolol, primidona, sulfametoxazol
Relativamente Alta (40-69 %)	Bezafibrato, norfloxacino, trimetoprima
Alta (>70 %)	Amoxicilina, ciprofloxacino, tetraciclina

Fuente: Cuevas, 2015.

Una amplia gama de productos farmacéuticos se han detectado en aguas superficiales y subterráneas e incluso en el agua potable. Estos contaminantes ingresan al ciclo del agua para consumo a través de las descargas de las PTAS que actúan como una puerta de entrada de estos productos a los cuerpos de agua debido a que muchos de estos compuestos no son completamente eliminados en sus procesos. Otras fuentes de contaminación son las descargas directas de estos contaminantes en los cuerpos de aguas como residuos farmacéuticos veterinarios (Gil et al., 2012).

Por otro lado, los productos de higiene personal son producidos para uso directo sobre el cuerpo humano y son utilizados para alterar el olor, el aspecto, el tacto, y no deben mostrar actividad bioquímica significativa. Muchos de estos productos son usados como ingredientes activos o preservantes en cosméticos, productos de baño o fragancias. Ejemplos de estos productos son los perfumes, fragancias, agentes de protección solar, repelentes de insectos o cremas para el cuidado de la piel. Los productos de cuidado personal se diferencian de los farmacéuticos ya que en grandes cantidades pueden ser directamente introducidos al ambiente debido por ejemplo al contacto recreacional con aguas, volatización en el aire y también al igual que con los productos farmacéuticos a través de descargas residuales. Estos productos pueden tener efectos negativos en los organismos acuáticos y a la salud humana en ciertas

concentraciones (Gil et al., 2012).

6.2.2. Productos Químicos

Estos productos abarcan una amplia gama de compuestos utilizados masivamente en la industria tales como los retardantes de llama o plastificantes.

Los retardantes de llama son utilizados ampliamente en muchos productos de la industria para la prevención de incendios. Entre estos, se encuentran aquellos compuestos basados en organofosfatos, tales como el tris (cloro isopropil) fosfato (TCPP) y tris(2-cloro etil) fosfato (TCEP). Siendo el TCPP encontrado con mayor frecuencia y mayor concentración que el TCEP. Igualmente,incluyen compuestos bromados entre los que se destacan, el polibromado-difenil éter (PBDEs), hexabromociclododecano (HBCD) y decabromodifeniletano (DBDFE) los cuales se aplican a una diversidad de compuestos o mezclas de compuestos químicos incorporados en plásticos, textiles, circuitos electrónicos, entre otros (Gil et al., 2012).

Estos compuestos tienen efectos perjudiciales en la salud, tales como la toxicidad sobre el comportamiento neurológico, disruptor endocrino y, posiblemente cáncer (Gil et al., 2012).

Por otra lado, los plastificantes son compuestos orgánicos de bajo peso molecular que se utilizan en la producción de plásticos. Los plastificantes más estudiados, más abundantes son el bisfenol A (BPA) y su derivado bisfenol A diglicidil éter (BADGE). Según el Handbook of Environmental Chemistry (2008), BPA y BADGE se encuentran en recipientes alimentarios, biberones de plástico, chupetes, juguetes para bebés, selladores dentales, computadoras, teléfonos celulares, botellas de agua de plástico, pinturas, adhesivos, esmaltes, barnices, etc... Los ftalatos son otro grupo de plastificantes que se encuentran en envolturas transparentes para alimentos, detergentes, jabones y pesticidas. Se ha demostrado que estos compuestos pueden tener efectos perjudiciales en la salud como disruptores endocrinos e incluso ser cancerígenos (Rosenfeld y Feng, 2011).

6.2.3. Plaguicidas

Se considera como pesticida o plaguicida a cualquier sustancia, mezcla de ellas o agente destinado a ser aplicado en el medio ambiente, animales o plantas, con el objeto de prevenir, controlar o combatir organismos capaces de producir daños a personas, animales, plantas, semillas u objetos inanimados (Ministerio de Salud, 2014).

En Chile, al igual que en la mayoría de los países del mundo, existe una utilización masiva de estos tanto en el área agrícola como en la sanitaria. Esta amplia utilización sumada a su libre venta y al escaso conocimiento de los usuarios sobre sus riesgos generan un escenario de riesgo sanitario y medioambiental (Ministerio de Salud, 2014).

Los plaguicidas son compuestos orgánicos de carácter antropogénico, los cuales representan un elevado peligro para la salud de las personas, la flora y fauna, y el medio ambiente. Actualmente se conocen alrededor de 16 millones de pesticidas diferentes y cada año se sintetizan, aproximadamente, 250.000 nuevos compuestos. Aunque los pesticidas se regularon hace décadas, el problema radica en sus productos de degradación- la mayoría de ellos polares-, prácticamente ignorados hasta la actualidad, pero que pueden resultar más tóxicos incluso

que los productos de partida (Patiño et al., 2014).

La contaminación de los cuerpos de aguas con estos compuestos se debe principalmente al transporte por escorrentía a partir de las zonas agrícolas y a las aguas residuales industriales. Estos pueden incluso infiltrarse y alcanzar las aguas subterráneas (Syafrudin et al., 2021).

6.2.4. Agentes Tensoactivos

Los agentes tensoactivos o surfactantes abarcan una amplia gama de productos químicos orgánicos que se agregan a los jabones, los detergentes para lavar platos o ropa, champús, agentes adherentes, dispersantes, emulsificantes, solubilizantes y agentes espumantes. También se utilizan en aplicaciones industriales en aplicaciones industriales como la industria del papel y celulosa, textiles, recubrimientos, pesticidas agrícolas, aceites combustibles y lubricantes, metales y plásticos. Estos ingresan a los ecosistemas acuáticos cuando son arrastrados por el desagüe y los sistemas de tratamiento de aguas residuales no los eliminan por completo (Rosenfeld y Feng, 2011; Gil et al., 2012).

Se incluyen dos grandes tipos de tensoactivos aromáticos, tales como: tensoactivos aniónicos del tipo sulfonato alquilbenceno lineal (LAS) y no aniónicos del tipo alquilfenolpolietoxilado (APEO). La producción de los surfactantes aniónicos representan alrededor del 55 % de los surfactantes producidos anualmente en el mundo. Los surfactantes no iónicos están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40 % del total. Se ha demostrado que los APEO presentan mayor toxicidad. Los alquilfenoles son una clase de APEO ampliamente utilizados que preocupan especialmente y se encuentran constantemente en las corrientes de escorrentía y aguas residuales urbanas. Son altamente tóxicos para los organismos acuáticos y tiene efectos negativos en la salud humana (Rosenfeld y Feng, 2011; Gil et al., 2012).

6.3. Eficiencia de Remoción Plantas de Tratamiento Convencionales

Como se mencionó anteriormente, las plantas de tratamiento convencionales (PTAS y PTAP) están diseñadas para remover los contaminantes incluidos en la normativa respectiva a sus usos (D.S. N°90/2001 y NCh 409/1984) y por tanto poseen no estan diseñadas para remover microcontaminantes. Debido a la gran cantidad y variedad de estos y a sus diferentes propiedades físico-químicas (por ejemplo lipofobicidad o hidrofobicidad), las plantas poseen diferentes eficiencias de remoción frente a estos contaminantes.

En la Tabla 6.3 se exponen las eficiencias de remoción de diferentes compuestos farmacéuticos en las plantas de tratamiento de aguas servidas convencionales con proceso biológico de lodos activados a partir de un análisis bibliográfico realizado por Deblonde et al. (2011).

Tabla 6.3: Eficiencias de Remoción de Algunos Compuestos Farmacéuticos en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Convencionales.

Compuestos farmacéuticos	Moleculas	Tasa de eliminación (%)
Antibióticos	Claritromicina	56,4
	Ciprofloxacino	62,3
	Doxiciclina	35,4
	Eritromicina	48,8
	Eritromicina—H20	70,9
	Metronidazol	38,9
	Norfloxacino	54,3
	Ofloxacino	64,5
	Roxitromicina	39,5
	Sulfametoxazol	17,5
	Sulfapiridina	83,5
	Tetraciclina	95,1
	Trimetoprima	1,4
Antiepilépticos	Carbamazepina	-5,7
Analgésicos y antiinflamatorios	4-aminoantipirina	55,4
	Antipirina	32,5
	Codeína	32,5
	Diclofenaco	34,6
	Ibuprofeno	74,2
	Indometacina	-22,1
	Ketoprofeno	31,1
	Ketorolaco	44
	Naproxeno	81,6
Reguladores lipídicos	Ácido clofíbrico	39,1
	Ácido fenofíbrico	-148,1
	Bezafibrato	60,8
	Gemfibrozilo	51,5
Betabloqueantes	Acebutolol	58,2
	Atenolol	56,7
	Celprolol	36,4
	Metoprolol	55,8
	Propanolol	48,5
	Sotalol	52,6
Diuréticos	Furosemida	59,8
	Hidroclorotiazida	53,2
	Ácido amidotrizoico	0,2
	Diatrizoato	0
	ácido lotalámico	-1,1

Tabla 6.3: Eficiencias de Remoción de Algunos Compuestos Farmacéuticos en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Convencionales.

Compuestos farmacéuticos	Moleculas	Tasa de eliminación (%)
Medios de contraste	Iopromida	78,1
	lomeprol	73,5
	Lohexol	59,6
	Iopamidol	17,4
Cosméticos	Galaxolide	76,2
	Tonalida	76,1
Psicoestimulantes	Cafeina	96,9
	Paraxantina	96,9
Desinfectantes	Triclosán	76,8
Anti-depresivos	Fluoxetina	98,1
Plastificantes	DEP	96,5
	DBP	95,8
	BBP	92,4
Ftalatos	DEHP	90,2
	DMP	97,5
	DIBP	12,4
	Bisfenol A	71

Fuente: Deblonde et al., 2011.

Se observa a partir de la tabla anterior, la disparidad en las eficiencias de remoción donde hay compuestos que presentan una alta eficiencia, otros con baja eficiencia e incluso otros como la carbamazepina o ácido fenofíbrico que aparentemente tienen eficiencias negativas.

Estas eficiencias de remoción se calcularon a partir de la concentración promedio de los efluentes y los afluentes. Sin embargo, para algunos compuestos se obtuvieron resultados negativos al calcular la eficiencia de eliminación. Los pocos datos disponibles para compuestos con bajas concentraciones como el ácido fenofíbrico, la indometacina y el ácido iotalámico (producto de contraste) explicaría estos resultados negativos (Deblonde et al., 2011). Todas las PTAS estudiadas incluían tratamiento primario, secundario (con sistema de lodos activados) y, en ocasiones, terciario.

Por su parte, Rozas (2016) realizó un análisis similar, que presentan las eficiencias de remoción en las PTAS y PTAP para 4 microcontaminantes: atrazina (herbicida, ATZ), carbamazepina (anticonvulcionante, CBZ), diclofenaco (antiinflamatorio, DCL) y triclosán (antibacteriano, TCS). Los resultados de este análisis se presentan en la Tablas 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7.

Tabla 6.4: Eficiencias de Remoción Atrazina.

Compuesto	Proceso	PTAS Influente / Efluente [ng/L]	PTAP Agua cruda / Agua potable [ng/L]	País	Remoción PTAS (%)	Remoción PTAP (%)
Atrazina	PTAS	<2,5 / 8,1	-	USA	68	-
	PTAP	-	1,6 / <0,7		-	>99
	PTAS	<10 / >100	-	Chile	-	-
	PTAP	-	∼40 / ∼40		-	-
	PTAP	-	/26	Brasil	-	n.i.
	PTAS	7 - 36 / 3,9 - 27,4	-	España	25-44	-

n.i.: no informado.
Fuente: Rozas et al., 2016.

Tabla 6.5: Eficiencias de Remoción Carbamazepina.

Compuesto	Proceso	PTAS Influente / Efluente [ng/L]	PTAP Agua cruda / Agua potable [ng/L]	País	Remoción PTAS (%)	Remoción PTAP (%)
Carbamazepina	PTAS	1780 / 1630	-	Alemania	8	-
	PTAS	- /300-6300	-		n.i.	-
	PTAS	- /300-2100	-	España	7	-
	PTAS	- /380	-		n.i.	-
	PTAS	- /226	-	Corea del Sur	n.i.	-
	PTAS	784/236	-	Japón	43	-
	PTAS	232/187	-	USA	19	-
	PTAP	-	5,8/<5		-	>90
	PTAS	70 - 510 / 50 - 150	-	España	66	-
	PTAP		60-400 / 60-250	USA	-	-33
	PTAP		600-140	USA	-	76
	PTAS	314-573/ -	-	Canadá	<10	-

n.i.: no informado.
Fuente: Rozas et al., 2016.

Tabla 6.6: Eficiencias de Remoción Diclofenaco.

Compuesto	Proceso	PTAS Influente / Efluente [ng/L]	PTAP Agua cruda / Agua potable [ng/L]	País	Remoción PTAS (%)	Remoción PTAP (%)
Diclofenaco	PTAS	116 / <5	-	USA	>99	-
	PTAP	-	<0,25 / <0,25		-	-
	PTAS	- / 8,8 - 127	-	Corea del Sur	n.i.	-
	PTAS	~390 / >280	-	Chile	~28	-
	PTAP	-	~16/~1,6		-	-
	PTAS	- /721	-	Chile	n.i.	-
	PTAS	- / 60 - 810	-	España	69 - 75	-
	PTAS	3020 / 2510	-		17	-
	PTAS	- / 1000-3000	-	Alemania	n.i.	-
	PTAS	720 / 530 - 740	-	España	12	-
	PTAS	600 - 800 / 10 - 200	-	Brasil	75	-
	PTAS	1993 /632	-	Malasia	68	-
	PTAS	470-1.920 / 310-930	-	Suiza	~47	-

n.i.: no informado.
Fuente: Rozas et al., 2016.

Tabla 6.7: Eficiencias de Remoción Triclosán.

Compuesto	Proceso	PTAS Influente / Efluente [ng/L]	PTAP Agua cruda / Agua potable [ng/L]	País	Remoción PTAS (%)	Remoción PTAP (%)
Triclosán	PTAS	- / 70-650	-	España	44-92	-
	PTAS	5.210 - 10.700 / 240-410	-	USA	>96	-
	PTAS	142 / 22,5	-	China	84	-
	PTAS	~1000/50	-	Alemania	90	-
	PTAS	784 / 238	-	Japón	70	-
	PTAS	1280 / <2	-	USA	>99	-
	PTAP	-	<1 / <1		-	-
	PTAS	- / 1857	-	Chile	n.i.	-
	PTAS	~400 / 97-25	-	Chile	~84	-
	PTAP	-	~55 / ~20		-	>60

n.i.: no informado.
Fuente: Rozas et al., 2016.

Nuevamente, a partir de las tablas anteriores se observa la dispar eficiencia de las plantas de tratamiento convencionales frente a diferentes microcontaminantes. Así, se evidencia la necesidad de estudiar y evaluar tratamientos terciarios o nuevas tecnologías para la correcta eliminación de estos.

6.4. Tecnologías para la Eliminación de Contaminantes Emergentes

En la actualidad existen diversos estudios sobre diferentes tecnologías disponibles para la eliminación de contaminantes emergentes. Algunas de estas ya han sido utilizadas con éxito para el tratamiento de contaminantes convencionales y han probado también ser útiles y eficaces en el tratamiento de estos nuevos contaminantes de interés. De esta forma, los métodos empleados para el tratamiento de contaminantes emergentes pueden clasificarse en tres familias: tratamientos físico-químicos y procesos de membrana; tratamientos biológicos; y procesos híbridos (Patiño et al., 2014).

6.4.1. Tratamientos Físico-químicos y Procesos de Membrana

Dentro de la variedad de procesos físico-químicos y de membranas existentes, destacan los siguientes recurrentes en la bibliografía especializada:

- Procesos de Oxidación Avanzada (POA):
  - Ozonización (O_3).
  - Tratamiento fotosensible con UV.

  - Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2).

- Procesos de Membrana
  - Ósmosis Inversa
  - Nanofiltración

- Procesos de Adsorción con Carbón Activado.

1. **Procesos de Oxidación Avanzada**

   Los procesos avanzados de oxidación (POA), han resultado ser eficaces para la oxidación de un gran número de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos. De forma general, se encuentran dentro de los POA todos aquellos procesos que producen in situ la generación de especies altamente activas: radicales hidróxilo. Las principales características de estos radicales son su elevado potencial de oxidación y su carácter no selectivo, por lo que fácilmente ataca a un elevado grupo de productos químicos orgánicos, mineralizándolos y convirtiéndolos en productos menos complejos y perjudiciales. Una de las grandes ventajas de estos procesos radica en su bajo impacto ambiental (Patiño et al., 2014 y Cuevas, 2015).

   Los POA más comunes utilizan combinaciones de ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radiación ultravioleta y fotocatálisis. A continuación se presentan estas tecnologías con mayor detalle:

   - **Ozono**

     Debido a su alto potencial de oxidación, el tratamiento con ozono se ha empleado en el tratamiento de agua potable para la desinfección, consiguiendo así una reducción en la formación de productos de desinfección y mayor biodegradabilidad. La molécula de ozono es capaz de reaccionar particularmente con compuestos que contienen anillos aromáticos, enlaces insaturados y grupos amino (Patiño et al., 2014). El ozono es capaz de oxidar compuestos tanto directamente (reacción entre el ozono disuelto y la molécula) como indirectamente, a través de la formación del radical hidroxilo.

     La ozonización para la eliminación de micro-contaminantes ha tomado un papel muy importante en las últimas décadas. La estabilidad del ozono en el agua depende del pH y de la calidad del agua. Se puede acelerar la descomposición del ozono aumentando el pH o adicionando peróxido de hidrógeno al medio, lo que hace que la ozonización pase a ser un POA, debido a la formación de radicales hidroxilo. Mientras que el ozono es el principal responsable de la desinfección, la oxidación de los micro-contaminantes es debido a ambos oxidantes (O_3 y radical hidroxilo) (Cuevas, 2015).

     Dentro de las ventajas se encuentran sus altas eficiencias de remoción frente a los contaminantes emergentes. Entre sus desventajas están el alto coste de los equipos y operación, además de la posible formación de sub-productos más tóxicos (Patiño et al., 2014; Cuevas, 2015).

En la Figura 6.3 se muestran los resultados de un estudio sobre la oxidación con ozono de una mezcla de siete compuestos farmacéuticos con un tiempo de retención de 1,3 minutos, obteniéndose remociones superiores al 95 % e incluso alcanzando el 100 % de eliminación tras 1,5 minutos (Adams et al., 2002; Patiño et al., 2014). Estos compuesto son: carbadox (CARB), sulfacloro piridacina (SCPD), sulfadimetoxina (SDMX), sulfamerazina (SMRZ), sulfametazina (SMZN), sulfatiazol (STZL), y trimethoprim (TRMP).

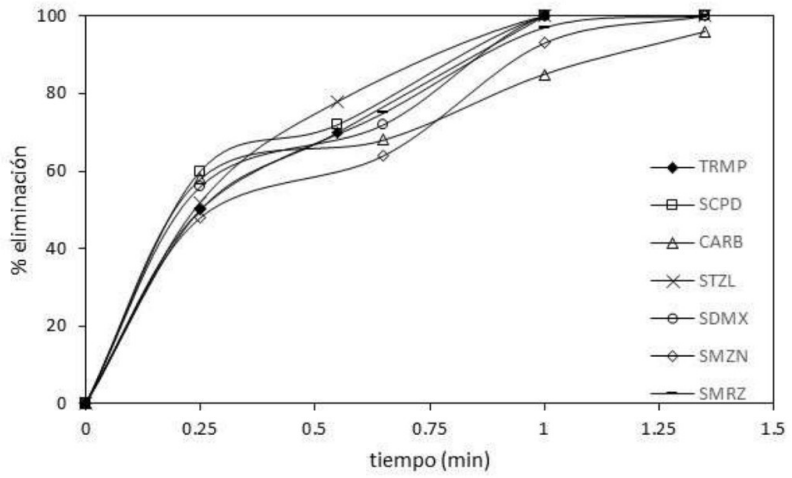


Figura 6.3: Eliminación de algunos compuestos farmacéuticos con Ozono.

Fuente: Patiño et. al 2014 adaptada de Adams et al., 2002.

- **Luz Ultravioleta y Foto-Fentón**:

  La remoción de contaminantes por fotólisis es generada a través de reacciones de foto-oxidación basadas en la excitación del sustrato orgánico permitiendo la trasferencia de electrones a la molécula de oxígeno . Factores como la turbidez, color del agua y concentración de materia orgánica e inorgánica del agua pueden afectar la eficiencia de este proceso (Legrini et al., 1993; Rozas, 2016). La adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) puede incrementar notablemente la eficiencia de remoción (Proceso de foto-oxidación y foto-Fenton).

  La oxidación Fenton consiste en el empleo del agente Fenton (peróxido de hidrógeno e iones de hierro) el cual posee unas fuertes propiedades oxidantes (Gan et al., 2009; Patiño et al., 2014).

  La Figura 6.4 presenta las eficiencias de remoción de octilfenol para diferentes tiempos de contacto frente a procesos de fotólisis y foto-oxidación. Este microcontaminante es un surfactante formado a partir de residuos de agentes tensoactivos cuyo principal uso está en la fabricación de detergentes domésticos e industriales. (Garrido, 2010; Hernández et al., 2021).

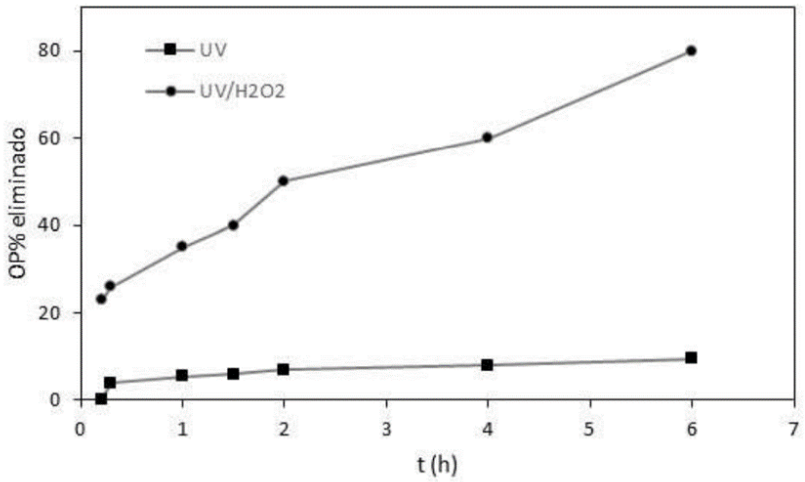


Figura 6.4: Comparación de tecnología UV y UV/H2O2, para la remoción de octilfenol.

Fuente: Patiño et. al, 2014. Adaptada de Neamtu et al., 2009.

A partir de la figura anterior se observa que la combinación de UV con peróxido de hidrógeno disminuye significativamente el tiempo de contacto requerido y aumenta la eficiencia de eliminación.

También se han combinado efectivamente los procesos de ozono y UV como se muestra en la Figura 6.5. Esta presenta la eficiencia de remoción de BHA frente a los procesos UV y UV/O3. El Hidroxianisolbutilado o BHA es un compuesto utilizado en la industria como aditivo alimentario para prevenir el deterioro de la grasa en alimentos (Gil et al., 2012).

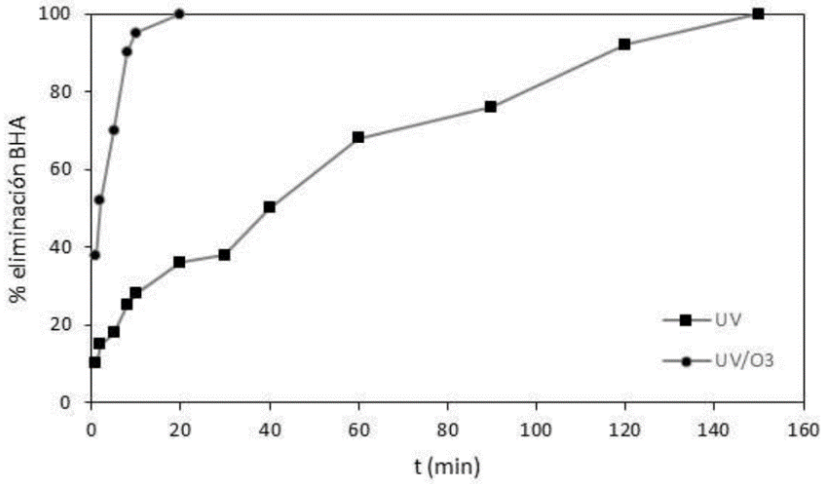


Figura 6.5: Comparación de la eliminación de BHA mediante tecnología UV y UV/O3.

Fuente: Patiño et al., 2014. Adaptada de Lau et al., 2007.

Nuevamente se observa el aumento en la efectividad y disminución de los tiempos de contacto con la combinación de procesos de oxidación, como el caso UV frente a UV/O3.

2. **Procesos de Membrana** Una membrana es una barrera de material sintético u orgánico semipermeable capaz de seleccionar qué compuestos son capaces de atravesarla en función de las propiedades físicas, químicas e incluso eléctricas tanto de los compuestos a eliminar como de la propia membrana. En toda operación que utilice membranas los compuestos a separar, que pueden ser partículas, moléculas o iones de diversos tamaños, se encuentran suspendidos o disueltos en estado líquido o gaseoso y existe una fuerza motriz encargada de que se produzca el transporte de estas moléculas a través de la membrana en contra del gradiente de concentración (Peñalver Romero, 2020).

   La Tabla 6.8 presenta diferentes procesos de membrana utilizados en la actualidad para el tratamiento de aguas.

Tabla 6.8: Procesos de membrana más comunes en el tratamiento de agua potable y aguas residuales.

Proceso	Características	Aplicaciones
Ósmosis inversa	Presión de funcionamiento: 10-100 bar. Tamaño de Poro: 0,1 a 1 nanómetros	Separación de partículas pequeñas, que incluyen bacterias e iones monovalentes (Obotey Ezugbe y Rathilal, 2020). Aplicado en desalinización de aguas.
Nanofiltración	Presión de funcionamiento: 5-20 bar. Tamaño de Poro: 1 a 10 nanómetros	Eliminación de iones divalentes y sustancias orgánicas (Abdel-Fatah, 2018). Aplicado en tratamiento de aguas residuales y potabilización.
Ultrafiltración	Presión de funcionamiento: 1-10 bar. Tamaño de Poro: 10 a 100 nanómetros	Remoción material particulado, bacteria y virus. Utilizado como pretratamiento para la OI y NF.
Microfiltración	Presión de funcionamiento: 0,1-5 bar. Tamaño de Poro: 0,1 a 10 micrómetros	Usualmente se usa para retener sólidos en suspensión: por lo tanto, se emplea como etapa de limpieza, de concentración o como pretratamiento para la nanofiltración o a la ósmosis inversa (Solís et al., 2017).

Fuente: (Vásquez, 2018; Prats, 2015; Obotey Ezugbe y Rathilal, 2020; Abdel-Fatah, 2018; Solís et al., 2017).

Se presenta en la Figura 6.6 un esquema con los diferentes tamaños de partículas que retienen los diferentes procesos de membrana más utilizados.

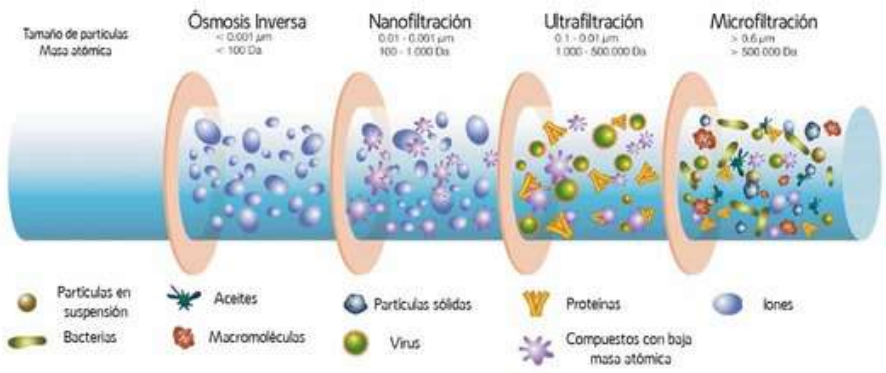


Figura 6.6: Esquema diferencias entre procesos de membrana

Fuente: Bluegold, 2020.

Los procesos de membrana que han sido más estudiados para la remoción de microcontaminantes son la Nanofiltración (NF) y la Osmosis Inversa (OI). La Osmosis Inversa posee gran eficiencia en la separación partículas pequeñas, que incluyen bacterias e iones monovalentes como iones de sodio e iones de cloruro hasta un 99,5 %. Ha sido ampliamente usada para la desalinización y el tratamiento de aguas. Su funcionamiento se basa en una presión hidrostática suficientemente grande para superar la presión osmótica intrínseca de la alimentación, proceso contrario a la ósmosis natural (Obotey Ezugbe y Rathilal, 2020).

Por su lado, las características de la nanofiltración se encuentran entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa, y funciona tanto por flujo de tamaño de poro (convectivo) y los mecanismos de difusión de la solución. La NF es empleada para la eliminación de iones divalentes y sustancias orgánicas y se utiliza en algunas aplicaciones específicas, incluso también desalinización (Abdel-Fatah, 2018).

3. **Procesos de Adsorción con Carbón Activado**

Los procesos de adsorción son una de las tecnologias más estudiadas para el tratamiento de aguas, especialmente para la eliminación de contaminantes orgánicos. Es por ello que también han sido ampliamente estudiados para su aplicación en la eliminación de contaminantes emergentes. Los adsorbentes más empleados son los carbones activos: carbón activo granular (CAG) o carbón activo en polvo (CAP), su principal ventaja es que no generan productos tóxicos y poseen una elevada capacidad de adsorción. La eficacia de adsorción es función de las propiedades del adsorbente empleado - área superficial, morfología y química superficial -. Existen además otros estudios empleando otro tipo de adsorbentes, como zeolitas o nanotubos de carbono (Patiño et al., 2014).

En la Tabla 6.9, se presentan ejemplos de diferentes eficiencias de remoción de contaminantes emergentes utilizando diferentes adsorbentes:

Tabla 6.9: Eliminación de contaminantes emergentes mediante adsorción.

Compuesto/s	Adsorbente/s	Eficiencia (%)
Imidazoles	Carbón activo	90
Sulfonamidas		90
Amoxicilina	Carbon Activo	95
	Bentonita	88
	Nanotubos de carbono	>80
Ofloxacino	Carbón activo	≈100
Triclosán	Carbón activo (GAC)	60
	Caolinita	32,3
	Montmorillonita	10,5
Triton X-series	Nanotubos de carbono	80-95

Fuente: Patiño et al., 2014.

6.4.2. Tratamientos Biológicos

- **Biorreactores de Membrana (MBR)**

  Los biorreactores de membrana o MBR, son sistemas que combinan el proceso biológico de lodos activados con la filtración por membranas. Aun cuando el proceso biológico es el mismo, existen varias diferencias respecto a parámetros operacionales. El tratamiento físico de separación de solidos-líquidos marca la mayor diferencia, donde en los sistemas de lodos activados este tratamiento se realiza en un sedimentador secundario, en cambio en los MBR este proceso se realiza utilizando membranas (Vasquez, 2018). En general, los MBR utilizan membranas de UF con tamaño de poro entre 0.1 y 0.01 micrómetros, aunque en algunos casos también se utilizan membranas de MF con tamaño de poro entre 1 y 0.1 micrómetros.

  La Figura 6.7 presenta un esquema comparativo entre lodos activados y un MBR.

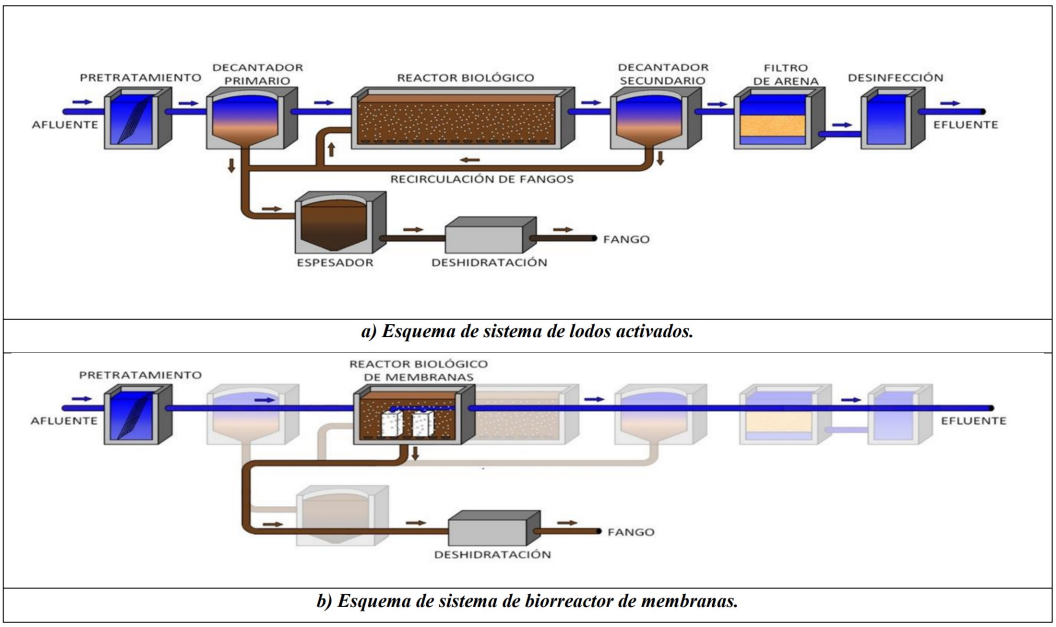


Figura 6.7: Comparación de Biorreactor de Membrana con Lodos Activados.

Fuente: Vásquez (2015) adaptado de López (2012).

En un estudio realizo por Sipma et al. (2010), se comparó la eliminación de 30 compuestos farmacéuticos mediante tratamiento con lodos activos y MBR, donde sólo en cuatro de los 30 casos, las eliminaciones mediante lodos activos fueron superiores a las obtenidas mediante el empleo de MBR. Incluso para ocho de los compuestos seleccionados se duplicó la eficacia de eliminación con el empleo de MBR. Mediante el tratamiento con lodos activos, más de la mitad de los compuestos presentaron retenciones inferiores al 40 %, en contraposición con la eliminación aplicando MBR, donde para la mitad de los compuestos se obtuvieron retenciones superiores al 70 % (Como se citó en Patiño et al., 2014).

Las Figuras 6.8 y 6.9 presentan las diferentes eficiencias de remoción de un estudio realizado por Vasquez (2018) utilizando MBR con tiempos de retención celular (TRC) de 30 y 60 días para algunos microcontaminantes. A partir de esta, se destaca la buena eficiencia de remoción para la mayoría de los compuestos analizados como por ejemplo el Ibuprofeno y Triclosán. Aun así, existen compuestos más resistentes a este tratamiento como la Atrazina, Carbamazepina, Diclofenaco, Linuron, Simazina y Terbutilazina.

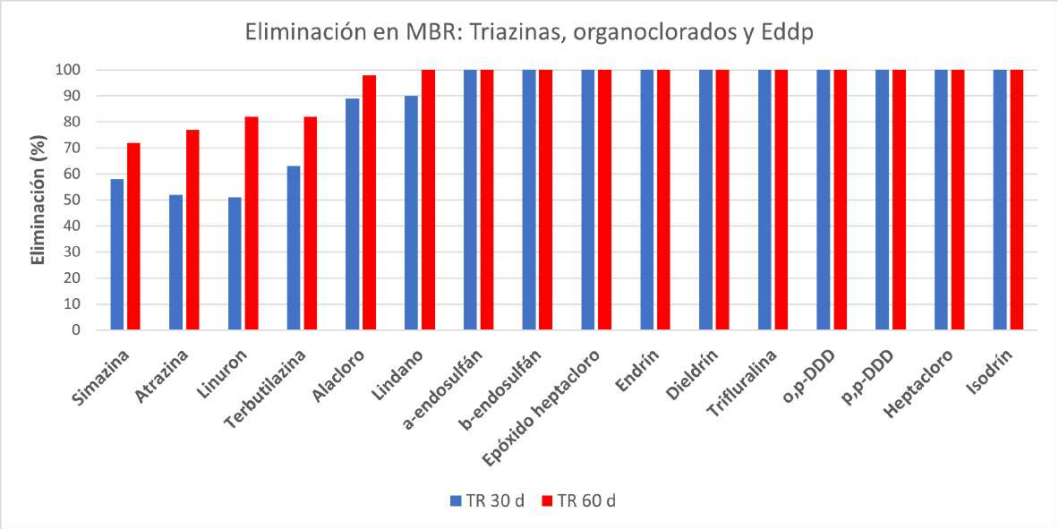


Figura 6.8: Eliminación de diferentes microcontaminantes con MBR: Triazinas, organoclorados y Eddp.

Fuente: Vásquez (2018).

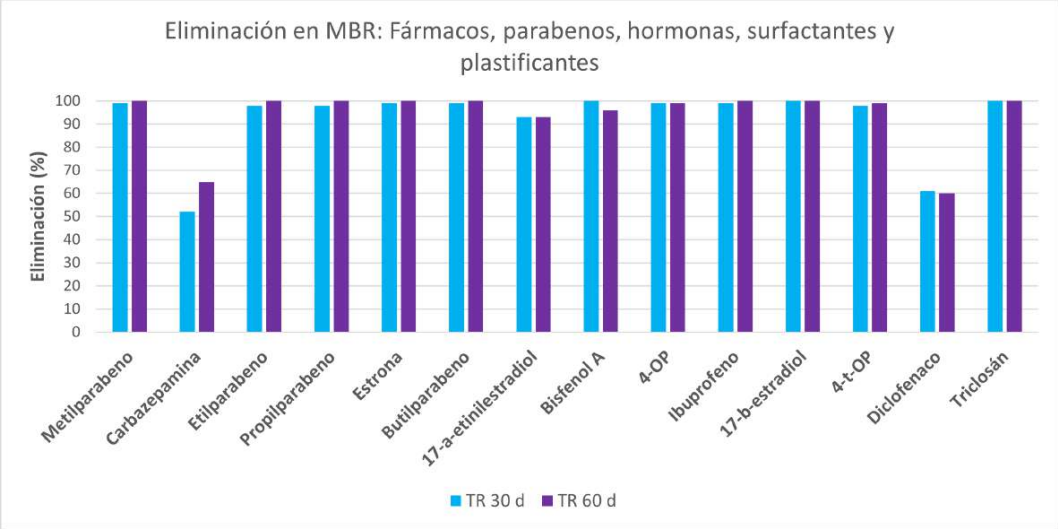


Figura 6.9: Eliminación de diferentes microcontaminantes con MBR: Fármacos, parabenos, hormonas, surfactantes y plastificantes.

Fuente: Vásquez (2018).

Vasquez (2018) estudió también la eliminación de diferentes microcontaminantes utilizando una combinación de biorreactor de membrana con osmosis inversa (MBR+OI) y con nanofiltración (MBR+NF) donde, observó que se podría incrementar notablemente la eficiencia de remoción de sustancias más refractarias al tratamiento sólo con MBR adicionando estos procesos físicos. Para compuestos más refractarios al tratamiento sólo con MBR como la Carbamazepina, 17-a-etinilestradiol y Diclofenaco se obtuvieron rendimientos superiores al 96 % y 83 % para MBR+OI y MBR+NF respectivamente y se comprobó que los tratamientos con membrana OI/NF complementan muy bien el

tratamiento con MBR, eliminando 30 microcontaminantes analizados bajos los limites de detección. En la Figura 6.10 se presentan las eficiencias de remoción para esto 3 microcontaminantes utilizando MBR y las combinaciones MBR+NF y MBR+OI.

Lo mismo se realizó comparando los rendimientos adicionando al proceso MBR un Proceso de Oxidación Avanzada POAS como fotólisis y ozonización. Se realizaron combinaciones de MBR con Ozonización a dosis altas y bajas (MBR + O3 A y MBR + O3 B) y de MBR con Fotólisis a dosis altas y bajas(MBR + UV A y MBR + UV B). Se obtuvieron altas eficiencias de remoción para los compuestos más refractarios utilizando combinaciones de MBR con POAS. En la Figura 6.10 se presentan las eficiencias de remoción para estos 3 microcontaminantes frente al proceso MBR y para las combinaciones MBR + O3 A, MBR + O3 B, MBR+UV A, MBR+UV B, MBR + NF y MBR + OI.

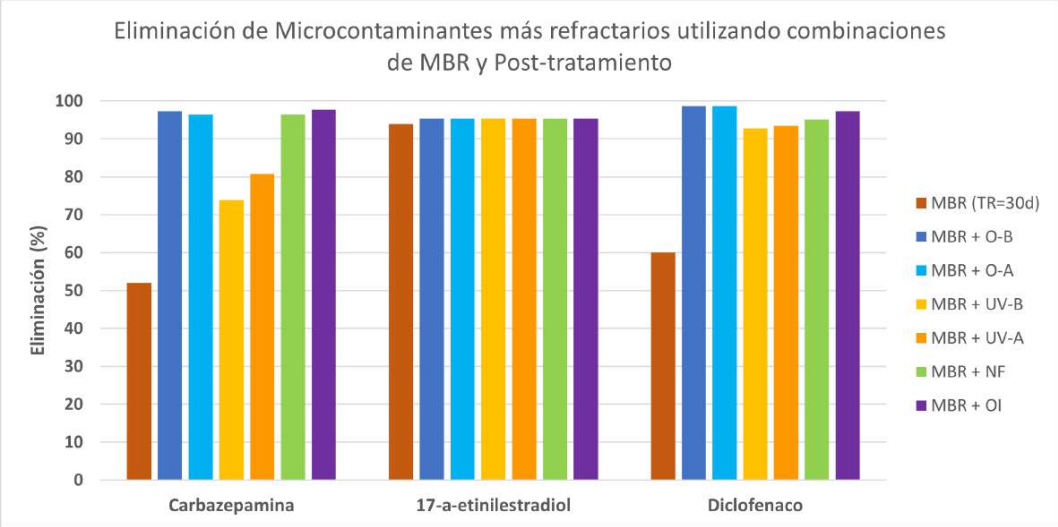


Figura 6.10: Comparación de eliminación de diferentes microcontaminantes con MBR adicionando post-tratamientos.

Fuente: Vásquez (2018).

La Figura 6.11 presenta las eficiencias de remoción globales de los microcontaminantes analizados por Vásquez (2018) para las combinaciones de MBR con post-tratamientos, donde la combinación de MBR + Ósmosis Inversa tiene las mayores eficiencias globales con una eliminación global del 99,3 %.

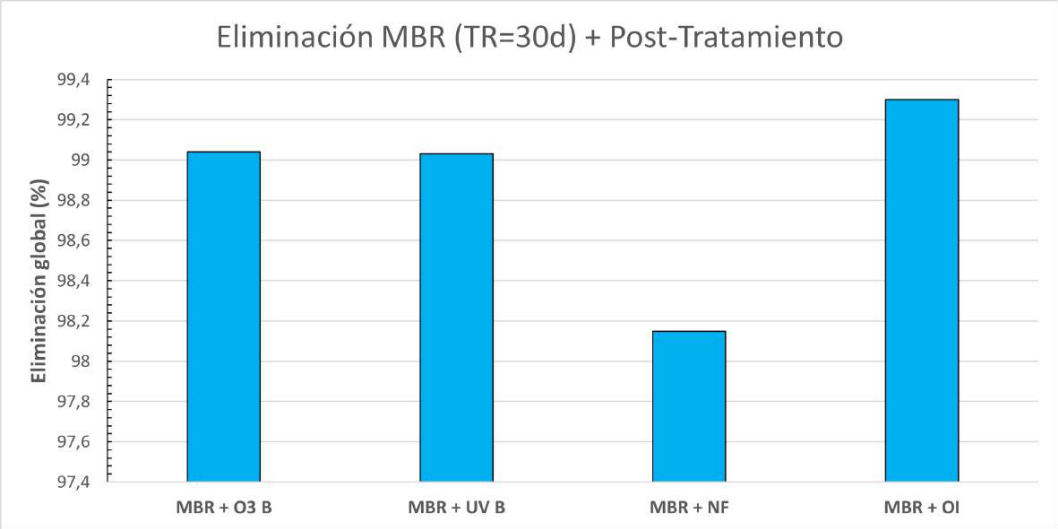


Figura 6.11: Eficiencias de remoción globales de MBR + post-tratamientos.

Fuente: Vásquez (2018).

6.5. Casos de Estudio en Chile

6.5.1. Productos Farmacéuticos en la Cuenca del Biobío

Henriquez (2012), realizó un trabajo sobre la presencia de productos farmacéuticos en la cuenca del río Biobío, donde se analizó la presencia de fármacos en las aguas de entrada y salida de las plantas de tratamiento de agua para consumo humano y en las plantas de tratamiento de aguas servidas de la comunas de Santa Bárbara, Los Ángeles y Concepción.

Las plantas de tratamiento de agua potable de Santa Barbara y Los Ángeles se abastecen a partir de fuentes subterráneas, mientras tanto la PTAP de Concepción de fuentes superficiales, específicamente del Río Biobío. Por otro lado, las plantas de tratamiento de aguas servidas de las 3 comunas emplean el tratamiento biológico de lodos activados.

Se analizaron antidepresivos, antibióticos (de uso humano y veterinario), betabloquedores, reguladores de lípidos, estimulantes y un herbicida. Estos microcontaminantes analizados se presentan en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Microcontaminantes analizados por Henriquez (2012)

Nombre	Clasificación	Tipo de Fármaco
Nordiazepam	Fármaco	Ansiolítico
Diazepam	Fármaco	Ansiolítico, psicoléptico
Lincomicina	Fármaco	Antibiótico
Trimoteprima	Fármaco	Antibiótico
Sulfametoxazol	Fármaco	Antibiótico
Monensina	Fármaco	Antibiótico Veterinario
Fluoxetina	Fármaco	Antidepresivo
Venlafaxina	Fármaco	Antidepresivo
Sertralina	Fármaco	Antidepresivo
Paroxetina	Fármaco	Antidepresivo
Carbazepina	Fármaco	Antiepiléptico
Atenolol	Fármaco	Betabloqueante
Norfluoxetina	Fármaco	Metabolito
Carbazepina 10,11-epóxido	Fármaco	Metabolito
Norfluoxetina	Fármaco	Metabolito
p-hidroxi atorvastatina	Fármaco	Metabolito
o-hidroxi atorvastatina	Fármaco	Metabolito
Atorvastatina	Fármaco	Regulador de lípidos
Cafeína	Estimulante	–
Atrazina	Herbicida	–

Fuente: Henriquez (2012).

Los resultados detectaron la presencia de 16 microcontaminantes, en las muestras referidas a las aguas servidas; mientras que para el caso de las aguas destinadas a consumo humano se detectaron sólo dos, Sertralina y Paroxetina con concentraciones inferiores a los 25 $\frac{ng}{L}$. La mayor presencia observada de microcontaminantes se encuentra en las aguas servidas de las tres localidades en estudio, en particular para tres compuestos: La cafeína (estimulante) que mostró concentraciones en las aguas servidas crudas que van desde 6.150 $\frac{ng}{L}$ a 13.150 $\frac{ng}{L}$; el atenolol (betabloqueador), con concentraciones entre 1.180 $\frac{ng}{L}$ y 2.032,5 $\frac{ng}{L}$; y la carbamazepina (antidepresivo), con concentraciones que van desde 166,5 $\frac{ng}{L}$ a 198,8 $\frac{ng}{L}$ (Henriquez, 2012).

Para el caso del regulador de lípidos atorvastatina y sus metabolitos orto y para atorvastatina, se obtuvieron mayores concentraciones para la para-atorvastatina, con valores máximos de 333,3 $\frac{ng}{L}$, seguida del orto-atorvastatina con concentraciones máximas de 323, 5 $\frac{ng}{L}$ (Henriquez, 2012).

Respecto a la eficiencia de remoción de las PTAS frente a los microcontaminantes analizados, estos resultados se presentan en la Tabla 6.11 e indican que estas son capaces de remover en diferentes porcentajes la mayoría de los microcontaminantes analizados. Sin embargo para los casos de los fármacos carbamazepina y sulfametoxazol estas plantas no poseen eficiencia de remoción alguna e incluso las concentraciones de estos en los efluentes de estas plantas

serian incluso mayores en algunos casos, obteniendo porcentajes de remoción negativos. Es conocida la escasa eficiencia de remoción de las PTAS convencionales frente a algunos fármacos como la carbamazepina, aun así, estos resultados no serian determinantes ya que al momento de realizar las mediciones las plantas no se encontraban en condiciones óptimas de operación (Henriquez, 2012).

Tabla 6.11: Porcentajes de remoción de microcontaminantes en las distintas plantas de tratamiento de aguas servidas cuenca Biobío.

Familia	Compuesto	Porcentaje de remoción [%] Localidad		
		Santa Bárbara	Los Ángeles	Concepción
Antibióticos	Sulfametoxazol	-10,4	-34,5	37
Antidepresivos	Fluoxetina	76,2	55,8	65,8
	Norfluoxetina	100	100	48
	Venlafaxina	73,2	3	3,9
	Carbazepina	46,2	-18	-135,3
	Carbazepina 10,11-epóxido	–	-1958,7	–
Regulados de lípidos	Atorvastatina	100	100	100
Estimulante	Cafeína	97,1	99	71,5

Fuente: Henriquez (2012).

6.5.2. Presencia de Microcontaminantes Orgánicos en el río Biobío: Evaluación de Procesos de Oxidación Avanzada, UV/H2O2 y O3/CAP, como alternativas para su abatimiento

Rozas (2016), realizó un trabajo en el cual se evaluó la presencia de algunos microcontaminantes orgánicos en las aguas del río Biobío y en sistemas de tratamiento de agua potable y aguas servidas en esta cuenca. También evaluó diferentes tecnologías para la remoción de microcontaminantes como fotólisis (UV), foto-oxidación (UV/H_2O_2) , ozonización (O_3 y ozonización combinado con carbón activado en polvo (O_3/ CAP).

Se evaluó la presencia de microcontaminantes en una zona aguas arriba del río con escasa influencia de actividades antrópicas (Comuna de Lonquimay) y en otra zona con gran influencia de actividades antrópicas en la zona baja del río (Comuna de Hualqui hasta Hualpén). Los microcontaminantes que fueron evaluados en agua natural y plantas de tratamiento de aguas fueron atrazina (ATZ), cafeína (CAF), diclofenaco (DCL) y triclosán (TCS) donde, se identificó la presencia de estos contaminantes en ambas zonas, incluso en la zona con escasa influencia antrópica lo cual indicaría que estos MCs están omnipresentes en el entorno natural (Rozas, 2016). En la Tabla 6.12 se presentan las concentraciones de los compuestos evaluados.

Tabla 6.12: Detección de microcontaminantes orgánicos en el río Biobío y sistemas de tratamientos de agua potable y servidas.

Muestreo	Zona Alta	Zona Baja		
	Río Biobío	Río Biobío	PTAP	PTAS
Atrazina [ng/L]	21 (±4)	39 (±3)	41 (±11) - 74 (±21)	3 (±1) - 157 (±40)
Bisfenol A [ng/L]	84 (±33)	91 (±17)	65 (±7) - 147 (±19)	247 (±13) - 1047 (±120)
Cafeína [ng/L]	8 (±2)	33 (±3)	21 (±1) - 59 (±14)	60 (±9) - 15830 (±1300)
Diclofenaco [ng/L]	16 (±2)	15 (±1)	11 (±2) - 17 (±2)	288 (±23) - 399 (±41)
Estriol* [ng/L]	N/D	N/D	N/D	274 (±27) - 1047 (±120)
Fenolftaleína [ng/L]	N/D	N/D	N/D	38 (±3) - 283 (±36)
Progesterona* [ng/L]	N/D	N/D	N/D	25 (±2) - 26 (±3)
Triclosán [ng/L]	25 (±10)	54 (±9)	20 (±10) - 46 (±12)	26 (±12) - 395 (±47)
Testosterona* [ng/L]	N/D	N/D	N/D	23 (±1) - 35 (±5)

N/D: compuesto no detectado.
Valores en paréntesis corresponde a la desviación estándar.
*: solo detectado en el influente, PTAS.

Fuente: Rozas (2016).

Se evidencia a partir de las concentraciones obtenidas por Rozas que se tienen las mayores concentraciones de microcontaminantes en los efluentes de las PTAS. También se evidencia la presencia de los microcontaminantes en todas las etapas de las PTAP y PTAS, por tanto los procesos físico-químicos y biológicos utilizados convencionalmente para el tratamiento de agua potable y aguas servidas no presentan mayores eficiencias en la remoción de estos contaminantes.

En este estudio también se evaluaron diferentes alternativas de tratamiento, donde para el caso de UV/H_2O_2 se logro una eficiencia de remoción del 80 % para DCL y TCS con una dosis inferior a 200 mJ/cm^2 y una eficiencia del 80 % para ATZ y CBZ con dosis de UV de 740 y 990 mJ/cm^2. La CBZ no fue eliminada por la fotólisis y el principal mecanismo de oxidación de esta fue por la adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) (Rozas, 2016).

Por otro lado, los experimentos utilizando agua pura evidenciaron que los tratamientos con O_3 y O_3/CAP lograron altas eficiencias de remoción mayores al 90 % en aproximadamente 5 minutos para CBZ, DCL y TCS, mientras que para el caso de la ATZ se obtuvieron menores eficiencias con eficiencias mayores al 90 % a los 30 minutos de reacción. La adición de CAP aumento ligeramente la eficiencia de remoción en la mezcla de microcontaminantes utilizando agua natural (Rozas, 2016).

6.5.3. Contaminación farmacéutica en los ríos del mundo: Río Maipo y Mapocho

Wilkinson et. al. (2022) realizaron una investigación global sobre la contaminación con compuestos farmacéuticos en diferentes ríos, donde se analizaron 61 microcontaminantes de origen farmacéutico en 104 países de todos los continentes, realizando 137 campañas de muestreo diferentes. Dentro de estos países, se encuentra Chile donde, se realizaron campañas de muestreo tanto en el río Maipo como en el Mapocho con un total de 5 y 10 muestras respectivamente analizadas en diferentes puntos de estos.

En la Tabla 6.13 se presentan los microcontaminantes analizados en esta investigación.

Tabla 6.13: Productos farmacéuticos analizados en *Pharmaceutical Pollution of the world´s rivers.*

Compuestos Farmacéuticos Analizados
Amitriptilina, Artemisinina, Atenolol, Cafeína, Carbamazepina, Cetirizina, Cimetidina, Ciprofloxacino, Citalopram, Claritromicina, Clotrimazol, Cloxacilina, Codeína, Cotinina, Desvenlafaxina, Diazepam, Diltiazem, Difenhidramina, Enrofloxacino, Eritromicina, Fexofenadina, Fluconazol, Fluoxetina, Gabapentina, Hidrocodona, Itraconazol, Ketoconazol, Ketotifeno, Lidocaína, Lincomicina, Loratadina, Metformina, Metronidazol, Miconazol, Naproxeno, Nevirapina, Nicotina, Noretisterona, Norfluoxetina, Oseltamivir, Oxazepam, Oxitetraciclina, Paracetamol, Pregabalina, Propranolol, Raloxifeno, Ranitidina, Salbutamol, Sertralina, Sitagliptina, Sulfadiazina, Sulfametoxazol, Temazepam, Tetraciclina, Tiabendazol, Tramadol, Triamtereno, Trimetoprima, Tilosina, Venlafaxina, Verapamilo

Fuente: Wilkinson et. al. (2022).

Se presenta en la Figura 6.12 las ubicaciones geográficas de las muestras tomadas para el análisis de los diferentes fármacos en los ríos Mapocho (MP) y Maipo (MA) durante este estudio. Algunas de estas referencias geográficas tuvieron que ser inferidas debido a que no eran correctas.

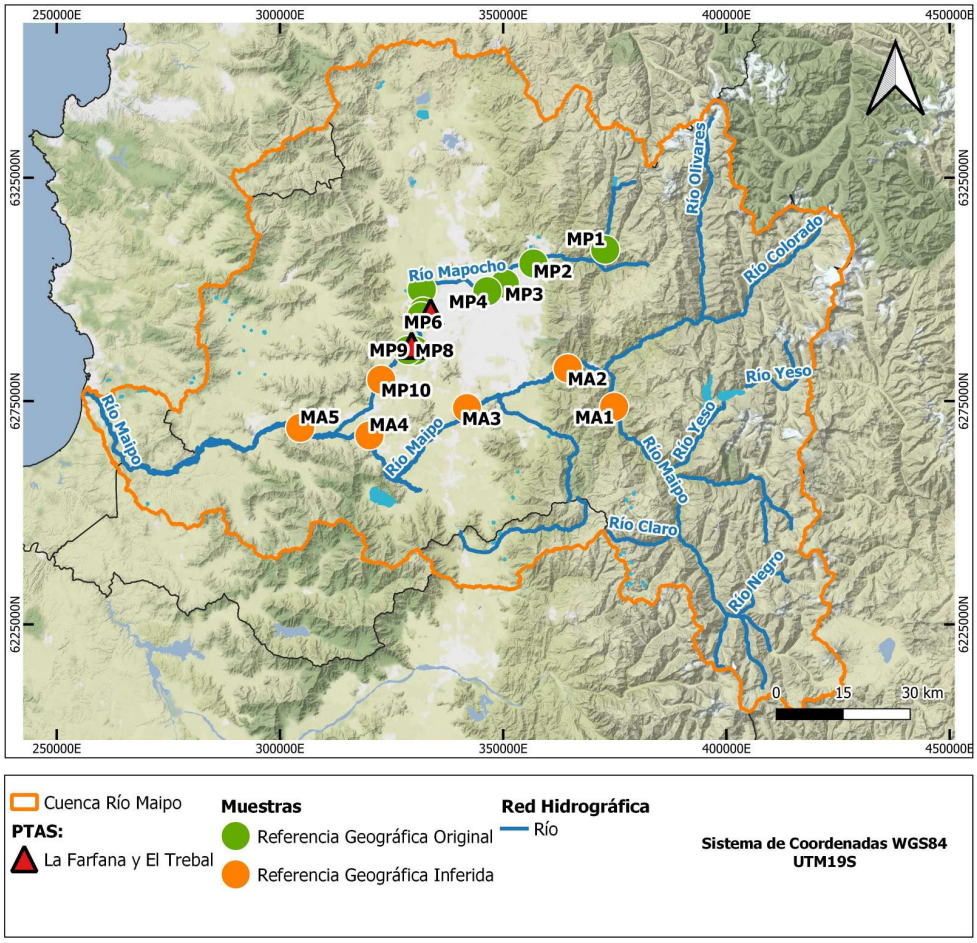


Figura 6.12: Ubicación muestras tomadas en estudio *Pharmaceutical Pollution of the world´s rivers*.

Fuente: Wilkinson et. al. (2022).

A partir de los datos disponibles de la campaña de muestreo global realizada por Wilkinson et. al. (2022), se detectaron 26 compuestos farmacéuticos en el río Mapocho y 1 en el río Maipo. En la Tabla 6.14 se presentan los porcentajes de muestras detectadas para cada contaminante junto al rango de las concentraciones detectadas de estos para ambos ríos.

Tabla 6.14: Resultados *Pharmaceutical Pollution of the world´s rivers*: concentraciones compuestos farmacéuticos en río Maipo y Mapocho.

Compuesto Farmacéutico	Porcentaje de Muestras Detectadas [%]		Rango muestras detectadas [ng/L]	
	Maipo	Mapocho	Maipo	Mapocho
Amitriptilina	0 %	10 %	N/D	10,6
Atenolol	0 %	40 %	N/D	224 - 417
Cafeína	0 %	40 %	N/D	589 - 3210
Carbamazepina	0 %	40 %	N/D	329 - 1090
Cetirizina	0 %	40 %	N/D	182 - 289
Citalopram	0 %	20 %	N/D	10,1 - 11,4
Claritromicina	0 %	10 %	N/D	117
Codeína	0 %	40 %	N/D	32,8 - 97,4
Cotinina	0 %	10 %	N/D	416
Enrofloxacino	100 %	0 %	37 - 163	N/D
Eritromicina	0 %	20 %	N/D	11,9 - 30
Fexofenadina	0 %	40 %	N/D	288 - 568
Gabapentina	0 %	40 %	N/D	174 - 488
Hidrocodona	0 %	40 %	N/D	3,33 - 11,7
Lidocaína	0 %	50 %	N/D	4,79 - 394
Metformina	0 %	40 %	N/D	3330 - 4930
Naproxeno	0 %	40 %	N/D	178 - 285
Paracetamol	0 %	11 %	N/D	58
Pregabalina	0 %	40 %	N/D	588 - 1130
Ranitidina	0 %	10 %	N/D	11,2
Propranolol	0 %	33 %	N/D	16,3 - 25,5
Sitagliptina	0 %	40 %	N/D	29,9 - 100
Sulfametoxazol	0 %	40 %	N/D	86,7 - 134
Tramadol	0 %	40 %	N/D	215 - 413
Triamtereno	0 %	40 %	N/D	11,4 - 25,9
Trimetoprima	0 %	40 %	N/D	81,2 - 139
Venlafaxina	0 %	40 %	N/D	46,5 - 139

N/D: compuesto no detectado.

Fuente: Wilkinson et. al. (2022).

6.6. Comentarios

Se realizó un análisis bibliográfico sobre los contaminantes emergentes que incluye una caracterización y clasificación de estos, eficiencias de remoción en PTAS y PTAP convencionales y nuevas tecnologías de tratamiento disponibles. A partir de este trabajo se pone en evidencia la disparidad en las eficiencias de remoción de las plantas convencionales frente a diferentes microcontaminantes, lo cual está influenciado por la escasa información y la dificultad de comparar condiciones de operación equivalentes. No obstante lo anterior, se observa en general bajas eficiencias frente a contaminantes ampliamente utilizados como en el caso de algunos fármacos.

En la actualidad existen diferentes estudios sobre tecnologías capaces de remover estos contaminantes, como procesos de oxidación avanzada, procesos de membrana y MBR. Incluso la combinación de estos procesos puede incrementar las eficiencias de remoción como se observa en el estudio realizado por Vasquez (2018), donde se presenta la alta efectividad de

remoción de los procesos que combinan MBR con post-tratamiento como Ozonización (O3), Fotólisis (UV), Nanofiltración (NF) y Ósmosis Inversa (OI). Estos estudios, sin duda deben ser ampliados de modo de obtener resultados reproducibles.

Otro problema que presentan los CEs es la falta de estudios a nivel país sobre estos, donde solo existen un par de estudios que presentan concentraciones de algunos microcontaminantes en la cuenca del Biobío (Rozas, 2016) y sobre algunos fármacos en los ríos Mapocho y Maipo. De esta forma, no es posible precisar la situación de contaminación emergente en el río Maipo y en los diferentes cuerpos de agua de nuestro país.

Es importante realizar más estudios sobre el tema para visualizar la situación de calidad de agua frente a estos contaminantes y tomar medidas en caso de ser necesario, como por ejemplo actualizar e incluir en las normativas contaminantes emergentes de interés y considerarlos en los planes de monitoreo de calidad del agua. Se recomienda para efectos de complementar el presente trabajo, realizar un estudio que evalúe concentraciones de algunos microcontaminantes de interés en la cuenca del río Maipo que alberga la zona urbana más grande del país y concentra gran parte de su población y donde se tienen diferentes actividades que podrían contribuir con la contaminación con contaminantes emergentes, como la agricultura, descarga de efluentes de industrias y PTAS.

Finalmente se debe destacar la falta de información y regulación sobre estos contaminantes a nivel país, por tanto se requiere trabajar y avanzar en el tema que resulta de interés en la calidad del agua, y donde los efectos de la crisis climática tendrían efectos adversos en la calidad y disponibilidad del agua.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

El presente trabajo realiza un análisis sobre los contaminantes regulados y emergentes en el río Maipo. Para el caso de los contaminantes regulados, se introducen las normativas vinculas a la calidad de agua y sus usos junto a los diferentes contaminantes y parámetros regulados en estas. Se realizan dos análisis diferentes sobre los contaminantes regulados. El primero en base a la calidad físico-química en relación con la Norma Secundaria de Calidad del Agua Superficial (NSCA) de la cuenca del río Maipo establecida en el Decreto Supremo N°53/2014 y el segundo en relación a las normativas de uso del agua como la NCh 409/2006 para agua potable, NCh 1333/1978 para riego y el Decreto Supremo N°143/2009 para uso recreacional.

Con respecto a la NSCA de la cuenca del Río Maipo, a pesar de que esta norma establece niveles de calidad para diferentes tramos en los cursos superficiales en la cuenca del Maipo, se realiza una evaluación frente a todos los niveles de calidad establecidos para los diferentes parámetros y contaminantes exclusivamente en el cauce principal del río Maipo de acuerdo a los alcances considerados.

Dentro de los resultados y discusiones sobre este análisis se destaca un incremento en la densidad de las muestras realizas por año para el periodo posterior a la publicación del D.S. N°53, pero también se evidencia la escasez de información para el área de vigilancia MA-6 que corresponde a la desembocadura y que pertenece a la red de observación NSCA. Esta área de vigilancia resulta de gran interés debido a que todos los afluentes de la cuenca convergen en esta y a la presencia de un humedal y zonas urbanas que utilizan estas aguas, por tanto se recomienda aumentar las observaciones en esta o incluirla en la red de control de la NSCA.

Se observa un aumento en las concentraciones o valores promedio para el periodo posterior a la publicación de la NSCA Maipo para la conductividad eléctrica, pH, cloruro, sulfato, nitrato y ortofosfato y una disminución para el caso del oxígeno disuelto, lo cual evidencia un deterioro en la calidad del agua para este periodo vinculado con mayor probabilidad a la disminución de los caudales producto de la sequía o incluso a un posible aumento de las emisiones contaminantes, aunque también existiría un efecto de la mayor densidad de muestras que permite tener un mejor panorama de las condiciones en el río.

Se presentan los porcentajes de muestras dentro de los niveles de calidad ambiental establecidos en el D.S. N°53. Estos porcentajes no se refieren a incumplimientos de la norma,

más bien entregan información sobre los parámetros y contaminantes frente a los niveles establecidos en esta normativa. La mayoría de los parámetros y contaminantes regulados en el D.S. N°53 tienen porcentajes mayores al 70 %, salvo el caso del Oxígeno Disuelto en MA-4 (59 %), conductividad eléctrica y nitrato en MA-5 (50 y 68 %) y los casos del sulfato y el cloruro con más de un área con porcentajes bajos, el primero con las áreas MA-2 y MA-3 con porcentajes de 55 y 66 % y el segundo con 4 áreas bajo el 70 % y con porcentajes de 47 y 36 % para MA-2 y MA-5.

Se presentan algunas tendencias visibles en la contaminación aguas abajo del río Maipo, como en el caso de dos compuestos utilizados en la agricultura, el nitrato y el ortofosfato con tendencias evidentes, que aumentan sus concentraciones aguas abajo del área MA-3 coincidiendo con el inicio de las áreas de riego. Se recomienda elaborar un plan de evaluación de la contribución de fuentes difusas provenientes de derrames agrícolas, una de las principales fuentes de estos contaminantes.

Para el análisis de los parámetros regulados en las 3 normativas de uso durante el periodo 1990-2022 se evalúan para las diferentes áreas de vigilancia de la NSCA río Maipo y se observa una mayor cantidad de información disponible para las áreas MA-1 , MA-4 y MA-5 y nuevamente escasa información para MA-6.

No se logra realizar evaluaciones de contaminantes como el boro, cadmio, mercurio y plomo frente a alguna de las normativas de uso que los regulan debido a que se emplean mayormente metodologías de análisis con límites de detección mayores o iguales a los límites establecidos en estas normas. En el caso del boro el 97 % de sus muestras representan concentraciones inferiores al límite de detección (1 mg/L) que es mayor al límite de 0,75 mg/L establecido en la NCh 1333; para el plomo representan el 40 % frente al límite establecido en la NCh 409; y para los casos del cadmio y mercurio se tienen porcentajes de 93 y 78 % frente a los límites establecidos en la NCh 409 y NCh 1333 respectivamente. Se recomienda adoptar y emplear únicamente el uso de metodologías analíticas con límites de detección adecuados para los rangos establecidos en las normativas para la medición de las concentraciones de estos contaminantes.

Existen contaminantes con bajos porcentajes de muestras dentro de los límites establecidos en las normas de uso NCh 409 y NCh 1333 para el periodo 1990-2022. El arsénico, manganeso y hierro presentan bajos porcentajes frente a la NCh 409 donde, el arsénico tiene porcentajes bajo el 40 % para MA-1, MA-2 y MA-3 y con un 7 % en el área MA-2; el manganeso tiene porcentajes bajo el 50 % para todas las áreas salvo MA-2 y porcentajes del 20 % y 22 % para MA-3 y MA-5; y el hierro tiene porcentajes bajo el 23 % en todas las áreas con información.

Por otro lado, el cloruro y el sulfato tienen porcentajes bajos de muestras dentro de los límites establecidos en la NCh 1333, al igual que frente al D.S. N°53, con el primero con porcentajes bajo el 40 % para MA-1 y MA-2 y el segundo caso, con porcentajes menores al 30 % en todas las áreas salvo MA-6. Otros contaminantes con bajos porcentajes son el manganeso que tiene porcentajes bajo el 60 % en 3 áreas (MA-1, MA-3 y MA-5) y el sodio porcentual con un porcentaje bajo e igual a 24 % para MA-1. Para el caso de la conductividad eléctrica y sus diferentes clasificaciones en la NCh 1333, la mayor parte de las muestras estaría clasificada como agua que generalmente puede tener efectos perjudiciales en cultivos

sensibles, aunque en la práctica se cultiven varios cultivos sensibles en la cuenca del Maipo sin observarse limitaciones debido a las características del agua.

En lo que respecta a los parámetros y contaminantes analizados que se encuentran regulados en el D.S. Nº143, todas sus muestras se encuentran dentro de los límites establecidos en esta normativa.

Sobre los tratamientos para los usos como agua potable o riego, se recomienda para el diseño de nuevas PTAP y APR que tengan como fuente el río Maipo, considerar que el agua cruda de este afluente pueda contener niveles de arsénico, hierro y manganeso por sobre la norma de calidad del agua potable, por lo cual el diseño de los procesos de la planta debiese considerar la remoción de estos. Para el caso de las PTAP existentes en la cuenca y cuya fuente es el río Maipo, se tienen cumplimientos de la NCh 409 del 100 % para el año 2022 frente a los parámetros del tipo II que incluyen arsénico, hierro y manganeso (SISS, 2022). Esto evidencia la capacidad adecuada de las plantas actuales para remover estos contaminantes y cumplir con esta normativa obligatoria.

Por otro lado, para el uso de riego, en la práctica los parámetros y contaminantes con bajos porcentajes de muestra frente a los límites establecidos en la NCh 1333 no son tratados debido al carácter de norma técnica no obligatoria y a que no existe la necesidad real de implementar estos procesos de tratamiento, donde en la práctica en las zonas de riego de la cuenca se desarrollan una amplia variedad de cultivos sensibles, lo cual pondría en evidencia que los criterios solo basados en la presencia de metales son rígidos y no absolutos para definir la aptitud de un agua para riego. En este contexto, es necesario evaluar en forma global junto al tipo de suelo, clima, tasas de riego, etc... La experiencia práctica de más de un siglo de agricultura en la zona muestra este hecho.

Finalmente, para abordar de manera más amplia la contaminación del río Maipo y ante la actual falta de información e investigación, se recomienda realizar estudios sobre contaminantes emergentes en el río Maipo, que contengan concentraciones de diferentes microcontaminantes de interés y que visualicen la situación de la calidad del agua y potencial contaminación con estos en el principal cauce de la cuenca con mayor población del país, tal como ya se ha realizado en cuencas como la del Biobío. De esta manera se podrían tomar medidas en caso de ser necesario, como incluir contaminantes emergentes a las normativas de calidad o incluso incluirlos en los planes de monitoreo o red de observación de la NSCA Río Maipo.

Bibliografía

[1] Abdel-Fatah, M. A. (2018). Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*, *9*(4), 3077-3092. doi: https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.001

[2] Abrol, I., Yadav, J., y Massoud, F. (1988). Salt-affected soils and their management. *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS*.

[3] Adams, C., Wang, Y., Loftin, K., y Meyer, M. (2002). Removal of antibiotics from surface and distilled water in conventional water treatment processes. *Journal of Environmental Engineering*, *128*(3), 253-260. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:3(253)

[4] Agencia Para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (s.f.). *Boro (boron).* (Visitado en: 06-12-2022)

[5] Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades. (s.f.-a). *Toxfaqs - níquel (nickel).* (Visitado en: 19-12-2022)

[6] Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades. (s.f.-b). *Toxfaqs sobre el cadmio.* (Visitado en: 09-02-2023)

[7] Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades. (s.f.-c). *Toxfaqs – nitrato y nitrito (nitrate/nitrite).* (Visitado en: 19-12-2022)

[8] Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades. (s.f.-d). *Toxfaqs – plomo (lead).* (Visitado en: 21-12-2022)

[9] Agencia para Sustancias Toxicas y registro de Enfermedades. (s.f.-e). *Toxicological profile for zinc.* (Visitado en: 21-12-2022)

[10] Al-Zoubi, H., Hilal, N., Darwish, N., y Mohammad, A. (2007). Rejection and modelling of sulphate and potassium salts by nanofiltration membranes: neural network and spiegler–kedem model. *Desalination*, *206*(1), 42-60. (EuroMed 2006) doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.060

[11] American Water Works Association. (1990). Water quality and treatment: a handbook of community water supply.

[12] Angel Sánchez, M. M. d. (1994). *Contribución al estudio de la demanda bioquímica de oxigeno (dbo)* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad autónoma de nuevo León.

[13] Anjum, S., Gautam, D., Gupta, B., y Ikram, S. (2009, 09). Arsenic removal from water: An overview of recent technologies.

[14] Arnal, N., Marra, C. A., y de Alaniz, M. J. T. (2010). *Intoxicación por cobre. efectos sobre la composición lipídica y el sistema de defensa antioxidante* .

[15] Aschner, M., Erikson, K., Herrero, H. E., y Tjalkens, R. (2009). Manganese and its

role in parkinson's disease: from transport to neuropathology. *Neuromolecular Med*. doi: https://doi.org/10.1007/s12017-009-8083-0

[16] Azcarategui, L. A. L., Sancha, A. M., y Patri, M. P. M. (2004). Presencia de cobre en agua de consumo: Causas, efectos y soluciones. *Universidad de Chile. Departamento de Ingenieria Civil*.

[17] Badilla, C. (2018). *Evaluación del grado de contaminación con mercurio (hg) en laguna la señoraza: Agua, sedimentos y biota* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Concepción.

[18] Barceló, D. L., y de Alda, M. J. L. (2008). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes.*

[19] Barrera Martínez, D. (2017). *RemociÓn de manganeso en la planta de tratamiento de agua potable de tocancipÁ – cundinamarca* (Tesis Doctoral no publicada).

[20] Basha, C. A., Ghosh, P. K., y Gajalakshmi, G. (2008). Total dissolved solids removal by electrochemical ion exchange (eix) process. *Electrochimica Acta*, *54*(2), 474-483. doi: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.07.040

[21] Biblioteca Nacional del Congreso de Chile. (s/f). Hidrografía región metropolitana de santiago. *Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales*.

[22] Bluegold. (2020). Comparativa de membranas para el tratamiento de aguas.

[23] Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., y Segura-Araya, G. (2017, 12). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, *30*, 15 - 27.

[24] Book, A. (2004). Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic. monographs on chloramine, chloral and chloral hydrate, dichloroacetic acid, trichloroacetic acid and 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5h)-furanone. *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*, *84*, 269-477.

[25] Carabantes, A. G., y de Fernicola, N. A. (2003, 12). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, *39*, 365-372. doi: 10.1590/S1516-93322003000400003

[26] Casey, T. (2009). Iron and manganese in water: Occurrence, drinking water standards, treatment options. *Aquavarra Research Publications Water Engineering Papers Aquavarra Research Limited*.

[27] Castro, M. (2006). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*.

[28] Cazorla, A. (2021). Efecto directo e indirecto del exceso de hierro (fe) disponible en el suelo sobre el desempeño del cultivo de lepidium meyenii walp.

[29] Chaturvedi, S., y Dave, P. N. (2012). Removal of iron for safe drinking water. *Desalination*, *303*, 1-11. doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.003

[30] Chávez-Mejía, A. C., Ramos-Ramírez, I. A., Uscanga-Roldan, D., y Jiménez-Cisneros, B. E. (2008). Detección de microcontaminantes organicos en el agua residual de la ciudad de mexico.

[31] Chavez Rosado, A. C., y Nina Ponce, D. M. (2022). Técnicas de tratamiento para la

remoción de nitrato en aguas subterráneas: Revisión sistemática. *Repositorio Institucional - UCV*.

[32] Chen, Y., Lin, M., y Zhuang, D. (2022, 6). Wastewater treatment and emerging contaminants: Bibliometric analysis. *Chemosphere*, *297*, 133932. doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133932

[33] Choong, T. S., Chuah, T., Robiah, Y., Gregory Koay, F., y Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, *217*(1), 139-166. doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.015

[34] CIREN. (2022). Análisis oferta hídrica y su impacto en la agricultura, zona centro.

[35] Colmenares, E., María Cristina Mare. (2017). Remoción de iones cloruro presentes en efluentes utilizando hidrotalcitas como materiales adsorbentes. *Revista INGENIERÍA UC*.

[36] Cortina, J., Litter, M., Gibert, O., Valderrama, C., Sancha, A., Hoyos, S., y Ciminelli, V. (2016, 01). Latin american experiences in arsenic removal from drinking water and mining effluents. En (p. 391-416).

[37] Cuchimaque Lugo, C., Vargas Fiallo, L. Y., y Ríos Reyes, C. A. (2013). Remoción de fe y mn en aguas naturales por adsorción-oxidación sobre clinoptilolita. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*.

[38] Cuevas, S. M. (2015). Eliminación de micro-contaminantes mediante combinación de sistemas de membrana (nanofiltración) y procesos avanzados de oxidación. *Departamento de Ingeniería Área de Ingeniería Química, Universidad de Almería*.

[39] Córdova, L. (2013). Desinfección y remoción de arsénico del agua por fotocatálisis heterogénea. *CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO*.

[40] Darbi, A., Viraraghavan, T., Jin, Y.-c., Braul, L., y Corkal, D. (2003, 02). Sulfate removal from water. *Water Quality Research Journal of Canada*, *38*. doi: 10.2166/wqrj.2003.011

[41] Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., y Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*.

[42] de la Sota, A. (2016). Tendencias legislativas sobre contaminantes emergentes en europa. *Jornada ESAMUR*.

[43] Delisle, C. E., y W., S. J. (1977). The effects of sulphur on water and aquatic life in canada. *Sulphur and its inorganic derivatives in the Canadian environment*.

[44] Departamento de Salud Ambiental, Instituto de Salud Pública. (s/f). Boro antecedentes [Manual de software informático].

[45] Domínguez Mesa, N. (2018). *Contenido en sodio y potasio en aguas de consumo de algunos municipios de tenerife y su posible relación con la hipertensión en cada uno de ellos* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de la Laguna.

[46] Dozier, M., y McFarland, M. (2004, 01). Drinking water problems: Iron and manganese.

[47] EPA. (1997). Arsenic in drinking water, treatment technologies.

[48] Erel, Y., Morgan, J. J., y Patterson, C. (1991). Natural levels of lead and cadmium in a remote mountain stream. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *55*(3), 707-719. doi: https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90335-3

[49] FAO/OMS. (2002). Los nitratos y nitritos en el agua deconsumo.

[50] Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water. (2015). *Chromium in drinking water document for public consultation prepared by the federal-provincial-territorial committee on drinking water consultation period ends.*

[51] Ferreccio, C., y Sancha, A. M. (2006). Arsenic exposure and its impact on health in chile. *Journal of Health, Population and Nutrition*, *24*(2), 164–175.

[52] Fisher, J. F., Organization, W. H., y on Chemical Safety, I. P. (2003). *Elemental mercury and inorganic mercury compounds : human health aspects.* World Health Organization.

[53] Fu, F., y Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, *92*(3), 407-418. doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011

[54] Gan, S., Lau, E., y Ng, H. (2009). Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (pahs). *Journal of Hazardous Materials*, *172*(2), 532-549. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.118

[55] García Vargas, A., Reyes Navarrete, M. G., Alvarado De La Peña, A. I., González Valdez, L. S., Antuna, D. M., Vázquez Alarcón, E. d. C., ... Herrera Benavides, A. (2012). Cloruros totales en el agua de abastecimiento.

[56] García Hidalgo, Y. (2015). Calidad del agua con fines de riego. *"Ojeando la agenda" ISSN*.

[57] Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., y Veloso-Aguila, D. (2020). The central chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, *40*(1), 421-439. doi: https://doi.org/10.1002/joc.6219

[58] Garrido, C. (2010). *Extracción de octilfenoles desde matrices acuosas, utilizando un sistema de disco rotatorio con fase sorbente dual pdms-nanotubos de carbono.* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Chile.

[59] Gasque Silva, L. (2013). Arsénico, el elemento inclasificable. *Educación Química*, *24*, 495-500. doi: https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72519-9

[60] Gautam, R., Sharma, S., Mahiya, S., y Chattopadhyaya, M. (2014). *Heavy metals in water : Presence, removal and safety.*

[61] Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., y Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International journal of environmental research and public health*, *17*(11), 3782.

[62] Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., y Gutiérrez, O. D. (2012, 07). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, *7*, 52 - 73.

[63] González, M., Plaza, H. R., y Alejandro, O. (2016). *Presencia de microcontaminantes orgánicos en el río biobío :evaluación de procesos de oxidación avanzada, uv/h2o2 y o3/cap, como alternativas para su abatimiento.* Universidad de Concepción, Facultad

Ciencias Ambientales,Departamento Sistemas Acuáticos Continentales.

[64] Greenwood, N. N., y Earnshaw, A. (1998). *Chemistry of the elements* (Second ed.). Butterworth-Heinemann.

[65] Gros, M., Petrovic, M., y Barcelo, D. (2007, 09). Wastewater treatment plants as a pathway for aquatic contamination by pharmaceuticals in the ebro river basin (northeast spain). *Environmental Toxicology and Chemistry*, *26*. doi: 10.1897/06-495R.1

[66] Guillen-Rivas, J. R., Jaramillo-Cedeño, A. R., Baquerizo-Crespo, R. J., y Córdova-Mosquera, R. A. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión. , *6*(9), 1384-1407. doi: 10.23857/pc.v6i9.3118

[67] Hassan, H. R. (2023). A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, *35*(1), 2165964. doi: 10.1080/26395940.2023.2165964

[68] Health Canada. (2016, 3). ph of drinking water. *Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water*.

[69] Henriquez, D. (2012). *Presencia de contaminantes emergentes en aguas y su impacto en el ecosistema. estudio de caso: Productos farmacÉuticos en la cuenca del rio biobÍo, region del biobÍo, chile* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Chile.

[70] Hering, J., Katsoyiannis, I., Ahumada, G., Berg, M., y Hug, S. (2017, 03). Arsenic removal from drinking water: Experiences with technologies and constraints in practice. *Journal of Environmental Engineering*, *143*, 03117002. doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001225

[71] Hernández, D., Presentado, R., Cristop, Cristopher, R., y Vargas Hernandez, C. (2021, 01). Estudio de eliminación de octilfenol polietoxilado por tratamiento de oxidación avanzada.

[72] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts. *International Agency for Research on Cancer*, *100 C*.

[73] ICASS S.P.A. (2021). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de maipo.*

[74] INE. (2022a). Encuesta de superficie de hortalizas, superficie sembrada o plantada 2022.

[75] INE. (2022b). Estimación de superficie, producción y rendimiento año agrícola 2021-2022.

[76] Instituto Nacional de Estadística. (2019). Censo 2017.

[77] Instituto Nacional de Normalización. (1987). *Nch1333.of78.*

[78] Instituto Nacional de Normalización. (2005). *Norma chilena oficial nch409/1.of2005.*

[79] Jacobo-Marín, D., y de León, G. S. (2021). Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en méxico, principio precautorio y perspectiva comparada. *Revista de Derecho Ambiental*, *15*. doi: 10.5354/0719-4633.2021.57414

[80] Kapp, R. (2005). Arsenic. En P. Wexler (Ed.), *Encyclopedia of toxicology (second edition)* (Second Edition ed., p. 168-171). New York: Elsevier. doi: https://doi.org/10.1016/B0-12-369400-0/00086-7

[81] Katsoyiannis, I., y Zouboulis, A. (2006, 01). Comparative evaluation of conventional

and alternative methods for the removal of arsenic from contaminated groundwaters. *Reviews on environmental health*, *21*, 25-41. doi: 10.1515/REVEH.2006.21.1.25

[82] Khadse, G., Patni, P., y Labhasetwar, P. (2015). Removal of iron and manganese from drinking water supply. *Sustainable Water Resources Management*, 157,165.

[83] Kibria, G. (2017, 08). Dissolved oxygen: The facts.

[84] Kwakye-Awuah, B., Sefa-Ntiri, B., Von-Kiti, E., Nkrumah, I., y Williams, C. (2019). Adsorptive removal of iron and manganese from groundwater samples in ghana by zeolite y synthesized from bauxite and kaolin. *Water*, *11*(9). doi: 10.3390/w11091912

[85] Lau, T., Chu, W., y Graham, N. (2007). Reaction pathways and kinetics of butylated hydroxyanisole with uv, ozonation, and uv/o3 processes. *Water Research*, *41*(4), 765-774. doi: https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.11.021

[86] Le, V. C., Vu, N. D., y Cao, T. H. (2007). Arsenic removal from groundwater by a combination of chlorination and consecutive sand filtration.

[87] Lecca, E. R., y Lizama, E. C. R. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial data*, *17*(1), 71–80.

[88] Legrini, O., Oliveros, E., y Braun, A. M. (1993). Photochemical processes for water treatment. *Chemicals Review*(93), 671-698.

[89] Li, Y., Yang, Z., Yang, K., Wei, J., Li, Z., Ma, C., ... Zhang, C. (2022). Removal of chloride from water and wastewater: Removal mechanisms and recent trends. *Science of The Total Environment*, *821*, 153174. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153174

[90] Litter, M. (2018). Arsénico en agua.

[91] López, A. (2012). Diseño de un biorreactor de membranas sumergidas a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales. *Universidad de Alicante*.

[92] Maier, G., Nimmo-Smith, R. J., Glegg, G. A., Tappin, A. D., y Worsfold, P. J. (2009). Estuarine eutrophication in the uk: current incidence and future trends. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *19*(1), 43-56. doi: https://doi.org/10.1002/aqc.982

[93] Maisterrena, V. D. (1999). Determinación de ortofosfatos en agua. *Anuario de la Facultad de Ciencias Veterinarias*, *1*(1).

[94] Mallevialle, J., Odendaal, P., Foundation, A. R., Wiesner, M., des eaux Dumez (Firm), L., y Commission, S. A. W. R. (1996). *Water treatment membrane processes*. McGraw-Hill.

[95] Maraver, F., Vitoria, I., Ferreira-Pêgo, C., Armijo, F., y Salas-Salvadó, J. (2015, 04). Magnesium in tap and bottled mineral water in spain and its contribution to nutritional recommendations. *Nutricion hospitalaria: organo oficial de la Sociedad Espanola de Nutricion Parenteral y Enteral*, *31*, 2297-2312. doi: 10.3305/nh.2015.31.5.8589

[96] Mariuxi, M., Beatriz, P., Nelson, R.-P., Kenya, B., Lissette, R., y Erwin, L. (2019). ConcentraciÓn de cadmio en agua, sedimentos, eichhornia crassipes y pomacea canaliculata en el rÍo guayas (ecuador) y sus afluentes. *Revista internacional de contaminación ambiental*.

[97] Marx, A., y Neutra, R. R. (1997, 03). Magnesium in Drinking Water and Ischemic Heart

Disease. *Epidemiologic Reviews*, *19*(2), 258-272. doi: 10.1093/oxfordjournals.epirev.a017957

[98] McFarland, M. L., y Dozier, M. C. (2004). Problemas del agua potable: El plomo. *El Sistema Universitario Texas A&M*.

[99] McGuire, M. J., Jones, R. M., Means, E. G., Izaguirre, G., y Preston, A. E. (1984). Controlling attached blue-green algae with copper sulphate. *Journal of the American Water Works Association*.

[100] Millán T., C. P. (2008). *RemociÓn de sulfato en riles mediante el uso de fitorremediaciÓn* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Chile.

[101] Ministerio de Salud. (2014). Normas sanitarias para el uso de plaguicidas y vigilancia de trabajadores expuestos [Manual de software informático].

[102] Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Decreto 53.*

[103] Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2001). *Decreto 90.*

[104] Mishra, S., Singh, R. P., Rout, P. K., y Das, A. P. (2022). Chapter 3 - membrane bioreactor (mbr) as an advanced wastewater treatment technology for removal of synthetic microplastics. En M. Shah, S. Rodriguez-Couto, y J. Biswas (Eds.), *Development in wastewater treatment research and processes* (p. 45-60). Elsevier. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85583-9.00022-3

[105] Murphy, E. A., Post, G. B., Buckley, B. T., Lippincott, R. L., y Robson, M. G. (2012). Future challenges to protecting public health from drinking-water contaminants. *Annual Review of Public Health*, *33*(1), 209-224. (PMID: 22224887) doi: 10.1146/annurev-publhealth-031811-124506

[106] National Drinking Water Alliance. (2019). *Lead in drinking water: What you should know.*

[107] Natural Resources Wales. (s.f.). *Dissolved oxygen in water.* (Visitado en: 21-12-2022)

[108] Navamani Kartic, D., Aditya Narayana, B., y Arivazhagan, M. (2018). Removal of high concentration of sulfate from pigment industry effluent by chemical precipitation using barium chloride: Rsm and ann modeling approach. *Journal of Environmental Management*, *206*, 69-76. doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.017

[109] NDWC. (1998). Iron and manganese removal.

[110] Neamţu, M., Popa, D.-M., y Frimmel, F. H. (2009). Simulated solar uv-irradiation of endocrine disrupting chemical octylphenol. *Journal of Hazardous Materials*, *164*(2), 1561-1567. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.024

[111] Neira Gutiérrez, M. A. (2006). *Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. estudio de caso: Chile.* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Chile.

[112] Obotey Ezugbe, E., y Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*, *10*(5), 89.

[113] OMS. (1996). Guidelines for drinking-water quality.

[114] Onyango, D., Entila, F., Egdane, J., Pacleb, M., Katimbang, M., Dida, M., ... Khady Nani, D. (2020, 01). Mechanistic understanding of iron toxicity tolerance

in contrasting rice varieties from africa: 2. root oxidation ability and oxidative stress control. *Functional Plant Biology*, *47*. doi: 10.1071/FP19054

[115] Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., y Gallo, J. A. (2020, 06). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *14*, 9 - 18.

[116] Pal, A., Gin, K. Y.-H., Lin, A. Y.-C., y Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: Review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of The Total Environment*, *408*(24), 6062-6069. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.026

[117] Patiño, Y., Diaz, E., y Ordóñez, S. (2014). Microcontaminantes emergentes en aguas: Tipos y sistemas de tratamiento. *Avances en Ciencias e Ingeniería*.

[118] Petrin, Z., Englund, G., y Malmqvist, B. (2008). Contrasting effects of anthropogenic and natural acidity in streams: a meta-analysis. *Proceedings. Biological sciences*, 1143–1148.

[119] Petrović, M., Gonzalez, S., y Barceló, D. (2003). Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *22*(10), 685-696. doi: https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)01105-1

[120] Peñalver Romero, M. (2020). Eliminación de los contaminantes emergentes ibuprofeno, diclofenaco y paracetamol mediante procesos de membrana.

[121] Piedra Marín, G. (2019). Zinc, un elemento quÍmico muy versÁtil. *Revista de Química*, *33*(1-2).

[122] Pizarro Rabanal, J. C. (2021). *Estudio de remociÓn de boro del agua destinada para la agricultura en el distrito de ite – tacna utilizando una resina selectiva al boro y propuesta de diseÑo de una columna de intercambio iÓnico* (Tesis de Master no publicada). Universidad Nacional Joprge Basadre Grohmann.

[123] Prats, D. (2015). Técnicas de membranas para el tratamiento de aguas. *Master en Gestión Sostenible y Tecnología de Agua*.

[124] Ramalho, R. S. (2003). Tratamiento de aguas residuales. En E. R. S.A. (Ed.), .

[125] Ramírez, M. A. Y., García, A. G., y Díaz, J. C. (2004). La contaminación por mercurio en méxico. *Gaceta ecológica*(72), 21–34.

[126] Ramírez Ortega, A. J., Ramírez Masferrer, J. , y Rial Lemos, E. (1999). El magnesio en la naturaleza. , *3*(2), 157–171.

[127] Rao, A., LeNoble, J., y Lilley, P. (2021). Water quality assessment and proposed objectives for burrard inlet: Nickel technical report.

[128] Regina M, Y., Saraswathy, S., Balu, K., Karthik, V., y Muthukumaran, K. (2015, 04). Removal of nickel (ii) ions from waste water using low cost adsorbents:a review. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, *8*.

[129] Richards, L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *United States Department of Agriculture*.

[130] Rodrigues, C., Follmann, H. V., Núñez-Gómez, D., Nagel-Hassemer, M. E., Lapolli, F. R., y Lobo-Recio, M. (2020). Sulfate removal from mine-impacted water by electrocoagulation: statistical study, factorial design, and kinetics. *Environmental Science*

and Pollution Research, *27*.

[131] Rodríguez-Gámez, O., Pérez-Macías, R., Aguilera-Rodríguez, I., Pérez-Silva, R. M., y Abalos-Rodríguez, C. A. (2020, 12). Remoción de cobre de aguas contaminadas empleando ramnolípidos. *Revista Cubana de Química*, *32*, 511 - 526.

[132] Ronzano, E., y Dapena Baqueiro, J. L. (1995). Tratamiento biológico de las aguas residuales.

[133] Rosenfeld, P. E., y Feng, L. G. (2011). Emerging contaminants. En P. E. Rosenfeld y L. G. Feng (Eds.), *Risks of hazardous wastes* (p. 215-222). Boston: William Andrew Publishing. doi: https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7842-7.00016-7

[134] Rozas, O. (2016). *Presencia de microcontaminantes orgánicos en el río biobío: Evaluación de procesos de oxidación avanzada, uv/h 2 o 2 y o 3 /cap, como alternativas para su abatimiento* .

[135] Rubio, C., González Weller, D., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Rodríguez, I., y Hardisson, A. (2007, 02). El zinc: oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria*, *22*, 101 - 107.

[136] Rusydi, A. F. (2018, 2). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *118*, 012019. doi: 10.1088/1755-1315/118/1/012019

[137] Saldivia, J. E. (2020). *Tratamiento de aguas servidas: el mayor logro medioambiental de chile*. El Mostrador.

[138] Samal, K., Mahapatra, S., y Ali, M. H. (2022, 6). Pharmaceutical wastewater as emerging contaminants (ec): Treatment technologies, impact on environment and human health. *Energy Nexus*, *6*, 100076. doi: 10.1016/J.NEXUS.2022.100076

[139] Sancha, A. (2006, 10). Review of coagulation technology for removal of arsenic: Case of chile. *Journal of health, population, and nutrition*, *24*, 267-72.

[140] Sancha, A. M., Castillo, G., Espinoza, C., y Mena, M. P. (2005). Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego.

[141] Singh, M., y Kishor, B. (2020, 02). A review on removal of turbidity and tds from water by using natural coagulants. , *2*, 2582-5208.

[142] Sipma, J., Osuna, B., Collado, N., Monclús, H., Ferrero, G., Comas, J., y Rodriguez-Roda, I. (2010). Comparison of removal of pharmaceuticals in mbr and activated sludge systems. *Desalination*, *250*(2), 653-659. doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.073

[143] Skipton, S., Dvorak, B., y Woldt, W. (2010). Drinking water: Sulfur (sulfate and hydrogen sulfide). *Institute of Agriculture and Natural Resources at the University of Nebraska–Lincoln*.

[144] Solís, C., Vélez, C., y Ramírez-Navas, J. (2017, 12). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *11*, 26 - 36.

[145] Solís Castro, Y., Zúñiga Zúñiga, L. A., y Mora Alvarado, D. (2018, 03). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, *31*, 35 - 46.

[146] Soto Rueda, E., Loango, N., y Landazuri, P. (2017, 01). Remoción de cromo hexavalente

de aguas residuales con microorganismos adaptados a medios ricos en cromo removal of hexavalent chromium from wastewater using microorganisms adapted to chromium-rich media 50 revista de la asociación colombiana de ciencias biológicas.

[147] Superintendecia de Servicios Sanitarios (SISS). (2022). Calidad del agua potable.

[148] Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2021). Informe de coberturas sanitarias 2021.

[149] Syafrudin, M., Ayu, R., Yuniarto, A., Hadibarata, T., Rhee, J., Al-Onazi, W., ... Al-Mohaimeed, A. (2021, 01). Pesticides in drinking water—a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*, 468. doi: 10.3390/ijerph18020468

[150] Sánchez, J. (2001). El fÓsforo, parÁmetro critico de calidad de agua tÉcnicas analÍticas y de muestreo. *Asociación Brasilera de Ingeneria Sanitaria y Ambiental*.

[151] The California Water Boards. (s.f.). *¿qué es la conductividad eléctrica/salinidad?* (Visitado en: 07-12-2022)

[152] The California Water Boards. (2004). Folleto informativo ph.

[153] Tresintsi, S., Simeonidis, K., Zouboulis, A., y Mitrakas, M. (2013). Comparative study of as(v) removal by ferric coagulation and oxy-hydroxides adsorption: laboratory and full-scale case studies. *Desalination and Water Treatment*, *51*(13-15), 2872-2880. doi: 10.1080/19443994.2012.748011

[154] Tumolo, M., Ancona, V., Paola, D. D., Losacco, D., Campanale, C., Massarelli, C., y Uricchio, V. F. (2020, 8). *Chromium pollution in european water, sources, health risk, and remediation strategies: An overview* (Vol. 17). MDPI AG. doi: 10.3390/ijerph17155438

[155] United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *Información básica sobre el plomo en el agua potable.* (Visitado en: 21-12-2022)

[156] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2017). Causal analysis/-diagnosis decision information system (caddis): ph. (Visitado en: 21-12-2022)

[157] Urrutia U., N. (2021). *EliminaciÓn de fÓsforo de aguas servidas mediante tecnologÍas convencional y no convencional: Una aproximaciÓn desde balance de materia* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Concepción.

[158] U.S. Environmental Protection Agency. (2005, 7). Toxicological review of zinc and compounds.

[159] Valencia Espinoza, C. E. (2011). *QuÍmica del hierro y manganeso en el agua, mÉtodos de remociÓn* (Tesis Doctoral no publicada). UNIVERSIDAD DE CUENCA.

[160] Vernier Software & Technology. (2006). Ciencias con lo mejor de vernier.

[161] Vidal, G., y Araya, F. (2014). *Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: Situación actual y desafios.* Universidad de Concepción.

[162] Vitoria, I., Maraver, F., Sánchez-Valverde, F., y Armijo, F. (2015). Contenido en nitratos de aguas de consumo público españolas. *Gaceta Sanitaria*, *29*(3), 217–220.

[163] Vásquez, E. (2015). Estudio de biorreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales urbanas. *Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua, Universidad de Alicante*.

[164] Vásquez, E. (2018). Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas residuales urbanas mediante mbr combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas. *Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales.*.

[165] Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M., Rinklebe, J., y O'Connor, D. (2020). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. *Environment International*, *134*, 105281. doi: https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281

[166] Water Quality Program. (2021). Contaminants of emerging concern and wastewater treatment.

[167] Waypa, J., Elimelech, M., y Hering, J. (1997, 10). Arsenic removal by ro and nf membranes. *Journal American Water Works Association*, *89*, 102-114. doi: 10.1002/j.1551-8833.1997.tb08309.x

[168] Wilkinson, J. L., Boxall, A. B. A., Kolpin, D. W., Leung, K. M. Y., Lai, R. W. S., Galbán-Malagón, C., ... Teta, C. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(8).

[169] World Health Organization. (2004). Sulfate in drinking-water. *WHO Guidelines for Drinking-water Quality*.

[170] World Health Organization. (2007). ph in drinking-water. *WHO Guidelines for Drinking-water Quality*.

[171] World Health Organization. (2021). Nickel in drinking-water.

[172] Worsfold, P., McKelvie, I., y Monbet, P. (2016). Determination of phosphorus in natural waters: A historical review. *Analytica Chimica Acta*, *918*, 8-20. doi: https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.02.047

[173] Zamora, J. R. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, ph, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las asociaciones administradoras del acueducto,(asadas), de cada distrito de grecia, cantón de alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, *9*(12), 125–134.