



Metodología de Construcción de Índice de Calidad para aguas superficiales

Equipo de trabajo:

Cristobal Girardi. Especialista en sitios contaminados.

Fernando González. MSc. Hidrología.

Sebastián Jara. Magister en metalurgia.

Raquel Charte. Hidrogeóloga.

Mariela Elorrieta. Ingeniera Civil Química.

Elena Sanchis. Geóloga.

Andrea Arancibia. Experta GIS.

Iván Castillo. Ing. en Recurso Naturales Renovables

Chile, 25 de abril del 2018

Contenido

Contenido	2
1 Introducción	6
2 Objetivos.....	7
2.1 General	7
2.2 Específicos.....	7
3 Alcances	8
4 Índices de Calidad de Agua, Nacionales e Internacionales.....	9
4.1 Índices Nacionales	9
4.1.1 ICA DGA	9
4.1.2 ICA MFP	10
4.1.3 Índice de calidad de agua para ecosistemas hídricos (García, 2012).....	11
4.2 Índices Internacionales.....	12
4.2.1 NSF-WQI	12
4.2.2 Índice de León y su Aplicación a la Cuenca Lerma-Chapala, México	13
4.2.3 Índice de calidad de aguas para rellenos sanitarios (LWPI).....	15
5 Propuesta y Metodología de Construcción del ICA Superficial.....	17
5.1 Definición de Clases de Calidad de Agua Superficial	17
5.1.1 Guías y Normativa Nacional de Calidad de Agua	17
5.1.2 Normativas Internacionales de Calidad de Agua	19
5.1.3 Definición de Las Clases de Calidad del ICA Agua Superficial	20
5.2 Índice de Calidad de Agua (ICA) Superficial.....	22
5.2.1 Definición de parámetros	23
5.2.2 Normalización de parámetros	25
5.2.3 Ponderación de Parámetros y Aplicación del ICA Superficial	29
5.2.4 Análisis y Tratamiento de Datos que Alimentan ICA.....	30
5.2.5 Interpretación del ICA de Agua Superficial.....	30
6 Aplicación del ICAS	32
6.1 Aplicación ICA a Nivel Nacional	34
6.2 Aplicación ICA a Nivel Regional	39

6.2.1	ICAS Región de Arica y Parinacota	39
6.2.2	ICAS Región de Tarapacá.....	41
6.2.3	ICAS Región de Antofagasta	43
6.2.4	ICAS Región de Atacama	45
6.2.5	ICAS Región de Coquimbo.....	48
6.2.6	ICAS Región de Valparaíso	50
6.2.7	ICAS Región Metropolitana	52
6.2.8	ICAS Región del General Libertador Bernardo O'Higgins.....	53
6.2.9	ICAS Región del Maule.....	55
6.2.10	ICAS Región del Biobío.....	57
6.2.11	ICAS Región de la Araucanía.....	59
6.2.12	ICAS Región de los Ríos	61
6.2.13	ICAS Región de los Lagos.....	63
6.2.14	ICAS Región de Aysén	66
6.2.15	ICAS Región de Magallanes	69
7	Brechas y limitaciones	72
8	Conclusiones	74
9	Bibliografía.....	76
10	Anexos	77
10.1	Normativas	77
10.1.1	Normativa Canadiense Protección Vida Acuática	77
10.1.2	Normativa Francesa de Calidad de Agua.....	79
10.1.3	Tabla maestra de parámetros complementarios a nivel nacional.	80

Índice de Tablas

TABLA 1. PESOS OTORGADOS A LOS PARÁMETROS SEGÚN DGA.....	9
TABLA 2. RANGOS DE CALIDAD AGUA SEGÚN DGA 2004.....	10
TABLA 3. PESOS OTORGADOS A LOS PARÁMETROS SEGÚN MFP.....	10
TABLA 4. RANGOS DE CALIDAD DE AGUA, SEGÚN MFP.....	11
TABLA 5. PONDERACIÓN PROPUESTA PARA PARÁMETROS DE ICA DE AGUA POTABLE SEGÚN TESIS (GARCÍA 2012).....	11
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE AGUAS SEGÚN TESIS (GARCÍA 2012).....	12
TABLA 7. PESOS OTORGADOS A LOS PARÁMETROS SEGÚN NSF.....	13
TABLA 8. RANGO DE CLASIFICACIÓN DE ICA SEGÚN NSF.....	13
TABLA 9. PESOS OTORGADOS A LOS PARÁMETROS SEGÚN MÉTODO MEXICANO.....	14
TABLA 10. RANGOS DE CLASIFICACIÓN ICA MÉXICO PARA USO COMO AGUA POTABLE.....	14
TABLA 11. RANGO DE CLASIFICACIÓN ICA MÉXICO PARA USO EN AGRICULTURA.....	14
TABLA 12. RANGO DE CLASIFICACIÓN ICA MÉXICO PARA USO EN PESCA Y VIDA ACUÁTICA.....	15
TABLA 13. PARÁMETROS Y PESOS CONSIDERADOS EN ÍNDICE LWPI-.....	16
TABLA 14. VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS ESTABLECIDOS PARA LA DICTACIÓN DE LAS NORMAS SECUNDARIAS DE CALIDAD AMBIENTAL PARA LAS AGUAS APTAS PARA LA PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS COMUNIDADES ACUÁTICAS Y LOS USOS PRIORITARIOS (CONAMA, 2004).....	17
TABLA 15. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD SEGÚN NORMA SECUNDARIA DE CALIDAD.....	18
TABLA 15. CLASIFICACIÓN DE ÍNDICE SEGÚN VALOR OBTENIDO Y CLASIFICACIÓN ASIGNADA A CADA CLASE.....	22
TABLA 17. PESOS OTORGADOS A LOS PARÁMETROS GENERALES Y COMPLEMENTARIOS EN EL ÍNDICE PROPUESTO.....	23
TABLA 18. PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS CONSIDERADOS POR EL ICA SUPERFICIAL. EN ROJO DESTACAN AQUELLOS PARÁMETROS CONSIDERADOS COMO CRÍTICOS.....	24
TABLA 19. VALORES ASIGNADOS PARA LA NORMALIZACIÓN.....	25
TABLA 20. NORMALIZACIÓN PARA OXÍGENO DISUELTO.....	25
TABLA 21. NORMALIZACIÓN PARA CONDUCTIVIDAD.....	26
TABLA 22. NORMALIZACIÓN DEL PH.....	27
TABLA 23. NORMALIZACIÓN PARA DQO.....	27
TABLA 24. CRITERIO DE NORMALIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS.....	28
TABLA 25. NORMALIZACIÓN PARA PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS.....	28
TABLA 26. RANGOS DE CALIDAD DE ICA DE AGUA SUPERFICIAL SEGÚN RANGO.....	31
TABLA 27. PARÁMETROS SEGÚN NORMATIVA CANADIENSE.....	77
TABLA 28. PARÁMETROS SEGÚN NORMATIVA FRANCESA.....	79

Índice de Figuras

FIGURA 1. CURVA PARA NORMALIZACIÓN DE PH, DESARROLLADA POR NSF.....	26
FIGURA 2. ESQUEMA DE LÓGICA DIFUSA EN CÁLCULO DEL ICA.....	30
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DEL ICAS POR REGIÓN Y TRIMESTRE DEL PERIODO 2006 - 2011.....	34
FIGURA 4. CLASIFICACIÓN DEL ICAS POR REGIÓN Y TRIMESTRE DEL PERIODO 2011 - 2016.....	35
FIGURA 5. PARÁMETROS DETERMINANTES EN EL CÁLCULO DEL ICAS POR REGIÓN DEL PERIODO 2006-2011.....	36
FIGURA 6. PARÁMETROS DETERMINANTES DEL ICAS POR REGIÓN DEL PERIODO 2011-2016.....	37
FIGURA 7. ICAS REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA.....	41
FIGURA 8. ICAS REGIÓN DE TARAPACÁ.....	43
FIGURA 9. ICAS REGIÓN DE ANTOFAGASTA.....	45
FIGURA 10. ICAS REGIÓN DE ATACAMA.....	47
FIGURA 11. ICAS REGIÓN DE COQUIMBO.....	49
FIGURA 12. ICAS REGIÓN DE VALPARAÍSO.....	51

FIGURA 13.	ICAS REGIÓN METROPOLITANA	53
FIGURA 14.	ICAS REGIÓN DEL GENERAL LIBERTADOR BERNARDO O’HIGGINS.	55
FIGURA 15.	ICAS REGIÓN DEL MAULE	57
FIGURA 16.	ICAS REGIÓN DEL BIOBÍO	59
FIGURA 17.	ICAS REGIÓN DE LA ARAUCANÍA.	61
FIGURA 18.	ICAS REGIÓN DE LOS RÍOS.	63
FIGURA 19.	ICAS REGIÓN DE LOS LAGOS DE VERANO Y OTOÑO (A).	65
FIGURA 20.	ICAS REGIÓN DE LOS LAGOS DE INVIERNO Y PRIMAVERA (B).	66
FIGURA 21.	ICAS REGIÓN DE AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑES DEL CAMPO DE VERANO Y OTOÑO (A).	68
FIGURA 22.	ICAS REGIÓN DE AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO DE INVIERNO Y PRIMAVERA (B).	69
FIGURA 23.	ICAS REGIÓN DE MAGALLANES Y LA ANTÁRTICA CHILENA DE VERANO Y OTOÑO (A).	71
FIGURA 24.	ICAS REGIÓN DE MAGALLANES Y LA ANTÁRTICA CHILENA DE INVIERNO Y PRIMAVERA (B).	72

1 Introducción

El presente estudio de desarrollo e implementación de un índice de calidad para aguas superficiales a nivel nacional se enmarca en el proyecto Escenario Hídricos 2030, el cual tiene como objetivo construir escenarios futuros para contribuir a la seguridad y sustentabilidad del recurso, ayudando a la formulación de políticas, identificando las oportunidades y riesgos de los diversos sectores.

Un índice de calidad es una herramienta que entrega información con respecto de la calidad del agua de manera simplificada y de fácil entendimiento. Su objetivo es englobar aquellos parámetros más importantes que pueden incidir en la afectación de la calidad del agua en un solo factor, por lo que puede ser muy útil en la toma de decisiones respecto a la gestión del recurso.

En los últimos años se han generado y aplicado diversos índices a nivel internacional, varios países han creado índices específicos acordes con sus características hidrológicas y territoriales. Si bien estos índices son territorio o sitio específicos, muchos de ellos han sido modificados para ser implementados en otros países o territorios que presentan condiciones hidrológicas distintas a aquellas para las cuales se crearon los índices.

En Chile, se han desarrollado algunos índices para medir la calidad de agua (García, 2012; DGA, 2004), sin embargo, no todos han tenido una buena aceptación, ya que se han visto restringidos porque las metodologías usadas no ponderan de manera adecuada el potencial de afectación que puede generar su presencia en las aguas superficiales.

Por otra parte, debido a la gran diversidad de las condiciones geológicas, geoquímicas e hidrológicas que presenta Chile, se hace complejo desarrollar un único índice que pueda ser aplicado tanto en el norte, centro y sur del país, y que considere estas variables.

En este contexto, se propone el índice de calidad de agua superficial (ICAS) que responde a las necesidades específicas de la iniciativa EH2030, el cual busca identificar si la calidad en cuerpos de agua superficiales es apta para otros usos y las brechas de información existentes. Con ello, será posible entregar una evaluación preliminar de la situación del recurso a nivel nacional.

Es importante destacar que este índice se construye con la información de calidad de agua disponible en la Dirección General de Aguas (DGA), siendo información que complementa los instrumentos hoy existentes (Normas Secundarias de Calidad Ambiental) y no pretende ser la referencia nacional para otros fines.

En el presente informe se detalla la metodología utilizada para la construcción de este índice, actividad que consideró en primera instancia una revisión extensiva de los índices nacionales e internacionales descritos en la literatura, los cuales fueron usados como base de referencia para su desarrollo, para posteriormente definir clases de agua según calidad, los parámetros que determinan la calidad y su ponderación, y finalmente los resultados de su aplicación a nivel nacional.

2 Objetivos

2.1 General

El objetivo principal del siguiente estudio es proporcionar una herramienta complementaria que permita identificar, a nivel de investigación exploratoria, zonas con posible riesgo hídrico asociado a la calidad de las aguas superficiales a lo largo de Chile.

2.2 Específicos

- Evaluar la calidad del agua superficial en las distintas cuencas del país para las cuales se disponga de datos de monitoreo.
- Obtener un mapa nacional considerando las particularidades regionales, donde se identifiquen zonas en que la calidad del agua pueda afectar o limitar otros usos.

3 Alcances

El presente informe detalla la metodología de la construcción de un índice de calidad de aguas superficiales y la aplicación del mismo a nivel nacional. Las fortalezas y limitaciones del ICAS se detallan a continuación.

El índice propuesto es una herramienta complementaria que permita identificar, a nivel de investigación exploratoria, zonas con posible riesgo hídrico asociado a la calidad de las aguas superficiales a lo largo de Chile. Este índice entrega una evaluación preliminar de la condición de la calidad del agua superficial y no diferencia si el origen de la afectación corresponde a factores antrópicos o naturales. Por lo tanto, en aquellas cuencas donde el índice levanta una alerta, se debe realizar una investigación detallada o sitio específica que permita evaluar el riesgo y el impacto asociado a la presencia de la o las sustancias que pueden estar afectando la calidad del agua.

El ICAS se construye sobre la base de indicadores de afectación de la calidad de agua tanto generales como específicos (parámetros complementarios). Entre los parámetros generales se incluyen pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y demanda química de oxígeno. Los parámetros específicos comprenden metales y metaloides, así como nitrato y nitrito. Por lo tanto, el índice tiene el potencial de proporcionar de manera indirecta a través de los parámetros generales, y de manera directa, a través de los parámetros complementarios, una idea de los factores naturales y/o antrópicos (a sectores productivos o usuarios) que puedan estar afectando la calidad del recurso.

Con el fin de facilitar la aplicación de la metodología propuesta, no se consideran las concentraciones naturales de cada uno de los parámetros, por lo que específicamente para la clase más estricta (Excepcional), el que se sobrepasen los valores límite que determinan los umbrales para la protección de vida acuática, no implica que no exista flora y fauna local adaptada a estas condiciones.

Cabe destacar, que los resultados del ICA están condicionados al acotado tiempo que se disponía para el estudio y por ende, a la disponibilidad de información digitalizada y pública. Si bien el ICAS considera metales, metaloides, nitratos y nitritos, la información referente a nutrientes y otros potenciales contaminantes es limitada, acotándose sólo a algunos sectores del país. El ICAS no considera compuestos orgánicos, agroquímicos, pesticidas y antibióticos por ejemplo. En este sentido, debido a las limitaciones de la base de datos utilizada, los posibles efectos del sector agrícola, agroindustrias, acuícolas, forestales y las descargas de aguas residuales sin sistemas de tratamiento, podrían no quedar representados de manera adecuada en los mapas generados.

Las brechas identificadas en la información disponible de calidad de agua en Chile es la referida a la disponibilidad de datos de nutrientes a lo largo de Chile y, principalmente, a datos de agroquímicos, pesticidas y antibióticos, entre otros, que actualmente no son considerados en el monitoreo de la calidad del agua en el país.



4 Índices de Calidad de Agua, Nacionales e Internacionales

El desarrollo del índice propuesto, se apoyó en distintos índices nacionales e internacionales, los cuales se presentan a continuación.

4.1 Índices Nacionales

4.1.1 ICA DGA

El índice planteado por la DGA en 2004 (DGA, 2004), tiene su base en el índice elaborado por la National Sanitation Foundation (NSF) y utiliza el mismo modelo matemático, considerando varios de los parámetros planteados por el de la NSF, pero además utiliza la norma secundaria general de calidad presente en la Guía CONAMA 2004 (CONAMA, 2004) para determinar sus valores de referencia y poder categorizar y clasificar la calidad del agua.

El modelo propuesto considera dos clasificaciones de parámetros, en primer lugar parámetros obligatorios, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a la afectación de las cuencas por intervención antrópica y tienen en su conjunto una ponderación del 70% del total del índice (Tabla 1). Por otro lado, el 30% restante lo complementan los parámetros relevantes, que corresponden a un listado de parámetros que exceden la clase de excepción de la cuenca en estudio y que son aquellos que más afectan la calidad del recurso.

Tabla 1. Pesos otorgados a los parámetros según DGA.

Parámetro	Ponderación
Oxígeno disuelto (OD)	0,12
pH	0,12
Conductividad eléctrica (CE)	0,12
Coliformes fecales (CF)	0,12
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	0,12
Sólidos totales en suspensión (TSS)	0,12
Parámetros relevantes	0,30

La clasificación del agua según este modelo entrega rangos que van entre 0 y 100, como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 2. Rangos de Calidad agua según DGA 2004.

Rango ICA	Calidad
100 – 90	Excelente
70 – 90	Muy buena
70 – 50	Buena
50 – 25	Regular
25 - 0	Mala

4.1.2 ICA MFP

El índice desarrollado por Fundación Chile en el marco del proyecto Mining FootPrint del año 2013, se basa tanto el ICA de la NSF como el propuesto por la DGA en 2004, y plantea al igual que este último, una diferenciación entre parámetros, otorgando una ponderación del 61% a los parámetros considerados obligatorios y el 39% restante a los parámetros relevantes (Tabla 3). Estos últimos corresponden a todos aquellos parámetros que excedan la clase de excelencia y que sean distintos a los planteados como obligatorios, y se refieren principalmente a metales, metaloides y aniones, dado el objetivo de aplicación del índice.

Tabla 3. Pesos otorgados a los parámetros según MFP.

Parámetro	Ponderación
OD	0,17
CF	0,16
pH	0,11
CE	0,10
TSS	0,07
Parámetros relevantes	0,39

El ICA MFP varía entre 0 y 100, siendo 0 un agua de mala calidad, mientras que un valor cercano a 100 representa un agua de muy buena calidad o de excelencia, según la siguiente clasificación.

Tabla 4. Rangos de calidad de agua, según MFP.

Rango ICA	Calidad	Clase
100 – 90	Excelente	0
70 – 90	Muy buena	1
70 – 50	Buena	2
50 – 25	Regular	3
25 - 0	Mala	4

4.1.3 Índice de calidad de agua para ecosistemas hídricos (García, 2012)

El estudio de García (2012) plantea la dificultad de usar un Índice de Calidad de Agua ya existente, debido a la variabilidad de ecosistemas y clima presentes a lo largo del país.

Para enfrentar la situación, se propone un Índice de Calidad de Agua Global, el cual se hace modificando los índices anteriormente desarrollados en Chile, como lo son el DGA (2004) e ICA Objetivo (Sancha, 2001). Para ello se realiza una ponderación entre 3 índices los cuales son los más representativos, ya que involucran distintos tipos de agua superficial, haciendo de este índice de acuerdo a lo expresado por su autor, un método más exacto.

Para la ponderación se usan los siguientes índices

- ICA natural: Se usa parámetros que entregan la mayor cantidad de información sobre calidad de agua, estos son CE, pH y OD, todos con igual ponderación, igual a 0,33.
- ICA potable: Se basa en la norma NCh 409 para la elección de parámetros, estos son Sulfatos-Cloruros, pH, Metales (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Se, Zn), estos tienen una ponderación distinta de acuerdo a su impacto (Tabla 5).

Tabla 5. Ponderación propuesta para parámetros de ICA de agua potable según Tesis (García 2012).

Parámetro	Ponderación
Sulfatos - Cloruros	0,3
Metales	0,5
pH	0,2

- ICA riego: Se basa en la norma NCh 1333 para la elección de parámetros, estos son CE, pH, Metales (As, B, Cd, Cu, Mn, Mo, Ni Zn), estos tienen una ponderación de 0,33 para todos.

Estos índices se obtienen utilizando el mismo modelo matemático que el de la NSF, es decir,



$$ICAnatural, potable, riego = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i \quad (1)$$

Estos 3 índices se ponderan para dar origen al ICA global:

$$ICAglobal = \frac{ICAnatural + ICAPotable + ICARiego}{3} \quad (2)$$

Se definen 3 rangos para evaluar los resultados de este índice (Tabla 6):

Tabla 6. Clasificación de Aguas según Tesis (García 2012).

Rango	Clasificación
$ICA \leq 1,0$	Buena
$1,0 < ICA \leq 1,5$	Regular
$1,5 < ICA \leq 3$	Mala

Este método permite evaluar la cantidad real de recurso hídrico superficial, teniendo en cuenta el comportamiento físico-químico natural de las aguas.

4.2 Índices Internacionales

4.2.1 NSF-WQI

El índice de Calidad de Agua “Water Quality Index” fue desarrollado en 1970 por la National Sanitation Foundation (NSF) de Estados Unidos, por medio del uso de la técnica de investigación Delphi de la “Rand Corporation’s” (Ball y Church, 1980).

Este método tiene la característica de ser un índice multiparámetro, el cual identifica como variables de importancia los parámetros Oxígeno Disuelto, Coliformes Fecales, pH, DBO₅, Nitratos, Fosfatos, Temperatura, Turbidez y Sólidos Totales. Para cada uno de estos parámetros se desarrollaron curvas de función con el fin de determinar la variación de la calidad del agua causada por el nivel de que presenta cada una de las variables.

Una vez determinadas las curvas para cada parámetro, se le otorga a cada uno un peso, el cual indica la relevancia del parámetro frente a la calidad de agua con respecto a los otros. Para esto, se calculan promedios de las valoraciones otorgadas para todas las variables. Los pesos temporales son calculados dividiendo la importancia de cada parámetro sobre la valoración del peso de la variable de mayor importancia, es decir, el oxígeno disuelto.

Así los pesos temporales son divididos individualmente entre la suma de los pesos temporales, lo que se traduce en los pesos finales (Tabla 7).

Tabla 7. Pesos otorgados a los parámetros según NSF.

Parámetro	Peso
Oxígeno Disuelto	0.17
Coliformes Fecales	0.16
pH	0.11
DBO	0.11
T°	0.10
Fosfatos Totales	0.10
Nitratos	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos Totales	0.07

El cálculo del ICA se hace por medio de un promedio aritmético ponderado.

$$NSF = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i \quad (3)$$

Donde P_i corresponde al Subíndice del Parametro i , el cual está determinado según las curvas de función, y W_i al factor de ponderación para el parametro i .

El resultado final es interpretado de acuerdo a la siguiente escala de clasificación de calidad de agua (Tabla 8) .

Tabla 8. Rango de Clasificación de ICA según NSF.

Rango NSF	Clasificación
91 – 100	Excelente
71 – 90	Buena
51 – 70	Media
26 – 50	Mala
0 - 25	Muy Mala

Cabe destacar, que este índice ha sido ampliamente utilizado a nivel internacional lo que lo convierte en uno de los índices para calidad de aguas con mayor validación (Tyagi et al., 2013; Kummar y Alappat, 2009).

4.2.2 Índice de León y su Aplicación a la Cuenca Lerma-Chapala, México

El índice descrito a continuación fue desarrollado por el Instituto Mexicano del Agua y presenta un sistema indicador de la calidad del agua, el cual agrupa las variables contaminantes más representativas de acuerdo a sus autores. Es una adaptación y modificación del modelo Dinius por medio de interpolación según método Delphi.

La evaluación numérica de este ICA se realiza mediante técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de pesos específicos (Tabla 9).

$$ICA = \prod_{i=1}^n |Q_i^{W_i}| \quad (4)$$

Donde W_i corresponde a los pesos específicos asignados a cada parámetro i y Q_i es la calidad del parámetro i en función a su concentración, método similar al usado por NSF.

El ICA que arroja la ecuación es un número entre 0 y 100 a partir del cual y en función al uso del agua, permite estimar el nivel de contaminación y su clasificación.

Tabla 9. Pesos otorgados a los parámetros según método Mexicano.

Parámetro	Peso
Oxígeno Disuelto	0.103
DBO	0.096
DQO	0.053
Grado Acidez	0.063
Sólidos Suspendidos	0.033
Coliformes Totales	0.083
Coliformes Fecales	0.143
Nitratos	0.053
Amonio	0.043
Fosfatos	0.073
Fenoles	0.033
Diferencia de T°	0.043
Alcalinidad	0.055
Dureza	0.058
Cloruros	0.068

El resultado final es interpretado de acuerdo al uso que se quiere dar al agua, consumo humano (Tabla 10), riego (Tabla 11) y pesca y vida acuática (Tabla 12), utilizando la siguiente escala de clasificación para cada uno.

Tabla 10. Rangos de Clasificación ICA México para uso como agua potable.

Rango ICA	Clasificación
90-100	No requiere purificación para su consumo
80-90	Purificación menor requerida
70-80	Dudoso su consumo sin purificación
50-70	Tratamiento potabilizador necesario
40-50	Dudosa para consumo
0-40	Inaceptable para consumo

Tabla 11. Rango de clasificación ICA México para uso en agricultura.

Rango ICA	Clasificación
90-100	No requiere purificación para riego
70-90	Purificación menor para cultivos que requieren alta calidad de agua
50-70	Utilizable en mayoría de cultivos
30-50	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos
20-30	Uso solo en cultivos muy resistentes
0-20	Inaceptable para riego

Tabla 12. Rango de clasificación ICA México para uso en pesca y vida acuática.

Rango ICA	Clasificación
70-100	Pesca y vida acuática abundante
60-70	Límite para peces muy sensibles
50-60	Dudosa la pesca sin riesgo para la salud
40-50	Vida acuática limitada a especies muy resistentes
30-40	Inaceptable para actividad pesquera
0-30	Inaceptable para vida acuática

4.2.3 Índice de calidad de aguas para rellenos sanitarios (LWPI)

El índice descrito a continuación (Talalaj, 2014) corresponde a un indicador de la calidad del agua en aguas subterráneas asociadas a rellenos sanitarios, el cual agrupa parámetros generales y algunos parámetros que generalmente se asocian a este tipo de depósitos, entre estos, algunos metales y compuestos orgánicos. El índice se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$LWPI = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot S_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

Donde W_i corresponde al factor de ponderación para el parámetro i , n al número de contaminantes que afectan el agua subterránea.

Si se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S_i = C_p / C_b \quad (6)$$

Donde C_p corresponde a la concentración del parámetro i aguas abajo del relleno sanitario, y C_b a la concentración del parámetro i aguas arriba del relleno sanitario.

A continuación se detallan los parámetros y los pesos asociados de cada uno.

Tabla 13. Parámetros y pesos considerados en índice LWPI-

Parámetro	Peso
pH	2
CE	1
PAH	5
TOC	4
Pb	3
Cu	3
Cr ⁶⁺	3
Hg	3
Cd	3
Total	30

El índice descrito a sido aplicado en numerosos rellenos industriales de Europa.

5 Propuesta y Metodología de Construcción del ICA Superficial

5.1 Definición de Clases de Calidad de Agua Superficial

La primera etapa en la construcción del índice para calidad de aguas superficiales consistió en la definición de clases de calidad bajo las cuales se clasificarán las aguas de las distintas cuencas del país, para lo cual se realizó una revisión de distintas normativas internacionales y nacionales que permitieran definir rangos de calidad. A continuación, se presentan aquellas que fueron utilizadas en la propuesta de las clases según calidad.

5.1.1 Guías y Normativa Nacional de Calidad de Agua

a. Guía CONAMA para Normas Secundarias de Calidad Ambiental

Las normas secundarias generales de calidad ambiental, descritas en la Guía CONAMA 2004 (CONAMA, 2004) y utilizadas en el estudio de la DGA del año 2004, están asociadas a la protección de aguas superficiales para la protección y conservación de comunidades acuáticas y para usos prioritarios. Esta considera 4 clases de calidad de agua, las que van desde la clase excepcional hasta la insuficiente, por lo que permite determinar en qué situación se encuentra el agua superficial analizada y de acuerdo al resultado obtenido, asignar un posible uso (Tabla 14 y Tabla 15).

Tabla 14. Valores máximos y mínimos establecidos para la dictación de las normas secundarias de calidad ambiental para las aguas aptas para la protección y conservación de las comunidades acuáticas y los usos prioritarios (CONAMA, 2004).

NSC - protección de las aguas continentales superficiales					
Elementos o compuestos	Unidad	Clase de excepción	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Cobre	mg/L	< 0,0072	0,009	0,2	1
Cromo total	mg/L	< 0,008	0,01	0,1	0,1
Hierro	mg/L	< 0,8	1	5	5
Manganeso	mg/L	< 0,04	0,05	0,2	0,2
Magnesio					
Selenio	mg/L	< 0,004	0,005	0,02	0,05
Zinc	mg/L	< 0,096	0,12	1	5
Arsénico	mg/L	< 0,04	0,05	0,1	0,1
Cadmio	mg/L	< 0,0018	0,002	0,01	0,01
Cianuro	mg/L	< 0,004	0,005	0,01	0,05
Mercurio	mg/L	< 0,00004	0,00005	0,00005	0,001
Nitrato					
Nitrito	mg/L	< 0,05	0,06	>0,06	>0,06
Razón nitrato + nitrito					
Plomo	mg/L	< 0,002	0,0025	0,2	5

Cloruro	mg/L	<80	100	150	200
pH	Rango	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
Sulfato	mg/L	< 120	150	500	1000
Aluminio	mg/L	<0,07	0,09	0,1	5
Boro	mg/L	< 0,4	0,5	0,75	0,75
OD	mg/L	>7,5	7,5	5,5	5
Niquel	mg/L	< 0,042	0,052	0,2	0,2
Plata					
Turbiedad					
Conductividad eléctrica	uS/cm	< 600	750	1500	2250
DBO5	mg/L	<2	5	10	20
RAS	-	<2,4	3	6	9
Solidos Disueltos	mg/L	< 400	500	1000	1500
Solidos suspendidos	mg/L	<24	30	50	80
Sulfuro	mg/L	< 0,04	0,05	0,05	0,05
Molibdeno	mg/L	< 0,008	0,01	0,15	0,5
Estaño	mg/L	< 0,004	0,005	0,025	0,05
Coliformes fecales	NMP/100 ml	< 10	1000	2000	5000
Coliformes totales	NMP/100 ml	< 200	2000	5000	10000

Tabla 15. Clasificación de calidad según norma secundaria de calidad.

Clase de Calidad	Clasificación
Clase Excepcional	Indica un agua de mejor calidad que la Clase 1, que por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte única del patrimonio ambiental de la República. Esta calidad es adecuada también para la conservación de las comunidades acuáticas y demás usos definidos cuyos requerimientos de calidad sean inferiores a esta Clase.
Muy buena calidad	Indica un agua adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto y para los usos comprendidos en las Clases 2 y 3.
Buena calidad	Indica un agua adecuada para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa, y para los usos comprendidos en la Clase 3.
Regular calidad	Indica un agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido.
Clase insuficiente	Las aguas que excedan los límites establecidos para la Clase 3, indicarán un agua de mala calidad (Clase 4), en general no adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin el tratamiento adecuado.

b. Norma NCh 409 del 2005 – Agua Potable

La norma NCh 409 se utiliza para la definición de clases junto al resto de las normas internacionales y nacionales.

c. Norma NCh 1333 de 1978/1987 - Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos

La norma NCh 1333 se utiliza en específico para definir el límite de la plata correspondiente a la clase Buena, que está definida por un uso del agua para riego irrestricto. Se utiliza el valor propuesto por esta norma debido a que no se encuentran otros valores de referencia enfocados en este uso para este elemento a nivel internacional.

5.1.2 Normativas Internacionales de Calidad de Agua

a. Normativa Canadiense para Calidad de Agua (CCME)

La normativa canadiense *Canadian Environmental Quality Guidelines* especifica los valores de referencia para aguas superficiales para distintos parámetros de acuerdo a distintos usos, incluyendo agricultura, salud humana y protección de vida acuática y ecosistemas (CCME, 1999; Anexo 7.1.1). Esta última clasificación fue utilizada por el presente estudio como apoyo para definir el límite de la Clase Excepcional. Es importante destacar que se consideró esta normativa por ser una de las más utilizadas y validadas a nivel internacional.

Adicionalmente, se utilizaron los valores de referencia de la norma para protección de vida acuática y agricultura con el objetivo de definir el límite de la Clase Excepcional en caso de la plata y el nitrato; y de la Clase Buena respectivamente, específicamente en la definición del valor de corte para el aluminio, el cobalto y el nitrato. Finalmente, se utilizaron los valores propuestos para brebaje de animales para definir los umbrales de la Clase Regular, específicamente en la definición del valor de corte para el cobalto.

b. Normativa Mexicana para calidad de Aguas

Se utilizó la normativa mexicana para calidad de aguas (León, 1998) exclusivamente para definir las clases en lo concerniente al parámetro DQO, ya que este último no se considera en las normativas nacionales ni en la mayoría de las internacionales utilizadas.

c. Normativa Francesa para calidad de Agua (SEQ, Francia)

La normativa francesa (Systèmes d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau) (Senado Francia, 2012) al igual que la canadiense hace una clasificación de los parámetros diferenciando el uso. Se utilizó esta normativa para complementar la norma secundaria general de calidad (CONAMA, 2004), específicamente en referencia al parámetro pH, y complementar lo establecido por la normativa mexicana en el parámetro DQO (Anexo 7.1.2). Al comparar los parámetros entregados para pH, la normativa francesa era coincidente con lo establecido por NSF, mientras que para DQO, esta normativa coincide

con normativa usada para el índice mexicano, es por lo anterior que se utilizaron los rangos propuestos en la normativa francesa para definir las distintas clases.

Adicionalmente, se utiliza esta norma para la definición del valor de corte para la Clase Regular respecto al nitrato.

d. Norma de Calidad de Aguas Superficiales de la Provincia de Alberta, Canadá

La normativa canadiense para la provincia de Alberta (ESRD, 2014) se utilizó para complementar la norma secundaria general de calidad, específicamente para el establecimiento del límite para el cobalto de un agua apta para la protección de la vida acuática.

e. Norma Australiana y Neozelandesa de Calidad de Agua Superficial y Agua de Mar

La normativa Australiana y Neozelandesa (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 2000A y 2000B) para la protección de vida acuática y la que considera un uso para irrigación, se utilizaron para complementar la norma secundaria general de calidad, específicamente para el establecimiento del límite para el fósforo de un agua apta para la protección de la vida acuática y de un agua apta para riego.

5.1.3 Definición de Las Clases de Calidad del ICA Agua Superficial

Previo a la construcción del índice se definieron clases de calidad, las cuales permiten definir rangos de valores para un potencial uso, así como también los criterios de normalización usados para los parámetros.

En general, las clases se definen de acuerdo a las normas secundarias generales de calidad ambiental (CONAMA, 2004), las normas canadienses para protección de vida acuática, para uso agrícola y para brebaje de animales (CCME, 1999), la norma francesa de calidad de agua (Senado Francés, 2012) y la norma mexicana de calidad de agua (León, 1998).

Adicionalmente, los valores que determinan cada una de las clases son comparados con otras normativas nacionales e internacionales, incluyendo la NCh 409, la NCh 1333 y la norma de calidad de agua de la FAO (Ayers et al., 1985).

Clase Excepcional: Esta clase corresponde a la categoría más estricta de calidad de agua que entrega el índice, y se define de acuerdo a los valores máximos permitidos por la clase excepcional de las normas secundarias generales de calidad ambiental (Tabla 14), ya que estas últimas se enfocan en la protección de vida acuática y ecosistemas.

La selección de esta clase de acuerdo a las normas anteriores, se realiza a partir de la comparación de los valores límites para los distintos parámetros que considera, y por su coincidencia con aquellos presentados por otras normativas, principalmente internacionales, que están enfocadas en el mismo objetivo de protección. Entre estas normativas internacionales se incluyen la normativa canadiense a nivel nacional y la de la

provincia de Alberta, y la norma de calidad de aguas francesa. Adicionalmente, para ciertos parámetros como aluminio, fósforo, plata, cobalto y nitrato se utilizaron valores de referencia de normativas internacionales para este uso.

Cabe destacar que no se consideran las concentraciones naturales de cada uno de los parámetros en la metodología, por lo tanto que se sobrepasen los valores que determinan los umbrales para la protección de vida acuática, no implica que no exista flora y fauna adaptada a estas condiciones.

Clase Buena: Esta clase está referida principalmente al uso aplicable a riego y también utiliza para la mayoría de los parámetros aquellos valores límites propuestos por las normas secundarias generales de calidad (Tabla 14).

La selección de esta clase se realiza a partir de la comparación de los valores límites para los distintos parámetros que considera, y por su coincidencia con las normativas canadiense y francesa para agua de riego y agricultura. La clase seleccionada cumple con ambas o al menos una de las normativas internacionales antes mencionadas en los distintos parámetros, por lo que se considera ésta como segunda categoría de clasificación, siendo su uso aplicable a riego irrestricto.

Adicionalmente, para ciertos parámetros como aluminio, cobalto y fósforo se utilizaron valores de referencia de la norma canadiense para este uso.

Clase Regular: Esta clase define los estándares para aguas de uso recreativo, bebida de animales y riego restringido.

La selección de esta clase se realiza de acuerdo a la definida por las normas secundarias generales de calidad ambiental (Tabla 14). De la misma manera que para las clases anteriores, se realiza a partir de la comparación de los valores límites para los distintos parámetros que considera, y por su coincidencia con normativa francesa para bebida de animales. Cabe destacar, que esta clase presenta valores límite levemente superiores a los de la NCh 409, pero inferiores a los que presenta la clasificación C de la FAO (Ayers et al., 1985), la cual contempla un uso exclusivo para deporte acuático y de poco contacto con el ambiente.

Adicionalmente, para ciertos parámetros como cobalto y nitrato se utilizaron valores de referencia de la norma canadiense y francesa respectivamente para este uso.

Como se mencionó anteriormente, si bien la Clase Regular es menos estricta que la norma para agua potable, todas aquellas clases a partir de esta, incluyendo las Clases Buena y Excepcional, se consideran como agua potabilizable mediante un tratamiento simple.

Clase Insuficiente: Esta clase comprende las aguas que exceden los límites establecidos para la clasificación de regular e indican agua de mala calidad (Tabla 14), en general, no adecuada para conservación de comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin un tratamiento específico.



A continuación se presenta una tabla resumen con las distintas clases definidas para el ICA superficial con el detalle de su alcance.

Tabla 16. Clasificación de índice según valor obtenido y clasificación asignada a cada clase.

Clase de Calidad	Referencia
Excepcional	Clase de excepción según normas secundarias generales de calidad ambiental de la Guía CONAMA 2004, se compara y complementa con normas de protección de vida acuática internacionales, y va enfocada a la protección de vida acuática y de ecosistemas. Estas aguas no afectan salud humana y cumplen con criterios de aceptabilidad del agua potable.
Buena	Agua adecuada para riego y el desarrollo de acuicultura. Se basa principalmente en la Clase 2 de Guía CONAMA 2004, se compara y complementa con normativa nacional e internacional (francesa y canadiense) para riego y sistemas agrícolas, y cumple con ambas o al menos una de ellas.
Regular	Agua para uso recreativo, bebida de animales y riego restringido. Se basa en la Clase 3 de Guía CONAMA 2004 y se compara y complementa con normativa canadiense y francesa para bebida de animales y con la FAO.
Insuficiente	Comprende las aguas que exceden los límites establecidos para la clasificación de regular en la Guía CONAMA 2004, e indican agua de mala calidad, en general, no adecuada para conservación de comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin un tratamiento adecuado.

5.2 Índice de Calidad de Agua (ICA) Superficial

El índice propuesto, al igual que los índices nacionales utilizados como referencia, plantea dos clases de parámetros. Por una parte, considera 4 parámetros generales, que son aquellos que entregan información general acerca de la calidad de las aguas y que también son medidos en todas las estaciones en línea de la DGA y otros parámetros llamados complementarios.

El índice de calidad de agua propuesto, al igual que el ICA NSF, queda definido por la siguiente ecuación:

$$ICA = W_{pg} \cdot \max(Qi_{pg}) + W_{pc} \cdot \max(Qi_{pc}) \quad (5)$$

Dónde:

- W_{pg} es el peso asignado a los parámetros generales ($W_{pg} = 0.49$)
- W_{pc} es el peso asignado a los parámetros complementarios ($W_{pc} = 0.51$)
- $\max(Q_i)$ máximo valor normalizado de los parámetros o generales (pg) o complementarios (pc)

El índice propuesto se apoya en los principios de la lógica difusa para su construcción y el establecimiento de condiciones que se transforman finalmente en expresiones matemáticas que permiten su aplicación (Lemontov et al., 2009; Yilmaz, 2007).

5.2.1 Definición de parámetros

Sobre la base de los índices y normativas anteriormente expuestos, se integran las metodologías estudiadas con el fin de poder desarrollar un índice de calidad de agua superficial que pueda ser aplicado a nivel nacional siguiendo algunas normativas para distintos usos del agua.

Para ello se analizó en primera instancia la base de datos entregada por la DGA, a partir de lo cual, se definen los parámetros generales del índice, que incluyen oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, DQO y pH. Estos parámetros entregan información importante relativa a la calidad del agua y además, son monitoreados en todas las estaciones de calidad de la DGA.

Los parámetros generales tienen una ponderación igual al 49% del total del índice, mientras que el 51% restante corresponde a los parámetros complementarios (Tabla 17).

Tabla 17. Pesos otorgados a los parámetros generales y complementarios en el índice propuesto.

Parámetros generales	Ponderación
OD	0,49
pH	
CE	
DQO	
Parámetros complementarios	0,51

Los parámetros complementarios permiten determinar la singularidad del agua superficial en cuestión, y además se refieren a aquellos parámetros que más pueden afectar la calidad del agua. Lo anterior podría en algunos casos permitir identificar el origen de la anomalía.

Para determinar qué parámetros se clasificarían como complementarios, se analizaron las bases de datos de los monitoreos que realiza la DGA a nivel nacional, se identificaron en una primera instancia aquellos que son medidos en la mayoría de las estaciones y que además tienen una representatividad temporal.

Los parámetros medidos por las estaciones de la DGA fueron comparados con aquellos propuestos por las distintas normativas mencionadas en el capítulo anterior, y en especial con aquellos definidos por la Guía CONAMA del 2004, la normativa canadiense Canadian Environmental Quality Guidelines y la Environmental Quality Guidelines for Alberta Surface Waters para la protección de vida acuática y ecosistemas, y uso agrícola. Aquellos que

coincidirían con estas normativas, se definieron en primera instancia como parámetros complementarios.

Posteriormente, se acota el número de parámetros a aquellos que presentaban mayor toxicidad para los seres humanos y el medio ambiente. De esta manera, fueron elegidos 15 parámetros complementarios (Tabla 18) que presentan según la RAIS de EEUU (The Risk Assessment Information System) dosis de referencia oral (DdRo) del orden de 10^{-2} mg/kg.día, debido a su alta toxicidad (https://rais.ornl.gov/cgi-bin/tools/TOX_search).

A continuación, dentro de los parámetros complementarios, se definen 6 parámetros críticos de acuerdo a su toxicidad y riesgo comprobado de generar cáncer por mecanismos similares en seres humanos y/o animales, es decir, se seleccionan aquellos parámetros que cumplen con la condición de ser medidos por la DGA y que además son parte de los grupos 1 y 2 de la *International Agency for Research on Cancer (IARC; <https://www.iarc.fr/>)*. Los parámetros críticos incluyen los elementos arsénico, cadmio, cromo hexavalente, cobalto, níquel y plomo (presentados en rojo en la tabla). Se decide la distinción de estos parámetros respecto al resto de los parámetros complementarios con el fin de que aquellos clasificados como críticos determinen la calidad del agua analizada, es decir, se fuerza a que la clasificación entregada por el ICA no sea menor a la correspondiente al máximo valor encontrado entre los parámetros críticos.

Además, se incluyen los parámetros nitrato y nitrito por ser parámetros comúnmente considerados en los índices de calidad de agua internacionales, debido a su importancia para la identificación de contaminación derivada de la agricultura, y además por ser el nitrato un indicador de eutrofización.

Tabla 18. Parámetros complementarios considerados por el ICA Superficial. En rojo destacan aquellos parámetros considerados como críticos.

Parámetro	Unidad	Toxicidad	
		DdRo	Grupo cancerígeno según IARC
Arsénico	mg/L	$3 \cdot 10^{-4}$	1
Cadmio	mg/L	$5 \cdot 10^{-4}$	1
Cianuro	mg/L	$6 \cdot 10^{-4}$	
Cromo VI	mg/L	$3 \cdot 10^{-3}$	1
Cobalto	mg/L	$3 \cdot 10^{-4}$	2B
Cobre	mg/L	$4 \cdot 10^{-2}$	
Mercurio	mg/L	$1,6 \cdot 10^{-4}$	3
Molibdeno	mg/L	$5 \cdot 10^{-3}$	
Níquel	mg/L	$2 \cdot 10^{-2}$	1 (2B)
Nitrato	mg/L	1,6	
Nitrito	mg/L	0,1	
Plata	mg/L	$5 \cdot 10^{-3}$	
Plomo	mg/L	$2 \cdot 10^{-2}$ (*)	2B

Selenio	mg/L	5.10 ⁻³	3
----------------	------	--------------------	---

* Dosis de referencia para cromato de plomo.

5.2.2 Normalización de parámetros

La comparación y valoración de los parámetros definidos como generales y complementarios en un cuerpo de agua necesitan de una escala normalizada de calidad para ser valorados e integrados en un índice final de calidad. De esta manera, cada parámetro, con su respectiva unidad, es llevado a una misma escala.

La escala utilizada y el valor asignado para cada una de las clases (Q_i) se presentan en la Tabla 19. Por lo tanto, lo que se hace es asignar al rango de valores óptimo el valor 1, considerado como Clase Excepcional, el valor 2 para la Clase Buena, el valor 3 para la Clase Regular, y por último el valor 4 para la Clase Insuficiente.

Los criterios para cada categoría, son los utilizados para clasificar la calidad de agua.

Tabla 19. Valores asignados para la normalización.

Clase	Valor asignado al parámetro (Q_i)
Excepcional	1
Buena	2
Regular	3
Insuficiente	4

a. Parámetros Generales

Oxígeno Disuelto (OD)

La normalización del oxígeno disuelto, se realiza tomando como referencia los valores entregados en la Guía CONAMA 2004, documento utilizado posteriormente en el estudio DGA 2004 (Tabla 20).

Esta guía establece rangos que clasifican el parámetro en clases, de acuerdo a la concentraciones existente en el agua, el rango escogido fue verificado con el estudio de Mining FootPrint y por la SEQ, Francia¹.

Tabla 20. Normalización para Oxígeno Disuelto.

Parámetro	Unidad	Q_i			
		1	2	3	4
Oxígeno Disuelto	mg/L	>7,5	5,5 < OD ≤ 7,5	5,0 < OD ≤ 5,5	<5,0

¹ Systéme d'évaluatio de la qualié de l'eau des cours d'eau (SEQ) Francia

Conductividad

Al igual que con el oxígeno disuelto, se utilizó como rango de clasificación para la conductividad el rango establecido por la guía CONAMA 2004, que a su vez fue verificado por el estudio Mining FootPrint (Tabla 21).

Tabla 21. Normalización para Conductividad.

Parámetro	Unidad	Qi			
		1	2	3	4
CE	μS/cm	<600	750	1500	2250

pH

La metodología utilizada para los parámetros anteriores de acuerdo a la Guía CONAMA 2004, no permite hacer una diferenciación de clases respecto al pH, ya que les otorga a todas el mismo rango. En este contexto, los valores de Q_i se obtienen a partir de gráficas estandarizadas (Figura 1), en la que se encuentran definidos los máximos y mínimos permitidos para cada parámetro en la clase correspondiente. Este método es recomendado tanto por NSF como asimismo en el ICA propuesto en el proyecto Mining FootPrint.

Una vez determinado el rango con la curva existente, éste se verificó con SEQ, Francia y los resultados fueron coincidentes.

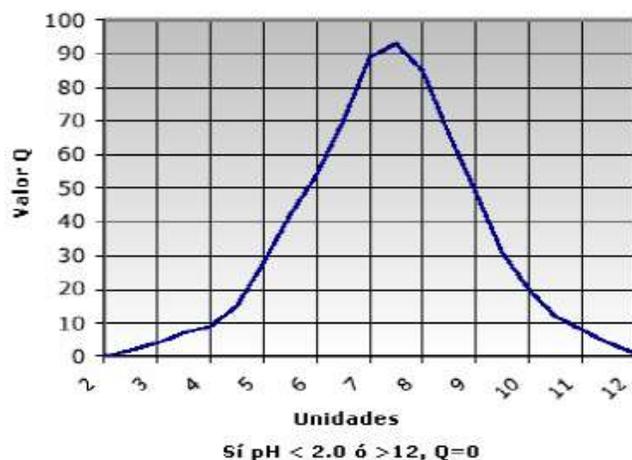


Figura 1. Curva para normalización de pH, desarrollada por NSF.

En la Tabla 22 se presentan los valores que definen las Q_i de acuerdo a la metodología de la NSF antes descrita.

Tabla 22. Normalización del pH.

Parámetro	Unidad	Qi			
		1	2	3	4
pH	-	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,2$	$6,0 \leq \text{pH} < 6,5$	$5,5 \leq \text{pH} < 6,0$	$< 5,5$
			$8,2 < \text{pH} \leq 9,0$	$9,0 < \text{pH} \leq 9,5$	$> 9,5$

DQO

En general las normativas y metodologías estudiadas consideran en los índices que proponen el parámetro DBO como parámetro fundamental. Sin embargo, este parámetro no pudo ser incluido en el índice propuesto ya que éste no es medido en las estaciones de monitoreo en línea de la DGA. En este contexto, se decidió incorporar la DQO, que corresponde a un indicador indirecto de la cantidad de materia orgánica que presenta el agua y que sí es medido por la DGA. Cabe destacar, que la DQO representa la demanda de oxígeno necesaria para oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos.

Debido a que en Chile no está normado este parámetro, se consideraron normativas internacionales para los distintos usos mencionados anteriormente, entre estas la norma de calidad de agua mexicana y la norma de calidad de agua de Francia (SEQ, Francia) antes mencionadas.

En la tabla a continuación se detallan los valores de Qi de acuerdo a distintos rangos de DQO.

Tabla 23. Normalización para DQO.

Parámetro	Unidad	Qi			
Parámetro	Unidad	1	2	3	4
DQO	mg/L	≤ 10	$10 < \text{DQO} \leq 20$	$20 < \text{DQO} < 40$	≥ 40

b. Parámetros Complementarios

Los parámetros complementarios, como se mencionó anteriormente, hacen referencia a 14 parámetros que mide DGA, dentro de los cuales 6 son considerados como críticos por su riesgo comprobado de desarrollar cáncer en animales y/o humanos.

Los valores que definen cada clase para cada parámetro provienen de las normas secundarias generales de calidad (Guía CONAMA, 2004). Esta decisión, se basa en la comparación y coincidencia de los valores de las clases propuestas por dichas normas con los valores de referencia presentados por las normas canadiense para la protección de vida acuática, la norma canadiense para la protección de vida acuática de la Provincia de Alberta, la norma canadiense para uso agrícola, la norma francesa para uso agrícola y para brebaje de animales, la norma mexicana de calidad de agua, las normas de calidad de la

FAO, las normas Australianas y Neozelandesas de calidad de agua, las normas chilena NCh 409 para agua potable y NCh 1333, de acuerdo a lo antes mencionado.

Tabla 24. Criterio de normalización de parámetros complementarios.

Qi			
1	2	3	4
≤ Clase Excepcional NSC ²	Clase Buena NSC ²	Clase Regular NSC ²	≥ Clase Regular NSC ²

De acuerdo a las clases definidas en la Tabla 24, se le asigna un valor de Qi de 1 a 4 para ser ingresado al ICAS (Tabla 25). En los casos donde el valor de dos clases tienen como límite el mismo valor (por ejemplo el arsénico en las clases 2 y 3), el valor del ICAS tomará el valor de la clasificación con peor calidad.

Tabla 25. Normalización para parámetros complementarios.

Parámetro	Unidad	Rangos de concentración definidos para cada Qi			
		1	2	3	4
Arsénico	mg/L	< 0,04	0,1	0,1	> 0,1
Cadmio	mg/L	< 0,0018	0,01	0,01	> 0,01
Cianuro	mg/L	< 0,004	0,01	0,05	> 0,05
Cromo VI	mg/L	< 0,008	0,1	0,1	> 0,1
Cobalto (1)	mg/L	≤ 0,0025	0,05	1	> 1
Cobre	mg/L	< 0,0072	0,2	1	> 1
Mercurio	mg/L	< 0,00004	0,00005	0,001	> 0,001
Molibdeno	mg/L	< 0,008	0,15	0,5	> 0,5
Níquel	mg/L	< 0,042	0,2	0,2	> 0,2
Nitrato (2)	mg/L	≤ 13	13	50	> 50
Nitrito	mg/L	< 0,05	> 0,06	> 0,06	> 0,06
Plata (3)	mg/L	≤ 0,00025	0,01	0,2	> 0,2
Plomo	mg/L	< 0,002	0,2	5	> 5
Selenio	mg/L	< 0,004	0,02	0,05	> 0,05

- (1) La clase 1 se obtiene de la norma Environmental Quality Guidelines for Alberta surface waters-for the protection of Aquatic Life, 2014. La clase 2 y 3 de la normativa CCME de riego y bebida de animales respectivamente.
- (2) La clase 1 y 2 se definen de la normativa CCME para la protección de la vida acuática y la clase 3 de Systeme d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau, France 2003, en la correspondiente a bebida de animales.
- (3) La clase 1 se obtiene de la norma CCME de protección a la vida acuática y la clase 2 y 3 de la norma NCh 1333.

Cabe destacar, que en el caso de algunos parámetros, por no ser considerados por las normas secundarias generales de calidad, se debieron complementar los valores límite que definen cada clase con otras normativas (Tabla 25), específicamente en el caso del cobalto, el nitrato y la plata, para los que se utilizaron normas internacionales (Canadá y Francia) y nacionales (NCh 1333).

² Normas Secundarias de Calidad pertenecientes a la Guía CONAMA 2004.

5.2.3 Ponderación de Parámetros y Aplicación del ICA Superficial

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la calidad del agua se valora con el factor correspondiente a la clase del agua resultante, es decir de 1 a 4, donde de acuerdo a la ecuación (4) es multiplicado por el factor de ponderación W_i .

Sin embargo y como se mencionó anteriormente, la ponderación de los parámetros que conforman el ICA superficial y la aplicación del mismo están sujetas al establecimiento de reglas de acuerdo al método de lógica difusa, es decir, se impone que se cumplan ciertas condiciones que se detallan más adelante.

Se define que los valores que entran en la ecuación (5) corresponden a los valores máximos del grupo de parámetros generales y del grupo de parámetros complementarios.

Adicionalmente y con el objetivo de que los parámetros críticos por su mayor toxicidad y demostrado efecto cancerígeno sean determinantes en el valor del ICAS, se impone como regla que la existencia de uno o más parámetros críticos determinarán una clase final del ICAS no menor al Q_i máximo de los parámetros críticos, con lo cual la obtención del ICAS superficial de acuerdo a la ecuación 5 queda supeditada a esta condición. Es decir, la clase que entrega el ICAS será siempre igual o mayor a aquella correspondiente al parámetro crítico que presente el Q_i mayor.

A continuación se detallan los distintos casos y condiciones que determinan el cálculo del ICAS (ver también Figura 2):

- En primera instancia, se exige la existencia de mediciones de los 4 parámetros generales, de lo contrario el ICA no se aplica.
- De no haber mediciones de parámetros complementarios, el ICAS pasará a ser determinado solamente por los parámetros generales, tomando el valor Q_i máximo de estos.
- Si el valor máximo de Q_i se encuentra entre los parámetros críticos, el ICAS tendrá un valor igual a este máximo.
- Si el valor máximo de Q_i se encuentra entre los parámetros generales y/o complementarios no críticos, el ICA se calcula de acuerdo a la ecuación (5).

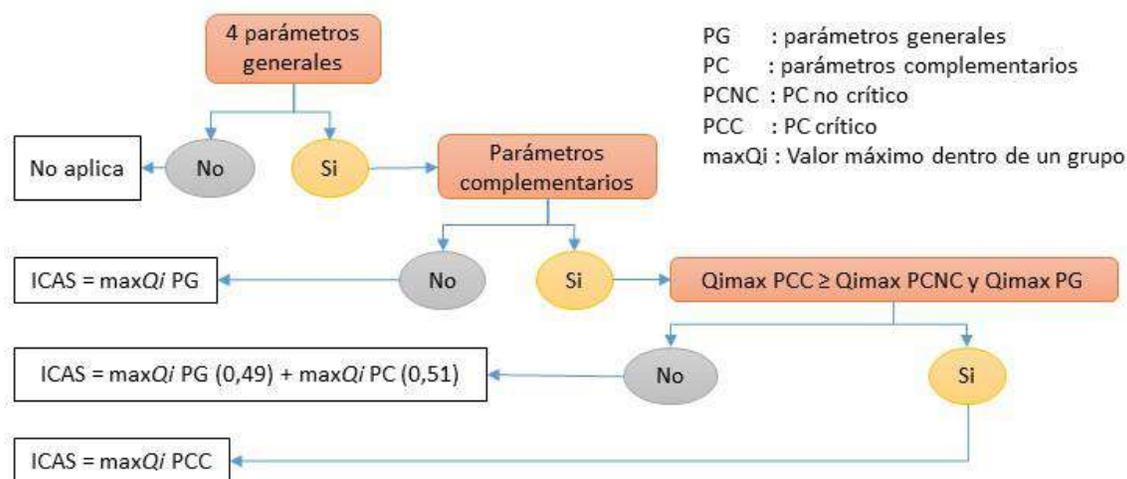


Figura 2. Esquema de lógica difusa en cálculo del ICA.

5.2.4 Análisis y Tratamiento de Datos que Alimentan ICA

Previo a la utilización de los datos obtenidos desde las estaciones de monitoreo de agua superficial, se realiza una depuración de los mismos con el fin de disminuir la incerteza asociada a la obtención del ICA, que consiste principalmente en:

- la identificación de cada uno de los parámetros que son medidos por cada una de las estaciones disponibles y que tienen representatividad temporal, es decir que cuente con al menos 1 registro medido al año en cada una de las épocas (verano, otoño, invierno y primavera),
- la identificación y descarte de valores atípicos que no se encuentren dentro de un rango de valores objetivos,
- la identificación y descarte de aquellos valores para los distintos parámetros que correspondan a límites de detección o de cuantificación y no a valores de medición. Esta decisión radica en que el hecho de trabajar con los valores asociados a los límites de detección podría haber aumentado considerablemente la incertidumbre asociada al cálculo del ICA, ya que en muchos casos los límites de detección estaban por encima de los umbrales definidos para las distintas clases, y además existía una amplia variabilidad en los valores correspondientes a los límites de detección de la base de datos de la DGA, con diferencias incluso de un orden de magnitud.

Tras la depuración de los datos, se dio que varias estaciones quedaron con mayor cantidad de registros en el periodo 2006-2011, situación que fue más evidente desde la región metropolitana hacia el sur, con Los Ríos como caso más extremo, que pasó de tener 50 estaciones en 2006-2011 a cerca de 30 en 2011-2016. Por su parte, las regiones del norte también mostraron una disminución en el número de estaciones de monitoreo, pero menos significativa.

5.2.5 Interpretación del ICA de Agua Superficial

El valor obtenido del modelo se categoriza en rangos, los cuales son especificados en la Tabla 26, la cual se basa en las normativas antes mencionadas. El valor del ICAS obtenido permite una visualización por color de acuerdo a la calidad de agua que presenten cada una de las estaciones de monitoreo a lo largo del país.

Tabla 26. Rangos de calidad de ICA de agua superficial según rango.

Clase de Calidad	Simbología
Excepcional $0 \leq \text{ICA} \leq 1$	
Buena $1 < \text{ICA} \leq 2$	
Regular $2 < \text{ICA} \leq 3$	
Insuficiente $3 < \text{ICA} \leq 4$	

6 Aplicación del ICAS

La base de datos corresponde a un total de 450 estaciones de monitoreo de la DGA (Figura 3), que incluye datos desde el año 2006 hasta el año 2016, las cuales no son constantes en los dos periodos analizados ni en las épocas del año (ver Tabla 27). La base de datos utilizada en el cálculo del ICAS cuenta con una parte importante de los registros sin datos (NA), lo que está asociado a la metodología usada para el análisis y tratamiento de los datos (ver 5.2.4).

Tabla 27. Número de estaciones de monitoreo utilizadas para el cálculo del ICAS por periodo y época del año.

Periodo / Trimestre	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2006-2011	358	407	358	433
2011-2016	305	349	351	386

SIMBOLOGÍA

 Regiones de Chile

 Límites Internacionales

 Límite Costero

 Lagos

 Ríos

 Estaciones DGA



DATUM
WGS84
GCS

0 200 400 km

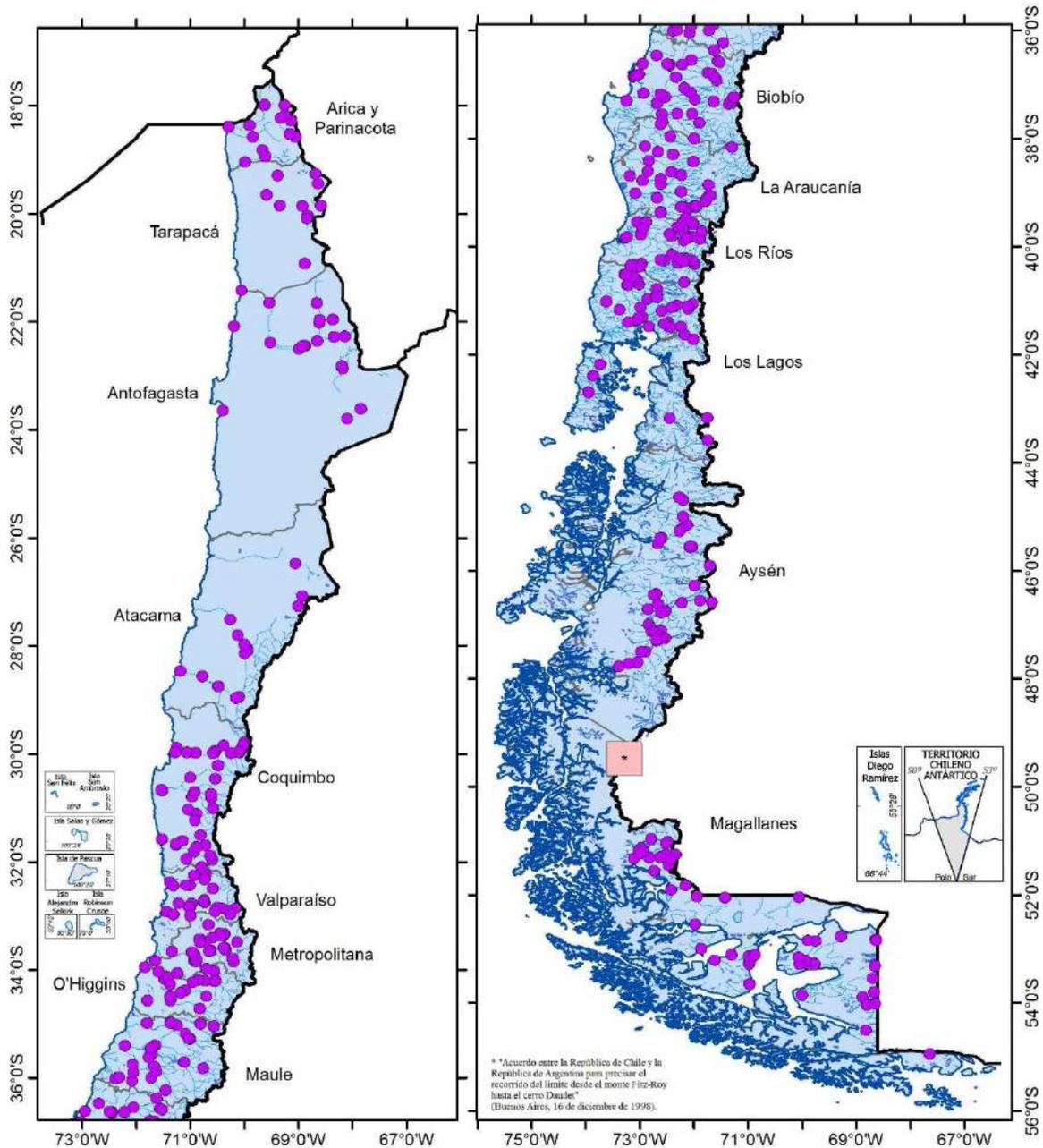


Figura 3. Distribución de las estaciones de monitoreo DGA utilizadas en el cálculo del ICAS.

La aplicación del ICAS propuesto se realizó teniendo en cuenta un promedio quinquenal por estación del año, es decir, se obtuvo en la medida de lo posible y de acuerdo a la

disponibilidad de datos, un ICAS para cada una de las estaciones de monitoreo para invierno, primavera verano y otoño, para el periodo correspondiente a los años 2006 – 2011, y otro que contempló las distintas estaciones del año para el periodo 2011 – 2016.

6.1 Aplicación ICA a Nivel Nacional

Las figuras 4 y 5 muestran la distribución de la clasificación del ICAS por Región y estación del año, mientras que las figuras 6 y 7 muestran los parámetros con mayor peso dentro del cálculo del ICAS, lo cual se presenta diferenciadamente para cada región.

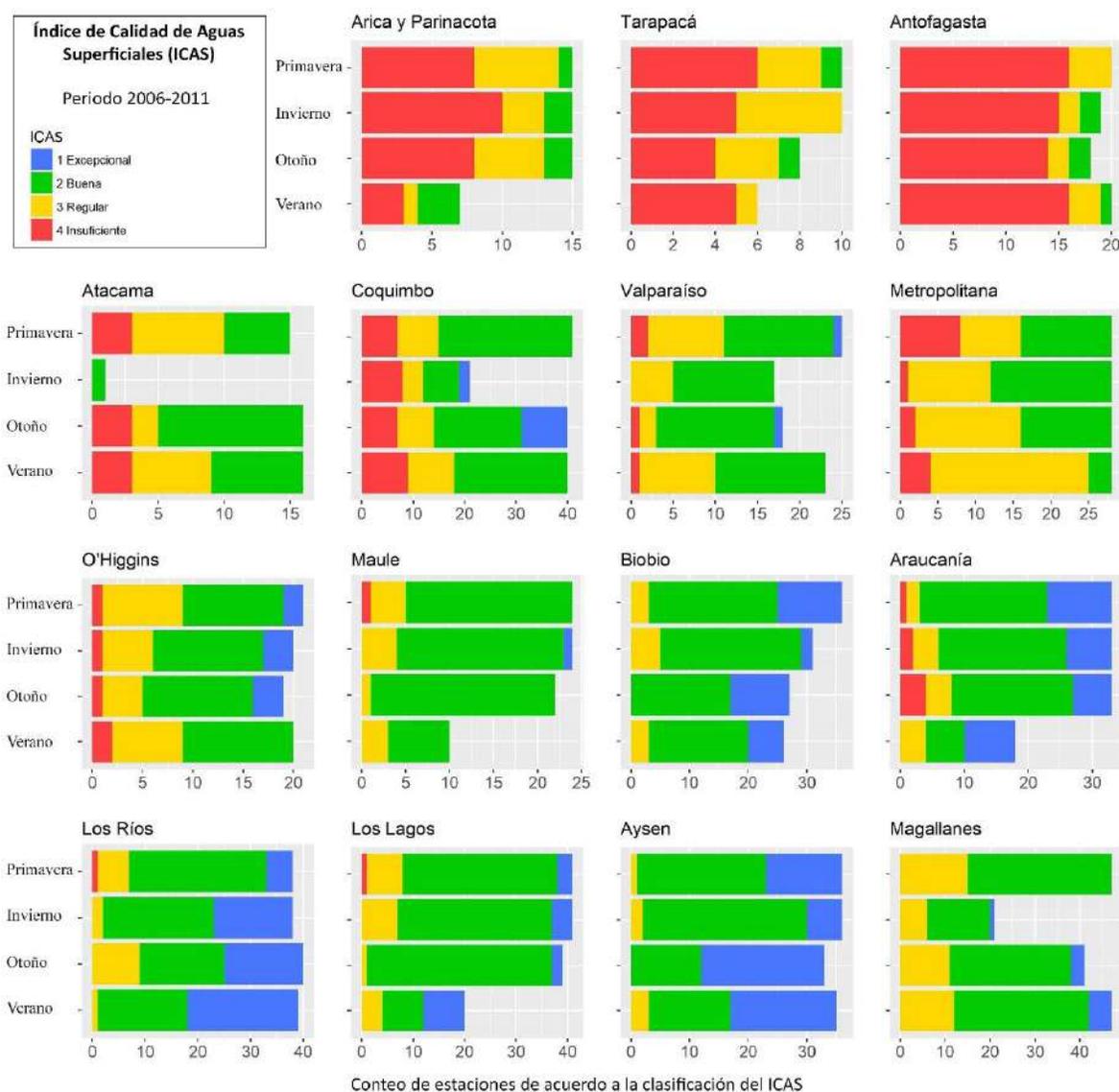


Figura 4. Conteo de estaciones de acuerdo a la clasificación del ICAS por Región y trimestre del periodo 2006 - 2011

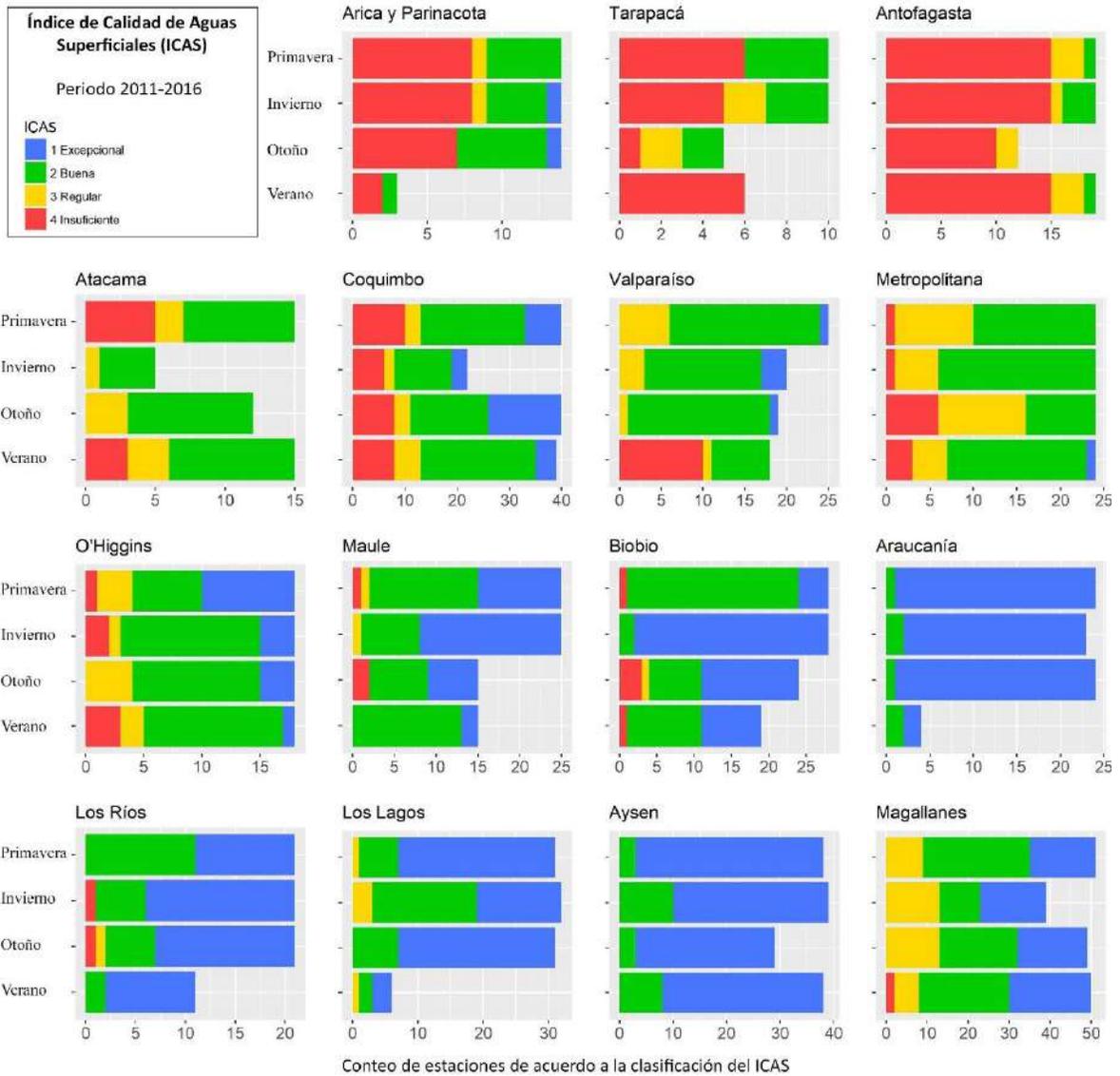
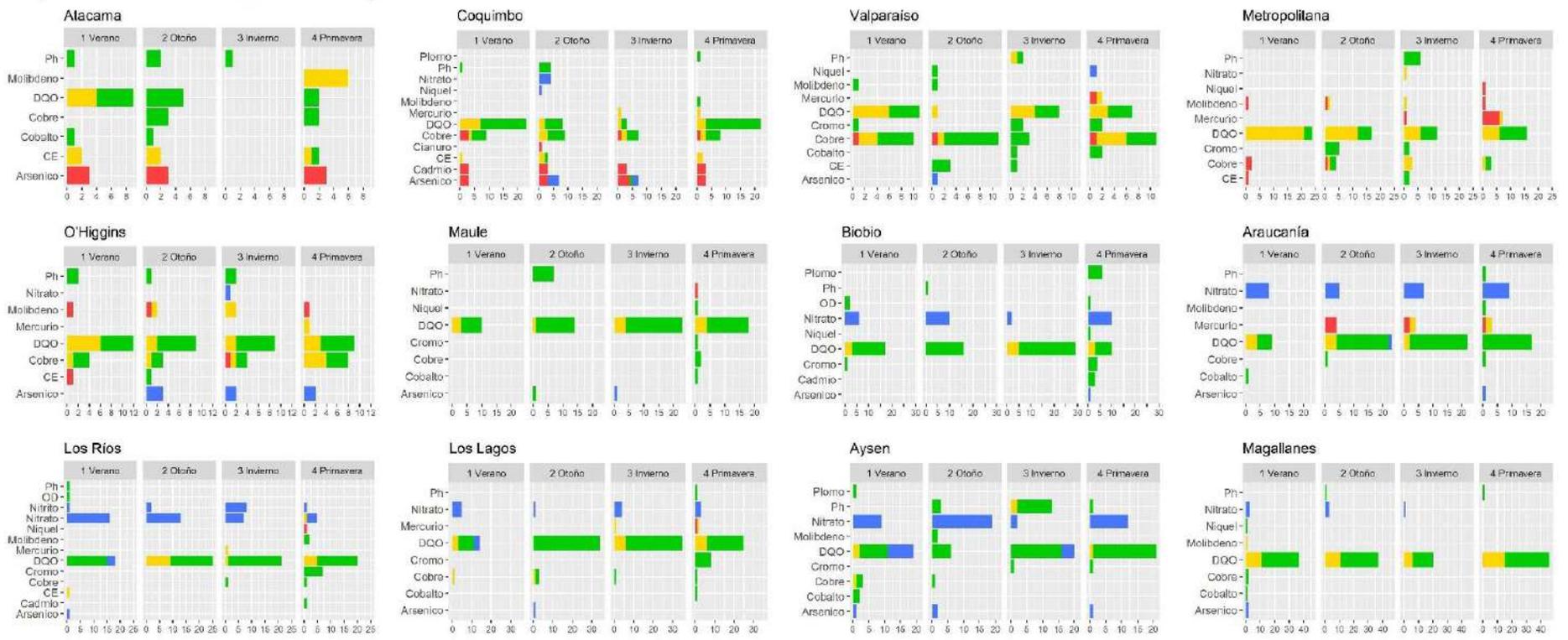


Figura 5. Conteo de estaciones de acuerdo a la clasificación del ICAS por Región y trimestre del periodo 2011 - 2016



Número de estaciones DGA donde el ICAS fue determinado por cada parámetro en cada región

Figura 6. Conteo de parámetros determinantes en el cálculo del ICAS por región del periodo 2006-2011.

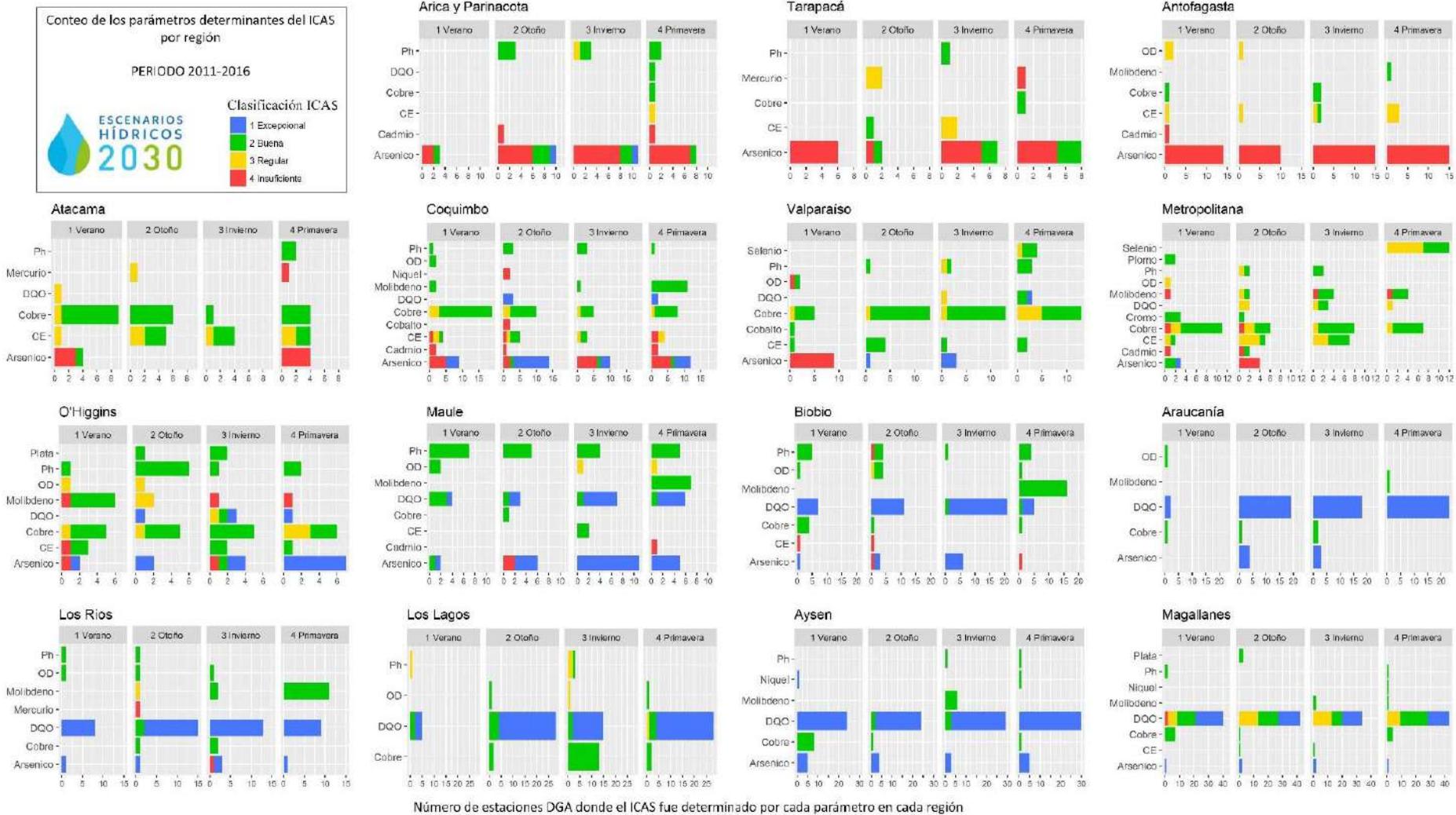


Figura 7. Conteo de parámetros determinantes en el cálculo del ICAS por región del periodo 2011-2016.

A diferencia de lo que ocurre con otros indicadores, el ICAS tiene una representatividad territorial a nivel nacional, dada la distribución de estaciones de monitoreo DGA utilizadas en el estudio (Figura 3). Sin embargo, en algunas regiones -como la de Atacama y la de Magallanes- se cuenta con pocas estaciones que cumplan con los criterios metodológicos y además están concentradas en algunas cuencas, por lo que no permiten visualizar la calidad del agua en la mayoría de las cuencas de la región.

En términos nacionales, se puede observar que en las regiones del norte, principalmente Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta se caracterizan por poseer una tendencia generalizada a los bajos niveles de calidad de agua, independiente de la época del año, domina una calidad insuficiente, lo que está fuertemente relacionado al alto contenido de arsénico (figuras 4 y 5).

Cabe destacar que la región de Antofagasta es la que presenta peor calidad de acuerdo al ICAS, situación que se asocia a los altos niveles de arsénico. Estos registros están principalmente asociados al río Loa y a la cuenca del Salar de Atacama en menor medida. La situación presenta una leve mejoría en el periodo 2011-2016, ya que si bien las estaciones que registran una calidad insuficiente se mantienen relativamente constantes debido al alto contenido de arsénico, se da un alza en las estaciones que registran una buena calidad, principalmente en la cuenca del río Loa.

En la región de Atacama comienza a mejorar la calidad del agua, además de ser la primera de esta zona en contar con una variabilidad más notoria respecto a las distintas épocas del año. Las calidades más bajas se encuentran en verano y primavera, principalmente en el periodo 2006-2011, con una calidad insuficiente relacionada al contenido de arsénico, todas en la cuenca endorreica entre Frontera y Vertiente del Pacífico.

En cuanto a la región de Coquimbo, durante el periodo 2006-2011 hay alrededor de 8 estaciones (de cerca de 40) con calidad insuficiente, independiente de la época del año, relacionado a los niveles de arsénico, cadmio y cobre, todas ellas en la parte alta de la cuenca del Río Elqui; en cambio la región de Valparaíso, en el mismo periodo, se caracteriza por contar con la mayoría de las estaciones, independiente de la época del año, con una buena calidad. Por otro lado las peores calidades se dan en verano y primavera, asociado a la DQO, cobre y mercurio.

Para la Región Metropolitana, en igual periodo, la calidad regular está asociada en todas las épocas del año a la DQO como parámetro principal, mientras que la calidad insuficiente está relacionada principalmente al mercurio y cobre para el periodo 2006-2011 y al arsénico, cobre, cadmio y molibdeno en el periodo 2011-2016, la mayoría de ellas asociadas al río Mapocho (salvo una estación que pertenece al estero Pangué).

En la región de O'Higgins predominan las estaciones con buena calidad. Existe una estación con calidad insuficiente desde otoño a primavera y 2 en verano, asociadas al alto

contenido de molibdeno, las cuales pertenecen al estero Alhué (cuenca del río Carén) y al río Cachapoal en invierno.

En general en la regiones de la zona central, el periodo 2011-2016 presenta una mejora respecto al periodo anterior, salvo en la región de Valparaíso en la época de verano, donde la calidad clasificada como insuficiente aumenta de 1 a 10 estaciones, producto del aumento del contenido de arsénico, y en la Metropolitana en la época de otoño, donde hay un aumento en las estaciones (de 2 a 6) que registran una calidad insuficiente producto del mismo parámetro, de las cuales 5 se encuentran en el río Mapocho y 1 en el río Maipo.

La zona sur del país, desde el Maule hasta Magallanes, tiene una clara tendencia en este lapso a presentar una dominancia de buena calidad en el periodo 2006-2011, pasando a una calidad excepcional en el 2011-2016 (figuras 4 y 5).

Dentro de los registros de calidad insuficiente, se encuentra la región del Maule, con un único registro asociado al nitrato, el cual se encuentra en primavera en la estación río Teno, antes junta Mataquito.

Otra región que posee calidad insuficiente en periodo 2006-2011 es la Araucanía, asociados al contenido de mercurio, los que alcanzan su máximo en otoño con 4 registros, en los ríos Cholchol, Muco, Pucón y Donguil. Por su parte, la región de Los Lagos posee 1 solo registro de calidad insuficiente, que se encuentra en primavera y está asociado al contenido de mercurio en el río Bueno.

En términos de variación de un periodo a otro, la tendencia general es a que exista una mejora en el periodo 2011-2016 respecto al periodo anterior, salvo con algunas excepciones como la región del Biobío y Maule, en donde aparecen estaciones con registros de calidad insuficientes, con un caso en verano por el CE, 3 casos en otoño por arsénico, CE y ph, y 1 caso en primavera por arsénico, los que se ubican en los ríos Biobío, Chillán y Ñuble.

6.2 Aplicación ICA a Nivel Regional

El ICAS es analizado a continuación a nivel regional con el fin de visualizar en detalle la calidad del agua en las distintas estaciones de monitoreo y además identificar aquellos parámetros que más inciden en la calidad de la misma. La aplicación se realiza para los dos quinquenios analizados y por estación del año (ver figuras 4:7).

6.2.1 ICAS Región de Arica y Parinacota

Esta Región se caracteriza por poseer una tendencia generalizada a los bajos niveles de calidad de aguas superficiales, independiente de la época del año que se mire (Figura 8). En el periodo 2006-2011 más de la mitad de las mediciones se encuentran clasificadas como insuficientes, debido principalmente a los altos niveles de arsénico, siendo el caso más crítico en invierno, donde 10 de las 15 estaciones presentan dicha calidad. La calidad



insuficiente está relacionada a la cuenca del Río Lluta, a la cuenca del Río Camarones y a la cuenca Altiplánica. La siguiente categoría más representada corresponde a la calidad regular debido a la CE, las cuales se concentran en la cuenca Altiplánica. Por otro lado, en verano es donde se presenta la mejor situación, al haber 3 estaciones que presentan una buena calidad en la cuenca Altiplánica, mismo cifra que las de calidad insuficiente, no obstante, es importante mencionar que en verano hay 8 registros menos que en las otras épocas, siendo menos representativa la muestra.

La situación mejora levemente en el periodo 2011-2016, ya que si bien las estaciones que registran una calidad insuficiente se mantienen relativamente constantes debido al alto contenido de arsénico, principalmente en la cuenca del río Lluta, se da un alza en las estaciones que registran una buena calidad, principalmente en la cuenca Altiplánica, e incluso aparecen algunas estaciones con una calidad excepcional en la cuenca costera, lo que se debe a una disminución del contenido de arsénico y CE.

No obstante, hay algunas situaciones que pueden estar afectando los resultados del ICAS y su aparente mejora. En esta región se da que el cromo y el nitrato dejan de ser medidos de un periodo a otro, sin embargo estos presentaron bajas concentraciones en el periodo 2006-2011, no siendo determinantes en el cálculo del ICAS. Además algunas estaciones disminuyeron sus registros de un periodo a otro producto de una variación en su límite de detección, correspondiendo al cobalto, molibdeno y plomo (Tabla 28), sin embargo estos en una sola estación contaron con niveles de concentración elevados en el periodo anterior, y de todos modos no fueron determinantes del ICAS.

Tabla 28. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Arica y Parinacota. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	198	> 0.01	18	5	< 0.01 < 0.04	105 85	> 0.061	1	1
Molibdeno	< 0.05 < 0.01	201 14	> 0.05	3	1	< 0.05	104		0	0
Plomo	< 0.05 < 0.03	189 14	> 0.05	12	4	< 0.07 < 0.05	125 39	> 0.222	2	2

Cabe detallar que en la Figura 8 existen algunas estaciones que debido a su cercanía con otras no alcanzan a ser visualizadas en la cartografía.

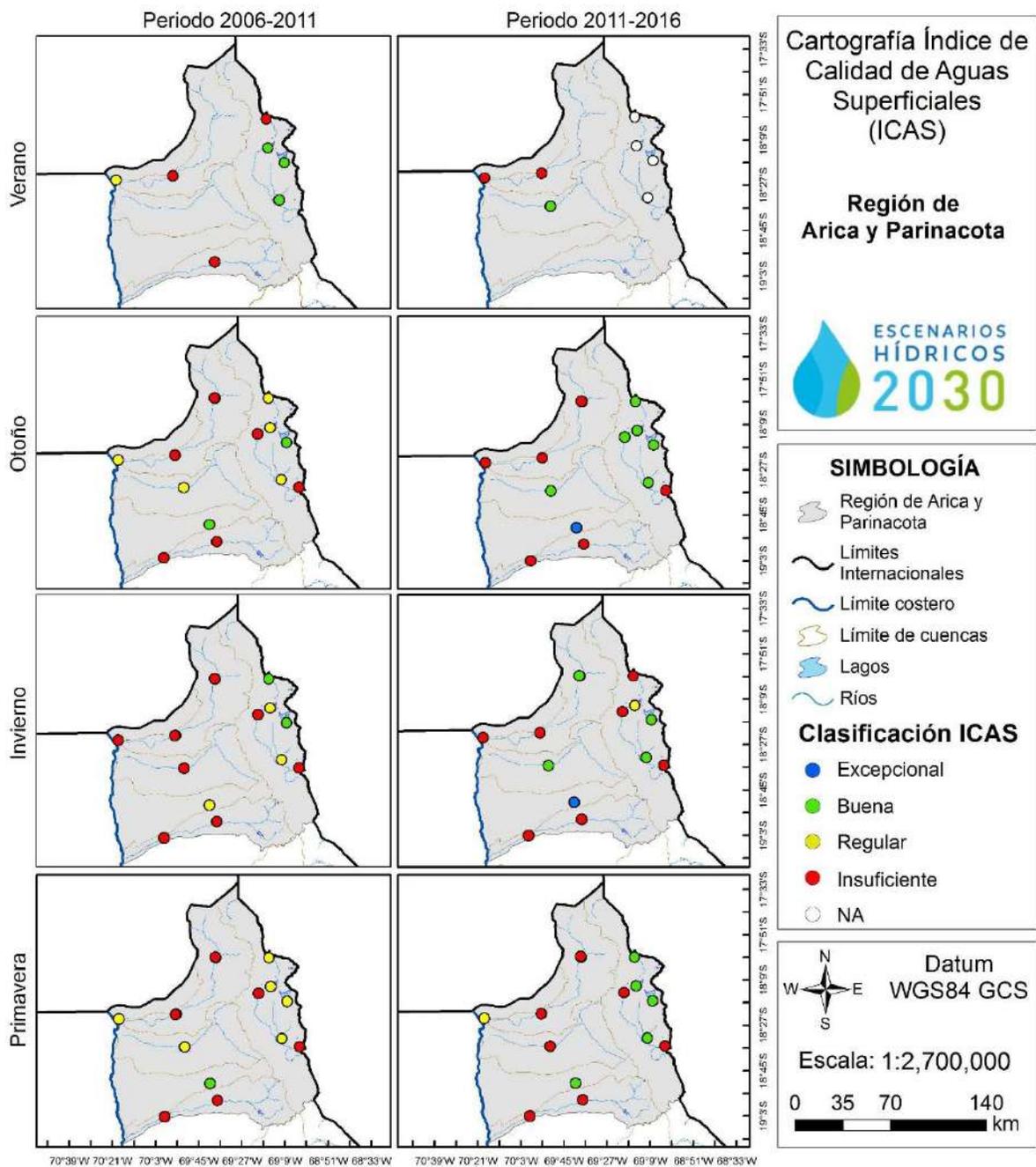


Figura 8. ICAS Región de Arica y Parinacota.

6.2.2 ICAS Región de Tarapacá

Esta región se caracteriza por presentar una tendencia general hacia un nivel insuficiente de calidad de aguas (Figura 9), al contar con 5 estaciones en esta categoría en verano e invierno, 4 en otoño y 6 en primavera, situación que se asocia a los altos niveles de arsénico. La calidad insuficiente se encuentra principalmente en el río Cancosa y río

Cariquima de la cuenca Altiplánica y en el río Aroma y río Coscaya en la cuenca de la Pampa del Tamarugal. Por su parte la calidad regular es la segunda más representativa en este periodo, con 1 estación en verano, 2 en otoño, 4 en invierno y 3 en primavera, las que se concentran en la cuenca Altiplánica, la cuenca de la Pampa del tamarugal. Existen también 2 estaciones catalogadas en buena calidad en la cuenca Altiplánica, 1 en otoño y otra en primavera.

En el periodo 2011-2016 se puede observar una leve mejora, donde se ve un aumento en las estaciones con una buena calidad, con 4 registros en primavera, 3 en invierno y 2 en otoño producto de una disminución del arsénico, la mayoría en la cuenca Altiplánica y otras en el río Loa, mientras que en verano existe un aumento de los registros con calidad insuficiente, pasando de 5 a 6 de un periodo a otro, registro extra que se ubica en la Pampa del Tamarugal.

En esta región hay dos parámetros que dejan de ser medidos de un periodo a otro, correspondientes al cromo y nitrato, sin embargo estos cuentan con valores de normalización de 2 y 1 respectivamente, equivalentes a una calidad excepcional y buena, y en ninguno de los casos entra a ponderar en el ICAS, ya que el arsénico es el parámetro que más determina la calidad insuficiente. También se da el caso que 4 parámetros modifican su límite de detección de un periodo a otro, los cuales son el cobalto, mercurio, níquel y plomo (Tabla 29), los cuales ven disminuido el número de mediciones de un periodo a otro, salvo en el caso del mercurio, el cual paso de ser registrado en 2 estaciones a 4 en el periodo 2011-2016, siendo además el único de los 4 parámetros que había registrado altas concentraciones el periodo 2006-2011.

Tabla 29. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Tarapacá. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01 < 0	138	> 0.01	11	2	< 0.01 < 0.04	89 57		0	0
Mercurio	< 0.001	98	> 0.001	35	2	< 0.002 < 0.001	85 53	> 0.001	8	4
Níquel	< 0.02 < 0.03	136 1	> 0.02	7	2	< 0.05 < 0.02	87 29		0	0
Plomo	< 0.05 < 0.03	143 2	> 0.06	4	3	< 0.07 < 0.05	87 29		0	0

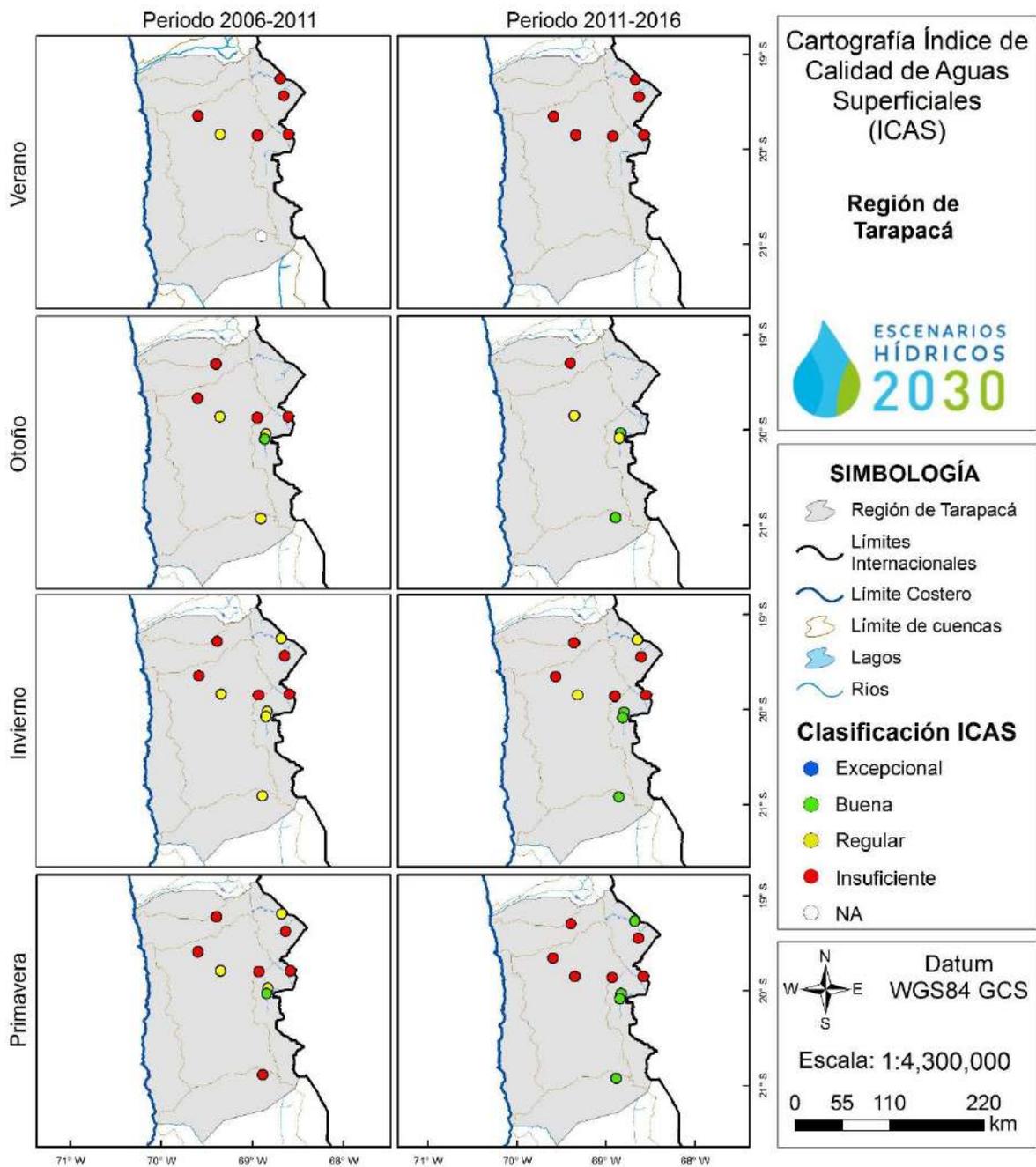


Figura 9. ICAS Región de Tarapacá

6.2.3 ICAS Región de Antofagasta

La Figura 10 muestra los resultados del ICAS en la región. Esta es la región con peor índice de calidad de agua, con una calidad insuficiente en alrededor de 15 estaciones de 20 durante todo el año, donde existe una relación constante entre la calidad medida en las distintas épocas del año. Estos registros están fuertemente asociados al Río Loa y en menor

medida a la cuenca del Salar de Atacama. Al igual que en las regiones vistas anteriormente, el arsénico resulta ser el parámetro determinante en la calidad del agua, al ser el responsable de que esta sea insuficiente en prácticamente todos los casos. Por su parte los registros de calidad irregular se encuentran entre 2 en otoño e invierno y 4 en primavera, asociado principalmente a la CE en el río Loa, la cuenca del Salar de Atacama y la quebrada Caracoles. Los registros de buena calidad son escasos y se encuentran en las cuencas costeras, quebrada Caracoles y río Loa, con 1 registro en verano y 2 en otoño e invierno.

No obstante, se puede ver una leve mejora en el periodo 2011-2016, al existir un aumento de las estaciones con buena calidad en invierno (pasando de 2 a 4) y primavera (pasando de 0 a 2), asociadas principalmente al río Loa y la quebrada Caracoles, mientras que en verano no existe una variación de un periodo a otro. Por su parte, el otoño destaca por presentar una disminución de las estaciones de un periodo a otro, pasando de 20 a 13. Los registros de calidad insuficiente en este periodo siguen estando en su mayoría relacionadas al alto contenido de arsénico.

En esta región hay 3 parámetros medidos durante el periodo 2006-2011 que dejan de ser medidos en el periodo 2011-2016, correspondientes al cromo, nitrato y nitrito. Estos parámetros en la mayoría de los casos no son determinantes en la clasificación insuficiente del ICAS, ya que el arsénico es el mayor responsable de dicha calidad, solo existe un caso donde la calidad del agua tiene una clasificación insuficiente producto del arsénico y del nitrito (ambos valores normalizados iguales a 4), en la estación río Loa en Yalquincha. Además hay 3 parámetros que aumentan su límite de detección de un periodo a otro, correspondientes al mercurio, níquel y plomo (Tabla 30), razón por la cual el número de estaciones que registraron estos parámetros disminuyó de un periodo a otro, lo cual puede estar afectando la aparente mejora de un periodo a otro, ya que el plomo y el mercurio habían registrado altas concentraciones el periodo 2006-2011.

Tabla 30. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Antofagasta. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Mercurio	< 0.001	198	> 0.001	64	2	< 0.002 < 0.001	129 92		0	0
Níquel	< 0.02	282	> 0.01	34	6	< 0.05 < 0.02	131 52	> 0.059	1	1
Plomo	< 0.05 < 0.03 < 0.01	256 19 12	> 0.01	25	12	< 0.07 < 0.05 < 0.06	116 45 7	> 0.11	1	1

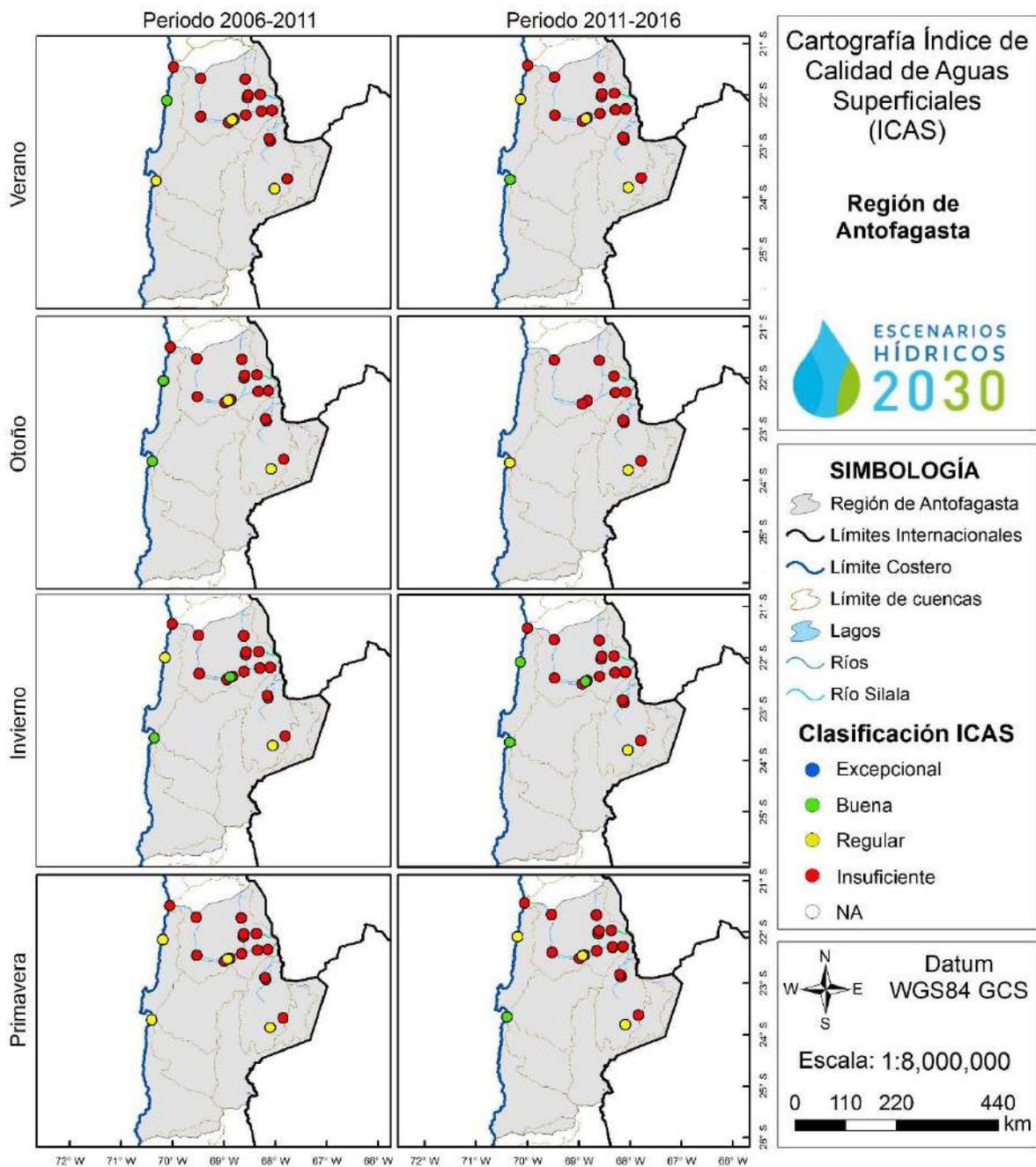


Figura 10. ICAS Región de Antofagasta

6.2.4 ICAS Región de Atacama

La Figura 11 muestra los resultados del ICAS en la región, en la que se puede ver que comienza a mejorar la calidad del agua respecto a las regiones anteriores, además de ser la primera en contar con una variabilidad más notoria respecto a las distintas épocas del año. Las calidades más bajas se encuentran en verano y primavera, principalmente en el

periodo 2006-2011, al contar con 3 estaciones cada una con una calidad insuficiente relacionada al contenido de arsénico, todas en la cuenca Endorreica entre Frontera y Vertiente del Pacífico, y 6 con calidad regular asociada al DQO y CE en verano y 7 con calidad regular en primavera debido al molibdeno y CE, registros que están principalmente asociados al Río Copiapó. En este periodo la mejor calidad se presenta en otoño, donde 11 estaciones registran una buena calidad en el río Huasco y río Copiapó. En invierno existe una sola medición, que si bien está clasificada en una buena calidad, no permite inferir una mejora por la baja representatividad.

El periodo 2011-2016 presenta una mejora respecto al periodo anterior en todas las épocas del año. En verano se mantienen 3 estaciones con una calidad insuficiente producto del arsénico en la cuenca Endorreica entre Frontera y Vertiente del Pacífico, mientras que las estaciones con calidad regular disminuyen a 3 (2 en el río Huasco y 1 en el río Copiapó), siendo reemplazadas por una buena calidad. En otoño hay 9 estaciones con buena calidad (4 en el río Copiapó y 5 en el río Huasco) y 3 con calidad regular producto del CE y mercurio (2 en el río Huasco y 1 en el río Copiapó), mientras que las de calidad insuficiente desaparecen. En invierno hay un alza en las estaciones con registro medidos, siendo estas en su mayoría de buena calidad (4 de 5 estaciones). Finalmente en primavera ocurre un aumento de las estaciones con calidad insuficiente (de 3 a 5) relacionada al contenido de mercurio en el río Huasco y al arsénico en el río Copiapó. Nuevamente ocurre que debido a la cercanía de algunas estaciones no se permiten visualizar todas ellas en el mapa.

En esta región el cromo y el nitrato dejan de ser medidos de un periodo a otro, aunque no son parámetros responsables del ICAS el periodo anterior. Además hay 4 parámetros que ven modificado su límite de detección de un periodo a otro, correspondientes al cobalto, molibdeno, níquel y plomo (Tabla 31), por lo que vieron reducido su número de registros de un periodo a otro, salvo en el caso del plomo, el cual pese a este aumento pasó de ser registrado en 1 estación a 2 en el periodo siguiente. Pese a esta disminución de registros, el molibdeno fue el único parámetro que en el periodo 2006-2011 presentó altas concentraciones, siendo el parámetro determinante de una calidad regular en 6 estaciones.

Tabla 31. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Atacama. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	206	> 0.001	28	4	< 0.01 < 0.04	112 70		0	0
Molibdeno	< 0.05 < 0.01	201 17	> 0.02	16	7	< 0.05	111		0	0
Níquel	< 0.02 < 0.01	208 5	> 0.01	21	1	< 0.05 < 0.02	124 28		0	0
Plomo	< 0.05	202	> 0.01	5	1	< 0.07	107	> 0.078	2	2

< 0.03	14	< 0.05	29
< 0.01	13		

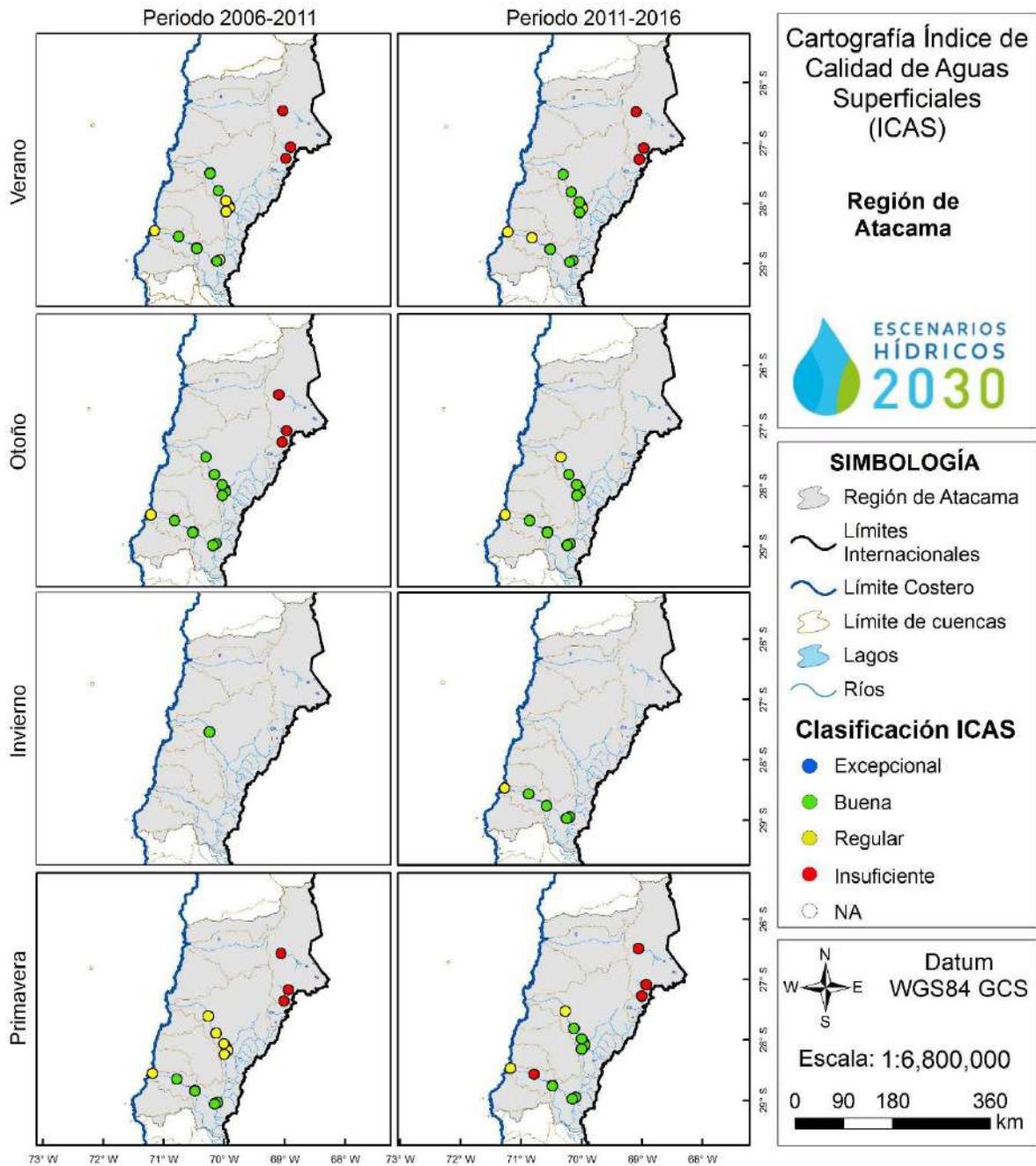


Figura 11. ICAS Región de Atacama

6.2.5 ICAS Región de Coquimbo

La Figura 12 muestra los resultados del ICAS en la región. En el periodo 2006-2011 hay alrededor de 9 estaciones con calidad insuficiente, independiente de la época del año, relacionado a los niveles de arsénico, cadmio y cobre, todas ellas en la parte alta de la cuenca del Río Elqui. Destacan las estaciones con buena calidad, principalmente en verano y primavera, épocas en las cuales son más de la mitad (22 y 26 respectivamente), donde la cuenca del Río Choapa es la con más registros en esta categoría. En otoño e invierno hay estaciones con calidad excepcional (9 y 2 respectivamente), siendo la mayoría de los registros de la cuenca del Río Limarí, seguido por el Río Choapa.

En el periodo 2011-2016 existe una mejora respecto al periodo anterior, al haber estaciones con calidad excepcional en todas las épocas del año, principalmente en la cuenca del Limarí y la cuenca del Choapa. No obstante, en primavera existe un aumento de 3 estaciones con calidad insuficiente producto del arsénico, dos de las cuales pertenecen a la cuenca del Río Limarí. La mayoría de los registros con calidad insuficiente se encuentran en la parte alta del río Elqui, mientras que los registros de calidad regular se asocian al río Elqui y a la cuenca costera.

Existen 3 parámetros que dejan de ser medidos en el periodo 2011-2016, correspondientes al cromo, nitrato y nitrito, sin embargo solo el nitrito tiene un valor normalizado igual a 4 en el periodo 2006-2011, que corresponde al único registro de este parámetro en esta región, mientras que el cromo y el nitrato en el mismo periodo poseen bajas concentraciones, por lo que no afectan en el cálculo del ICAS. Además hay 3 parámetros que ven disminuidos sus registros de un periodo a otro producto de un aumento en los límites de detección, correspondientes al mercurio, níquel y plomo (Tabla 32), lo que pudo tener un efecto sobre la mejora aparente de calidad del periodo 2011-2016 respecto al periodo anterior, ya que el mercurio fue un parámetro determinante de una calidad regular del ICAS en 2 estaciones en el periodo 2006-2011. Por su parte el níquel y plomo presentaron concentraciones bajas en el periodo 2006-2011, no entrando en ningún caso a ser parte del cálculo del ICAS en aquellos registros clasificados como regular o insuficiente.

Tabla 32. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Coquimbo. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Mercurio	< 0.001 < 0	759 7	> 0.001	177	3	< 0.002 < 0.001 < 0.3	501 331 11	> 0.001	3	0
Níquel	< 0.02 < 0.01	748 39	> 0.01	168	38	< 0.05 < 0.02 < 0.01	473 136 11	> 0.05	47	16

Plomo	< 0.05	876	> 0.01	22	6	< 0.07	468	0	0
	< 0.01	50				< 0.05	136		
	< 0.03	39				< 0.01	11		

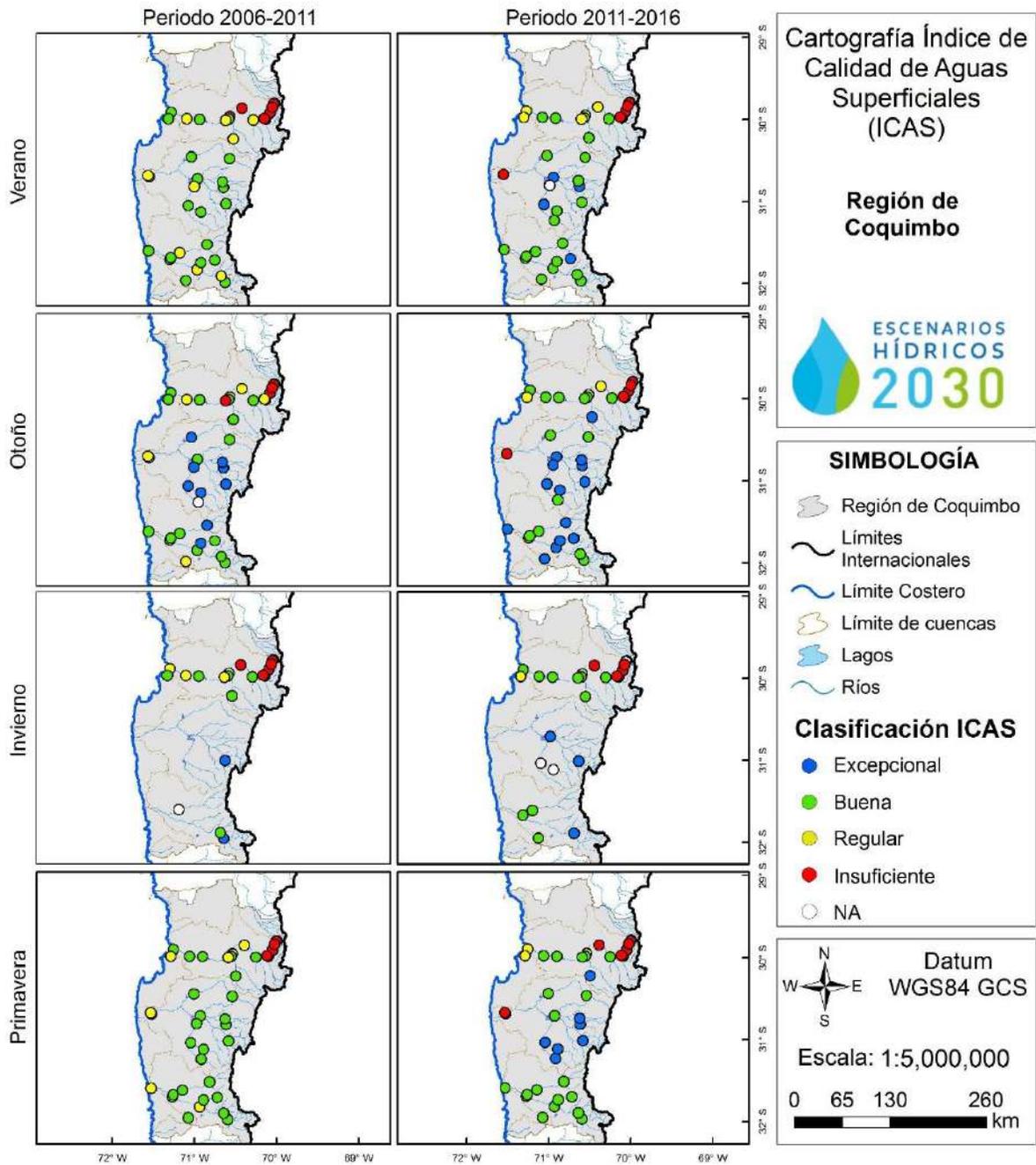


Figura 12. ICAS Región de Coquimbo.

6.2.6 ICAS Región de Valparaíso

La Figura 13 muestra los resultados del ICAS en la región. El periodo 2006-2011 se caracteriza por contar con la mayoría de las estaciones con una buena calidad, con 13 registros en verano y primavera, 14 en otoño y 12 en invierno, la mayoría en el río Aconcagua, con algunos casos en Ligua y Petorca. Lo siguen los registros de calidad regular, con 9 en verano y primavera, 2 en otoño y 5 en invierno, con la mayoría ubicados en el río Aconcagua y unos pocos en Petorca y Ligua, asociados al DQO y cobre principalmente, con una estación asociada al mercurio. También hay 1 estación con calidad insuficiente en verano y otoño asociados al cobre y 2 estaciones en primavera asociadas al cobre y mercurio, todas ellas en el río Aconcagua.

El periodo 2011-2016 presenta una mejora respecto al periodo anterior, salvo en verano donde la calidad insuficiente aumenta de 1 a 10 estaciones producto del alto contenido de arsénico, concentrados en el río Aconcagua. Por su parte, invierno y primavera son las épocas donde la mejora es más evidente, lo que se da producto de una disminución en los niveles de cobre, parámetro determinante de esta categoría en la región, haciendo que aumenten las estaciones con buena calidad e incluso que aparezcan estaciones con calidad excepcional en río Ligua (2 registros), Petorca y Aconcagua (con 1 registro cada una).

En esta región hay 2 parámetros que dejan de ser medidos de un periodo a otro, correspondientes al cromo y nitrato, sin embargo en el periodo 2006-2011 sus concentraciones fueron bajas y no determinaron el ICAS en las categorías regular e insuficiente. Además 4 parámetros disminuyeron su número de registros producto de una variación de su límite de detección de un periodo a otro, correspondiendo al cobalto, mercurio, molibdeno y níquel (Tabla 33). De los anteriores solo el mercurio y el cobalto fueron parámetros que determinaron una calidad regular en el periodo 2006-2011, los otros 2 contaron con una baja concentración.

Tabla 33. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Valparaíso. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	292	> 0.01	40	8	< 0.01	160	> 0.012	1	1
	< 0.001	15				< 0.04	1			
Mercurio	< 0.001	278	> 0.001	43	2	< 0.002	134		0	0
						< 0.001	108			
Molibdeno	< 0.05	297	> 0.02	11	3	< 0.05	117	> 0.082	1	1
	< 0.01	19								
	< 0.017	16								
	< 0.02	1								
Níquel	< 0.02	276	> 0.01	35	8	< 0.05	129	> 0.02	3	3

< 0.003	16	< 0.02	51
< 0.01	12	< 0.07	8
< 0.05	1		

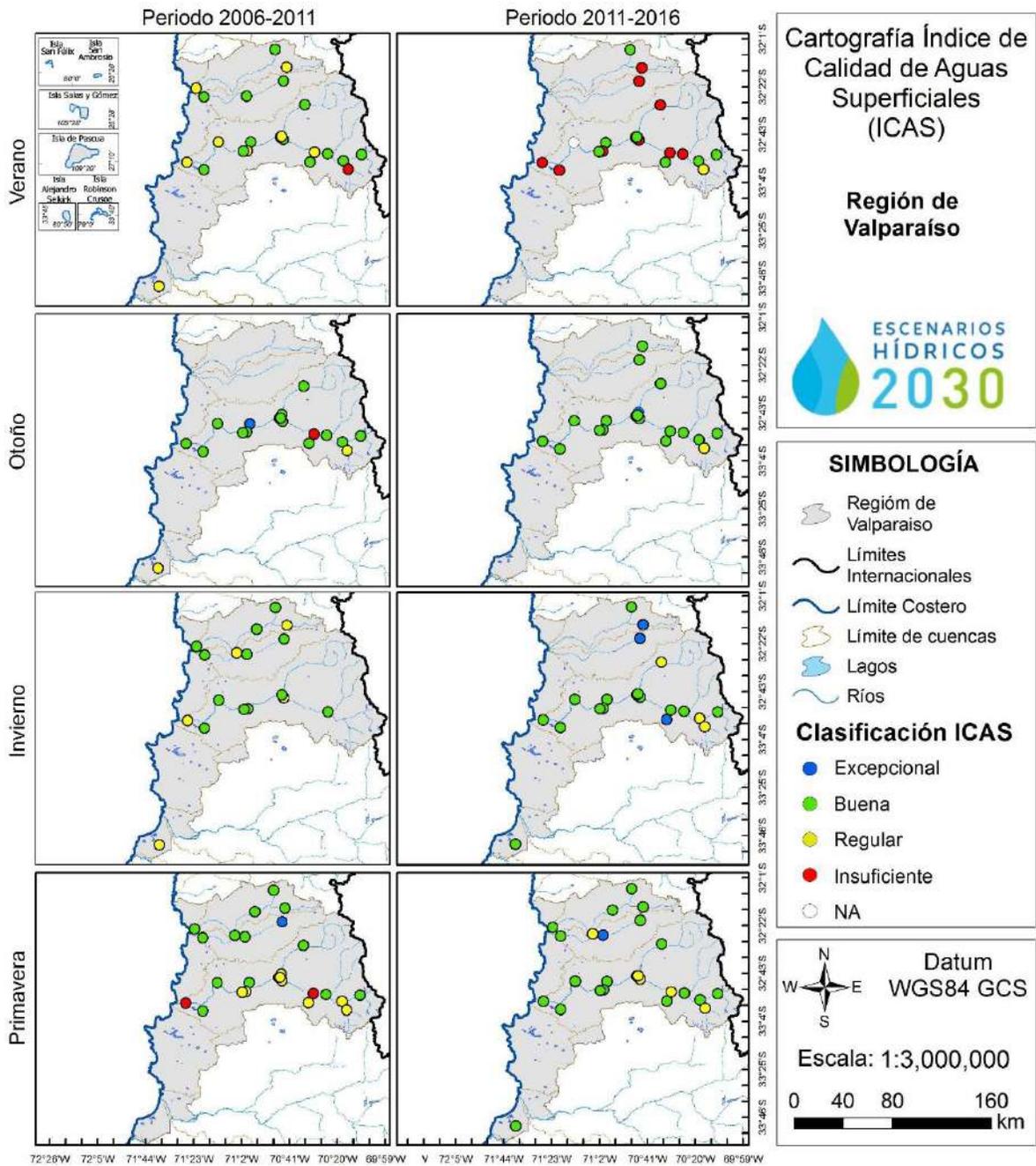


Figura 13. ICAS Región de Valparaíso

6.2.7 ICAS Región Metropolitana

La Figura 14 muestra los resultados del ICAS en la región. En el periodo 2006-2011 destaca una calidad regular, la que se ve acentuada en verano, al contar con 21 estaciones de 28 en esta categoría asociado a la DQO gracias a la mayor escorrentía que se produce en esas épocas por el derretimiento de nieve, las que están distribuidas equitativamente entre el río Maipo y Mapocho. Por otro lado, en invierno es la época que presenta más estaciones con buena calidad (16 de 28), y solo 1 con calidad insuficiente relacionada con el mercurio en el Río Maipo. En este periodo, la calidad regular está asociada en todas las épocas del año al DQO como parámetro principal. En primavera es donde se dan más estaciones con calidad insuficiente con el mercurio como parámetro determinante en 7 de 9 casos, las cuales pertenecientes al Río Mapocho, salvo una que pertenece al estero Pangué.

En el periodo 2011-2016 hay una mejora en la calidad respecto al periodo anterior, salvo en otoño, donde hay un aumento en las estaciones que registran una calidad insuficiente (de 2 a 6) producto del contenido de arsénico, de las cuales 5 se encuentran en el río Mapocho y una en el río Maipo. En verano es la época del año que presenta un mayor aumento en la calidad del agua, con 16 estaciones con una buena calidad y 1 con calidad excepcional, todas en el río Maipo. Por su parte, en primavera hay una disminución de estaciones con calidad insuficiente y un aumento de las con buena calidad, todas ellas en el río Maipo.

No obstante, en esta región hay 4 parámetros que debido al aumento de sus límites de detección ven considerablemente disminuidos sus registros de un periodo a otro. Estos corresponden al cobalto, cromo, mercurio y plomo (Tabla 34), sin embargo el único de estos parámetros que determina una calidad insuficiente o regular es el mercurio, los otros 3 parámetros cuentan con concentraciones más bajas.

Tabla 34. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región Metropolitana. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01 < 0.001	355 12	> 0.001	84	17	< 0.01 < 0.04	256 172	> 0.01	5	4
Cromo	< 0.01 < 0.002	210 23	> 0.01	104	28	< 0.01 < 0.03 < 0.05	26 23 18		0	6
Mercurio	< 0.001 < 1	318 1	> 0.001	95	8	< 0.002 < 0.001	235 183		0	0
Plomo	< 0.05 < 0.04 < 0.01	380 23 18	> 0.01	27	8	< 0.07 < 0.05 < 0.005	226 65 21	> 0.068	5	4

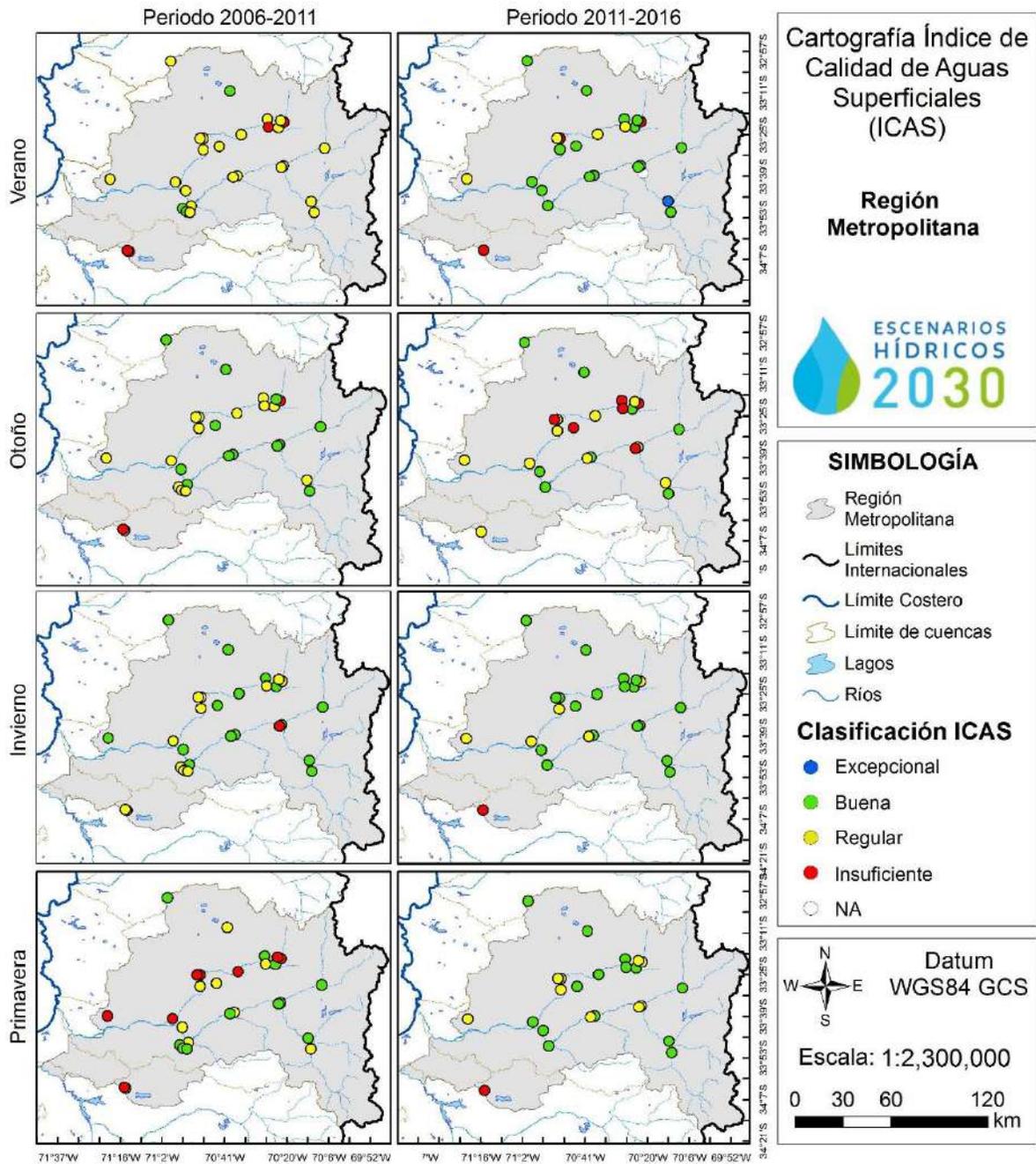


Figura 14. ICAS Región Metropolitana

6.2.8 ICAS Región del General Libertador Bernardo O'Higgins

La Figura 15 muestra los resultados del ICAS en la región. En el periodo 2006-2011 predominan las estaciones con buena calidad, habiendo 11 estaciones en esta categoría en verano, otoño e invierno y 10 en primavera, la gran mayoría en la cuenca del río Rapel.

La calidad excepcional se registra en otoño, invierno y primavera con 3, 3 y 2 estaciones respectivamente, las que se distribuyen entre las cuencas del río Rapel y río Maipo. Existe 1 estación con calidad insuficiente desde otoño a primavera producto del molibdeno y cobre y 2 en verano producto del molibdeno y CE, las cuales pertenecen al estero Alhue y al río Coya en invierno. La calidad regular cuenta con 7 registros en verano, 4 en otoño, 5 en invierno y 8 en primavera, todos pertenecientes a la cuenca del río Rapel y asociados a la DQO, molibdeno y cobre.

En el periodo 2011-2016 se ve una mejora en la calidad en todas las épocas del año, siendo más evidente en primavera, al haber 8 estaciones con calidad excepcional. Las estaciones con buena calidad se mantienen relativamente estables de un periodo a otro. Las estaciones con calidad insuficiente se encuentran en verano, invierno y primavera, y se asocia principalmente al molibdeno, donde estas siguen siendo las mismas estaciones del periodo anterior, más la adición de una estación ubicada en el estero Codegua en la Leonera en verano y estero Alhue en Quilamuta en invierno.

En esta región hay 2 parámetros que dejan de ser medidos de un periodo a otro, siendo estos el cromo y el nitrato, los cuales en todo caso presentan concentraciones bajas y no determinan calidades regulares o insuficientes en el periodo 2006-2011. Además 3 parámetros disminuyen sus registros de un periodo a otro producto de un aumento en su límite de detección, los que corresponden al cobalto, mercurio y níquel (Tabla 35), de los cuales el cobalto y mercurio presentan altas concentraciones en el periodo 2006-2011, incluso siendo parámetros determinantes del ICAS en calidades insuficientes y regulares.

Tabla 35. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de O'Higgins. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01 < 0	246	> 0.01	30	5	< 0.01 < 0.04	160 95	> 0.086	1	1
Mercurio	< 0.001	230	> 0.001	26	1	< 0.002 < 0.001	147 108	> 0	19	0
Níquel	< 0.02 < 0.01	219 14	> 0.01	32	5	< 0.05 < 0.02	162 53	> 0.034	1	1

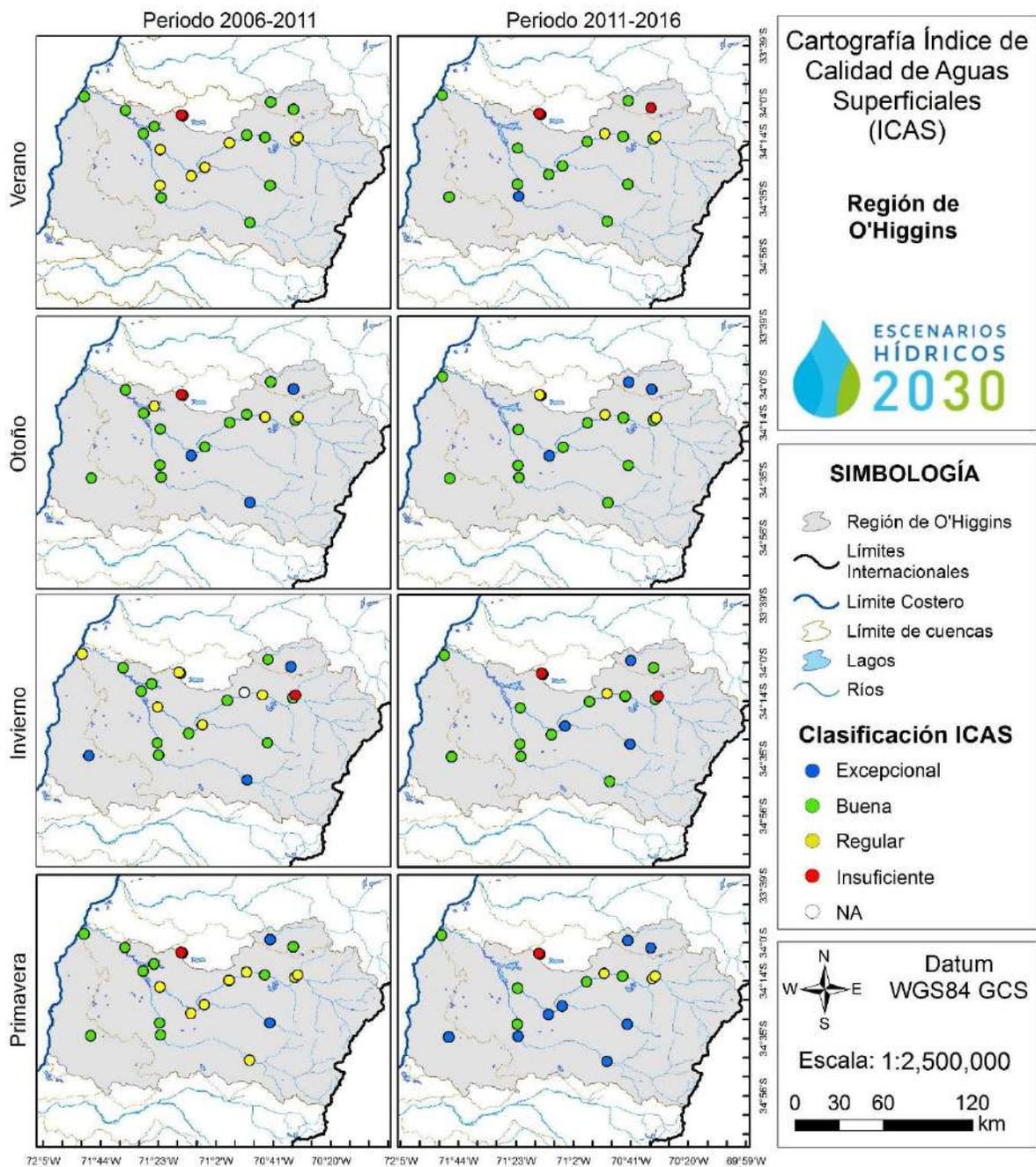


Figura 15. ICAS Región del General Libertador Bernardo O'Higgins.

6.2.9 ICAS Región del Maule

La Figura 16 muestra los resultados del ICAS en la región. En el periodo 2006-2011 esta región se encuentra ampliamente dominada por una buena calidad del agua, siendo en otoño la época con mejor calidad al contar con 21 estaciones en dicha categoría. Lo siguen los registros de calidad regular, habiendo 3 registros en verano, 1 en otoño y 4 en invierno

y primavera, todos ellos asociados a la DQO, y la mayoría pertenecientes a la cuenca del río Maule. Existe un único registro de calidad insuficiente, el cual se encuentra en primavera en la estación Río Lontue en Sagrada Familia, en la cuenca del río Mataquito.

El periodo 2011-2016 presenta un aumento de la calidad del agua respecto al periodo anterior, que ya contaba con buenos registros, donde la calidad regular e insuficiente son 2 en otoño en el río Longaví producto del arsénico y 1 en primavera por el contenido de cadmio en el mismo río. Destacan las épocas de invierno y primavera, al contar con una calidad excepcional en 17 y 10 estaciones respectivamente, la mayoría en la cuenca del río Maule.

En esta región hay 2 parámetros que dejan de ser medidos de un periodo a otro, siendo estos el cromo y el nitrato. El nitrato en el periodo 2006-2011 fue un parámetro determinante de una calidad insuficiente, mientras que el cromo presentó concentraciones más bajas que no determinaron el ICAS en ningún caso. Además hay 3 parámetros que disminuyeron sus registros de un periodo a otro, correspondiendo al cobalto, níquel y plomo (Tabla 36), sin embargo sus concentraciones fueron bajas en el periodo 2006-2011, no afectando al ICAS en las categorías regulares e insuficientes.

Tabla 36. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región del Maule. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	262	> 0.01	36	1	< 0.01	143		0	0
	< 0.005	24				< 0.04	117			
Níquel	< 0.02	231	> 0.01	36	13	< 0.05	146		0	0
	< 0.005	24				< 0.02	72			
	< 0.01	22								
Plomo	< 0.05	273	> 0.01	4	1	< 0.07	125		0	0
	< 0.01	45				< 0.05	86			

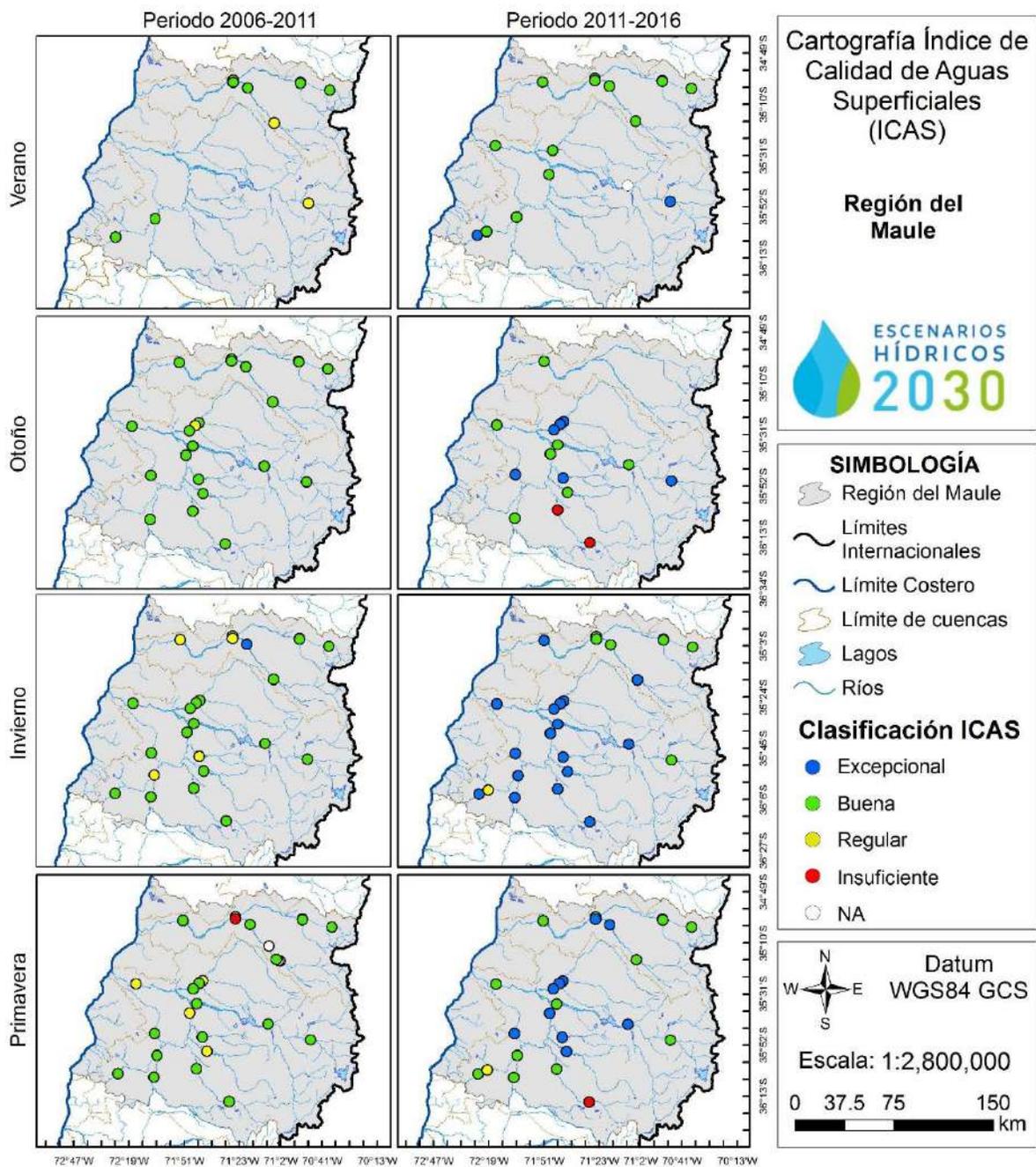


Figura 16. ICAS Región del Maule

6.2.10 ICAS Región del Biobío

La Figura 17 muestra los resultados del ICAS en la región. En el periodo 2006-2011 predominan las estaciones con registros de buena calidad de agua. Las épocas del año con mejor calidad corresponden a otoño y primavera, al contar con 10 y 11 estaciones con calidad excepcional respectivamente, la mayoría en el río Biobío y algunas en el río Itata.

Las estaciones que presentan una calidad regular se encuentran en el Río Itata principalmente, registrando además 2 en el Río Biobío, todas ellas con el DQO como parámetro determinante. No hay ningún registro de calidad insuficiente en este periodo.

Durante el periodo 2011-2016 hay una tendencia al aumento de las estaciones con registro de calidad excepcional, siendo más evidente en invierno, donde 28 de 30 estaciones se encuentran en esta categoría. No obstante, en este periodo aparecen estaciones con registros de calidad insuficientes, con 1 caso en verano por la CE, 3 casos en otoño por arsénico, CE y ph y 1 caso en primavera por arsénico, los que se ubican en los Ríos Biobío, Chillan y Ñuble.

En esta región el cromo y nitrato disminuyen considerablemente las mediciones de un periodo a otro, prácticamente no hay mediciones de estos parámetros en el periodo 2011-2016. Además hay 3 parámetros que disminuyen sus registros el periodo 2011-2016 producto de un aumento en sus límites de detección, lo que corresponden al cobalto, níquel y plomo (Tabla 37), sin embargo el periodo anterior presentaron concentraciones bajas que no determinaron calidades regulares o insuficientes.

Tabla 37. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región del Biobío. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	357	> 0.01	24	1	< 0.01	241		0	0
	< 0.005	47				< 0.04	177			
Níquel	< 0.02	330	> 0.01	17	3	< 0.05	225		0	0
	< 0.005	47				< 0.02	82			
	< 0.01	23								
Plomo	< 0.05	340	> 0.01	12	8	< 0.07	213		0	0
	< 0.01	61				< 0.05	93			
	< 0.02	11								

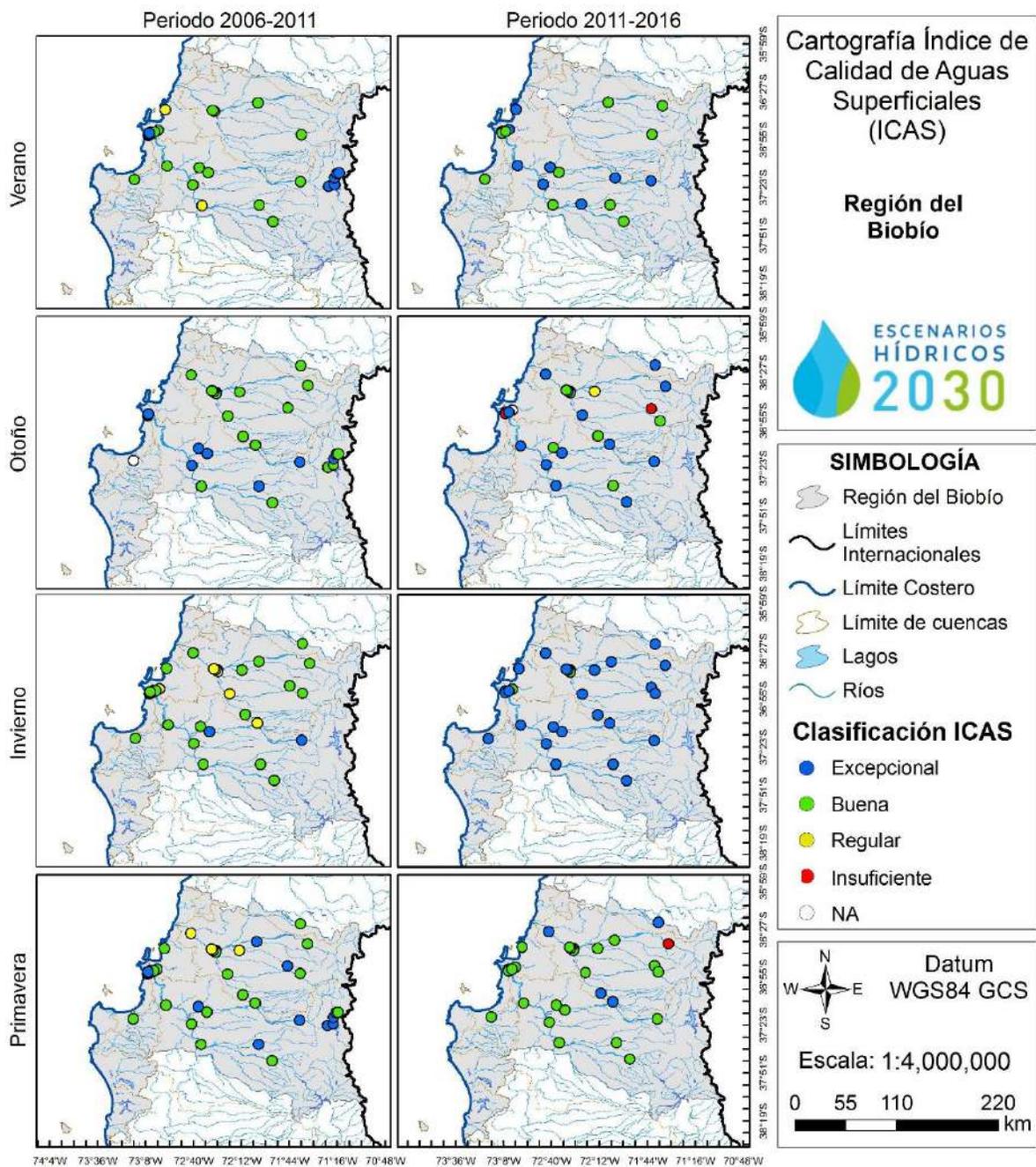


Figura 17. ICAS Región del Biobío

6.2.11 ICAS Región de la Araucanía

La Figura 18 muestra los resultados del ICAS en la región. Durante el periodo 2006-2011 dominan las estaciones con registros de buena calidad, con 19 estaciones en otoño y 20 en invierno y primavera. Lo siguen las estaciones con registro excepcional, alcanzando las 8 en verano, 6 en otoño, 7 en invierno y 10 en primavera, todo lo anterior ubicado en la

cuenca del río Tolten, río Imperial y río Biobío. Los registros de calidad insuficiente están todos asociados al contenido de mercurio y alcanzan su máximo en otoño con 4 registros, en los ríos Cholchol, Muco, Pucon y Donguil, mientras que los registros de calidad regular son 4 en verano, otoño e invierno y 2 en primavera, la mayoría asociadas a la DQO, pero con algunos casos asociados al mercurio, en las cuencas del río Imperial, río Biobío y río Tolten.

Durante el periodo 2011-2016 hay una notable mejora en los registros de calidad de agua, donde gran parte de estos presentan una calidad excepcional, con solo unos pocos registros con buena calidad. En este periodo no se registran estaciones con calidad regular o insuficiente. No obstante, en esta región hay 5 parámetros que ven disminuidos los registros el periodo 2011-2016 producto de un aumento en sus límites de detección, los que corresponden al cobalto, cobre, mercurio, molibdeno y níquel (Tabla 38), sin embargo el único de ellos que presentó altas concentraciones en el periodo 2006-2011 fue el mercurio, el cual determinó que varias estaciones fueran clasificadas como insuficiente y regular, las cuales en el periodo siguiente fueron clasificadas como excepcional. Además el cromo y nitrato dejaron de ser medidos durante el periodo 2011-2016, aunque ninguno de los dos presentó altas concentraciones el periodo anterior.

Tabla 38. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de La Araucanía. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01 < 0.005 < 0	337 28 1	> 0.01	7	1	< 0.01 < 0.04	206 139		0	0
Cobre	< 0.01 < 0.02 < 0.005	129 44 29	> 0.01	171	7	< 0.02	341	> 0.021	4	4
Mercurio	< 0.001	240	> 0.001	85	11	< 0.002 < 0.001	181 137	> 0.001		0
Molibdeno	< 0.05 < 0.005 < 0.01	316 28 24	> 0.045	4	3	< 0.05	174	> 0.11	1	1
Níquel	< 0.02 < 0.005 < 0.01	288 29 24	> 0.01	16	3	< 0.05 < 0.02	180 69	> 0.05	1	0

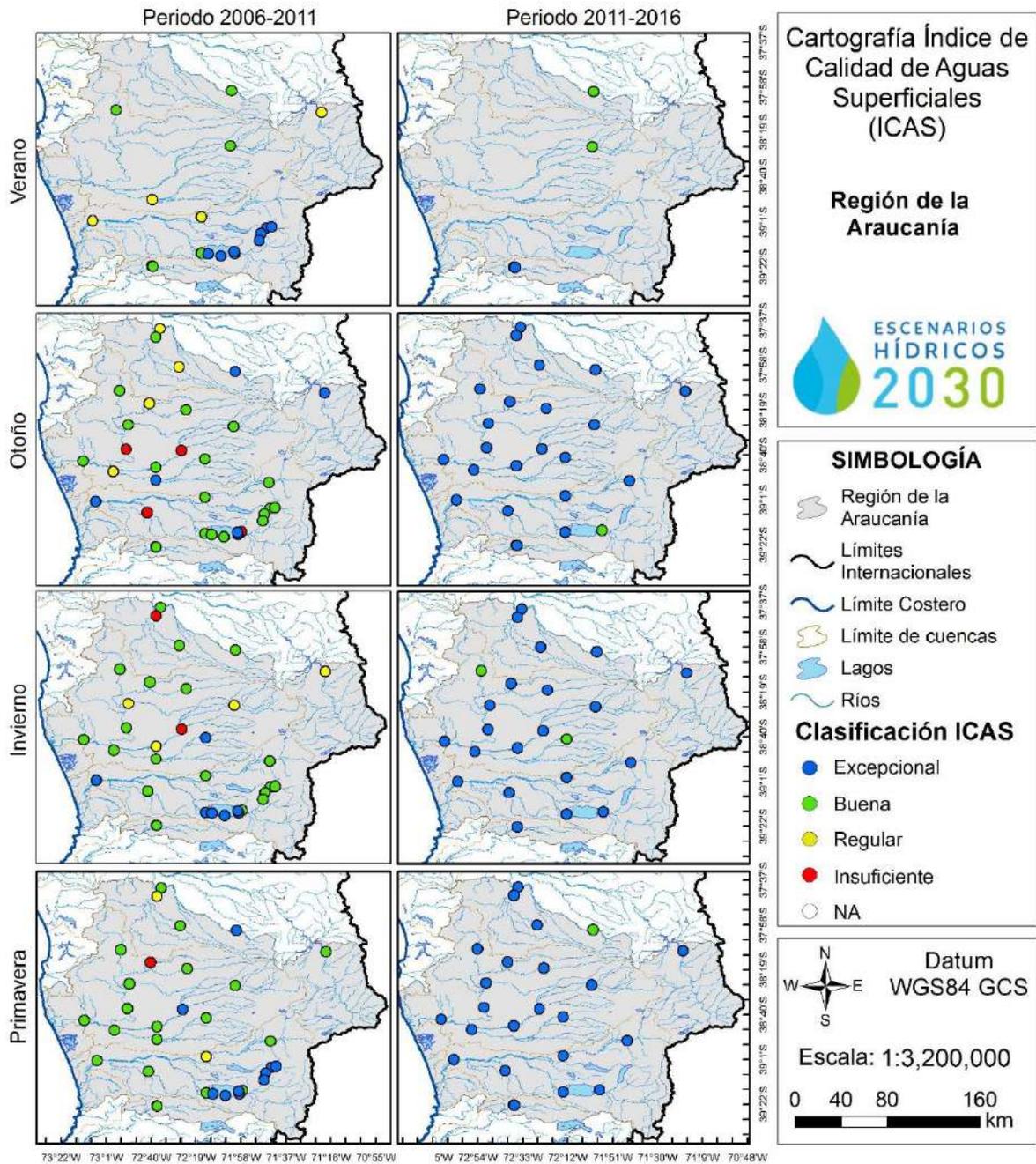


Figura 18. ICAS Región de la Araucanía.

6.2.12 ICAS Región de los Ríos

La Figura 19 muestra los resultados del ICAS en la región. Durante el periodo 2006-2011 hay una dominancia de los registros con buena calidad, con 17 en verano, 16 en otoño, 21 en invierno y 26 en primavera, seguidos por los registros excepcionales con 21 registros en

verano, 15 en otoño e invierno y 5 en primavera. La peor calidad se encuentra en primavera, donde incluso hay un registro clasificado como insuficiente producto del alto contenido de níquel en río Bueno. Los registros con calidad regular se encuentran principalmente en la cuenca del río Valdivia y se asocian en su mayoría a la DQO, aunque la CE, mercurio, nitrato y níquel cuentan con 1 registro cada uno en esta categoría, habiendo 1 en verano, 9 en otoño, 2 en invierno y 7 en primavera.

Durante el periodo 2011-2016 se ve una marcada tendencia a la mejora de la calidad del agua, al dominar los registros excepcionales, con 9 en verano, 14 en otoño, 15 en invierno y 10 en primavera. Por su parte los registros de calidad insuficiente son únicamente 1 en otoño relacionado al mercurio en el río Valdivia y 1 en invierno relacionado al arsénico en río Bueno. Cabe destacar que hay una disminución de las estaciones de monitoreo de un periodo a otro cercano a 20 en cada época del año, siendo necesario observar la distribución espacial de las estaciones para tener una lectura más completa de los datos.

No obstante, la mejora observada de un periodo a otro puede estar siendo afectada por la disminución de los registros de algunos parámetros complementarios. En ese sentido el cromo, nitrato y nitrito dejan de ser medidos el periodo 2011-2016, aunque el periodo anterior presentaban bajas concentraciones, salvo un registro de nitrato que determina una calidad regular en el lago Panguipulli. También hay 2 parámetros que disminuyen sus registros el segundo periodo producto del aumento de los límites de detección, los que corresponden al cadmio y cobre (Tabla 39), lo que de todas maneras presentaron bajas concentraciones el periodo anterior.

Tabla 39. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Los Ríos. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cadmio	< 0.01	461	> 0.002	2	1	< 0.01	371		0	0
	< 0.001	29								
Cobre	< 0.01	185	> 0.01	231	8	< 0.02	453	> 0.02	18	3
	< 0.02	46								
	< 0.005	30								

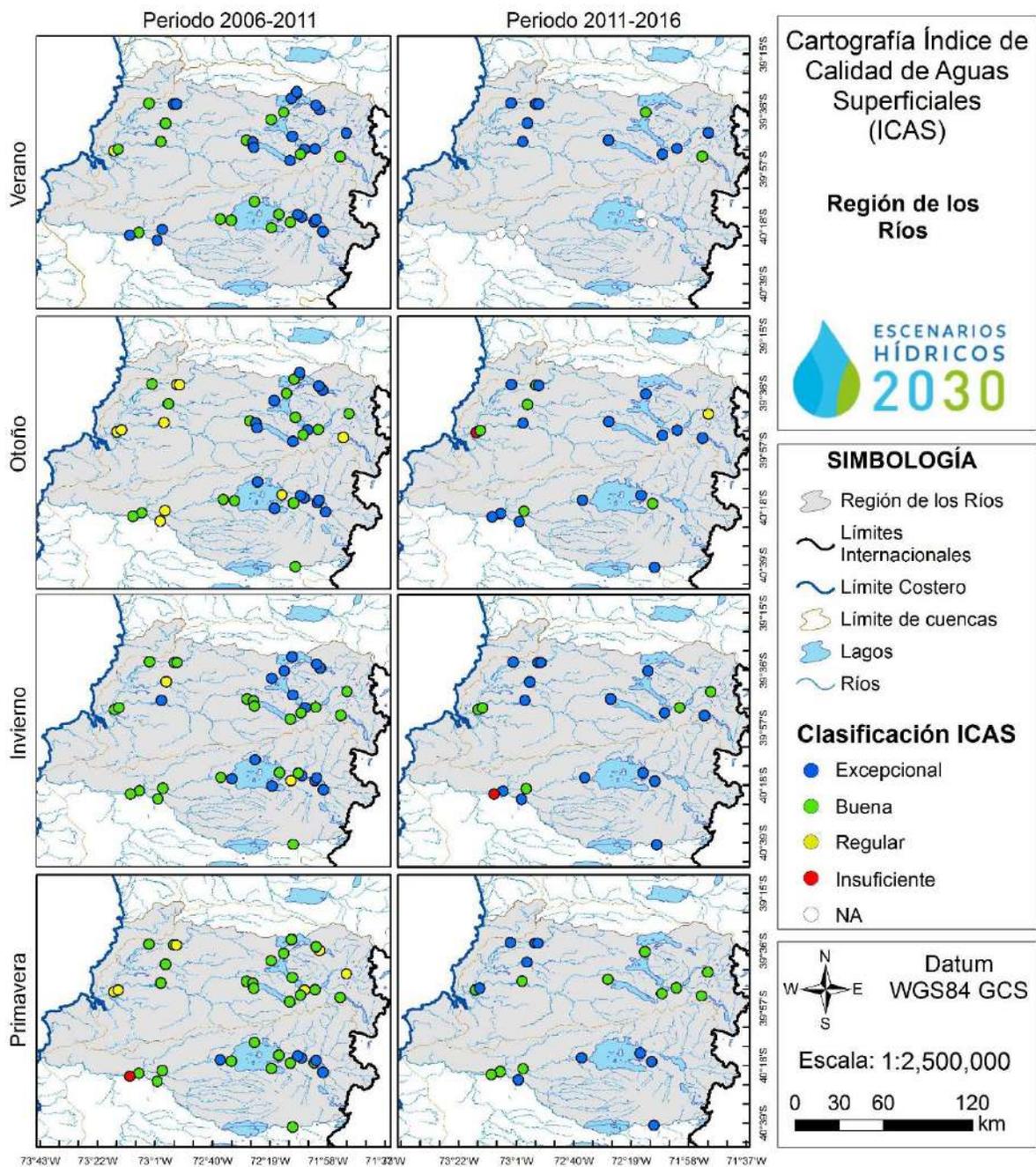


Figura 19. ICAS Región de los Ríos.

6.2.13 ICAS Región de los Lagos

Las figuras 20 y 21 muestran los resultados del ICAS en la región. En el periodo 2006-2011 cuenta con gran parte de las estaciones de monitoreo clasificadas en buena calidad, con 8 registros en verano, 36 en otoño y 30 en invierno y primavera. Los registros de calidad excepcional se mantienen relativamente constantes desde otoño a primavera con alrededor

de 3 estaciones en esta clasificación, mientras que en verano llega a su máximo con 8 registros, todo esto concentrado en las cuencas entre río Bueno y río Puelo. Los registros de calidad regular son 8 en verano y primavera, 1 en otoño y 3 en invierno, y se asocian principalmente a la DQO, mercurio y cobre, los cuales se encuentran en río Damas, río Bueno y en la isla de Chiloé entre otros. Por su parte la calidad insuficiente cuenta con 1 solo registro que se encuentra en primavera y está asociado al contenido de mercurio en Río Negro.

En el periodo 2011-2016 hay un notable aumento de las estaciones con registros excepcionales de calidad de agua, alcanzando los 3 en verano, 24 en otoño y primavera y, 13 en invierno, la mayoría en la cuenca del río Bueno y río Yelcho entre otros. Los registros regulares se asocian al pH y la DQO y se encuentran en los ríos Maullín, Yelcho y Bravo. En este periodo no existen registros de calidad insuficiente. Cabe destacar, que pese a que existe una aparente mejora en la calidad, el número de estaciones consideradas en el análisis bajan significativamente en el segundo período.

En esta región hay 2 parámetros que dejan de ser medidos de un periodo a otro, los que corresponden al cromo y nitrato, sin embargo ambos presentaron bajas concentraciones el periodo 2006-2011. Además hay 3 parámetros que debido al aumento en su límite de detección pasaron a no tener mediciones el periodo 2011-2016, lo cuales son el cobalto, mercurio y molibdeno (Tabla 40), aunque solo el mercurio tuvo altas concentraciones el periodo 2006-2011 que determinaron que el ICAS tomara una calidad regular e insuficiente.

Tabla 40. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Los Lagos. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	178	> 0.01	4	1	< 0.01	117		0	0
	< 0.005	11				< 0.04	104			
Mercurio	< 0.001	136	> 0.001	30	3	< 0.002	122		0	0
						< 0.001	78			
Molibdeno	< 0.05	17		0	1	< 0.05	98		0	0
	< 0.005	12								
	< 0.01	11								

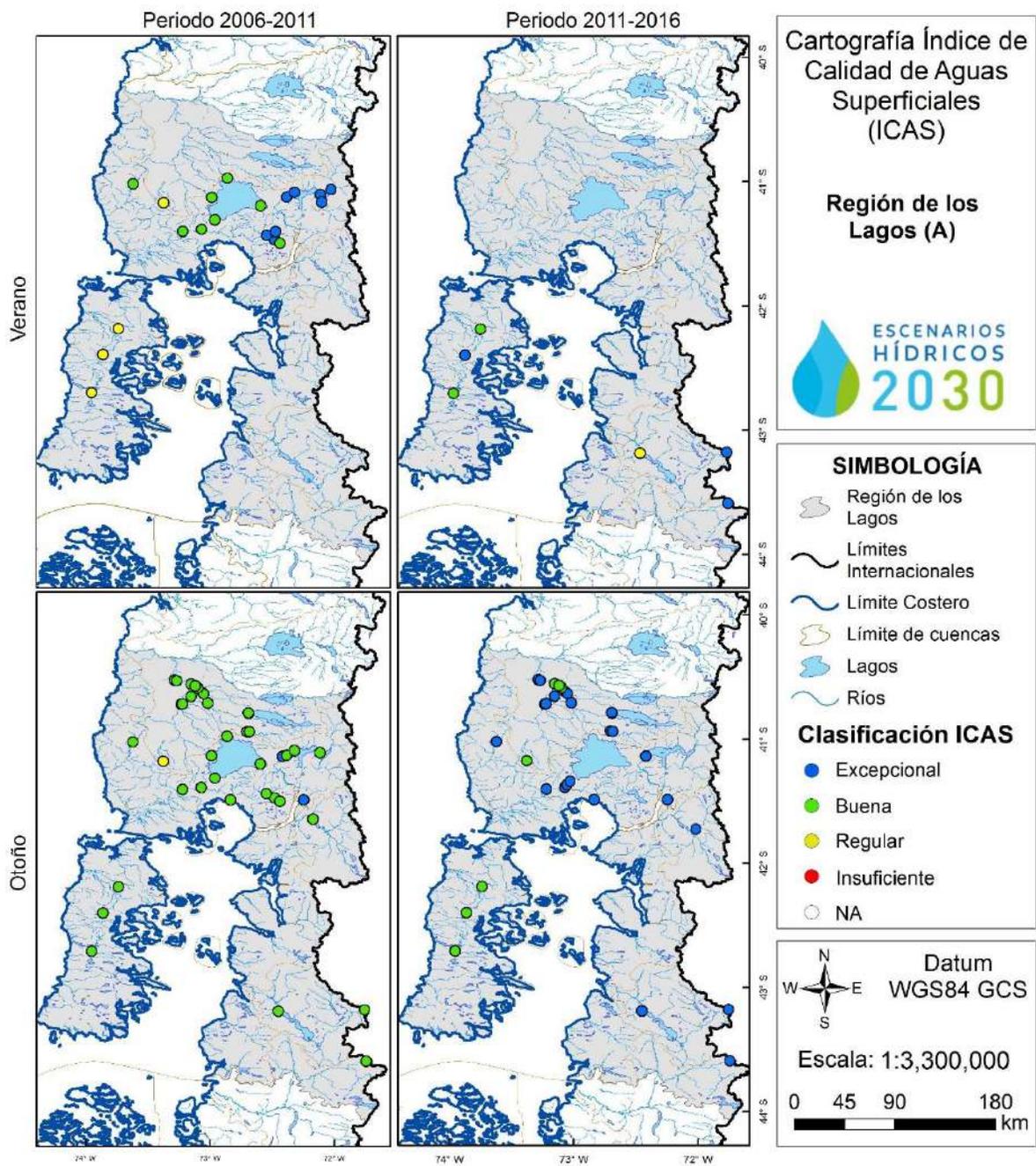


Figura 20. ICAS Región de los Lagos de verano y otoño (A).

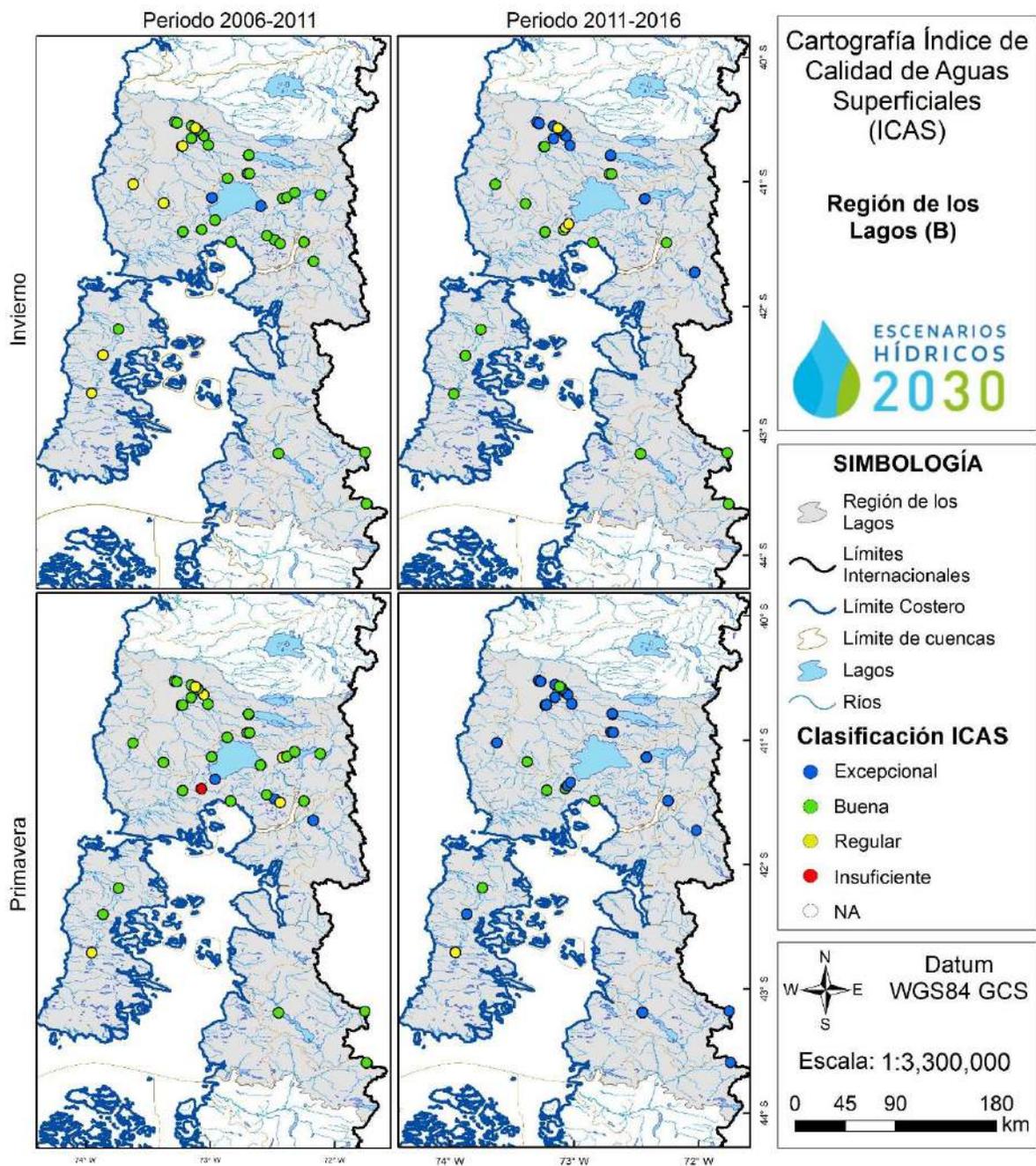


Figura 21. ICAS Región de los Lagos de invierno y primavera (B).

6.2.14 ICAS Región de Aysén

Las figuras 22 y 23 muestran los resultados del ICAS en la región. Durante el periodo 2006-2011 hay una dominancia compartida entre los registros de calidad buena y excepcional. En verano y otoño la calidad excepcional es la que predomina, con 18 y 21 registros respectivamente. Por su parte, en invierno y primavera predomina la buena calidad con 28

registros en invierno y 22 en primavera, todo lo anterior concentrado en las cuencas del río Aysén y río Baker. No hay registros de calidad insuficiente y los con calidad regular tienen su máximo en verano con 3 registros producto de la DQO y cobre, en río Grande, río Simpson y río los Leones; en invierno cuenta con 2 registros en río Baker y río Aysén asociados al ph y hay 1 registro en primavera en el río Aysén asociado a la DQO.

Durante el periodo 2011-2016 se observa una notable mejora en la calidad del agua, con la mayoría de los registros clasificados como excepcionales durante todo el año. Los registros de calidad regular desaparecen en este periodo.

En esta región solo hay mediciones de cromo y nitrato el periodo 2006-2011, sin embargo las concentraciones son bajas y no determinan los valores del ICAS. Además hay 3 parámetros que disminuyen sus registros de un periodo a otro debido a un aumento en sus límites de detección, correspondientes al cobalto, níquel y plomo (Tabla 41), no obstante en el periodo 2006-2011 todos ellos presentaron bajas concentraciones, no siendo parámetros determinantes de baja calidad del agua superficial.

Tabla 41. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Aysén. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01	504	>0.01	10	3	< 0.01	349		0	0
	< 0.005	19				< 0.04	208			
Níquel	< 0.02	475	> 0.02	10	4	< 0.05	338	>0.105	1	2
	< 0.01	19				< 0.02	77			
	< 0.005	19								
	< 0.05	6								
Plomo	< 0.05	490	> 0.01	3	1	< 0.07	301		0	0
	< 0.01	36				< 0.05	78			
	< 0.02	6								

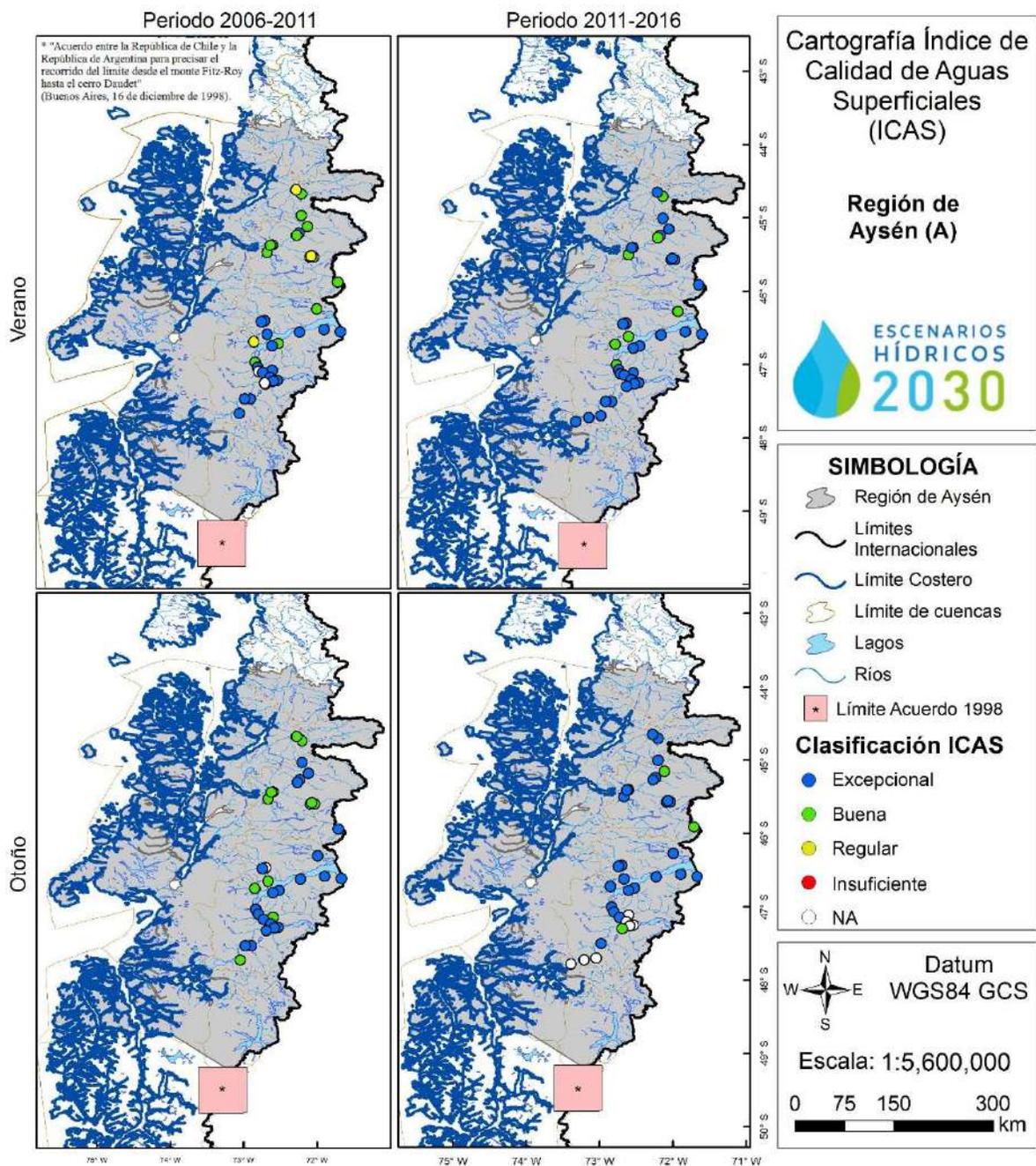


Figura 22. ICAS Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo de verano y otoño (A).

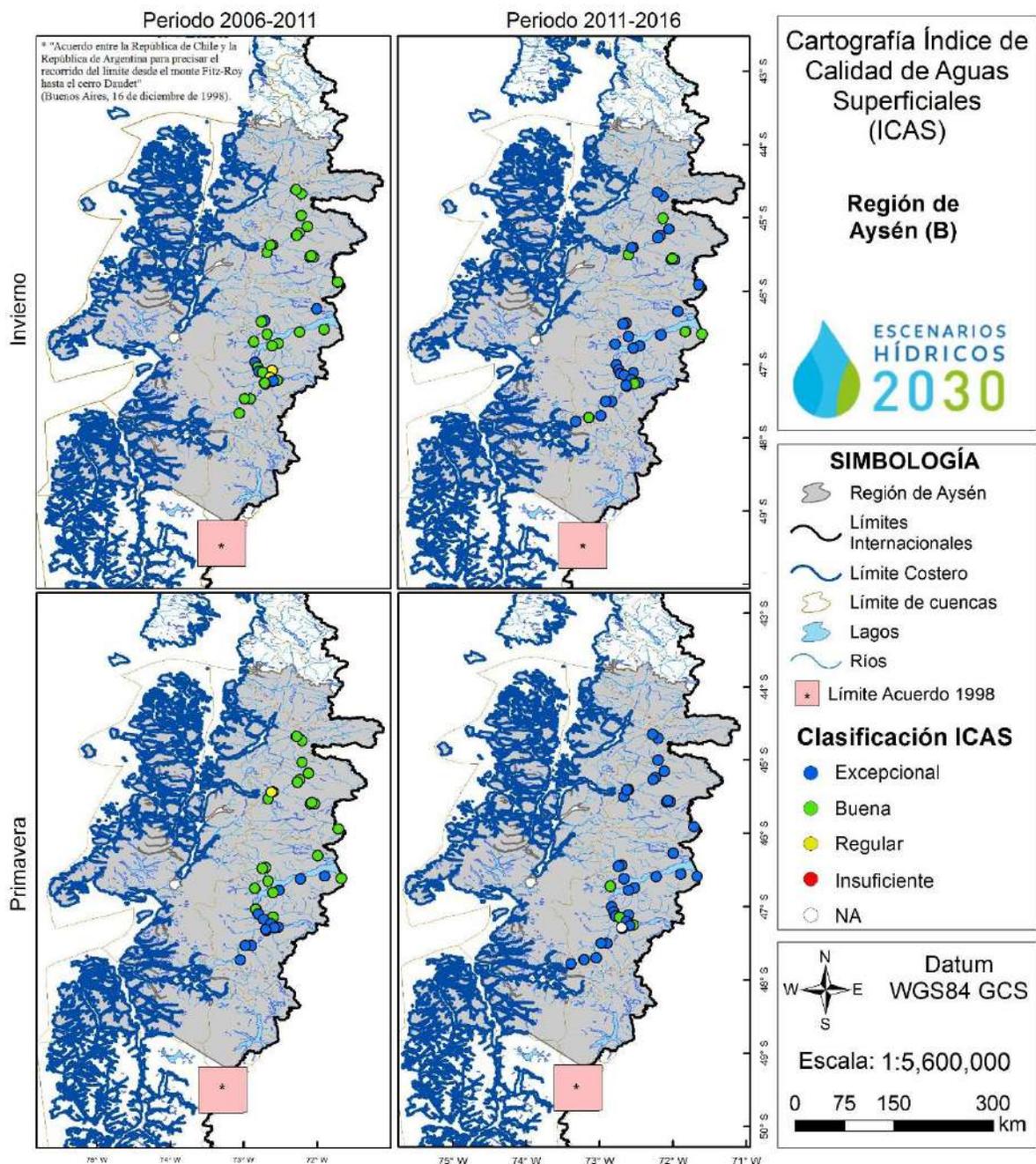


Figura 23. ICAS Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo de invierno y primavera (B).

6.2.15 ICAS Región de Magallanes

Las figuras 24 y 25 muestran los resultados del ICAS en la región. Durante el periodo 2006-2011 dominan los registros de buena calidad, con 30 registros en verano, 27 en otoño, 14 en invierno y 32 en primavera. Los siguen los registros de calidad regular, que alcanzan su máximo en primavera con 15 registros, los que se concentran en la cuenca Costera entre

Lag. Blanca (inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes, la mayoría relacionados a la DQO, salvo un registro en verano que está asociado al molibdeno en la estación río Tres Brazos antes Bt. Sendos. Los registros de calidad excepcional van desde 0 en primavera hasta 4 en verano, encontrándose en Tierra del Fuego y en la cuenca costera entre Seno Andrew y R. Hollelberg e islas al oriente. Los registros de calidad insuficiente están ausentes en este periodo.

En el periodo 2011-2016 hay un aumento de los registros con calidad excepcional, encontrándose entre 20 en verano y 16 en invierno y primavera. En verano se encuentran 2 registros de calidad insuficiente asociados al DQO, uno en río Grande y el otro en río Calete. Los registros de calidad regular se mantienen concentrados en la misma cuenca del periodo anterior, salvo en otoño donde dominan los de la cuenca Costera entre Seno Andrew y R. Hollelberg e Islas al oriente.

En esta región el nitrato deja de ser medido en el periodo 2011-2016, sin embargo presenta una baja concentración el periodo anterior, no siendo determinante de bajas calidades de aguas superficiales. Además hay 4 parámetros que disminuyen sus registros de un periodo a otro producto de un aumento de sus límites de detección, correspondiendo al cobalto, cromo, molibdeno y níquel (Tabla 42), no obstante en el periodo 2006-2011 sus concentraciones fueron bajas y no determinaron ninguna calidad baja de aguas superficiales.

Tabla 42. Parámetros afectados de un periodo a otro en la Región de Magallanes. Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011					2011-2016				
	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	LD	Conteo LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cobalto	< 0.01 < 0.005	656 22	> 0.01	16	3	< 0.01 < 0.04	348 332	> 0.015	1	1
Cromo	< 0.01 < 0.005	428 22	> 0.01	95	2	< 0.03	1		0	0
Molibdeno	< 0.05 < 0.01 < 0.005	624 42 22	> 0.01	2	2	< 0.05	343	>0.058	4	4
Níquel	< 0.02 < 0.01 < 0.05 < 0.005	554 43 23 22	> 0.01	50	14	< 0.05 < 0.02	465 110		0	1

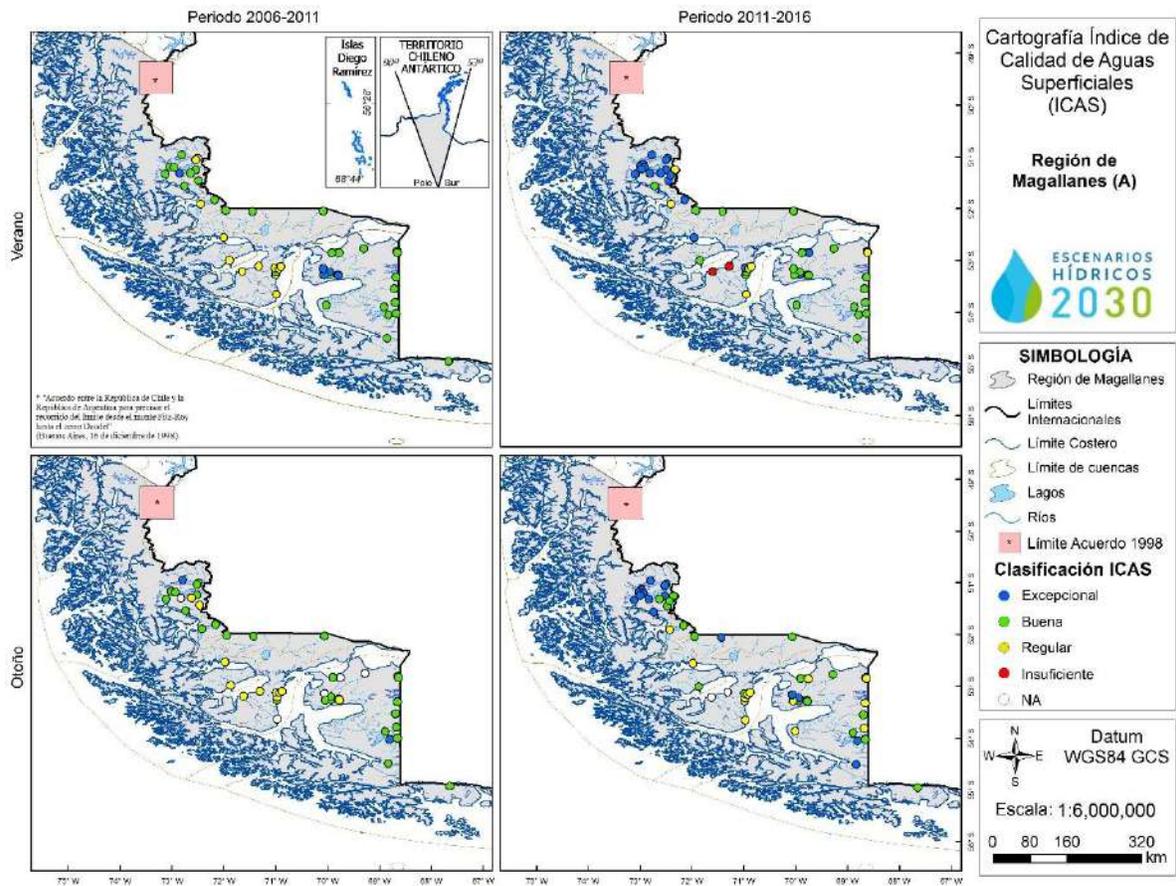


Figura 24. ICAS Región de Magallanes y la Antártica Chilena de verano y otoño (A).

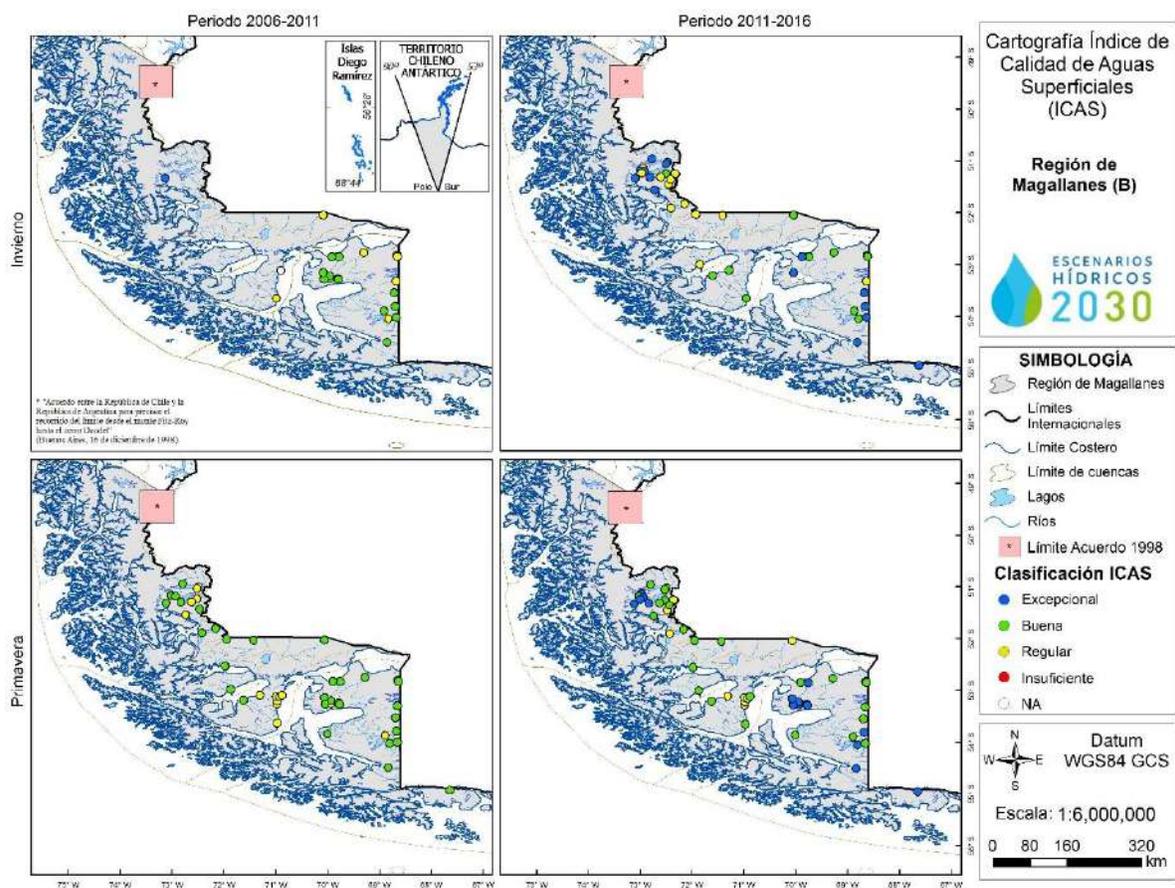


Figura 25. ICAS Región de Magallanes y la Antártica Chilena de invierno y primavera (B).

7 Brechas y limitaciones

Como se ha indicado anteriormente, el índice propuesto es una herramienta exploratoria que permite identificar zonas con estrés hídrico asociado a la calidad de las aguas superficiales. Para ello se utilizaron dos tipos de parámetros, los generales y los complementarios. Respecto a los primeros, estos poseen una particular importancia dentro de la construcción del ICAS propuesto, debido a que de no existir mediciones de estos 4 parámetros (recordar que corresponden al ph, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y la demanda de oxígeno disuelto), inmediatamente imposibilita la obtención del índice, es decir, son parámetros esenciales en su conjunto.

Por otro lado, todas las regiones presentaron una tendencia generalizada a un aumento de la calidad de las aguas superficiales del periodo 2006-2011 al periodo 2011-2016, con algunas excepciones aisladas. No obstante, es fundamental tener presente los casos donde esta mejora aparente es producto del abandono de las mediciones o si corresponde a un efecto del aumento de los límites de detección de algún (nos) parámetro (s) en particular, o bien de ambas situaciones en su conjunto. En ese sentido, los parámetros que sufrieron un

mayor abandono de mediciones en el segundo periodo fueron el cromo, nitrito, nitrato, plomo (Tabla 43 y Anexo 10.1.3), sin embargo la mayoría de esos registros contaban con bajas concentraciones, con 2 registros altos en el nitrito, 5 en el plomo, 4 en el nitrato y ninguno en el cromo.

Tabla 42. Resumen de los parámetros que disminuyeron sus registros de un periodo a otro por abandono de mediciones (Tabla completa en Anexo 10.1.3). Donde LD es el límite de detección y VMM es el valor mínimo medido.

Parámetro	2006-2011				2011-2016			
	Conteo < LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones	Conteo < LD	VMM	Conteo VMM	Nº de estaciones
Cromo	4444	> 0.001	1135	114	79	> 0.01	6	6
Nitrato	755	> 0.002	7816	1511	2	> 0.043	178	53
Nitrito	1531	> 0.001	714	25	0	> 2.469	2	0
Plomo	7008	> 0.01	177	44	4751	> 0.068	12	9

La segunda situación ocurre por el aumento del límite de detección de uno o más parámetros, y en algunos casos este aumento hace que el límite de detección este por sobre los valores de referencia de alguna de las clasificaciones de calidad, lo que generalmente ocurre solo en la clasificación excepcional, sin embargo el caso del mercurio es interesante de analizar, ya que si se observan los valores de normalización presentados en la Tabla 25, el límite de detección del mercurio en el primer periodo es igual al valor umbral de la calidad insuficiente (0.001 mg/L), esto quiere decir que cada vez que el mercurio es detectado, al ser mayor al límite de detección, inmediatamente este determina que el ICAS sea clasificado en la peor calidad posible (insuficiente), esto toma gran relevancia si se considera que en el periodo 2011-2016 el límite de detección se duplicó, lo que implica que incluso las veces que este parámetro no fue detectado por ser menor a 0.002 mg/L, puede que de todas maneras la calidad del agua haya sido regular o incluso insuficiente. No obstante esta situación no se da en los otros parámetros.

8 Conclusiones

Implementar un índice de calidad de aguas superficiales para todo el territorio nacional es un desafío, debido principalmente a la variabilidad de condiciones hidrológicas, geoquímicas y climáticas que presenta nuestro país. En este contexto, el índice propuesto se construye sobre la base de la aplicación de lógica difusa y busca unificar metodologías internacionales y nacionales con el fin de poder utilizar una metodología aplicable a nivel de investigación exploratoria que permita obtener un índice robusto y comparable entre las distintas cuencas del país, y que además sea de fácil comprensión tanto para expertos como para todos los actores interesados en el recurso hídrico.

Las principales limitantes identificadas durante el proceso de construcción y aplicación del índice propuesto se relacionan a la escasa disponibilidad de datos, especialmente de parámetros complementarios, más aún en aquellas cuencas de menor importancia para los entes reguladores. Se debe realizar un esfuerzo para incorporar en las mediciones regulares que realizan las distintas entidades públicas, parámetros que den cuenta de la potencial afectación que podrían generar en la calidad del agua las industrias más importantes del país. En este sentido, agroquímicos, compuestos farmacéuticos, compuestos orgánicos derivados del petróleo y compuestos orgánicos halogenados entre otros, deberían ser parte de la batería de mediciones que realizan las entidades públicas y además deberían ser parte de los monitoreos exigidos a la industria.

Además, existen casos donde los límites de detección para algunos parámetros son demasiado altos, haciendo imposible la aplicación de los valores de referencia de las normativas más estrictas. Por lo tanto, las entidades que realizan monitoreos de agua deberían mejorar la analítica con el fin de poder alcanzar límites de detección lo suficientemente bajos para alcanzar los estándares más estrictos de calidad de aguas.

Asimismo, la falta de valores de referencia para algunos parámetros en las distintas normas chilenas de calidad de agua hace necesario la utilización de normas internacionales de calidad con el fin de dar mayor validez a las clases de agua que se definen.

En cuanto a la aplicación del ICAS, se obtiene un mapa a nivel regional de todo el país que da cuenta de la calidad del agua superficial, la cual puede verse afectada tanto por condiciones naturales de las cuencas como por factores antrópicos. En ese sentido, las regiones del norte grande -desde Arica y Parinacota hasta Atacama- son las que presentan mayores problemas de calidad del agua superficial, principalmente por los altos niveles de arsénico, conductividad eléctrica, cobre y mercurio entre otros. Por su parte, la zona comprendida entre la región de Coquimbo y Magallanes presenta una afectación en la calidad del agua menor y menos generalizada que en la zona norte, donde los principales determinantes son la DQO, el arsénico y el cobre entre otros. En general se observa una tendencia de la calidad de las aguas superficiales que va de norte a sur, partiendo con un claro dominio de las calidades insuficientes hasta llegar a una situación contraria, con gran

parte de los registros clasificados en calidad excepcional, salvo en la Región de Magallanes, la cual presenta una calidad levemente peor que las regiones precedentes.

Cabe destacar, que el ICAS propuesto se encuentra en una fase de revisión y optimización. Se debe trabajar en la incorporación de parámetros que puedan dar cuenta de actividades asociadas a la industria agropecuaria, acuícola y forestal. Además, se requiere continuar con un análisis en detalle de las cuencas que presentan un mayor grado de afectación.

Finalmente, es necesario evaluar aquellas estaciones donde los parámetros generales no están siendo registrados periódicamente, situación que está concentrada en las regiones de Magallanes, Aysén y Arica y Parinacota, entre otras, de este modo se podría aumentar la representatividad espacial del índice en el territorio nacional, además de permitir evaluar la mayor cantidad de cuerpos de aguas superficiales.



9 Bibliografía

Alberta Environment & Sustainable Resource Development (ESRD). (2014). Environmental Quality Guidelines for Alberta Surface Waters. Water Policy Branch, Policy Division. Edmonton. 48 pp.

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. (2000A). Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 2, Aquatic ecosystems.

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. (2000B). Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 3, Primary industries.

Ayers, R.S and D.W. Westcot. (1985). Water quality for agriculture, FAO irrigation and Drainage paper 29, FAO, Roma.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1999). Canadian water quality guidelines for the protection of agricultural water uses: Introduction. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.

CCME, 1987. Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (Freshwater). Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQG online).

Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). (2004). Guía CONAMA para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas.

Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de agua según objetivos de calidad.

García, T. (2012). Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile (Tesis para optar al título de ingeniero civil). Universidad de Chile.

León L., (1998), Índice de Calidad de Agua, Forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

Kummar, D. y Alappat, B., (2009). NSF-Water Quality Index: Does It Represent the Experts' Opinion? Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage. 2009.13:75-79.

Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M. and Soares Machado, M. (2009) River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed Brazil. Ecological Indicators, 9, pp. 1188-1197.

NSF, (2014). [NSF] National Sanitation Foundation International, 2014. Disponible en: <<http://www.nsf.org>>.

Naciones Unidas (ONU). (1997). Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World (overview document)(World Meteorological Organization, Geneva.

Sancha, A. Espinoza, C. (2001). Determinación de contenido natural e índices de calidad: ¿Presente y futuro de calidad de aguas?. XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS-CHILE. Santiago, Chile.
Senado Francia. (2012). La qualité de l'eau et assainissement en France Rapport de l'OPECST n° 2152 (2002-2003) de M. Gérard Miquel, Mars 2013.

Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P. y Dobhal, R. (2013). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. American Journal of Water Resources, 2013, Vol. 1, No. 3, 34-38.

Yilmaz, I. (2007). Fuzzy evaluation of water quality classification. Ecological Indicators, 7, pp. 710-718.



10 Anexos

10.1 Normativas

A continuación se detalla los parámetros especificadas en cada normativa utilizada en este estudio

10.1.1 Normativa Canadiense Protección Vida Acuática

Tabla 27. Parámetros según normativa Canadiense.

Elemento	límite máximo (mg/L)	Cálculos y especificaciones
Cobre	Depende de la dureza CaCO ₃	0 to < 82 mg/L
Cromo	VI 0,001 y III 0,0089	≥82 to ≤180 mg/L
Hierro	0,3	Desconocida
Manganeso		
Magnesio		
Selenio	0,001	
Zinc	0,03	
Arsénico	0,005	
Cadmio	0,0009	
Cianuro	0,005	
Mercurio	0,000026	
Nitrato	13	
Nitrito	0,06	
Razón nitrato + nitrito		
Plomo	Depende de la dureza CaCO ₃	0 to ≤ 60 mg/L >60 to ≤ 180 mg/L >180 mg/L
Cloruro	120	Desconocida
pH	6,5 - 9,0	
Sulfato		
Aluminio	Depende del pH	0,005 pH<6,5
Amonio	No mide DGA	
Boro	1,5	
OD	Depende de temperatura del agua	

Molibdeno	0,073	
Niquel	Depende de la dureza CaCO3	0 to ≤ 60 mg/L
		> 60 to ≤ 180 mg/L
		>180 mg/L
		Desconocida
Plata	0,00025	
Talio	0,0008	

10.1.2 Normativa Francesa de Calidad de Agua

Tabla 28. Parámetros según normativa francesa.

Elementos o compuestos	Unidad	Muy buena	Buena	Mala
Cobre (dureza 100mg/L)	mg/L	0,5	5	
Cromo total	mg/L	0,05	1	
Hierro	mg/L			
Manganeso	mg/L			
Magnesio				
Selenio	mg/L	0,01	0,05	
Zinc (dureza 100mg/L)	mg/L	5	50	
Arsénico	mg/L	0,05	0,5	
Cadmio (dureza 100mg/L)	mg/L	0,005	0,02	
Cianuro	mg/L			
Mercurio	mg/L	0,001	0,003	
Nitrato		50	450	
Nitrito	mg/L	0,1	30	
Razón nitrato + nitrito				
Plomo (dureza 100mg/L)	mg/L	0,05	0,1	
Cloruro	mg/L			
pH	Rango			
Sulfato	mg/L	250	1000	
Aluminio	mg/L			
Boro	mg/L			
OD (valores mínimos)	mg/L			
Niquel (dureza 100mg/L)	mg/L	0,05	1	
Plata				
Conductividad eléctrica	uS/cm			
RAS	-			
Molibdeno	mg/L			
Cobalto				
Berilio				
Calcio		1000		
Litio				
Vanadio				
Sodio		150	2000	

Cobre 8145	< 0.01 < 0.02 < 0.005 < 0.001 < 0.012	2317 897 222 23 1	> 0.001	3742	7202	318	888	< 0.02 < 0.05	5752 1	> 0.02	1105	6858	388	971
Cromo 8151	< 0.01 < 0.005 < 0.002 < 0.02	4188 187 54 15	> 0.001	1135	5579	114	123	< 0.01 < 0.03 < 0.05	29 26 24	6		79	6	6
Mercurio 8303	< 0.001 < 0 < 1	5336 7 1	> 0.001	1165	6509	33	35	< 0.002 < 0.001 < 0.3	3609 2652 14	> 0	73	6348	15	15
Molibdeno 8320	< 0.05 < 0.005 < 0.01 < 0.17 < 0.5 < 0.02	6281 206 479 39 6 5	> 0.01	180	7196	67	104	< 0.05 < 0.03 < 1 < 0.002	3227 28 14 1	> 0.052	121	3391	99	110
Niquel 8341	< 0.02 < 0.01 < 0.005 < 0.003 < 0.05 < 0.03 < 0.021	5905 306 207 52 33 2 1	> 0.01	575	7081	105	160	< 0.05 < 0.02 < 0.07 < 0.001 < 0.01	3775 1192 23 19 14	> 0.006	68	5078	36	68

Nitrato 6240	< 0.2	296	> 0.002	7816	8571	1511	5986	< 0.01	2	> 0.043	178	180	53	143
	< 0.01	177												
	< 0.113	129												
	< 0.007	69												
	< 0.002	66												
	< 200	9												
	< 113	7												
	< 0.5	1												
	< 0.022	1												
Nitrito 6260	< 0.001	1520	> 0.001	714	2245	25	43		0	> 2.469	2	2	0	0
	< 1.001	5												
	< 0.01	3												
	< 0.002	1												
	< 1	1												
	< 0	1												
Plata 8361	< 0.01	6894	> 0.01	48	7203	1	1	< 0.01	6366	> 0.01	33	6399	11	11
	< 0.002	206												
	< 0.05	54												
	< 0.02	1												
Plomo 8383	< 0.05	6299	> 0.01	177	7185	44	45	< 0.07	3483	> 0.068	12	4763	9	9
	< 0.012	523						< 0.05	1194					
	< 0.03	108						< 0.06	29					
	< 0.04	40						< 0.005	23					
	< 0.02	17						< 0.01	14					
	< 0.043	14						< 0.001	8					
	< 0.5	6												
	< 0.001	1												

Selenio 8420	< 0.001	6590	> 0.001	116	6970	5	5	< 0.001	6483	> 0.001	26	6543	19	19
	< 0.005	203						< 0.03	14					
	< 0.004	48						< 0.02	14					
	< 0	7						< 0.01	6					
	< 0.05	6												





ESCENARIOS
HÍDRICOS
2030
C H I L E

