



DEPTO. CONSERVACIÓN Y
PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
N° PROCESO 14878197

MINUTA: DCPRH N° 12/
MAT.: Estudio de la relación entre concentraciones de nitrato y el nivel de agua subterránea en fuentes APR, regiones de Coquimbo a Los Lagos (2014-2020), Chile.
SANTIAGO, 07 de mayo de 2021

Índice de contenido

Resumen.....	1
1. Introducción.....	1
2. Origen e impacto del nitrato	2
3. Metodología.....	3
4. Resultados.....	4
5. Discusión.....	12
6. Conclusiones	14
7. Referencias	14

Índice de Figuras

Figura 1. Gráficos de dispersión y coeficiente de correlación de Pearson entre nivel estático de pozos APR y concentraciones de nitrato de a) región de Coquimbo, b) región de Valparaíso, c) región Metropolitana, d) región de O'Higgins, e) región del Maule, f) regiones de Ñuble y Biobío, g) región de Los Ríos y h) región de Los Lagos.....	6
Figura 2. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de Coquimbo.....	7
Figura 3. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de Valparaíso.....	8
Figura 4. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región Metropolitana.....	9
Figura 5. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de O'Higgins.....	9
Figura 6. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región del Maule.....	10
Figura 7. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de las regiones de Ñuble y Biobío.....	10
Figura 8. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de los Ríos.....	11
Figura 9. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de Los Lagos.....	11

Estudio de la relación entre concentraciones de nitrato y el nivel de agua subterránea en fuentes APR, regiones de Coquimbo a Los Lagos (2014- 2020), Chile.15pp.

Fernanda Aránguiz Ojeda¹, Daniela Fredes Muñoz² y Diego San Miguel Cornejo².

- (1) Practicante del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos enero-febrero 2021. Estudiante de Geología, Universidad de Concepción.
- (2) Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

Resumen

El nitrato es un nutriente inodoro e incoloro, que se incorpora a las aguas subterráneas por procesos naturales y por el efecto de actividades humanas, generando impacto en la salud de las personas y en el medio ambiente. Recientes diagnósticos de calidad en agua potable rural (APR) revelan la presencia de elevadas concentraciones de nitrato en diversas regiones del país. Así, se plantea evaluar la relación entre este nutriente y el nivel del agua subterránea entre las regiones de Coquimbo a Los Lagos con datos adquiridos entre 2014 y 2020. La metodología incluye un análisis de la estadística descriptiva del nitrato, estudio de la correlación entre las variables, y la elaboración de mapas de curvas isofreáticas y nitrato por región. Como resultados no se reconoce una relación estadística entre los parámetros estudiados, pero sí se distinguen patrones espaciales entre estos, las zonas con mayores concentraciones de nitrato coinciden con usos de suelo de terrenos agrícolas y áreas urbanas e industriales, y con acuíferos de moderada a alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados. Se recomienda mejorar la cantidad y distribución de fuentes APR, y evaluar la implementación de una norma secundaria de nitrato en acuíferos para prevenir su contaminación.

Palabras clave: nitrato, contaminación, agua subterránea, acuíferos, nivel estático, curvas isofreáticas, pozos APR.

1. Introducción

En Chile la Dirección General Aguas (DGA) es el organismo encargado de la gestión y administración de los recursos hídricos, según las disposiciones establecidas en el art. 129, bis 3, del Código de Aguas. Para esto cuenta con una red de estaciones de medición de calidad, cantidad y niveles de las aguas, tanto superficiales como subterráneas a lo largo del país.

En particular, la red de calidad de aguas subterráneas tiene por objetivo monitorear el estado químico actual de los acuíferos, para así detectar cambios temporales y espaciales. Desde el año 2013 la cantidad de estaciones de monitoreo han ido en aumento alcanzando 982 puntos de muestreo en la actualidad, distribuidos desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Los Lagos. Los

pozos de agua potable rural (APR) forman parte de esta red de monitoreo, y periódicamente se realizan diagnósticos de la calidad de agua en estas fuentes, previo a cualquier método de tratamiento, comparando diversos parámetros fisicoquímicos con respecto a normas de empleo vigentes. Es así, como en los últimos años los diagnósticos en fuentes APR realizados en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, y Ñuble-Biobío revelan la presencia de significativas concentraciones de nitrato (NO_3) en las aguas subterráneas (Dirección General de Aguas, 2020).

El nitrato es una sal inodora e incolora, que se incorpora a las aguas subterráneas por procesos naturales y por efecto directo o indirecto de las actividades humanas (Pacheco y Cabrera, 2003). Actualmente, este nutriente es uno de los principales contaminantes del agua

en muchas áreas del mundo, como Arabia Saudita, India, Reino Unido, América del Norte, Australia, Marruecos, Changshu en China e Irán (Mohseni-Bandpi y otros, 2013 en Rezvani y otros, 2019). Se ha demostrado que el consumo prolongado de nitrato puede generar impacto en la salud de las personas y también en el medioambiente.

En Chile, el agua subterránea para consumo humano representa más del 40% del volumen total de agua consumida en las zonas urbanas y el 76% en las zonas rurales (Arumi y otros, 2006). Considerando que el país afronta una de las mayores sequías de las que se tengan registro, resulta relevante estudiar la calidad de estas aguas, prevenir su contaminación y entender las relaciones entre sus componentes. En este sentido, la Mesa Nacional de Aguas cuya misión es la búsqueda de soluciones para enfrentar esta crisis hídrica, establece como principales ejes: el acceso universal al agua y al saneamiento, protección de los ecosistemas, gestión sustentable de acuíferos, entre otros (Mesa Nacional del Agua, 2020).

En el contexto de la protección de los recursos hídricos, diversos estudios internacionales se han enfocado en investigar la contaminación de nitrato en aguas subterráneas y acuíferos (Johnson y Kross, 1990; Lee y otros, 2003; Almasri, 2007; Debernardi y otros, 2008; Massetti y otros, 2008; Suthar y otros, 2009; Gurdak, 2012; Damia y otros, 2019), analizando los efectos que tiene este nutriente en la salud de las personas y en el medioambiente, y cuestionando los límites o normas establecidas en relación al consumo humano. En particular, Debernardi y otros (2008) advierten la ocurrencia de altas concentraciones de nitrato en zonas donde el nivel de agua subterránea es bajo, y por ende existe una menor protección de los acuíferos.

Así se plantea estudiar la relación entre las concentraciones de nitrato y el nivel del agua subterránea en fuentes APR distribuidas en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Ñuble-Biobío,

Los Ríos y Los Lagos entre los años 2014 al 2020. La metodología incluye (1) análisis de la estadística descriptiva de las concentraciones de nitrato por región, (2) estudio de la correlación estadística entre el nitrato y el nivel estático del agua subterránea, y (3) elaboración de mapas de curvas isofreáticas con concentraciones de nitrato por región. Las zonas con mayores niveles de nitrato son comparadas con el uso de suelo y la vulnerabilidad de los acuíferos asociados. Se espera que los resultados aporten a la toma de decisiones respecto a la gestión de aguas subterráneas y fuentes APR de la DGA, además de contribuir a los objetivos planteados por Mesa Nacional de Aguas con relación a la protección de este recurso fundamental para la vida.

2. Origen e impacto del nitrato

El origen del nitrato puede estar asociado a procesos naturales como la precipitación, la meteorización de rocas ígneas y minerales (Pacheco y Cabrera, 2003), además de descomposición de la materia orgánica. Como también a las actividades humanas que involucran la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Heaton, 1985 en Pacheco y Cabrera, 2003). Este nutriente constituye una de las principales fuentes de contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas (Martínez y otros, 2011), debido a su alta solubilidad y la tendencia a ser repelido por partículas de suelo cargadas negativamente (Keeney, 1986 en Massetti y otros, 2008).

Como impactos a la salud humana, el consumo prolongado de agua con nitrato puede provocar metahemoglobinemia, cáncer del canal alimenticio (Ovez 2006; Ashok y Hait 2015, en Rezvani y otros, 2019), entre otros efectos. Uno de los estudios más recientes sobre el impacto del nitrato en la salud, señala que infantes nacidos en India, Vietnam y 33 países de África,

que estuvieron expuestos al consumo de altos niveles de nitrato en sus primeros tres años de vida, presentan un menor desarrollo en su estatura que el promedio de la población (Damia y otros, 2019). Esto sugiere que los nitratos pueden tener impactos similares o peores en la altura y otras métricas de desarrollo que los coliformes fecales. Antecedentes que alarman, ya que este fenómeno se produce incluso en lugares donde los niveles de nitrato están por debajo de los umbrales presuntamente seguros, según las normas de los países estudiados (Damia y otros, 2019).

En Chile también se ha investigado los efectos de este nutriente en las personas. Arumi y otros (2006) evaluaron el riesgo en la salud de la población rural por consumo de nitrato en pozos noria en Parral, indicando que la ingesta de fórmulas lácteas preparadas con aguas con altas concentraciones de nitrato puede generar metahemoglobinemia en la población lactante del sector. También Schmidt y otros (2012), realizan mediciones de nitrato (NO_3) y nitritos (NO_2) en agua y saliva de la población rural en la región del Biobío, esto ya que en la cavidad oral los nitratos son transformados en nitritos, los que reaccionan con aminos y amidas para formar nitrosaminas, las que han probado favorecer la carcinogénesis oral. Los resultados indican que en la zona rural de esta región hay niveles significativamente mayores de nitratos en el agua y nitritos en saliva, y que los niveles de nitrato en agua superan las normas nacionales e internacionales (Schmidt y otros, 2012). A esto se suma los antecedentes recopilados por Donoso y Cortés (2018) sobre al menos 12 artículos científicos que relacionan la exposición al agua con nitrato a disfunciones de la glándula de la tiroides, tanto en animales como humanos, evidenciando un alto riesgo de cáncer ante exposiciones tan bajas de nitratos en aguas como 5 (mg/L) en algunos casos.

Los nitratos también pueden afectar al medioambiente a través de la eutrofización de estuarios y ecosistemas costeros (Ryther y Dunstan, 1996 en Martínez y otros, 2011), ya

que provocan una disminución de los niveles de oxígeno disuelto (Masseti y otros, 2007). En un medio eutrofizado se produce la proliferación de especies como algas y otras plantas verdes que cubren la superficie, esto trae como consecuencia un elevado consumo de oxígeno y su reducción en el medio acuático, asimismo dificulta la incidencia de la radiación solar por debajo de la superficie. Estos dos fenómenos producen una disminución de la capacidad autodepuradora del medio y una merma en la capacidad fotosintética de los organismos acuáticos (Martínez y otros, 2011).

Es debido a los diversos impactos de este nutriente que la Organización Mundial de Salud (OMS) establece como límite de nitrato (NO_3) en agua potable en 50 (mg/L) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) establece el límite de nitrógeno en forma de nitrato (N-NO_3) en agua potable en 10 (mg/L) que equivale a 44.3 (mg/L) de NO_3 . Sin embargo, las evidencias científicas señalan que estos umbrales pueden ser demasiado altos, ya que se ha reconocido efectos en la salud de las personas, incluso a bajas concentraciones de nitrato (Damia y otros, 2019).

3. Metodología

Se cuenta con un total de 1363 muestras de nitrato (mg/L) y 813 datos de nivel estático del agua (m) adquiridos en un periodo de seis años. Las regiones con mayor cantidad de muestras corresponden a Metropolitana, Maule y Coquimbo, Ñuble-Biobío¹ y Valparaíso, ya que en estas la red de monitoreo lleva mayor tiempo de funcionamiento.

El nitrato proveniente de las fuentes APR es medido en laboratorios acreditados ISO 17025, que entregan esta concentración como nitrato (NO_3) o nitrógeno en forma de nitrato (N-NO_3), dependiendo de la metodología de

¹ Las regiones de Ñuble y Biobío se analizan en conjunto, ya que las mediciones del último año de muestreo 2019, se desarrollaban durante el proceso de división administrativa de estas regiones.

medición. Aquellas concentraciones en forma de (N-NO₃) fueron convertidas a (NO₃) mediante la siguiente relación,

$$NO_3 \text{ (mg/L)} = N - NO_3 \text{ (mg/L)} \times 4.428$$

Donde, $\frac{\text{Peso molecular del ion nitrato}}{\text{Peso atómico del nitrógeno}} = 4.428$

Esto con el fin de homogeneizar la base de datos y comparar las concentraciones de este nutriente con la norma de calidad del agua potable NCH409 para consumo de humanos, que establece como límite 50 (mg/L). Se consideró utilizar el nivel estático de los pozos APR, ya que este representa la posición del agua subterránea en estado natural, y también porque la profundidad de este nivel determina el espesor de la zona no saturada que representa la interfaz entre la fuente del posible contaminante y las aguas subterráneas (Dirección General de Aguas, 2017).

La estadística descriptiva de las concentraciones de nitrato en cada región se estudió mediante los siguientes parámetros: mínimo, máximo, rango, mediana, media, varianza (n), desviación típica (n), curtosis (Pearson) y error típico de la media. Posteriormente, se realizaron gráficos de dispersión y cálculo de coeficiente de correlación de Pearson, entre las concentraciones de nitrato y el nivel estático de los pozos APR asociados a estas.

Para establecer relaciones espaciales entre las variables de estudio se elaboraron mapas de curvas isofreáticas y puntos ponderados de nitrato. Las curvas isofreáticas se crearon en base a modelos digitales de elevación (DEM) de cada región (disponibles en www.ide.cl), a estos datos de cotas en metros sobre nivel del mar (msnm) se les restó el valor de nivel estático asociado, y los resultados fueron interpolados en el software *Surfer v15* como kriging ordinario, obteniendo curvas cada 100 m, 50 m y 20 m, dependiendo de la cantidad de datos de nivel estático en cada región. Luego mediante el software *QGIS v3.10.2* se integraron estas

curvas con las concentraciones de nitrato en cada región, clasificadas en tres intervalos que parten desde el límite de detección a 30 (mg/L)-50 (mg/L) y >50 (mg/L).

A modo de análisis se han sobrepuesto las muestras >50 (mg/L) con información de los cambios de usos de suelo de CONAF utilizando la actualización más reciente de 2016 (disponible en www.ide.cl), y mapas de vulnerabilidad de los acuíferos de SERNAGEOMIN de los años 2006 y 2008 (Wall y otros, 2006).

4. Resultados

La estadística descriptiva de nitrato para cada región se resume en la tabla 1. Las medianas más altas de nitrato corresponden a las regiones de O'Higgins con 20.40 (mg/L), Metropolitana con 18.55 (mg/L), Valparaíso con 18.54 (mg/L) y el Maule con 11.87 (mg/L), disminuyendo hacia sur donde alcanza los 0.33 (mg/L) en la región de Los Lagos. Los histogramas de nitrato realizados muestran una distribución asimétrica positiva en todas las regiones, donde el intervalo que va desde el límite de detección a los 30 (mg/L) es el que presenta mayor frecuencia, concentrando la mayor cantidad de datos.

Los gráficos de dispersión y cálculo del coeficiente de correlación de Pearson se encuentran entre las figuras 1a) y 1h). En general, los valores del coeficiente de correlación son bajos. En las regiones de Coquimbo y Metropolitana alcanza los 0.3475 y 0.0348, respectivamente, y el resto de las regiones este coeficiente es <0.008, y no se reconoce una tendencia clara en las variables.

Entre las figuras 2 a 9 se muestran los mapas realizados con las curvas isofreáticas y concentraciones de nitrato, donde también se indican la cantidad de muestras que superan el límite de la norma NCH409 de agua potable. El mapa de la región de Coquimbo (Figura 2) fue elaborado con un total de 195 muestras de nitrato y 182 datos de nivel estático, adquiridos

entre 2016 y 2019. Las muestras de hasta 30 (mg/L) se distribuyen ampliamente en la región, y se asocian a curvas isofreáticas de entre 0 a

1500 msnm. Las concentraciones entre 30 a 50 (mg/L) se agrupan en el sector de Ovalle y La Serena entre niveles de agua 150 a 800 msnm.

Tabla 1. Resultados de estadística descriptiva por región para el parámetro nitrato (mg/L). En gris se destaca la mediana de nitrato en cada región.

	COQUIMBO	VALPARAÍSO	METROPOLITANA	OHIGGINS	MAULE	ÑUBLE-BIOBIO	LOS RÍOS	LOS LAGOS
Años de muestreo	2016-2019	2015-2019	2015-2019	2014-2019	2017-2020	2018-2019	2019-2020	2020
Cantidad muestras	195	114	423	169	239	117	68	38
Mínimo (mg/L)	0.01	0.01	0.82	0.01	0.08	0.09	0.01	0.22
Máximo (mg/L)	168.70	111.10	153.38	64.20	72.72	51.86	32.24	13.83
Rango (mg/L)	168.69	111.09	152.56	64.19	72.65	51.77	32.23	13.61
Mediana (mg/L)	5.95	18.55	18.54	20.40	11.87	4.93	1.98	0.33
Media (mg/L)	14.90	23.64	25.25	21.62	13.45	8.09	3.37	1.74
Varianza (n)	618.02	404.68	535.47	218.98	123.93	83.95	25.55	7.85
Desviación típica (n)	24.86	20.12	23.14	14.80	11.13	9.16	5.05	2.80
Curtosis (Pearson)	16.61	2.44	5.88	-0.30	4.61	6.70	15.20	7.06
Error típico de la media	1.785	1.892	1.126	1.142	0.72	0.851	0.62	0.461

En la figura 2, se observa que los datos >50 (mg/L) se agrupan en las cercanías de Coquimbo y al norte de La Serena, y se concentran en zonas donde el nivel freático varía entre 100 a 200 msnm. Estas muestras se ubican en el acuífero Culebrón Lagunillas, coincidiendo con zonas de moderada a alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados, y a su vez con zonas de uso de suelo de terrenos agrícolas y matorrales. En el mapa se describe que la cantidad de muestras >50 (mg/L) son 9 para esta región, pero estas no concuerdan con la cantidad representada en este (como puntos rojos) porque el nitrato en cada pozo se ha medido en un periodo de tres años, y debido a la escala de trabajo los puntos se sobreponen, esto también ocurre en las regiones de Metropolitana y O'Higgins.

En la región de Valparaíso (Figura 3) se emplearon 114 muestras de nitrato y 95 de nivel estático obtenidos entre 2015 y 2019. Las muestras del primer intervalo se

distribuyen de manera aleatoria en la región, en su mayoría se asocian a niveles de agua entre 0 a 1100 msnm. Las concentraciones de entre 30-50 (mg/L) se ubican principalmente en el sector norte de la región entre niveles de agua 0 a 700 msnm. Las muestras >50 (mg/L) se asocian a niveles de agua menores entre 50 a 300 msnm. Un grupo de estas muestras se distribuye entre Quillota y Villa Alemana, y el resto de las muestras se ubican en las cercanías de Casablanca y Cartagena. Estas concentraciones se encuentran en los acuíferos Aconcagua, Casablanca, Estero Cartagena y Maipo Desembocadura, coincidiendo con zonas de baja a muy alta vulnerabilidad² en depósitos no consolidados.

² Un sistema es vulnerable cuando una acción puede causar un perjuicio (daño, deterioro, degradación). Es una medida cualitativa o cuantitativa de un índice de la mayor o menor facilidad con que se puede infringir ese perjuicio. La vulnerabilidad a la contaminación indica la capacidad del sistema para absorber alteraciones, tanto naturales como artificiales (Wall y otros, 2006).

Al mismo tiempo, estas muestras coinciden con zonas de uso de suelo agrícola y de

matorrales.

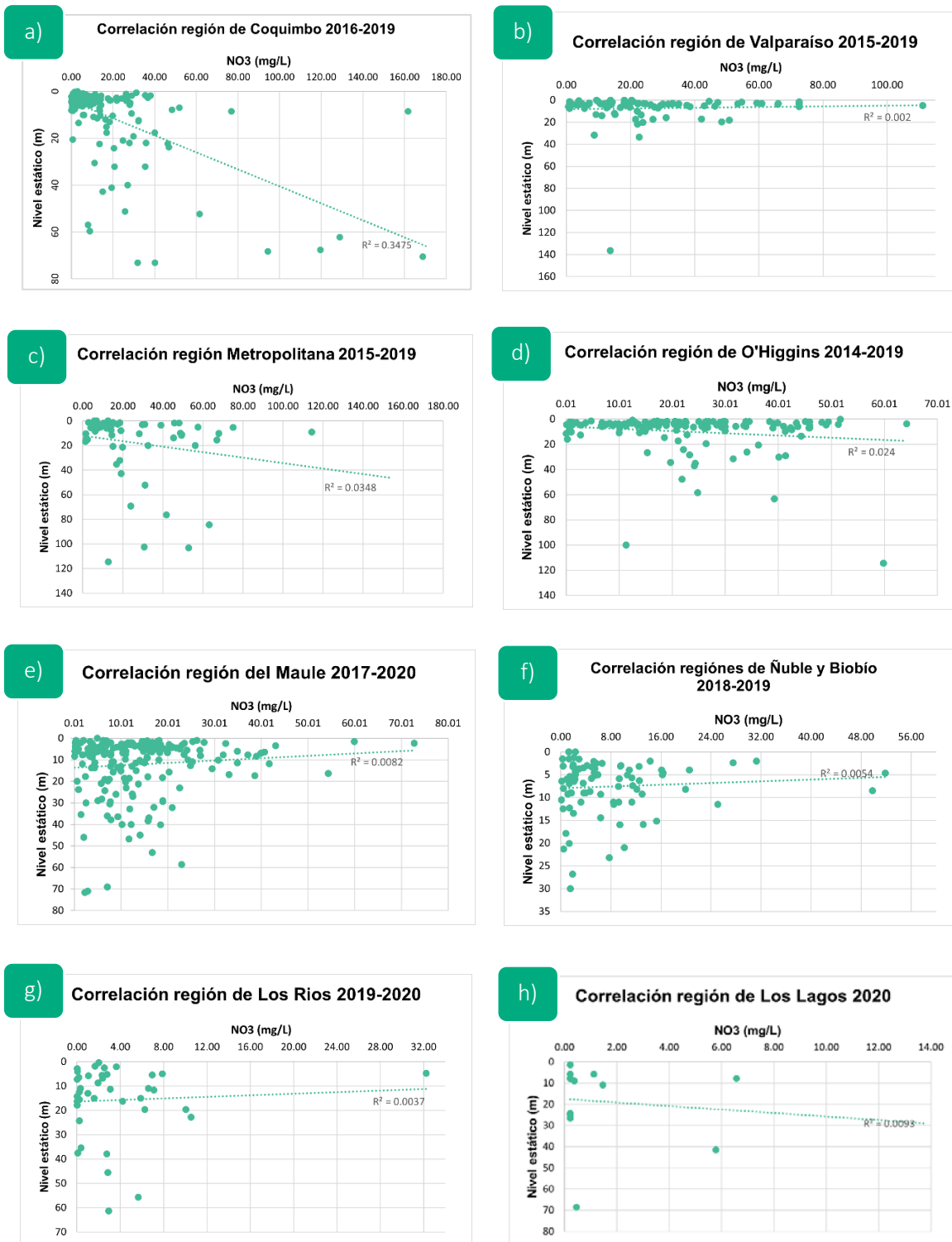


Figura 1. Gráficos de dispersión y coeficiente de correlación de Pearson entre nivel estático de pozos APR y concentraciones de nitrato de a) región de Coquimbo, b) región de Valparaíso, c) región Metropolitana, d) región de O'Higgins, e) región del Maule, f) regiones de Ñuble y Biobío, g) región de Los Ríos y h) región de Los Lagos.

Se contó con 423 datos de concentraciones de nitrato y 65 datos de nivel estático para elaborar el mapa de la región Metropolitana (Figura 4), abarcando los años 2015 a 2019. Las muestras del primer intervalo se distribuyen aleatoriamente en la región, agrupándose la mayor parte de estas en el sector sureste, asociadas a niveles de agua de entre 100 a 500 msnm. Las del segundo intervalo se ubican en zonas donde el nivel freático varía entre 150 a 500 msnm. Las muestras >50 (mg/L) se encuentran en Chicureo, Paine, y entre Melipilla y Peñaflo asociadas entre niveles de agua 200 a 510 msnm. Estas forman parte del acuífero Maipo, y coinciden con zonas de baja a alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados. Que al mismo tiempo se asocian a zonas de usos de suelo de áreas urbanas e industriales, y terrenos agrícolas.

El mapa de la región de O'Higgins (Figura 5) se elaboró en base 169 datos de nitrato y 134 datos de nivel estático obtenidos entre 2014 y 2019. Las muestras <30 (mg/L) se concentran en el centro de la región, asociadas a niveles de agua que van desde 50 a 900 msnm, mientras que las muestras entre 30-50 (mg/L) se ubican entre 170 a 500 msnm de nivel freático. Las muestras >50 (mg/L) se distribuyen en las cercanías de Rengo, Santa Cruz y Las Cabras, en zonas donde el nivel de agua varía entre 170 y 300 msnm. Estas últimas, forman parte de los acuíferos Cachapoal y Tinguiririca, y se ubican en áreas de alta a extrema vulnerabilidad. Coincidiendo con usos de suelo de áreas urbanas e industriales, terrenos agrícolas, y en un caso particular con cuerpos de agua.

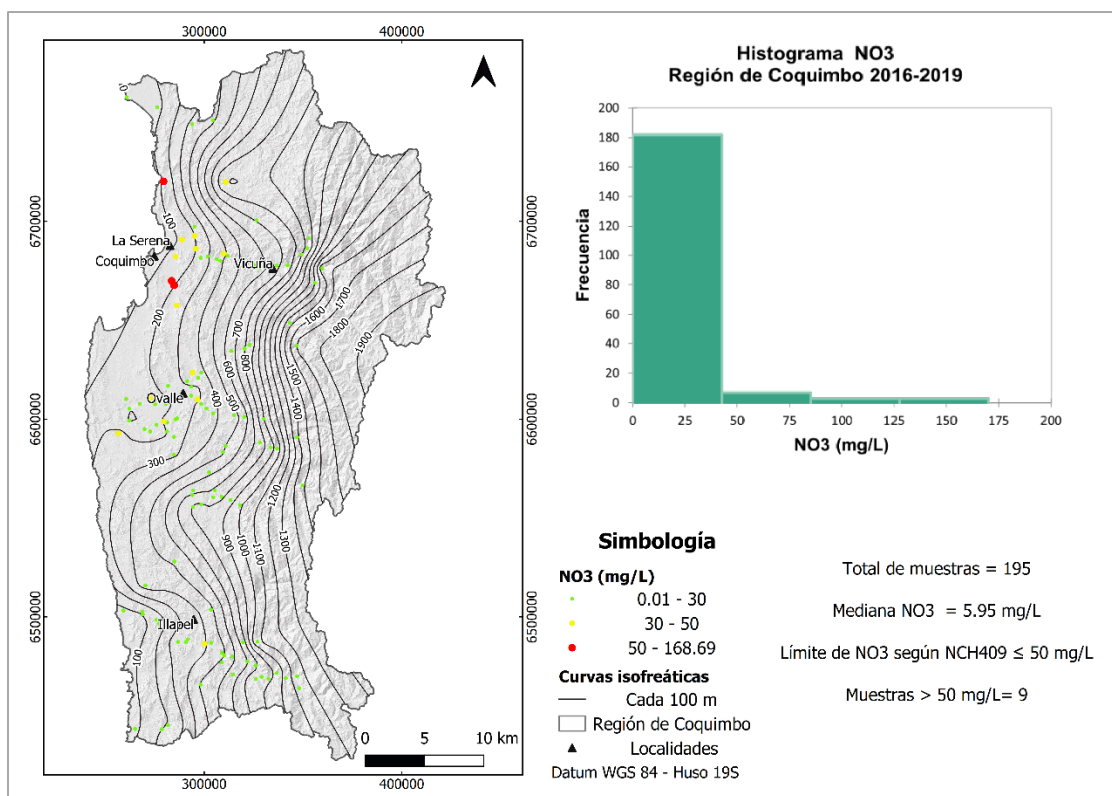


Figura 2. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de Coquimbo.

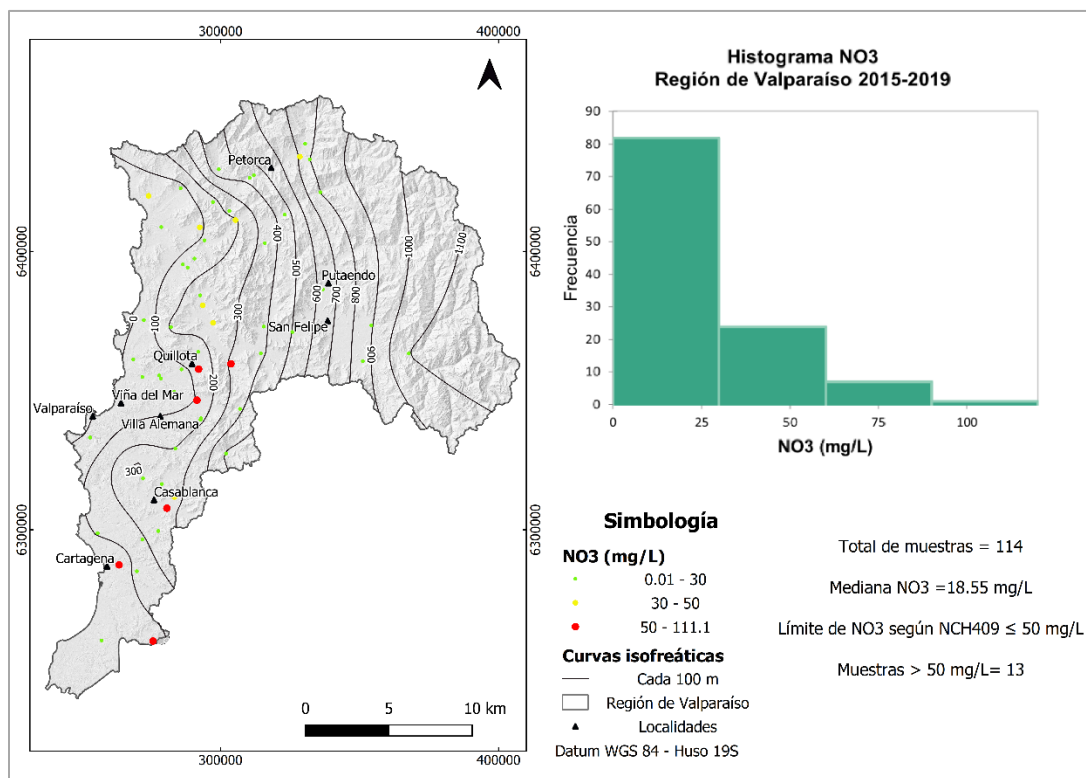


Figura 3. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de Valparaíso.

Para la región del Maule (Figura 6) se contó 239 datos de nitrato y con 207 datos de nivel estático entre los años 2017 y 2020. Las muestras del primer intervalo se distribuyen a lo largo de la depresión intermedia en el centro de la región entre niveles de agua 50 a 450 msnm. Las concentraciones del segundo intervalo se asocian a niveles estáticos entre 50 a 350 msnm. Luego, los datos >50 (mg/L) de nitrato se ubican entre Cumpeo y Curicó zonas donde el nivel de freático varía entre 150 a 350 msnm, en los acuíferos Mataquito y Maule Medio en zonas de moderada a alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados. Y también con usos de suelo de áreas urbanas e industriales y terrenos agrícolas.

Para las regiones Ñuble-Biobío (Figura 7) se contó con 117 datos de concentraciones de nitrato y 91 de nivel estático, adquiridos entre 2018 y 2019. La mayor parte de las muestras pertenecen al primer intervalo de

valores asociadas a niveles freáticos del orden de 0 a 250 msnm, mientras que de manera local se reconocen muestras 30-50 (mg/L) en la zona central de la región entre niveles de agua de 40 a 80 msnm. Sólo se cuenta con una muestra >50 (mg/L) que se encuentra en las cercanías de Chillán, esta coincide con zonas alta vulnerabilidad de acuífero en depósitos no consolidados y con usos de suelo de áreas urbanas e industriales.

Para la región de Los Ríos (Figura 8) se utilizaron 68 muestras de nitrato y 26 de nivel estático, adquiridos entre 2019 y 2020. La mayor cantidad de muestras pertenecen al primer intervalo de valores asociadas a niveles de agua entre 50 a 200 msnm, y sólo una alcanza el segundo intervalo con 32.2 (mg/L) siendo el valor máximo, esta se encuentra en las cercanías de Valdivia.

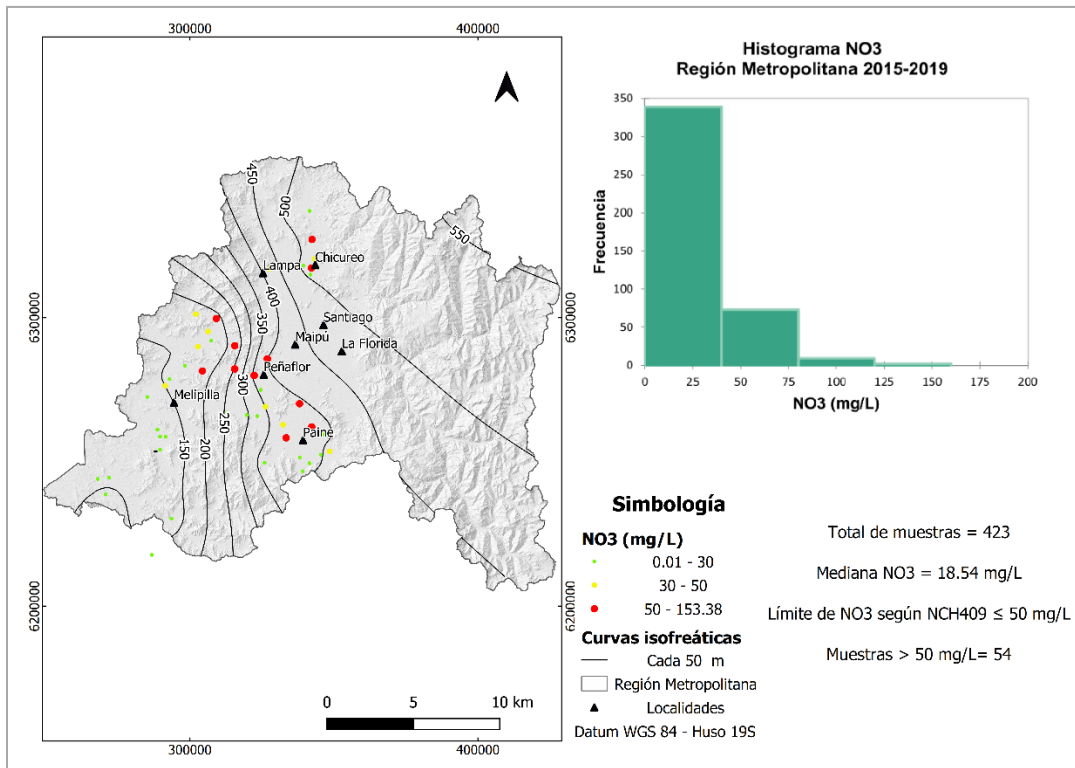


Figura 4. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región Metropolitana.

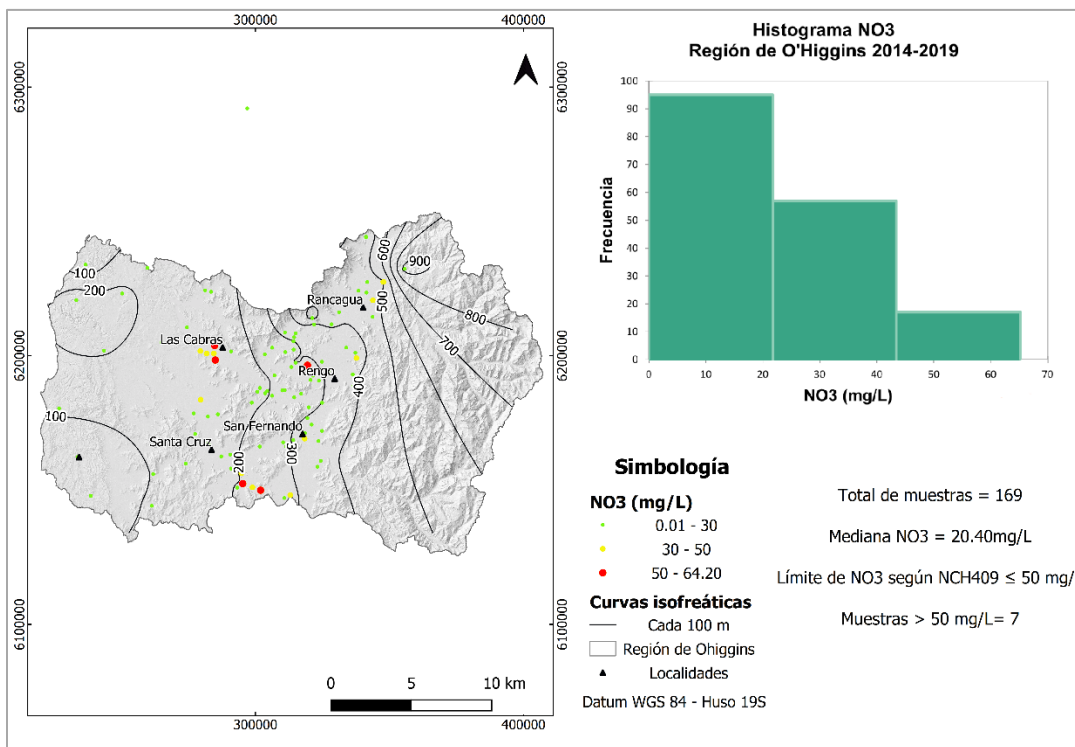


Figura 5. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de O'Higgins.

En la región de Los Lagos (Figura 9) se trabajó con 38 muestras de nitrato y de nivel estático

13, ya que la red de calidad fue implementada recientemente en el año 2020.

El máximo de nitrato corresponde a 13.83 (mg/L), por ende, todas las muestras clasifican en el primer intervalo, estas se

distribuyen en las cercanías de Osorno, Puerto Varas y Puerto Montt principalmente, entre niveles freáticos 0 a 120 msnm.

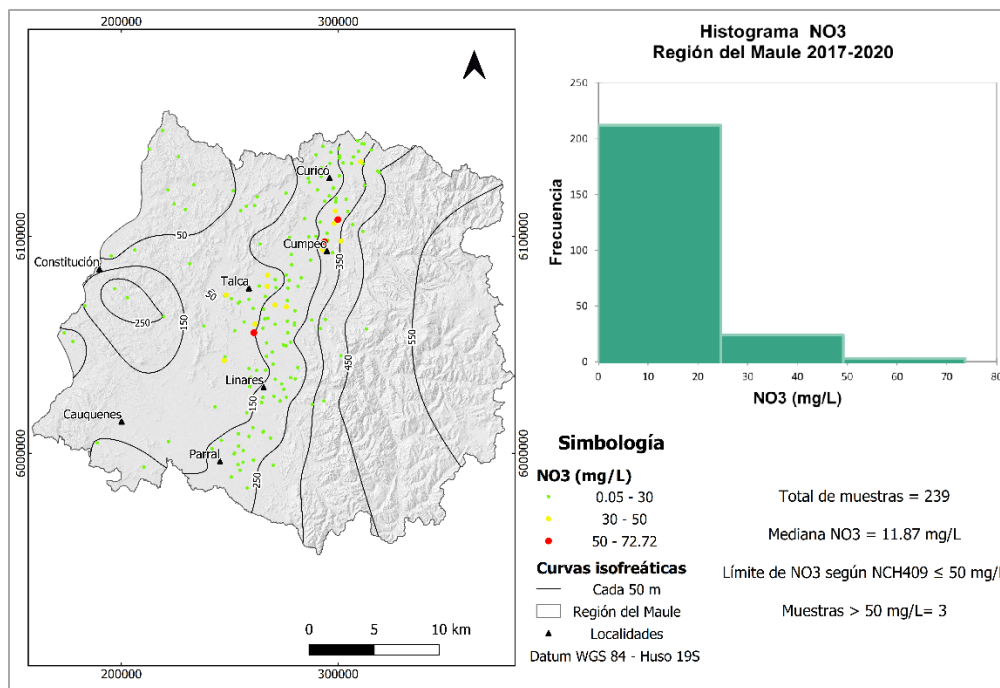


Figura 6. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región del Maule.

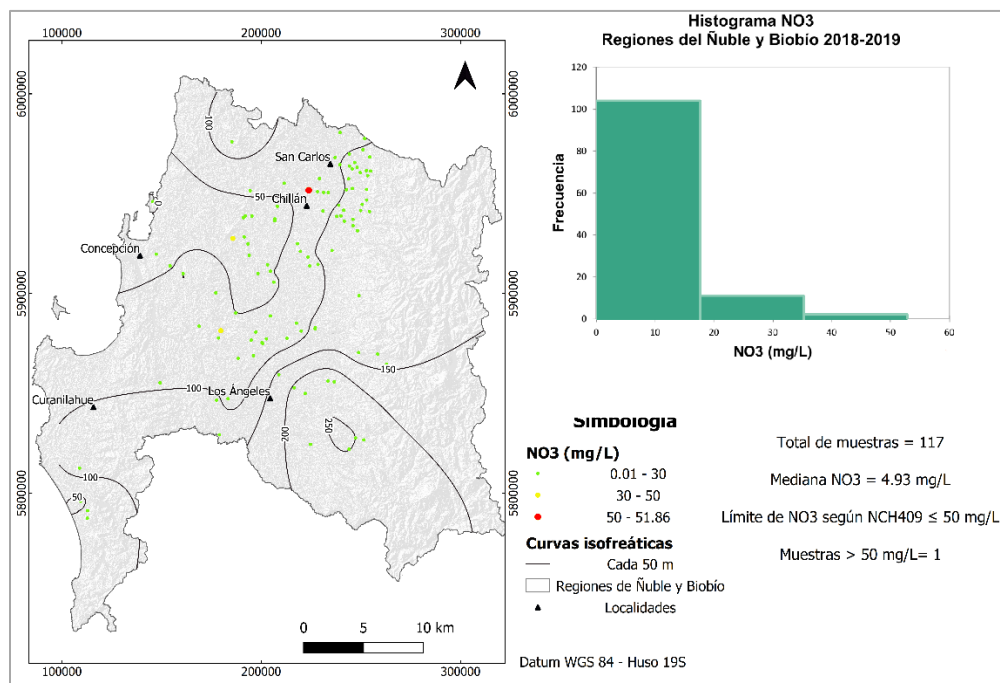


Figura 7. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de las regiones de Ñuble y Biobío.

Así en términos generales, se tiene que las regiones con mayor cantidad de muestras >50 (mg/L) de nitrato en orden creciente corresponden a: Maule (3), O'Higgins (7), Coquimbo (9), Valparaíso (13) y Metropolitana (54). Estas concentraciones

coinciden en su mayoría con zonas de moderada a extrema vulnerabilidad de acuíferos en depósitos no consolidados, y al mismo tiempo con usos de suelo de terrenos agrícolas y áreas urbanas e industriales principalmente.

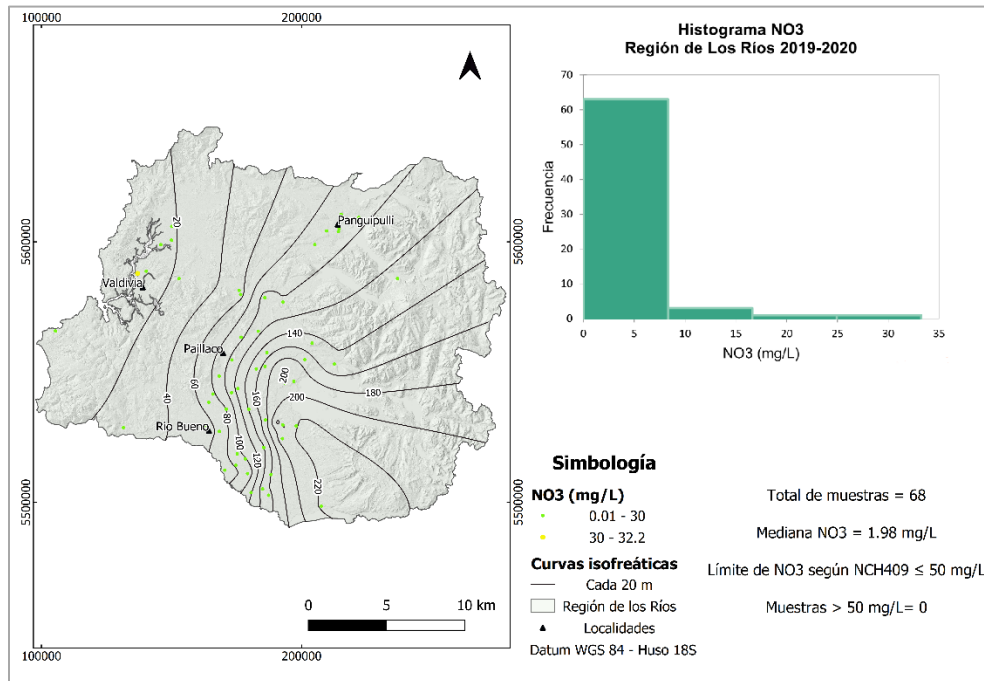


Figura 8. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de los Ríos.

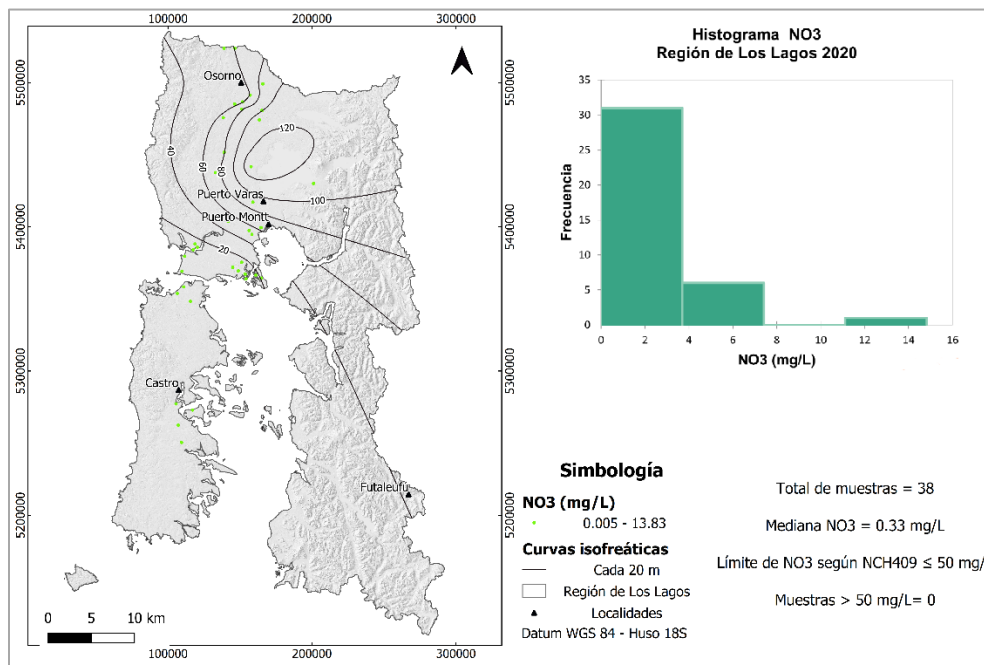


Figura 9. Mapa de nitrato y curvas isofreáticas de la región de Los Lagos.

Tabla 2. Resumen de usos de suelo y vulnerabilidad de acuíferos asociados a las muestras >50 (mg/L) de nitrato.

	N° Muestras > 50 (mg/L)	Uso de suelo asociado	Acuíferos	Vulnerabilidad de los acuíferos asociados
COQUIMBO	9	Terrenos agrícolas	Culebrón Lagunillas	Moderada a alta en depósitos no consolidados
		Matorral-suculentas		
VALPARAÍSO	13	Terrenos agrícolas	Aconcagua	Baja a muy alta en depósitos no consolidados
			Casablanca	
		Matorral-praderas	Maipo Desembocadura	
			Estero Cartagena	
METROPOLITANA	54	Áreas urbanas e industriales	Maipo	Baja a alta en depósitos no consolidados
		Terrenos agrícolas		
O'HIGGINS	7	Terrenos agrícolas	Choapa	Alta a extrema en depósitos no consolidados
		Cuerpos de agua	Tinguiririca	
		Áreas urbanas e industriales		
MAULE	3	Áreas urbanas e industriales	Mataquito	Moderada a alta en depósitos no consolidados
		Terrenos agrícolas	Maule Medio	
ÑUBLE-BIOBÍO	1	Áreas urbanas e industriales	Sin información	Alta a extrema en depósitos no consolidados
LOS RÍOS	0	-	-	-
LOS LAGOS	0	-	-	-

5. Discusión

En base a los resultados de estadística descriptiva se reconoce que la tendencia de los datos de nitrato a una distribución asimétrica positiva recae en que parámetros como la mediana y la moda, sean más representativas del conjunto de datos que la media. A pesar de que la mayor cantidad de datos se agrupa en el intervalo que comprende el límite de detección y los 30 (mg/L), es importante visualizar las zonas con concentraciones cercanas a esta última cifra, ya que esta es interpretada como un umbral de alerta, cercano al límite de la norma vigente.

Los bajos índices de correlación entre nitrato y nivel del agua, pueden deberse a la densidad y desbalance de datos, pero también debe considerarse como factor adicional no tener certeza sobre la profundidad a la que se toman las muestras al no tener información de la habilitación de los pozos (ubicación de las cribas). En las campañas de medición en fuentes APR, no siempre es posible cuantificar el nivel estático de estos pozos. Este desbalance de información, se refleja principalmente en la región Metropolitana que cuenta con una alta cantidad de datos de nitrato, pero baja densidad de datos del nivel de agua. Esto además puede inducir a errores en la

interpolación de los datos de nivel de agua en la creación de curvas de nivel isofreático. En regiones como Los Ríos y Los Lagos que llevan un corto periodo de medición es aún más complejo establecer una correlación estadística entre ambas variables. Sin embargo, los mapas elaborados señalan que, en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'higgins, Maule y Ñuble-Biobío existen relaciones espaciales entre altas concentraciones de nitrato y niveles bajos de freáticos entre 100 a 300 msnm, donde la zona no saturada tiene un menor espesor facilitando el transporte de contaminantes como el nitrato hacia las aguas subterráneas.

En el medioambiente el nitrato es asimilado directamente por microorganismos y plantas, (Boixadera y Cortés, 2000 en Martínez, 2011), esto podría explicar la disminución de los valores de nitrato hacia el sur del país, donde aumenta la presencia y diversidad de especies vegetales. Aun así, Sepúlveda y otros (2011) indican que la intensificación de la producción agrícola, ganadera y acuícola en las regiones de Los Ríos y Los Lagos del último tiempo hace que estas regiones sean susceptibles a la contaminación de nitrato. Es por esto, que se requiere un aumento estaciones de monitoreo en el agua subterránea de estas regiones.

En base a los mapas elaborados para cada región se han logrado distinguir las zonas donde las concentraciones de nitrato superan lo establecido por la norma de agua potable NCH409 indicando que dicha agua no es apta para el consumo humano. El hecho de que estas muestras coincidan en su mayoría con zonas de usos de suelo de terrenos agrícolas y áreas urbanas e industriales indicarían que el origen de este contaminante en las aguas subterráneas se debe principalmente a las actividades humanas. Esto coincide con lo expuesto por Arumi y otros (2020), que en base a isotopos estables de nitrógeno identificaron que el origen del nitrato en aguas tanto superficiales como subterráneas

poco profundas del centro de Chile, está asociado a la urea y fertilizantes de amonio provenientes de actividades agrícolas.

El agua de las fuentes APR cuenta en su mayoría con tratamientos enfocados en la desinfección, pero estos no remueven el nitrato, por lo que es probable encontrar altos niveles de este contaminante en estas aguas. Lo que no deja de ser alarmante, ya que el agua subterránea es una de las principales fuentes de consumo humano en zonas donde la geografía compleja y los problemas de conectividad con centros urbanos agudizan la crisis hídrica. Se han desarrollado diversas técnicas fisicoquímicas y biológicas, para eliminar nitratos del agua. Una de las más recomendados es la desnitrificación biológica, que consta de bacterias que descomponen el nitrato (NO_3) para metabolizar el oxígeno, liberando gas nitrógeno inofensivo (Rezvani, 2019). En comparación a otros métodos resulta rentable, ofrece una alta recuperación de agua, no deja salmuera ni corriente residual concentrada, realiza una eliminación de múltiples contaminantes y requiere limitados insumos químicos (Matějů y otros, 1992; Kapoor y Viraraghavan 1997; Vasiliadou y col. 2006; Moon y col. 2008; Karanasios y otros, 2010, en Rezvani, 2019).

La norma NCH1.333 indica los requisitos de calidad de agua para diferentes usos, y no establece un límite para el nitrato en las siguientes aplicaciones: el agua de regadío, agua de uso recreativo con y sin contacto directo, y agua destinada a estética. Por lo que el agua con significativas concentraciones de nitrato puede emplearse para dichas actividades.

El Ministerio del Medio Ambiente trabaja en la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) en aire, agua y suelo (Ley 19.300). Estas normas apoyan el control del impacto de contaminantes de fuentes puntuales y difusas en la calidad del agua, y su impacto en los ecosistemas

(Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Bajo este contexto, y considerando que los mayores contenidos de nitrato coinciden con acuíferos de moderada a alta, e incluso extrema vulnerabilidad, es necesario tener en cuenta la elaboración de una norma secundaria de nitratos en acuíferos. Esto podría contribuir a prevenir futuras contaminaciones y daños a una de las principales fuentes de agua en el país.

La red de monitoreo de pozos APR, constituye una importante fuente de levantamiento de información, útil para el manejo y gestión del agua en el país. En función de lo analizado en este estudio, se recomienda reforzar la distribución de pozos APR en las regiones del norte como Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, y en las regiones del extremo sur como Aysén y Magallanes, que están fuera de este estudio, por falta de información. También, se requiere robustecer el balance de datos de las fuentes APR existentes, para así poder establecer mejores relaciones entre parámetros en el futuro.

6. Conclusiones

Las concentraciones de nitrato en la mayoría de las regiones de estudio tienden a agruparse entre valores que van desde el límite de detección a los 30 (mg/L). Aun así, las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y el Maule, presentan diversas muestras sobre los 50 (mg/L) límite tolerado por la norma de agua potable NCH409, coincidiendo en su mayoría con zonas de usos de suelo de terrenos agrícolas y áreas urbanas e industriales, además de acuíferos con moderada a alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados. De momento, no existe una correlación estadística entre las concentraciones de nitrato y el nivel del agua subterránea asociado. Sin embargo, en las regiones con muestras >50 (mg/L) sí se distinguen patrones espaciales entre ambos parámetros, por lo que se recomienda evaluar en detalle

gestiones asociadas a la profundización de pozos en estas zonas.

Los resultados obtenidos indican que las actividades agrícolas e industriales serían las principales responsables de la contaminación de nitrato en las aguas subterráneas y acuíferos del país. Considerando que el impacto del nitrato en la salud humana se asocia principalmente a enfermedades como metahemoglobinemia, cáncer del canal alimenticio y patologías de la glándula de la tiroides, y en el medioambiente a la eutrofización de medios naturales, es necesario fiscalizar y controlar las emisiones de este contaminante hacia los acuíferos por parte de estas actividades humanas. En este sentido, se requiere evaluar la pertinencia de la normativa actual en cuanto al contenido apto para consumo humano, además de considerar la implementación de métodos que remuevan este nutriente del agua como la desnitrificación biológica. Entendiendo lo relevante que son las aguas subterráneas en el contexto de la crisis hídrica, se recomienda avanzar en una normativa secundaria de nitrato en acuíferos o de protección de fuentes con el objetivo de prevenir la contaminación de estos.

Finalmente, el aumento de estaciones de medición de fuentes APR junto con una óptima densidad y balance de datos, permitiría en un futuro obtener resultados más concluyentes en cuanto a la relación de las concentraciones de nitrato y el nivel de las aguas subterráneas, contribuyendo a la toma de decisiones y correcta gestión del agua en el país.

7. Referencias

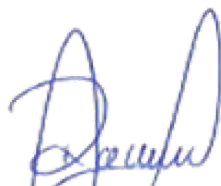
- ALMASRI, M. (2007). Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environmental Impact Assessment Review*. Vol. 27 (3): 220-242.
- ARUMI, J.; SALGADO, L. & CLARET, M. (2006). Evaluación del riesgo de contaminación con nitrato de pozos de suministro de agua potable

- rural en Chile. *Revista Panamericana de Salud Pública*. Vol. 20: 385-392.
- ARUMI, J.; ESCUDERO, M.; AGUIRRE, E.; SALGADO, J. & ARAVENA, R. (2020). Use of environmental isotopes to assess groundwater pollution caused by agricultural activities. *Isotopes in Environmental and Health Studies*. Vol. 56(5-6): 673-683.
- DAMANIA, R.; DESBUREAUX, S.; RODELLA, A.; RUSS, J. & ZAVERI, E. (2019). *Quality Unknown: The Invisible Water Crisis*. Banco Mundial. Washington, DC.
- DEBERNARDI, L.; DE LUCA, D. & LASAGNA, M. (2008). Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability. *Environmental Geology*. Vol 55(3): 539-558.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). (2020). Seguimiento de Calidad de Agua Subterránea en pozos APR -Periodo 2019. Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), Nº 22/2020, Santiago.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). (2017). Diagnóstico de la Calidad de Aguas subterráneas Región Coquimbo, SIT 397/2017.
- DONOSO, R. & CORTÉS, S. (2018). Exposición a nitratos en agua y su relación con disfunción de la glándula tiroides: revisión sistemática ¿Existen riesgos para la salud de la población?. *Revista médica de Chile*. Vol 146(2): 223-231.
- GURDAK, J. & QI, S. (2012). Vulnerability of recently recharged groundwater in principle aquifers of the United States to nitrate contamination. *Environmental science & technology*. Vol 46(11): 6004-6012.
- JOHNSON, C. & KROSS, B. (1990). Continuing importance of nitrate contamination of groundwater and wells in rural areas. *American journal of industrial medicine*. Vol. 18(4): 449-456.
- LEE, S.; MIN, K.; WOO, N.; KIM, Y. & AHN, C. (2003). Statistical models for the assessment of nitrate contamination in urban groundwater using GIS. *Environmental Geology*. Vol. 44 (2): 210-221.
- MARTÍNEZ, F.; OJEDA, D.; HERNÁNDEZ, A.; MARTÍNEZ, J. & QUEZADA, G. (2011). El exceso de nitratos: Un problema actual en la agricultura. *Synthesis*. 11-16.
- MASETTI, M.; POLI, S.; STERLACCHINI, S.; BERETTA, G. & FACCHI, A. (2008). Spatial and statistical assessment of factors influencing nitrate contamination in groundwater. *Journal of environmental management*. Vol. 86 (1): 272-281.
- MESA NACIONAL DEL AGUA. (2020). Primer Informe. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Públicas, Santiago.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. (2017). Guía para la elaboración de normas secundarias de calidad ambiental en aguas continentales y marinas 2017. Santiago.
- PACHECO, A. & CABRERA, S. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Revista Ingeniería*. Vol. 7 (2): 47-54.
- REZVANI, F.; SARRAFZADEH, M.; EBRAHIMI, S. & OH, H. (2019). Nitrate removal from drinking water with a focus on biological methods: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 26 (2): 1124-1141.
- SCHMIDT, T.; SEDAGHAT, S.; ROSEL, P. & FIERRO, J. (2012). Medición de nitratos y nitritos en agua y saliva de población rural precordillerana de la VIII región. *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*. Vol. 72(2): 119-124.
- SEPÚLVEDA, A.; GONZÁLEZ, E. & INOSTROZA, C. (2012). Remediación de la contaminación por nitratos en el suelo: antecedentes generales y pertinencia en zona sur de Chile.
- SUTHAR, S.; BISHNOI, P.; SINGH, S.; MUTIYAR, P.; NEMA, A. & PATIL, N. (2009). Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan, India. *Journal of hazardous materials*. Vol. 171(1-3): 189-199.

WALL, R.; ESPINOZA, C.; HUERTA, S. (2006). Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la Biodiversidad: identificación de zonas críticas. Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito). Santiago. 5 p., 10 mapas, escala 1:500.000.



FERNANDA ARÁNGUIZ OJEDA
ESTUDIANTE DE GEOLOGÍA
UNVIERSIDAD DE CONCEPCIÓN



DAMIELA FREDES MUÑOZ
ANALISTA DE DESARROLLO AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE
RECURSOS HÍDRICOS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS



DIEGO SAN MIGUEL CORNEJO
JEFA DEL AREA DE DESARROLLO AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE
RECURSOS HÍDRICOS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS