



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL ESTADO GEOQUÍMICO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SEDIMENTOS ACTIVOS DEL RÍO HUASCO

Memoria para optar al Título de Geóloga

Josefa Paz Velásquez González

Profesora Patrocinante: Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo
Profesional Guía: Dra. Ana Verónica Valdés Durán
Profesores Comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado
MSc. Abraham Elías González Martínez

CONCEPCIÓN, 2023

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.	
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Objetivos.	2
1.1.1. Objetivo General.	2
1.1.2. Objetivos específicos.	2
1.2. Antecedentes teóricos.	3
1.2.1. Conceptos geoquímicos básicos.	3
1.2.2. Estado del Arte.	4
1.2.3. Calidad del agua y legislación ambiental en Chile.	5
1.3. Transferencia de masa en la hidrósfera.	7
1.4. Agradecimientos.	8
2. ANTECEDENTES.	9
2.1. Ubicación y Accesos.	9
2.2. Geomorfología.	10
2.3. Clima.	11
2.4. Principales actividades económicas de la zona.	13
2.4.1. Sector minero.	13
2.4.2. Sector agrícola.	13
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.	15
3.1. Rocas del basamento.	17
3.1.1. Devónico-Carbonífero.	17
3.1.1.1. Complejo Epimetamórfico Chañaral.	17
3.2. Rocas estratificadas.	17
3.2.1. Triásico superior -Jurásico inferior.	17
3.2.1.1. Formación Canto del Agua (Anísico-Sinemuriano).	17
3.2.2. Jurásico inferior.	18
3.2.2.1. Formación La Negra (Pleinsbachiano-Jurásico superior).	18
3.2.3. Jurásico superior-Cretácico inferior.	18
3.2.3.1. Formación Punta del Cobre (Jurásico superior-Valanginiano).	18
3.2.4. Cretácico inferior.	19
3.2.4.1. Grupo Chañarcillo.	19
3.2.4.1.1. Formación Nantoco (Hauteriviano Superior).	19
3.2.4.1.2. Formación Totalillo (Barremiano).	19
3.2.4.1.3. Formación Pabellón (Barremiano superior-Aptiano).	20
3.2.5. Cretácico.	20
3.2.5.1. Formación Cerrillos (Albiano-Campaniano).	20
3.2.6. Mioceno-Plioceno.	20
3.2.6.1. Gravas de Atacama.	20
3.2.6.2. Gravas del río Huasco.	20
3.2.6.3. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos.	21
3.2.7. Pleistoceno-Holoceno.	21
3.2.7.1. Depósitos Litorales.	21
3.2.7.2. Depósitos Aluviales.	21
3.2.7.3. Depósitos Eólicos.	22
3.2.7.4. Depósitos fluviales.	22
3.3. Rocas ígneas.	22
3.3.1. Cretácico inferior.	22

3.3.1.1. Complejo plutónico Infiernillo (131-129 Ma).....	22
3.3.1.2. Complejo plutónico Retamilla (126 Ma).....	22
3.3.1.3. Complejo plutónico la Higuera (124-122 Ma).....	23
3.3.2. Maastrichtiano-Daniano	23
3.3.2.1. Complejo plutónico Los Morteros (69-68 Ma).....	23
3.3.2.2. Complajo plutónico Pie de Gallo (65-64 Ma).....	23
4. METODOLOGÍA	25
4.1. Toma de muestras	25
4.1.1. Trabajo de terreno	26
4.1.2. Análisis químico	26
4.1.3. Límite de detección y coincidencia de los datos 2007-2008	27
4.2. Metodología de análisis de resultados geoquímicos	29
4.2.1. Marco teórico estadístico	29
4.2.1.1. Datos composicionales.....	29
4.2.1.2. Transformación Isometric <i>log ratio</i> (<i>ilr</i>).....	31
4.2.1.3. Estadística Univariable.....	32
4.2.1.3.1. Línea geoquímica base.....	32
4.2.1.3.2. Análisis <i>Box-plot</i>	33
4.2.1.4. Análisis multivariable.....	34
4.2.1.4.1. Análisis de componentes principales.....	34
4.2.1.4.2. Análisis factorial.....	34
4.2.1.5. Identificación de fuentes de proveniencia.....	34
4.2.1.5.1. Factor de Enriquecimiento.....	34
4.2.1.5.2. Estadística Multivariable.....	35
4.3. Comparación de resultados con estudios similares	36
4.3.1. Estudios realizados en aguas superficiales	36
4.3.1.1. Estudio CENMA (2016).....	37
4.3.1.2. Dirección General de Aguas.....	38
4.3.2. Estudios realizados en sedimentos activos	39
4.3.2.1. Lacassie J.P & Díaz, A.	40
4.3.2.2. Estudio CENMA (2017).....	41
4.3.3. Coincidencia en las bases de datos	41
4.4. Parámetros geoquímicos importantes en la evaluación de la calidad ambiental	42
5. RESULTADOS	45
5.1. Estadística Univariable	45
5.1.1. Elementos Mayores	46
5.1.1.1. Aguas superficiales.....	46
5.1.1.2. Sedimentos activos	54
5.1.2. Elementos traza	59
5.1.2.1. Aguas superficiales.....	59
5.1.2.2. Sedimentos activos.....	81
5.2. Estadística Multivariable	109
5.2.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)	109
5.2.2. Análisis Factorial	110
5.3. Factor de Enriquecimiento	113
5.4. Comparación con otras bases de datos	115
5.4.1. Aguas superficiales	116
5.4.2. Sedimentos activos	120
6. DISCUSIÓN	130
6.1. Distribución y Origen de elementos Mayores	130
6.1.1. Aguas superficiales	130

6.1.2. Sedimentos activos.....	133
6.2. Distribución y Origen de elementos Trazas	136
6.2.1. Aguas superficiales.....	136
6.2.2. Sedimentos activos.....	140
6.3. Comparación valores 2007-2008 y valores 2015-2016.....	144
6.4. Calidad Ambiental en ambas matrices.....	147
7.CONCLUSIÓN.....	149

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1: Mecanismos de transferencia de masa entre las distintas esferas de la tierra.....	7
2. 1: Mapa de Ubicación y Accesos.....	9
2. 2: Principales factores que controlan el clima en la cuenca del río Huasco.....	11
3. 1: Geología del río Huasco.....	15
4. 1: Ubicación puntos de muestreo.....	25
4. 2: Rerepresentación gráfica del espacio generado por una transformación ilr.....	32
4. 3: Diagrama <i>Box-plot</i> teórico.....	33
4. 4: Ubicación muestras informe CENMA (2016).....	37
4. 5: Ubicación de estaciones de monitoreo físico-químico activas DGA.....	38
4. 6: Ubicación muestras Lacassie & Díaz 2019.....	40
4. 7: Ubicación muestras de sedimentos informe CENMA, 2017.....	41
4. 8: Áreas de vigilancia definidas para la NSCA del río Huasco.....	43
5. 1: Perfil O-E concentraciones de Ca en aguas superficiales.....	47
5. 2: Perfil O-E concentraciones de Na en aguas superficiales.....	48
5. 3: Perfil O-E concentraciones de Mg en aguas superficiales.....	49
5. 4: Perfil O-E concentraciones de K en aguas superficiales.....	50
5. 5: Perfil O-E concentraciones de Cl en aguas superficiales.....	51
5. 6: Perfil O-E concentraciones de Si en aguas superficiales.....	52
5. 7: Perfil O-E concentraciones de NO ₃ en aguas superficiales.....	53
5. 8: Perfil O-E concentraciones de Ca en sedimentos activos.....	55
5. 9: Perfil O-E concentraciones de Ti en sedimentos activos.....	56
5. 10: Perfil O-E concentraciones de Mn en sedimentos activos.....	57
5. 11: Perfil O-E concentraciones de Fe en sedimentos activos.....	58
5. 12: Perfil O-E concentraciones de Li en aguas superficiales.....	61
5. 13: Perfil O-E concentraciones de B en aguas superficiales.....	62
5. 14: Perfil O-E concentraciones de Sc en aguas superficiales.....	63
5. 15: Perfil O-E concentraciones de V en aguas superficiales.....	64
5. 16: Perfil O-E concentraciones de Mn en aguas superficiales.....	65
5. 17: Perfil O-E concentraciones de Co en aguas superficiales.....	66
5. 18: Perfil O-E concentraciones de Ni en aguas superficiales.....	67
5. 19: Perfil O-E concentraciones de As en aguas superficiales.....	68
5. 20: Perfil O-E concentraciones de Se en aguas superficiales.....	69
5. 21: Perfil O-E concentraciones de Sr en aguas superficiales.....	70
5. 22: Perfil O-E concentraciones de Ba en aguas superficiales.....	71
5. 23: Perfil O-E concentraciones de U en aguas superficiales.....	72
5. 24: Perfil O-E concentraciones de Al en aguas superficiales.....	73
5. 25: Perfil O-E concentraciones de Fe en aguas superficiales.....	74
5. 26: Perfil O-E concentraciones de Cu en aguas superficiales.....	75
5. 27: Perfil O-E concentraciones de Zn en aguas superficiales.....	76
5. 28: Perfil O-E concentraciones de Mo en aguas superficiales.....	77

5.	29:	Perfil O-E concentraciones de Sb en aguas superficiales.....	78
5.	30:	Perfil O-E concentraciones de Pb en aguas superficiales.....	79
5.	31:	Perfil O-E concentraciones de F en aguas superficiales.....	80
5.	32:	Perfil O-E concentraciones de Sc en sedimentos activos.....	83
5.	33:	Perfil O-E concentraciones de V en sedimentos activos.....	84
5.	34:	Perfil O-E concentraciones de Cr en sedimentos activos.....	85
5.	35:	Perfil O-E concentraciones de Co en sedimentos activos.....	86
5.	36:	Perfil O-E concentraciones de Ga en sedimentos activos.....	87
5.	37:	Perfil O-E concentraciones de As en sedimentos activos.....	88
5.	38:	Perfil O-E concentraciones de Rb en sedimentos activos.....	89
5.	39:	Perfil O-E concentraciones de Y en sedimentos activos.....	90
5.	40:	Perfil O-E concentraciones de Ag en sedimentos activos.....	91
5.	41:	Perfil O-E concentraciones de Sn en sedimentos activos.....	92
5.	42:	Perfil O-E concentraciones de Sb en sedimentos activos.....	93
5.	43:	Perfil O-E concentraciones de La en sedimentos activos.....	94
5.	44:	Perfil O-E concentraciones de Ce en sedimentos activos.....	95
5.	45:	Perfil O-E concentraciones de Bi en sedimentos activos.....	96
5.	46:	Perfil O-E concentraciones de Th en sedimentos activos.....	97
5.	47:	Perfil O-E concentraciones de Zn en sedimentos activos.....	98
5.	48:	Perfil O-E concentraciones de Ge en sedimentos activos.....	99
5.	49:	Perfil O-E concentraciones de Cs en sedimentos activos.....	100
5.	50:	Perfil O-E concentraciones de Ba en sedimentos activos.....	101
5.	51:	Perfil O-E concentraciones de Pb en sedimentos activos.....	102
5.	52:	Perfil O-E concentraciones de Cd en sedimentos activos.....	103
5.	53:	Perfil O-E concentraciones de Ni en sedimentos activos.....	104
5.	54:	Perfil O-E concentraciones de Cu en sedimentos activos.....	105
5.	55:	Perfil O-E concentraciones de Sr en sedimentos activos.....	106
5.	56:	Perfil O-E concentraciones de U en sedimentos activos.....	107
5.	57:	Perfil O-E concentraciones de Mo en sedimentos activos.....	108
5.	58:	Análisis de componentes principales para muestras de agua superficial.....	109
5.	59:	Análisis de componentes principales para sedimentos activos.....	109
5.	60:	Resumen Análisis Factorial en aguas superficiales.....	110
5.	61:	Resumen Análisis Factorial para muestras de sedimentos activos.....	112
5.	62:	Factor de enriquecimiento en aguas superficiales.....	113
5.	63:	Factor enriquecimiento en sedimentos activos.....	114
5.	64:	Perfil O-E comparativo concentraciones de As en aguas superficiales.....	116
5.	65:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Cu en aguas superficiales.....	117
5.	66:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Mn en aguas superficiales.....	118
5.	67:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Fe en aguas superficiales.....	119
5.	68:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Ba en sedimentos activos.....	121
5.	69:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Co en sedimentos activos.....	122
5.	70:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Cr en sedimentos activos.....	123
5.	71:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Cu en sedimentos activos.....	124
5.	72:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Fe en sedimentos activos.....	125
5.	73:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Mn en sedimentos activos.....	126
5.	74:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Ni en sedimentos activos.....	127
5.	75:	Perfil O-E comparativo concentraciones de V en sedimentos activos.....	128
5.	76:	Perfil O-E comparativo concentraciones de Zn en sedimentos activos.....	129
6.	1:	Evolución temporal de los caudales del río Huasco.....	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
4 1:	Parámetros químicos contenidos en las bases de datos de aguas superficiales 2007 y 2008.....	27
4 2:	Tabla 4.2. Parámetros químicos contenidos en las bases de datos de sedimentos activos 2007 y 2008.....	27
4 3:	Elementos que no cumplen con la condición del DL en aguas superficiales.....	28
4 4:	Elementos que no cumplen con la condición del DL en sedimentos activos.....	29
4 5:	Definición algebraica de variables presentes en un diagrama <i>box-plot</i>	33
4 6:	Criterios para la interpretación del F.E.....	35
4 7:	Campañas realizadas en estudio CENMA 2016.....	37
4 8:	Parámetros considerados en la NSCA.....	43
4 9:	Valores TEL y PEL para sedimentos.....	44
5 1:	Estadígrafos básicos para elementos mayores en muestras de aguas superficiales.....	46
5 2:	Estadígrafos básicos para elementos mayores en muestras de sedimentos.....	54
5 3:	Estadígrafos descriptivos de elementos trazas en muestras de agua.....	59
5 4:	Estadígrafos descriptivos de elementos trazas en muestras de sedimentos.....	81
6 1:	Índices de saturación calculados para las estaciones DGA de la parte baja de la cuenca.....	131

RESUMEN.

La presente memoria tiene como objetivo estudiar espacio-temporalmente la condición geoquímica de aguas superficiales y sedimentos activos del río Huasco. Para ello se cuenta con una base de datos obtenida durante abril de 2007 y enero de 2008, y se compilaron datos geoquímicos tanto de trabajos ya publicados como de organismos públicos a fin de armar una base de datos correspondiente al período 2015 y 2016. Para trabajar los set de datos, se eliminaron todos aquellos parámetros en los que más de un 70% de las observaciones no superaban el límite de detección instrumental, luego se seleccionaron aquellos parámetros coincidentes en cada matriz. Con el objetivo de conocer si las concentraciones publicadas en este trabajo son de origen natural o antropogénico se les aplicó la transformación *isometric log ratio* (Egozcue *et al.*, 2003) a todas las variables para calcular los estadígrafos que se utilizan en la construcción de diagramas *box-plot* (Tukey, 1977), además de técnicas exploratorias multivariadas como lo son el análisis de componentes principales y análisis factorial, en conjunto a la construcción de perfiles de concentración versus distancia al mar y el cálculo de factores de enriquecimiento. Con las bases de datos recopiladas y las de este trabajo se construyeron perfiles de concentración versus distancia al mar y se evaluó la calidad ambiental mediante parámetros específicos para cada matriz. Dentro de las principales fuentes a los elementos presentes en ambas matrices se encuentran los depósitos minerales asociados a la franja ferrífera, también se identificó que en aguas superficiales existe influencia de los aerosoles marinos, que actúan 40 km al interior del valle. Al comparar las concentraciones de 2007 con las de 2008 estas aumentan de un año a otro en aguas superficiales, mientras en los sedimentos estas disminuyen. Al comparar las concentraciones 2007-2008 con las de 2015-2016 se observa la misma relación tanto en aguas superficiales como en sedimentos, lo que sería originado por eventos climáticos que movilizan grandes cantidades de material generando mayores caudales en el río y con ello una redistribución de elementos en el sistema. Respecto a la calidad ambiental destacan dos parámetros en aguas superficiales que presentan varias observaciones sobre el estándar: NO_3 y Fe, el primero podría estar ingresando al río mediante la fertilización de suelos, lo que se recomienda estudiar de mejor forma con análisis isotópicos mientras el segundo el presenta valores sobre la norma a lo largo de todo el valle.

1. INTRODUCCIÓN.

La geoquímica es la rama de la geología que estudia los elementos químicos en la tierra bajo dos enfoques: su abundancia relativa y absoluta, y los factores que controlan su distribución y migración entre los distintos sistemas que componen el planeta (Hawkes & Webb, 1962). Debido al creciente aumento de las industrias minera y agrícola, uso de combustibles fósiles y urbanización desmedida, los ciclos biogeoquímicos de los elementos se han alterado provocando un desequilibrio en los ecosistemas. Lo anterior se manifiesta en un deterioro de los sistemas naturales, y por ende la pérdida de los beneficios que estos entregan, dando paso a la necesidad de evaluar y monitorear el estado de los ríos, acuíferos, suelo, material particulado atmosférico, etc.

Como se mencionó anteriormente, la geoquímica es clave para identificar la fuente de los elementos, y su uso en estudios ambientales ha permitido distinguir si su origen es geogénico u antrópico, así como “concentraciones naturales” y “anómalas”, respectivamente. La mayoría de los elementos que los ríos transportan hacia el mar, provienen de la meteorización de las rocas por las que circulan. En el caso de muchos ríos en Sudamérica, la movilización de metales y metaloides provenientes de la configuración geológica de los Andes es potenciada por las actividades humanas (Montecinos *et al.*, 2020). Viers y colaboradores (2019) plantean que la industria minera contamina ríos, acuíferos, suelos y atmósfera con metales y metaloides, además que la contaminación producida puede persistir por años. Según los mismos autores, en Chile, al igual que la actividad minera, la actividad agrícola también contribuye al ingreso de metales y metaloides a las napas subterráneas y cursos superficiales. En el norte de nuestro país, donde se concentra gran parte de la actividad minera y el recurso hídrico es escaso, el conocimiento del estado geoquímico de las aguas es sumamente importante para la protección y conservación de las mismas, así como de los ecosistemas.

El río Huasco ($\sim 28^{\circ}30'S$), se encuentra en el Norte Chico ($27-32^{\circ}S$), una zona geográfica caracterizada por un clima semi-árido, con precipitaciones variables durante el invierno y períodos de sequía intermitentes. Según el Atlas de Faenas Mineras (SERNAGEOMIN, 2011) en la parte baja de la cuenca abundan pequeños depósitos minerales de cobre, hierro y oro, y faenas irregulares. Hacia la cordillera, donde nacen sus tributarios se encuentran los yacimientos Pascua-

Lama, un importante depósito epidermal de alta sulfidización, y la mina El Morro. Así como la minería, la agricultura, principalmente de olivos y parronales, es también una de las principales actividades económicas de la zona y que, conjunto con la actividad minera representan la principal amenaza al recurso hídrico. Otro factor que podría afectar la composición de aguas y sedimentos son fenómenos climáticos eventuales, como lo son las fuertes lluvias que cada cierto tiempo afectan la zona norte de Chile, y que producen removilización de material.

En el presente trabajo, se darán a conocer nuevos antecedentes sobre la geoquímica de las aguas y sedimentos activos del río Huasco durante los años 2007 y 2008, los cuales serán analizados y comparados con datos pesquisados para el período 2015-2018, obtenidos de distintas fuentes. Lo anterior permitirá identificar variaciones ambientales, naturales o antrópicos a pequeñas escalas de tiempo que podrían estar afectando la calidad ambiental del curso. Asimismo, identificar estos cambios puede ayudar a un mejoramiento en la gestión ambiental de las aguas, así como a la prevención y mitigación de aquellos cambios que impacten de manera negativa en la calidad ambiental de las aguas o sedimentos.

1.1. Objetivos.

1.1.1. Objetivo general.

Evaluar espacio-temporalmente la geoquímica de aguas y sedimentos del río Huasco entre los años 2007-2008 y 2015-2019.

1.1.2. Objetivos específicos.

1. Caracterizar geoquímicamente aguas y sedimentos del río Huasco, muestreados durante abril de 2007 y enero de 2008.
2. Comparar la geoquímica de aguas y sedimentos en los períodos 2007-2008.
3. Comparar la geoquímica de ambas matrices entre 2007-2008 y 2016-2019.
4. Evaluar la calidad ambiental de ambas matrices en los períodos de tiempo considerados.

1.2. Antecedentes teóricos

1.2.1. Conceptos geoquímicos básicos

Los siguientes párrafos, basados en los trabajos de Tapia (2011) y Reimann & Garret (2005), introducen la terminología básica utilizada en la mayoría de los estudios geoquímicos con un enfoque medioambiental.

Durante los años 50, el desarrollo de nuevas técnicas de exploración minera introdujo nuevos conceptos, tales como *background*, línea geoquímica base o anomalía geoquímica. Hoy en día estos términos son ampliamente utilizados en estudios de contaminación, ciencias y legislación ambiental.

Background geoquímico fue definido por Hawkes & Webb (1962) como “la abundancia natural de un elemento en el material terrestre estéril”. Los mismos autores, agregan que es más realista verlo como un rango más que un valor absoluto. Hoy en día, conocer el *background* de elementos potencialmente peligrosos es esencial para definir zonas de contaminación, identificar fuentes y establecer criterios de calidad ambiental adecuados (Galuszka & Migaszewski, 2011).

El concepto anterior, fue definido para diferenciar concentraciones naturales de **anomalías**, las cuales podrían indicar la ocurrencia de un depósito mineral. Por definición, una anomalía es una desviación a la norma. Específicamente, una anomalía geoquímica es la desviación de los patrones considerados normales en un área (Hawkes & Webb, 1962). El término *threshold* o umbral fue introducido para diferenciar una anomalía del *background* y se define como “el límite superior de la fluctuación natural del *background* (Garret, 1991).

Uno de los principales problemas a la hora de hablar de *background*, es que se asume una geoquímica regional homogénea, lo que conduce a asumir que las variaciones en las concentraciones se deben netamente a fuentes antropogénicas. Por lo mismo, se percibe que los elementos químicos presentes naturalmente en el entorno se encuentran sólo en concentraciones inferiores a las que puede generar la contaminación provocada por el hombre (Reimann & Garret, 2005).

El concepto de línea base geoquímica, fue introducido oficialmente por el Programa Internacional de Correlación Geológica (IGGP 360, Línea Base Geoquímica Global) con la finalidad de crear una base de datos geoquímicos regionales y como insumo para el desarrollo de legislaciones medioambientales. Hace referencia a un rango de valores que caracterizan un área particular en un momento específico, dando cuenta de la heterogeneidad del ambiente.

1.2.2. Estado del arte

Para Goldschmidt, padre de la geoquímica moderna, el propósito básico de esta ciencia es determinar cuantitativamente la composición química del planeta y sus partes, y a partir de ahí descubrir las leyes que controlan la distribución de los elementos (Goldschmidt, 1954). Los estudios geoquímicos modernos, comenzaron enfocándose en encontrar depósitos minerales, no obstante, desde que se llevaron a una escala regional (*e.g.* Webb *et al.*, 1978), nacional (*e.g.* Cohen *et al.*, 2012), multinacional (*e.g.* Reimann *et al.*, 2000) e incluso continental (*e.g.* Smith *et al.*, 2012; de Caritat & Cooper, 2015), han extendido su aplicación al monitoreo ambiental, manejo de recursos naturales, planificación territorial y geología médica (de Caritat & Cooper, 2015).

La geoquímica moderna nació en los años 30, en la Unión Soviética. Durante los años 60, una serie de estudios llevados a cabo en Zambia, publicados por Webb *et al.* (1964), resultaron en un mapa para 10 elementos químicos en las matrices roca, suelo y sedimentos activos. Este trabajo puso en valor la importancia de los estudios geoquímicos como una herramienta de mapeo capaz de soportar un amplio rango de actividades geológicas relacionadas. Ya en los 70, fueron publicados los primeros mapas geoquímicos a escala nacional en Estados Unidos (Shacklette *et al.*, 1971) y Europa (Webb *et al.*, 1973). Así, los estudios de mapeo geoquímico comenzaron a considerarse una componente valiosa dentro del conocimiento básico que se debe tener de las geociencias en un país. De forma adicional, este tipo de estudios se ha llevado a cabo en múltiples matrices ambientales, lo que ha permitido comprender fuentes de proveniencia, ciclos biogeoquímicos y patrones de dispersión y transporte (Garret *et al.*, 2008).

Particularmente en sistemas fluviales, Martin & Meybeck (1979) proporcionaron el primer estudio completo sobre la composición del material suspendido en 22 cauces de diversas partes del mundo, incluyendo a los ríos Amazonas, Nilo, Magdalena, entre otros, y cubriendo más de 40 elementos mayores y trazas. Posteriormente, variados estudios similares (*e.g.* Eisma *et al.*, 1978;

Presley *et al.*, 1980; Emeis, 1985; Trefrey *et al.*, 1986; Zhang, 1988; Huang *et al.*, 1992) han complementado estos datos, aportando inmensamente al conocimiento de procesos de erosión, fuente y transporte de sedimentos al océano, y la perturbación antropogénica en los ciclos de elementos traza (Poulton & Raiswell, 2000).

Existen también mapeos geoquímicos a gran escala de compuestos disueltos en aguas, como lo son el mapeo geoquímico de aguas superficiales de Gales (Simpson *et al.*, 1993; Simpson *et al.*, 1996), el proyecto FOREGS (*Forum of European Geological Services*) (Plant *et al.*, 1997) que generó diversas líneas de base en diferentes matrices, incluidas las aguas, los mapas hidrogeoquímicos de Chile central (Jorquera *et al.*, 2015) y el del río Itacaiúnas en la amazonia (Sahoo *et al.*, 2019).

En nuestro país son pocos los trabajos enfocados en la geoquímica de aguas superficiales. Como se mencionó anteriormente, el trabajo de Jorquera *et al.* (2015) estableció rangos de valores *background* y anómalos para 16 elementos químicos, además de un completo estudio isotópico en el distrito cuprífero Andina-Los Bronces. Otro estudio importante fue publicado por Tapia *et al.* (2018), el que está enfocado en la geoquímica de aguas superficiales al norte de la región de Atacama, estableciendo valores de *background* local, fuentes de elementos contaminantes y algunos efectos del evento aluvional ocurrido en marzo de 2015. Dado que las aguas superficiales son un recurso escaso y de un gran valor económico y ecológico, la Dirección General de Aguas (DGA) se encarga de monitorear periódicamente algunos parámetros físico-químicos, además de emitir informes sobre la calidad de las aguas en los ríos que monitorean.

1.2.3. Calidad del agua y legislación ambiental en Chile.

La interacción entre fenómenos naturales y antrópicos, y la diversidad de estos a lo largo de nuestro país, determina una variedad de desafíos relativos a la calidad de las aguas en Chile. En la zona norte, las aguas se caracterizan por altas concentraciones locales de sales disueltas, metales y metaloides tanto en aguas superficiales como subterráneas. Las concentraciones de sales y metales decrecen hacia Chile central debido a una mayor recarga, aun así, existen enriquecimientos locales, principalmente de cobre (Vega *et al.*, 2018).

La ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio ambiente, promulgada el 9 de marzo de 1994, en el artículo 2 define contaminación como “la presencia en el ambiente de sustancias, elementos,

energía o combinación de ellos en concentraciones, o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente. Dentro del mismo artículo define contaminante como “todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, ruido, luminosidad artificial o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo para la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental. De lo anterior, se infiere que para que el estado considere legalmente un medio como contaminado, debe existir una norma o criterio de calidad que estipule los niveles aceptados de un contaminante en el medio.

Dentro de la misma ley 19.300, el artículo 2 establece dos tipos de normas de calidad ambiental; las de tipo primario, que establecen concentraciones y períodos máximos o mínimos permisibles de cierto contaminante cuya presencia o ausencia en el medio ambiente pueda constituir un riesgo para la salud humana y las de tipo secundario, que también establecen concentraciones y períodos máximos o mínimos permisibles de cierto contaminante cuya presencia o ausencia en el medio ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente.

Los cuerpos de agua, al ser un medio sensible para trasladar, recibir y transmitir contaminantes, además de ser un recurso escaso, pueden ser protegidos por normas de calidad ambiental, las cuales consideran las particularidades de cada cuenca, y definen niveles de calidad por cada subcuenca o área de vigilancia.

La cuenca del río Huasco abarca las comunas de Alto del Carmen, Vallenar, Freirina y Huasco, esta última y en particular el puerto de Huasco, es considerado como una Zona de exclusión o sacrificio ambiental (INDH, 2017), vale decir una zona geográfica permanentemente afectada por daño ambiental o falta de inversión económica (Vega & Tapia en https://geologia-ambiental.cl/wp-content/uploads/2020/08/Zona_exclus.pdf). En el marco del constante deterioro y conflictos ambientales en el sector, es que se está elaborando una norma secundaria de calidad ambiental, que busca frenar un poco este deterioro y que cuyo anteproyecto se encuentra aprobado. Dentro de los parámetros de calidad que establece, indica concentraciones máximas permitidas en sus aguas para los siguientes elementos: Cu, Fe, Zn, Mn, Hg, Al y As. A la fecha, los valores, zonas de vigilancia y estados de excedencia se encuentran establecidos en el

anteproyecto, y la consulta ciudadana, última instancia previa a la promulgación de la norma, fue realizada de manera online durante noviembre de 2020 y febrero de 2021.

1.3 Transferencia de masa en la hidrósfera.

La tierra puede dividirse en cuatro “esferas” o compartimentos; llamados atmósfera, hidrósfera, litósfera y biósfera (Figura 1.1).

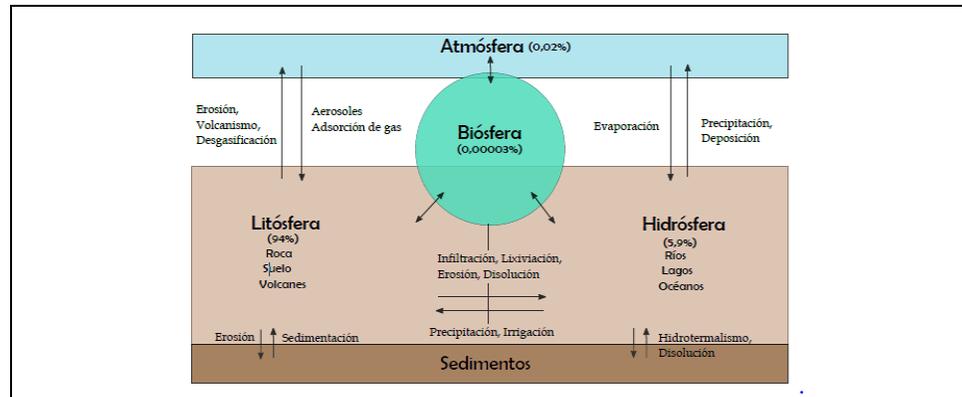


Figura 1.1. Mecanismos de transferencia de masa entre las distintas esferas de la tierra. Modificado de Fergusson (1990 en Tapia, 2011).

Estas esferas interactúan constantemente entre sí mediante mecanismos de transferencia de masa. La hidrósfera, que se compone de océanos, aguas superficiales (ríos y lagos principalmente) y aguas subterráneas, juega un rol preponderante en los procesos de transferencia de masa entre las 4 esferas mediante el ciclo hidrológico. El 80% del agua en el planeta está representado por los océanos, 19% por las aguas subterráneas, 1% por hielo, 0,002% por ríos y lagos, y un 0,0008% en la atmósfera (Garrels & Mackenzie, 1971).

La composición en elementos mayores y trazas en aguas naturales es el resultado de su interacción con otros reservorios y el contacto con gases, sólidos (material geológico y biológico) y líquidos que se integran a las aguas superficiales dentro del ciclo hidrológico. La composición del material suspendido y particulado depende principalmente de las rocas circundantes, así como también de la interacción entre el material disuelto con estas fases (Tapia, 2011).

Además de las fuentes naturales, la componente antropogénica puede perturbar los ciclos biogeoquímicos a escala global, a lo que, particularmente la hidrósfera es muy sensible, debido a que las actividades humanas desechan metales y metaloides al ambiente. De estas actividades, la

minería corresponde a una de las mayores fuentes de metales potencialmente tóxicos. Otros productos de origen antropogénico tales como pinturas anticorrosivas (Cd, Hg, Se, Pb), fertilizantes agrícolas (Cu, Zn, Se), pesticidas (Hg, As), combustibles (Pb) y productos farmacéuticos y cosméticos (Ag, Cu, Zn, Sn, Pb, Cd, Hg) son también una fuente indirecta de metales o elementos potencialmente tóxicos a las aguas.

1.4. Agradecimientos.

En primer lugar, quisiera agradecer a la doctora Ana Valdés, quién no sólo ha sido la guía de este trabajo, si no que también ha aportado muchísimo a mi desarrollo personal y profesional. Agradecer también a las mujeres de la Dirección de Investigación y Aplicaciones Nucleares, en especial a Adriana y Carolina quienes también han sido parte de este proceso.

A la profesora Verónica Oliveros, por ser la patrocinante de este trabajo, a los profesores de la comisión y a los funcionarios y funcionarias del Departamento de Ciencias de la Tierra, quienes siempre se hicieron presentes durante mi paso por la Universidad, y que han tenido la mejor disposición hacia los estudiantes.

Tengo muchos amigos a quienes agradecer: Leslie, Nadia, Ignacio, Javiera, Valentina, Emilio, Enrique, Sebastián a mis amigos viejotes María Fernanda, Franco, Fernando, Nicolás y de forma especial a Francisco Bastías, quien ha sido uno de los mejores amigos que me ha dejado este paso.

A mi mamá, a mi papá que me apoyaron en todo y me alentaron a seguir mis sueños. A mi hermano Pelao, quien ha estado desde siempre. Y por último a Pablo que ha sido un tremendo aporte y motivación en este proceso.

Muchas gracias a todas y todos.

2. ANTECEDENTES

2.1. Ubicación y Accesos.

El río Huasco nace en el área “Junta del Carmen” debido a la confluencia de los ríos del Tránsito y Carmen, a una distancia aproximada de 90 km del océano Pacífico. Se ubica en la zona sur de la región de Atacama, y cruza las ciudades de Huasco, Freirina y Vallenar (Fig. 2.1), esta última la de mayor densidad poblacional dentro de la cuenca. La principal vía de acceso terrestre a la zona de estudio es la Ruta 5, que conecta a Chile desde Quellón hasta el límite con Perú en el norte, pasando por la ciudad de Vallenar. La ciudad se encuentra 541 km al norte de Santiago y 942 km al norte de Concepción. Los principales caminos pavimentados del sector, que conectan con el resto de los poblados del sector, sirven como vías de acceso a los puntos muestreados a lo largo del río.

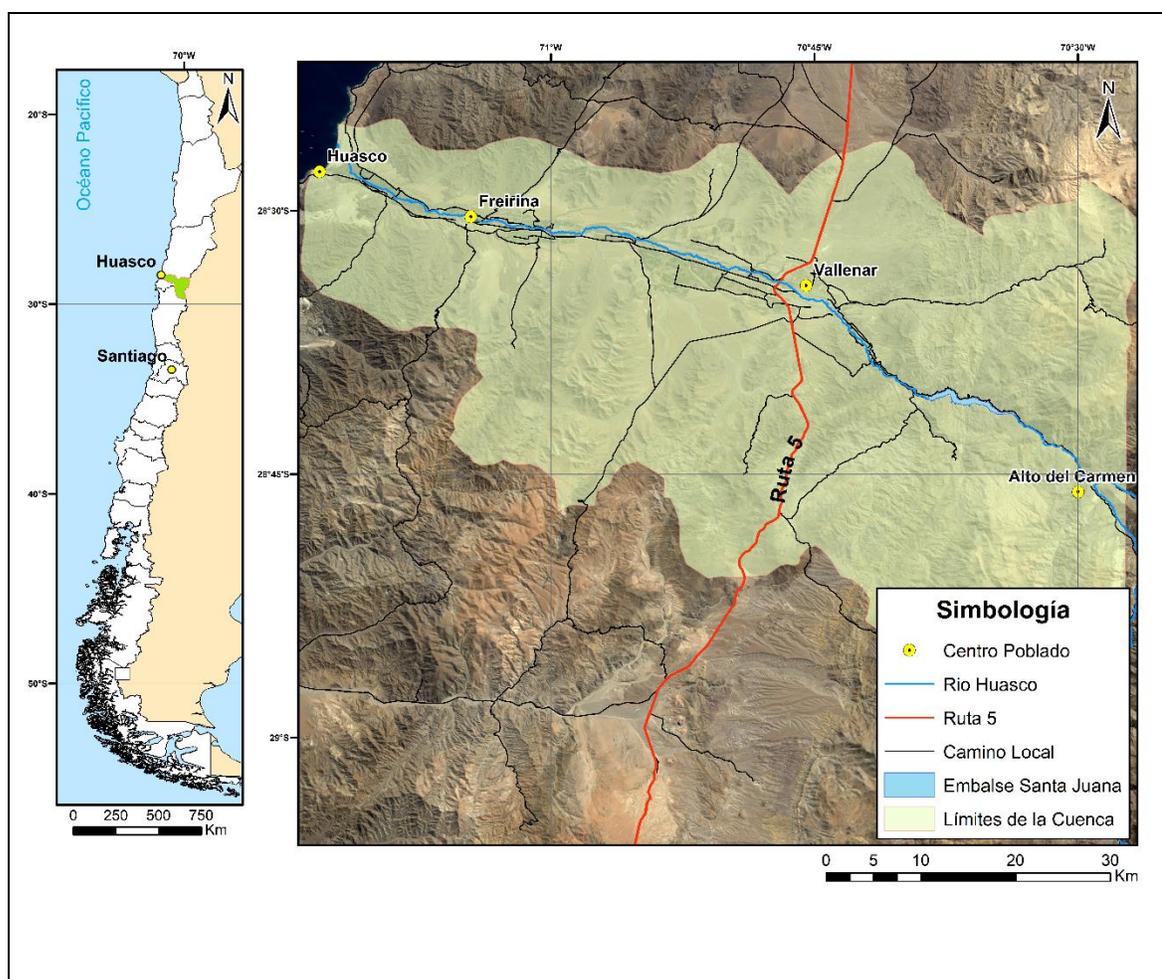


Figura 2.1. Mapa de Ubicación y Accesos. Elaborado a partir de shapefiles descargados de www.ide.cl

2.2. Geomorfología

En el mapa geomorfológico de Chile (Börgel, 1983), el río Huasco abarca de oeste a este cuatro macroformas del relieve: planicies marinas y llanos de sedimentación fluvial-aluvial en la zona costera; la cordillera de la costa y la depresión intermedia, esta última se expresa en el sector como una geoforma denominada Pampa transicional. Dado que el nacimiento del río ocurre unos kilómetros más arriba del embalse Santa Juana, se considera la vertiente occidental de la cordillera principal como el límite este del río. De las 4 formas mencionadas anteriormente, tanto las planicies marinas como los llanos de sedimentación fluvial-aluvial ocupan un área restringida.

Las planicies litorales en la zona del río Huasco, tienen una amplitud de 25 kilómetros. El límite en altura de estas planicies se extiende entre los 0 y 300 m s.n.m. Destaca esta macroforma en el sector, ya que es de origen fluviomarino. Los llanos de sedimentación fluvial-aluvial se desarrollan en las desembocaduras de los ríos por efecto de la acumulación detrítica, que en conjunto a el efecto de la tectónica litoral generan terrazas amplias y escalonadas.

En el sector del río Huasco, el desarrollo de la cordillera de la costa esta íntimamente ligado a la pampa transicional, la que se presenta cruzada por lomas y sierras de orientaciones este-oeste y norte-sur, que segmentan el terreno en llanos y pampas menores, como lo son las pampas Tololo y Varilla, ambas ubicadas al norte del río o el llano de Pajonal que se encuentra al sur de Vallenar. Aguilar *et al.* (2013) se refieren a estas morfologías como remanentes de pedimentos, que se encuentran tanto en la cordillera de la costa como colgados en los interfluvios de la cordillera principal. En el desierto de Atacama estas morfologías se asocian a quiescencia tectónica y clima árido (Nalpas *et al.*, 2008).

La cordillera de la costa se presenta como un paisaje maduro, con cumbres de altitudes de hasta 2000 m s.n.m. Los espolones que nacen de estas cumbres, dan paso aguas abajo a pedimentos con ondulaciones debido a la coalescencia de abanicos aluviales. Las alturas de estos pedimentos varían entre 1.500 m s.n.m. en la parte más oriental de la cordillera de la costa, hasta 500 m s.n.m. en el borde costero (Aguilar *et al.*, 2013). Durante el mioceno, y como resultado del alzamiento andino, se habrían depositado las gravas de Atacama (Mortimer, 1973). Estos depósitos presentan una gradación vertical, con una base de origen fluvial que hacia techo se vuelve aluvial, lo que se explica por la gradual desecación climática ocurrida en el mioceno

medio y el progresivo alzamiento y basculamiento en la región del antearco (Nalpas *et al.*, 2008). La colmatación del relieve por las Gravas de Atacama da origen al pedimento de Atacama (Mortimer, 1973).

2.3. Clima

En la región de Atacama el clima se caracteriza por una transición de clima árido en la zona norte a semi-árido en la zona sur (río Huasco y zona sur del río Copiapó). La cuenca del río Huasco en particular, se ubica al suroeste de una diagonal árida de escala continental (Aguilar *et al.*, 2013), la que se define como una zona de transición entre la influencia de sistemas de precipitación originados al sur y que son bloqueados por el anticiclón del pacífico hacia el norte (Figura 2.2).

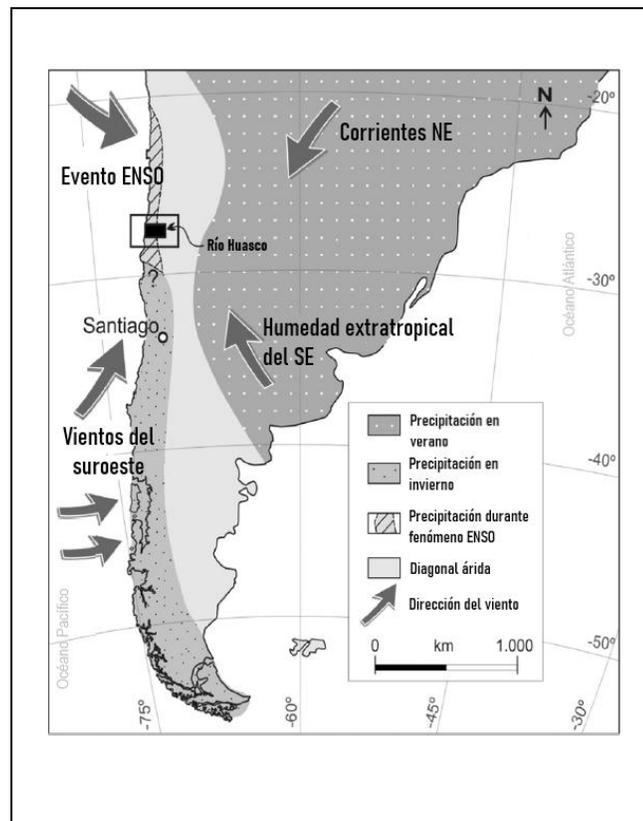


Figura 2.2. Principales factores que controlan el clima en la cuenca del río Huasco. Modificado de Salas *et al.*, 2016.

Schwerdfeger (1976), divide a los Andes en tres macrozonas caracterizadas por su condición climática:

1. Entre los 10° lat. Norte y 12° lat. Sur, la zona tropical, que se encuentra bajo la influencia de flujos atmosféricos húmedos y cálidos provenientes del océano Atlántico (flujos NE y SE en fig. 2.2)
2. Entre los 12° y 28° lat. Sur se encuentra la zona sub-tropical, dominada por la presencia del anticiclón del Pacífico, responsable de la condición árida a hiper-árida del desierto de Atacama.
3. Entre los 28° y 50° la zona extra-tropical esta influenciada por flujos atmosféricos generados en el Pacífico que son transportados por las corrientes atmosféricas húmedas del suroeste (fig. 2.2)

El río Huasco, se ubica en el extremo norte de la zona extratropical, la cual se caracteriza por una predominancia de precipitaciones durante los meses invernales, con una ocurrencia del 90% de los registros anuales entre los meses de mayo y agosto (Montecinos & Aceituno, 2003). Las corrientes atmosféricas provenientes del este se van debilitando hacia el sur, lo que sumado al bloqueo ejercido por la cordillera de los Andes, impide que sean un componente atmosférico importante para el clima de la zona. De esta forma el clima se mantiene cálido y árido desde septiembre a abril (Montecinos & Aceituno, 2003). Por otro lado, las variaciones interanuales en las precipitaciones del sector son controladas por el sistema de Oscilación del Sur El Niño (ENSO en su sigla en inglés). Los períodos cálidos de eventos el Niño desencadenan la densificación e intesificación de las lluvias (Aceituno, 1988). La frecuencia de este fenómeno ha sido estimada en un rango de entre 3-6 años (Squeo *et al.*, 2007). Según Salas *et al.* (2016), los aluviones ocurridos en el lugar durante marzo de 2015 tendrían su origen en las fuertes lluvias ocasionadas por el último evento El Niño.

Otro factor climático importante a considerar son las variaciones oeste-este originadas por el gradiente altitudinal, lo que se refleja en un aumento del promedio de las precipitaciones anuales hacia la cordillera principal, con precipitaciones estivales aguas arriba de las cuencas, por sobre los 1.000 m s.n.m. (Aguilar, 2013). Las mayores tasas de precipitación en los Andes, junto con la fusión de la nieve acumulada serían el principal sustento del recurso hídrico de la cuenca (Favier *et al.*, 2009).

2.4. Principales actividades económicas de la zona

En la región de Atacama, la principal actividad económica corresponde al sector minero. En efecto, según los indicadores del Banco Central, las actividades mineras en la región aportan un 8.8% al producto interno bruto nacional asociado a dicha actividad.

Por otro lado, destaca el sector silvoagropecuario, siendo el valle del Huasco un sector reconocido por el cultivo y producción de uvas de mesa, aceitunas y aceite de oliva, posicionando a la región de Atacama como el principal exportador a nivel nacional de dichos productos.

2.4.1 Sector minero

De acuerdo al Atlas de Faenas Mineras (SERNAGEOMIN, 2011), a lo largo del río Huasco se encuentra una variedad de minas y faenas, siendo estas en su mayoría irregulares y que cuyas menas se desconocen. Existen también faenas mineras reconocidas de las cuales se extrae principalmente cobre, oro y hierro; además de la extracción de no metálicos como baritina, calizas y mármoles.

Destaca también la existencia de una planta pelletizadora de concentrado de hierro, a tan solo 4 km de distancia del puerto de Huasco, y que opera con material obtenido en la mina los Colorados, ubicada 30 km al noroeste de Vallenar. Durante al menos 16 años, alrededor de 118 Ton/h de material sólido fino era descargado en la zona de la bahía produciendo una constante turbidez en la columna de agua (Lancellotti & Stotz, 2004).

2.4.2. Sector Agrícola

El sector agrícola en el valle se caracteriza por el desarrollo de pequeñas explotaciones de olivar, que coexisten con plantaciones extensivas de uva de mesa, que son las más abundantes en el valle medio y alto (Luque & Estrada 2018). Si bien en el valle del Huasco la agricultura no es la principal actividad económica, esta si es desarrollada a lo largo de toda la cuenca. Según datos del Censo Agropecuario de 2007 (INE, 2007) en la provincia del Huasco hay una superficie de 1.710.829 hectáreas de superficie de explotación agropecuaria con tierra activas de las cuales ~ 550.000 ha. Corresponden a la comuna de Vallenar, ~590.000 ha a la comuna de Freirina, y ~120.000 ha a la comuna de Huasco. Las especies frutales que predominan en superficie en

plantación son el olivo en la comuna de Huasco, olivos y paltos en la comuna de Freirina, y olivos, paltos y uva de mesa en la comuna de Vallenar.

Cabe mencionar también que el Embalse Santa Juana desde 1995 abastece de forma regular a los cultivos aguas abajo (Luque & Estrada, 2018).

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La geología presentada a continuación corresponde a un compilado de las cartas Geología del Área Freina-El Morado (Welkner *et al.*, 2006), Geología del Área Carrizal Bajo-Chacaritas (Arévalo & Welkner, 2008) y Geología del Área Vallenar-Domeyko (Arévalo *et al.*, 2009) que en conjunto abarcan el río Huasco en toda su longitud (Figura 3.1).

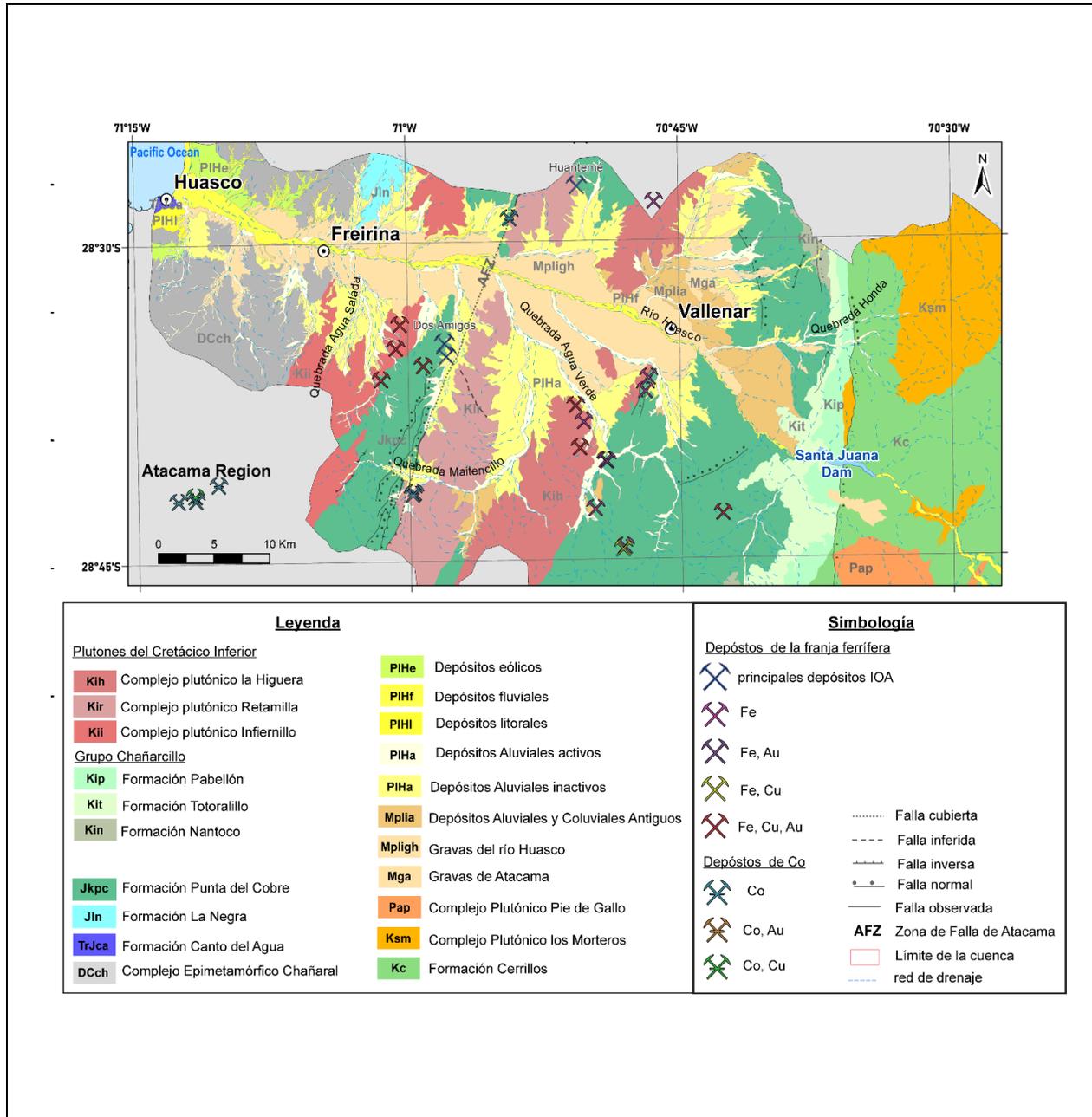


Figura 3.1. Geología del río Huasco. Compilado en ArcMap 10.4.

A modo general, en la zona costera afloran las rocas más antiguas, denominadas como Complejo Epimetamórfico Chañaral (Godoy, & Lara, 1998), y que representan una asociación petrotectónica formada en un prisma de acreción. Sobre estas rocas yace la Formación Canto del Agua (Moscoso, 1979), de ambiente clástico marino, y, sobre esta, se encuentra de manera discordante la Formación La Negra (García, 1967), que representa el arco volcánico formado durante la subducción jurásica. La Formación Punta del Cobre (Seegerstrom & Ruiz, 1962), de ambiente transicional, sobreyace a La Negra y al igual que esta constituye una asociación de tipo arco volcánico. El grupo Chañarcillo (Seegerstrom, & Parker, 1959), que yace sobre Punta del Cobre, se conforma por las formaciones Nantoco, Totalillo y Pabellón, corresponde a una unidad marina de trasarco o intrarco. Hacia el este, estas rocas son cubiertas por sedimentos clásticos y lavas subordinadas de la Formación Cerrillos (Seegerstrom, & Parker, 1959). De oeste a este, y de manera progresiva entre el Triásico y el Paleoceno, se emplazaron tanto en rocas sedimentarias como metamórficas los intrusivos: Complejo Plutónico Infiernillo (131-129 Ma) (Arévalo *et al.*, 2003), Complejo Plutónico Retamilla (127-126 Ma) (Arévalo & Welkner, 2008), Complejo Plutónico La Higuera (122 Ma) (Arévalo, & Welkner, 2008), Complejo Plutónico Los Morteros (69-68 Ma) (Arévalo & Welkner, 2008) y Complejo Plutónico Pie de Gallo (65-64 Ma).

Las rocas estratificadas mesozoicas y su basamento están deformadas por tres sistemas estructurales mayores: la Zona de Cizalle Infiernillo (ZCI), la Faja Plegada y Corrida los Colorados (FPCC), ambos ramales del segmento sur del Sistema de Falla de Atacama (SFA), y hacia el este la Falla Agua de los Burros (FAB). Desplazamientos normales a lo largo de la ZCI, FPCC, FAB, permitieron el emplazamiento de los complejos plutónicos Infiernillo, Retamilla y los Morteros respectivamente.

Sedimentos clásticos fluviales y aluviales del Mioceno-Plioceno (Gravas de Atacama (Mortimer, 1973) y Gravas del río Huasco (Welkner *et al.*, 2006)) fueron depositados gracias al alzamiento tectónico generalizado combinado con la baja global del nivel del mar, rellenando los paleovalles labrados durante el período de insición generalizada ocurrido durante el límite Oligoceno inferior – Oligoceno superior.

3.1. ROCAS DEL BASAMENTO

3.1.1. Devónico – Carbonífero

3.1.1.1. Complejo epimetamórfico Chañaral

Godoy & Lara (1998) definen esta unidad como un conjunto de rocas metasedimentarias con intercalaciones de mármoles, metacherts y metabasaltos almohadillados expuestos típicamente en la zona de Chañaral. En el valle del río Huasco, 250 km al sur, se configura en una franja continua de orientación N-S y de ancho variable entre 12 y 15 km (Arévalo & Welkner, 2008). Estas rocas constituyen el basamento de la Formación Canto del Agua y las Gravas del río Huasco, cuya relación de contacto es por discordancia angular. En la zona es intruído por el Complejo Intrusivo Carrizal Bajo en la costa, la Granodiorita Capote en el borde nororiental y el Complejo Plutónico Infiernillo en el borde suroriental.

La litología corresponde casi exclusivamente a metaturbiditas, que están configuradas por metaareniscas, cuarcitas, pizarras y filitas afectadas por un metamorfismo de bajo a muy bajo grado, representado por la asociación mineralógica cuarzo, albita, clorita, muscovita y calcita.

3.2. ROCAS ESTRATIFICADAS

3.2.1. Triásico superior-Jurásico inferior

3.2.1.1. Formación Canto del Agua (Anísico-Sinemuriano)

Moscoso (1979) denomina así a un “conjunto de sedimentitas marinas, areniscas y conglomerados cuarcíferos, lutitas, calizas brechosas y calcarenitas portadoras de fauna fósil. Aflora de manera discontinua y aislada a lo largo de la costa. En el valle del río Huasco, aflora al sur de la desembocadura y en la ciudad homónima. Sobreyace discordantemente al Complejo Epimetamórfico Chañaral, de la misma forma subyace a las lavas de la Formación La Negra.

En la zona de estudio, los afloramientos corresponden a cuerpos individuales de domos de pórfidos dacíticos y riolíticos, riolitas fluidales, tobas líticas y de cristales (Arévalo & Welkner, 2008).

3.2.2. Jurásico Inferior

3.2.2.1. Formación La Negra (Pleinsbachiano-Jurásico Superior)

Definida por García (1967), corresponde a una secuencia homogénea de al menos 300 m de espesor, compuesta en su mayoría por lavas macizas, de color rojizo, en cuya base se encuentra una intercalación de tobas soldadas. Aflora como una secuencia continua de orientación NNE desde la sierra Astillas hasta el valle del río Huasco. Sobreyace discordantemente a la formación Canto del Agua y su techo no aparece expuesto. En el valle del Huasco es intruída por la Granodiorita Capote y el Complejo plutónico Infiernillo. En cuanto a la litología, las coladas son de composición andesítica a andesíticabasáltica, con texturas tanto afaníticas como porfídicas. Los fenocristales más comunes son plagioclasas, que en algunos sectores se encuentra alterada a albita, piroxenos y anfíbolos alterados a clorita.

3.2.3. Jurásico Superior-Cretácico Inferior

3.2.3.1. Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano)

Definida por Segerstrom & Ruiz (1962), corresponde a una potente y heterogénea secuencia volcánica sedimentaria, que aflora en la parte central de la zona de estudio, según una franja ancha (25-30 km) que en general coincide con la depresión intermedia en la latitud de Vallenar (Arévalo & Welkner, 2008). Hacia el este subyace concordantemente a las calizas de la formación Nantoco (Hauteriviano Superior), mientras que 40 km más al sur del valle, en la quebrada el Morado, se observa sobreyaciendo concordantemente a la formación La Negra (Pleinsbachiano-Jurásico Superior) (Welkner *et al.*, 2006). Aparece intruída por los Complejos Plutónicos cretácicos Infiernillo, Retamilla, La Higuera, Camarones y Diorita Sierra Galena.

En la formación se distinguen tres miembros; un miembro inferior volcánico andesítico y volcanoclástico con calizas subordinadas, compuesto por lavas, tobas y en menor medida calizas. El miembro intermedio es mayoritariamente clástico, con brechas y conglomerados epiclásticos y volcanoclásticos, tobas y domos dacíticos. Por último, el miembro superior, que abarca la mayor parte de los afloramientos del sector está conformado por rocas volcánicas, principalmente lavas andesíticas de anfíbol y piroxeno. La propilitización media a penetrativa, con actinolita clorita y albita como minerales principales, da un característico color verde a la sección.

3.2.4. Cretácico Inferior

3.2.4.1. Grupo Chañarcillo:

Fue definido en el valle del río Copiapó por Segerstorm & Parker (1959) como una secuencia marina que engrana con facies continentales al oeste, formada de abajo hacia arriba por las formaciones Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón. De estas, la primera solo aflora en el valle del río Copiapó, en cambio, las últimas tres, han sido reconocidas al sur de los 28°S, en la carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo *et al.*, 2009).

3.2.4.1.1. Formación Nantoco (Hauteriviano Superior)

Corresponde en su mayoría a una secuencia de calizas bien estratificadas al borde de la precordillera. Sobreyace en concordancia a la formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano) y subyace de igual manera a la formación Totoralillo (Barremiano). Se compone de dos miembros; el inferior, que predomina en el área de estudio y cuyas litologías más abundantes son las calcilutitas bioclásticas, calcarenitas con bioclastos y calcilutitas arenosas. La extensión areal del miembro superior es muy baja en el valle del río Huasco y se compone de calcilutitas ricas en evaporitas frecuentemente plegadas y brechizadas.

3.2.4.1.2. Formación Totoralillo (Barremiano):

En el valle del río Huasco, los afloramientos de la formación Totoralillo se distribuyen en una franja de orientación NNE. Sobreyace a las lavas de la sección superior de la formación Punta del Cobre, así como también sobreyace concordantemente a calizas del miembro superior de la formación Nantoco. A techo se ponen en contacto con cherts de la base de la formación Pabellón. En el sector, la litología se compone de calcarenitas y calcilutitas bioclásticas, ricas en líticos volcánicos, con intercalaciones volcanodetríticas, que hacia el sur del Embalse Santa Juana se hacen importantes (Arévalo *et al.*, 2009).

3.2.4.1.3. Formación Pabellón (Barremiano Superior-Aptiano)

Está constituida por calcilutitas limoarenosas, calcarenitas, arcosas y abundantes intercalaciones volcanodetríticas. En el valle del río Huasco, subyace en contacto por falla normal a la formación Cerrillos (Albiano-Campaniano). En su base se compone de calcilutitas, con intercalaciones menores de calcarenitas bioclásticas. Las calcilutitas son ricas en montmorillonita, mineral que

les da un aspecto vítreo de color negro. Dentro de las calcarenitas bioclásticas se encuentran bancos de volcarenitas de grano medio a grueso.

3.2.5. Cretácico

3.2.5.1. Formación Cerrillos (Albiano-Campaniano)

Definida por Segerstrom & Parker (1959), corresponde a la unidad sedimentaria más oriental del sector. Se conforma de dos secciones; una basal fundamentalmente sedimentaria clástica a tobácea con intercalaciones calcáreas menores y una superior volcánica de composición intermedia. Sobreyace concordantemente a la formación Pabellón (Barremiano superior-Aptiano) y es intruída por el Complejo Plutónico los Morteros y el complejo Plutónico Pie de Gallo.

La sección basal se compone de paraconglomerados matriz soportados con clastos predominantemente andesíticos y en menor medida dacíticos que se alternan con areniscas, y en sectores más restringidos, capas de origen volcánico. Al sur del río Huasco, los paraconglomerados se interdigitan con un paquete de tobas dacíticas, y además aparece un paquete de areniscas alternadas con limolitas. La sección superior, se compone de coladas andesíticas y andesítico-basálticas de aspecto homogéneo (Arévalo *et al.*, 2009).

3.2.6. Mioceno-Plioceno

3.2.6.1. Gravas de Atacama:

Conjunto de gravas que cubren unidades premiocenas, formando terrazas remanentes en una amplia extensión entre la Cordillera de Domeyko y la cordillera de la Costa. El techo de esta unidad constituye la superficie de pedimentación actual.

En el valle del río Huasco, se expresan como un conjunto de gravas, arenas y ripios polimícticos, que en algunos sectores se intercalan con capas de arena, fango o cenizas.

3.2.6.2. Gravas del Río Huasco:

Depósitos fluviales y aluviales aterrizados, ubicados al norte y sur del río, y cuya máxima expresión se encuentra aguas abajo de la ciudad de Vallenar. Sobreyacen a los plutones de edad

cretácica inferior y las rocas que los hospedan, además del complejo epimetamórfico Chañaral. Sobreyacen a esta unidad depósitos aluviales y eólicos.

Se componen de gravas y ripios polimícticos, en los que dominan clastos de granitoides, dioritoides y volcánicos. En el sector de la quebrada el Sauce cercana a la localidad de Freirina, se encuentra intercalada una capa de cenizas, para la cual Welkner *et al.* (2006) determinaron una edad K-Ar de $13 \pm 1,5$ Ma.

3.2.6.3. Depósitos Aluviales y Coluviales antiguos:

Gravas y ripios de composición polimíctica que constituyen conos aluviales individuales y coalescentes, depósitos coluviales y llanuras de inundación adosadas a zonas topográficamente altas. Sobreyacen a las gravas de Atacama y a las rocas que constituyen su basamento. Los clastos de estas gravas son litológicamente similares al sustrato sobre el cual se encuentran.

La correlación de estos depósitos con gravas similares de amplio desarrollo en la cordillera de la Costa y precordillera de Chañaral y Copiapó designados como depósitos aluviales y coluviales antiguos permite asignarles una edad miocena tardía a pliocena, sobre la base de dataciones K-Ar en capas de cenizas intercaladas.

3.2.7. Pleistoceno-Holoceno

3.2.7.1. Depósitos Litorales

Gravas, arenas y coquinas que se distribuyen a lo largo del borde costero, que sobreyacen al complejo epimetamórfico Chañaral, rocas plutónicas y sedimentarias triásicas, rocas jurásicas y gravas del río Huasco. El contenido faunístico, principalmente gastrópodos, bivalvos y equinodermos, descrito por Pérez *et al.*, 2002 sugiere un amplio rango de edad Pleistoceno-Holoceno.

3.2.7.2. Depósitos Aluviales

Sedimentos moderadamente consolidados constituidos por gravas, arenas y limos que ocupan laderas de baja pendiente y quebradas, y que cubren a las rocas y depósitos preexistentes desde el Paleozoico al Cenozoico. Estos depósitos son producidos por flujos aluvionales asociados a episodios pluviales esporádicos y de gran intensidad.

3.2.7.3. Depósitos eólicos

Arenas bien seleccionadas, mal a semiconsolidadas que se distribuyen principalmente a lo largo de la línea de costa. Son en su mayoría bioclásticas y en menor medida con fragmentos de cuarzo, plagioclasa, líticos metamórficos, magnetita, epidota y hematita.

3.2.7.4. Depósitos fluviales

Depósitos no cohesivos asociados directamente al curso del río Huasco, que rellenan la parte más baja del valle. En la zona de la desembocadura engranan con los depósitos litorales.

3.3. ROCAS ÍGNEAS

3.3.1. Cretácico Inferior

3.3.1.1. Complejo Plutónico Infiernillo (131-129 Ma)

Se compone de granitoides y dioritoides distribuidos en una franja de orientación NNE. En su borde occidental, se desarrolla una franja de milonitas y migmatitas sinplutónicas, que representa la deformación dúctil generada por la rama más occidental del Sistema de Falla de Atacama en la provincia de Vallenar (Arévalo *et al.*, 2003). Hacia el este, limita con la formación Punta del Cobre, a través de un contacto intrusivo plano. Se compone de dos subunidades, siendo la unidad basal, de granodioritas la de mayor preponderancia en el sector. La subunidad basal se compone de granodioritas, tonalitas y escasas monzodioritas cuarcíferas con anfíbol, biotita y piroxeno como principales máficos. Se ha reconocido apatito y esfeno como minerales accesorios.

Destaca como la característica más importante de estas rocas la franja de milonitas y migmatitas a lo largo de su límite occidental. Estas rocas constituyen una zona de cizalle de alto grado metamórfico (facies de anfibolita), presentan evidencias cinemáticas y geoquímicas (cronología U/Pb de precisión) que permiten inferir que el complejo se habría emplazado gracias al desplazamiento de una falla normal sinplutónica al borde este del mismo.

3.3.1.2. Complejo Plutónico Retamilla (126 Ma)

Cuerpo plutónico de composición diorítica en la base y granítica en el techo, que intruye exclusivamente a rocas volcanoclásticas de la formación Punta del Cobre. Hacia el occidente,

limita con la formación ya nombrada, a través de varias fallas subverticales del Sistema de Falla Los Colorados (Arévalo *et al.*, 2003).

Se distinguen tres subunidades para este complejo, una inferior granodiorítica, una media diorítica y una superior microgranítica. Al norte del río Huasco, aflora exclusivamente la unidad inferior formada por granodioritas de piroxeno, con anfíbol de tipo hornblenda, mientras que al sur aflora también la subunidad media representada por dioritas y dioritas cuarcíferas, cuyos principales máficos son anfíbol y biotita.

3.3.1.3. Complejo Plutónico la Higuera (124-122 Ma)

Se define como un cuerpo plutónico granodiorítico-diorítico expuesto en una franja de afloramientos NNE. Se pone en contacto con la formación Punta del Cobre, hacia el este a través de una superficie plana de manto suave, concordante con la estratificación, mientras que, al oeste lo hace a través de una franja de milonitas de bajo grado (Zona de Cizalle Algarrobo, Arévalo *et al.*, 2003). Se compone de dos subunidades, una basal granodiorítica, que aflora mayormente al norte del río, y que principalmente se compone de granodioritas de anfíbol y piroxeno, con los anfíboles alterados a clorita. Al sur del río, aflora mayoritariamente la subunidad superior diorítica, compuesta por dioritas y dioritas cuarcíferas de piroxeno y anfíbol.

3.3.2. Maastrichtiano-Daniano

3.3.2.1. Complejo Plutónico Los Morteros (69-68 Ma)

Complejo multicomposicional que comprende granodioritas. Dioritas, gabros bandeados y diques aplíticos. Una brecha milonítica lo yuxtapone con las formaciones Cerrillos y Pabellón. La composición predominante es granodiorítica, con anfíbol y biotita como principales ferromagnesianos. Mediante determinaciones de alta precisión U/Pb se obtuvo una edad de cristalización en el rango 69-68 Ma (Tsotsos, 2006 en Arévalo *et al.*, 2009).

3.3.2.1. Complejo Plutónico Pie de Gallo (65-64 Ma)

Cuerpo plutónico bimodal que aflora en el cerro homónimo, donde intruye a la Formación Cerrillos. La mayor parte de las rocas que lo componen son granodioritas, y en menor abundancia

dioritas. Los ferromagnesianos más frecuentes son biotita y anfíbol, minerales en los cuales Arévalo *et al.* (2009); Gipson *et al.* (2003) han reportado dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ concordantes.

4. METODOLOGÍA

El siguiente capítulo contiene tanto antecedentes del muestreo de los datos ahora publicados, y muestreados por la Dra. Ana Valdés en los años 2007-2008, así como antecedentes actualizados publicados por unidades públicas junto a sus respectivas metodologías de muestreo y la metodología estadística aplicada a la obtención de resultados.

4.1. Toma de muestras

Las muestras fueron tomadas en dos campañas, la primera durante abril de 2007 (período de bajo caudal) y la segunda en enero de 2008 (período de alto caudal). Las ubicaciones de las muestras tomadas se señalan en la figura 4.1, y se encuentran tabuladas en el anexo I.

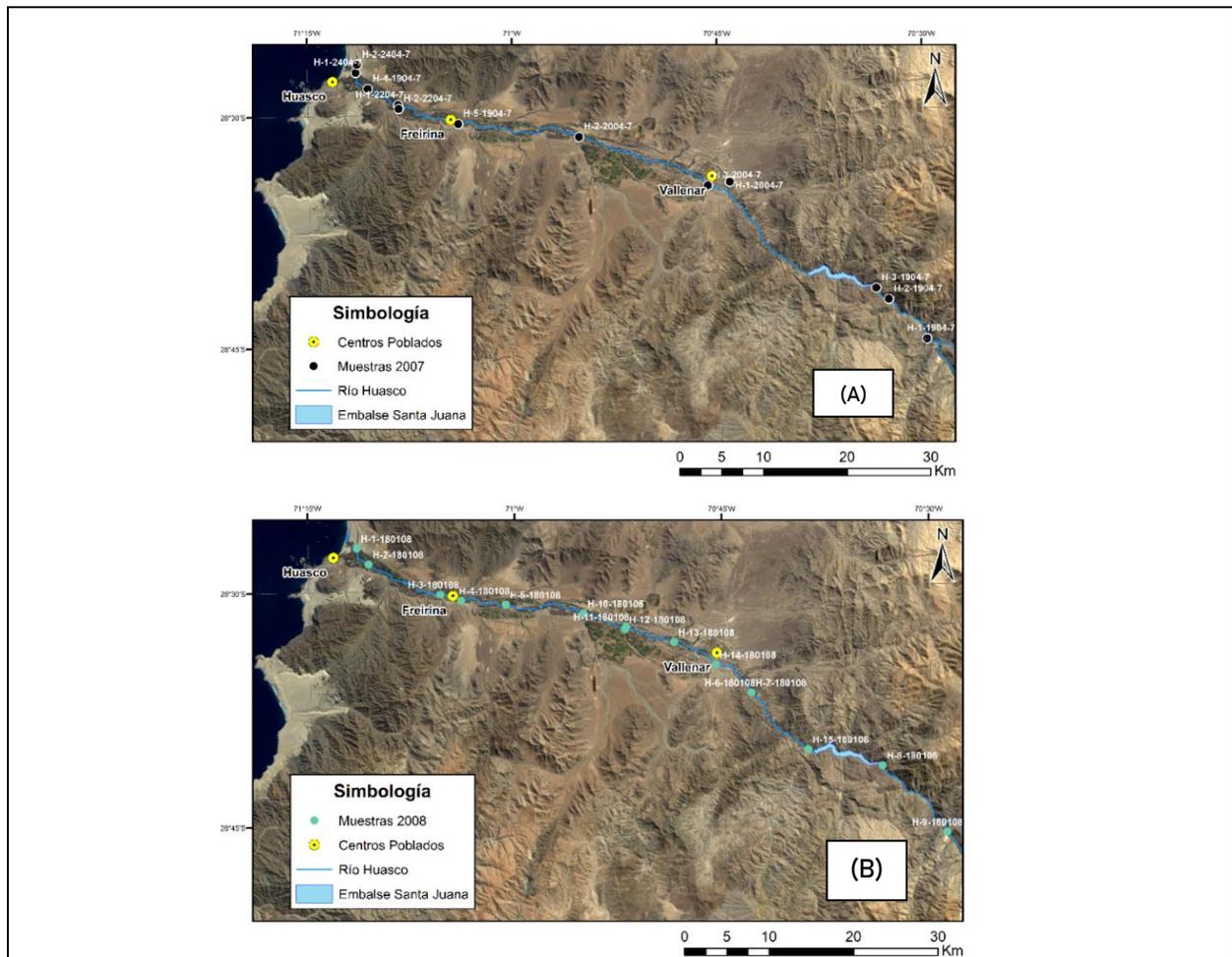


Figura 4.1 Ubicación puntos de muestreo. (A) Campaña abril 2007. (B) Campaña enero 2008.

4.1.1. Trabajo de terreno

En ambas campañas fueron tomadas una muestra de agua y una de sedimentos en cada uno de los puntos señalados en la figura anterior, a una profundidad de 5 a 10 cm para aguas, y 1 a 5 cm para sedimentos. Las muestras de agua fueron filtradas *in situ* con jeringas desechables luer lock y filtros Millipore de 0,22 μm . Las muestras destinadas a análisis de metales trazas y cationes mayores fueron acidificadas con una gota de HNO_3 doble destilado. Además, se midieron en terreno los parámetros físicos pH, temperatura y sólidos totales disueltos, los que se encuentran listados en el Anexo I. En el caso de los sedimentos, las muestras fueron tomadas directamente con un contenedor plástico, removiendo las hojas y restos maderosos que pudiesen haberse encontrado junto con ellos.

4.1.2. Análisis químico

Las muestras de la campaña realizada en abril de 2007, fueron analizadas en un cuarto limpio de clase 1000, es decir con un máximo de partículas permitido por unidad de volumen, en la Universidad de Toulouse, Francia. Por otro lado, las muestras de la campaña 2008, fueron enviadas a analizar a laboratorios ACME, en Canadá.

A continuación, se explicarán más detalladamente los procedimientos llevados a cabo en el Laboratorio GET de la Universidad Paul Sabatier.

En el caso de las muestras de agua, la conductividad eléctrica fue medida con un electrodo CONSORT C830, lo que permitió estimar las diluciones apropiadas previas a los demás análisis. Los aniones mayores fueron medidos con un sistema de cromatografía iónica Dionex ICS 2000, mientras que cationes mayores y elementos traza fueron medidos con un ICP-MS con celdas de colisión. Por último, los resultados obtenidos fueron validados mediante el análisis del material de referencia certificado SLRS4.

Por su lado, los sedimentos fueron secados a 105°C y pulverizados ($<100\mu\text{m}$) con un mortero de ágata. Los cationes mayores fueron medidos mediante ICP-AES y los elementos traza mediante ICP-MS.

4.1.3. Límite de detección y coincidencia de los datos 2007-2008.

Como se mencionó en la sección anterior, los elementos químicos fueron medidos en laboratorios distintos, por lo que se hace necesario unificar ambas bases de datos. Las tablas 4.1 y 4.2 presentan todos los elementos que fueron medidos en ambos años y matrices.

La tabla 4.1 resume aquellos elementos contenidos en las bases de datos de aguas superficiales.

Tabla 4.1. Parámetros químicos contenidos en las bases de datos de aguas superficiales 2007 y 2008.

<i>Campaña</i>	<i>Parámetros medidos</i>	<i>Unidad de medida</i>
Campaña 2007	Al, As, B, Ba, Ca, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Si, Sr, Ti, U, V, Zn, NO ₃ , SO ₄ , F, Ga, Pb, Br, Hg, La, Ce, Nb, P, S, Y.	Concentraciones en µg/L.
Campaña 2008	Al, As, B, Ba, Br, Ca, Cl, Co, Cs, Cu, Fe, Gd, Hg, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Si, Sr, U, V, W, Y, Zn, NO ₃ , F, Ag, Au, Be, Bi, Cd, Cr, Er, Eu, Ga, Ge, Hf, Ho, In, Ir, Lu, Os, Pd, Pt, Rh, Ru, Sm, Ta, Tb, Te, Ti, Tl, Tm, Yb, Eu, Pb, Th, Pr, Zr	Concentraciones en µg/L.

De forma similar, la tabla 4.2. presenta los elementos cuantificados en sedimentos activos.

Tabla 4.2. Parámetros químicos contenidos en las bases de datos de sedimentos activos 2007 y 2008.

<i>Campaña</i>	<i>Parámetros medidos</i>	<i>Unidad de medida</i>
Campaña 2007	Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Tl, Pb, Bi, Th, U.	Concentraciones en ppm.
Campaña 2008	Mo, Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Fe, As, U, Au, Th, Sr, Cd, Sb, Bi, V, Ca, P, La, Cr, Mg, Ba, Ti, B, Al, Na, K, W, Tl, Hg, Se, Te, Ga, Cs, Ge, Hf, Nb, Rb, Sc, Sn, S, Ta, Zr, Y, Ce, In, Re, Be, Li.	Concentraciones en ppm

Por otra parte, para ambas bases de datos fueron eliminados todos aquellos parámetros en donde más de un 70% de las muestras se encuentre bajo el límite de detección (DL). Por otro lado, para los elementos en los que más del 30% de las muestras tienen concentraciones que superan el DL, se tomará un valor igual a la mitad del límite de detección (Reimann *et al.*, 2008). Por ejemplo, si el límite de detección instrumental para cierto elemento es igual a 8 ppm, aquellas muestras con concentraciones < DL, serán trabajadas con una concentración igual a 4 ppm.

La tabla 4.3. presenta los parámetros químicos retirados de las bases de datos de aguas superficiales.

Tabla 4.3. Elementos que no cumplen con la condición del DL en aguas superficiales.

Campaña	Elemento	% de muestras sobre el DL
2007	Ga, Ge, Pb, Br, Hg, La, Ce, Nb, P, S, Y.	0%
2008	Ag, Au, Be, Bi, Cd, Cr, Er, Eu, Ga, Ge, Hf, Ho, In, Ir, Lu, Os, Pd, Pt, Rh, Ru, Sm, Ta, Tb, Te, Ti, Tl, Tm, Yb.	0%
	Eu	6,6%
	Pb, Th	20%
	Pr, Zr	26%

Una vez eliminados de la base de datos los parámetros de la tabla anterior, se verificaron las coincidencias en ambos sets de datos. De la revisión de los elementos de ambas campañas, los parámetros que coinciden; y por lo tanto los parámetros a analizar para aguas superficiales son: Al, As, B, Ba, Ca, Cl, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Rb, Sb, Se, Si, Sr, U, V, Zn, NO₃ y F.

En el caso de los sedimentos activos la tabla 4.4 reúne los elementos que no fueron considerados en el análisis de resultados por no cumplir la condición del DL.

Tabla 4.4. Elementos que no cumplen con la condición del DL en sedimentos activos.

Campaña	Elemento	% de muestras sobre el DL
2007	-	-
2008	Ta, Pt, Pd, In	0%

Una vez eliminados los parámetros resumidos en la tabla 4.4 de la base de datos de sedimentos activos, los elementos que coinciden en ambos sets de datos, y que se presentarán en el capítulo de resultados son: Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sb, Rb, Sr, Y, Mo, Ag, Cd, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Pb, Bi, Th y U.

4.2. Metodología de análisis de resultados geoquímicos

En esta sección se exponen los fundamentos estadístico-matemáticos que permitieron llegar a los resultados expuestos en el capítulo 5. En particular se hace referencia a un tipo de transformación aplicada a los datos composicionales, denominada *Isometric log-ratio* (ilr) (Egozcue *et al.*, 2003). Existen diversos tipos de transformaciones que se pueden aplicar a un set de datos composicionales, como lo son la transformación Box-Cox (Box & Cox, 1964); o las de la familia *log-ratio* (Aitchinson, 1986). Se escogió la transformación ilr, debido a que autores como Reimann *et al.* (2008) declaran que en el desarrollo del Atlas Geoquímico de Europa (Salmien *et al.*, 2005) se observó un comportamiento que se ajusta bien a las transformaciones logarítmicas y recomiendan el uso de esta transformación.

4.2.1. Marco teórico estadístico

4.2.1.1. Datos composicionales

Los datos composicionales son bastante frecuentes: se utilizan en ciencias medioambientales, geoquímica, biología, entre otras disciplinas. En este tipo de base de datos, las variables no son independientes entre sí, y se relacionan al estar expresadas como partes de un total. Las partes

composicionales se definen matemáticamente como números reales, positivos y suman una constante. En el caso particular de las bases de datos geoquímicos, si para cada muestra se midiesen todos los elementos químicos posibles, sus concentraciones sumarían 100% o 1.000.000 ppm. (Filzmoser *et al.*, 2009). Consecuencia de lo anterior, si cambia el valor de una variable, cambia una proporción del total y las otras deben cambiar también. Dicho de otro modo, si algún componente del set de datos incrementa su valor, al menos uno de los otros componentes deberá disminuir su valor para mantener la suma constante. Incluso, si no se dispone de la composición química de todos los elementos, los datos siguen siendo dependientes del resto. Estas características son inherentes a los datos geoquímicos, y es importante tener presente que ninguna variable es libre de cambiar independientemente.

Por lo tanto, el primer paso en el análisis de datos medioambientales, debiese ser “observar” los datos con herramientas gráficas adecuadas (Reimann *et al.*, 2008). Típicamente se utilizan histogramas, box-plot, etc. Generalmente un histograma de datos composicionales tiende a tener una distribución sesgada a la derecha, debido a la presencia de anomalías u *outliers*, siendo un gráfico poco representativo. Al utilizar una transformación logarítmica para estos datos, el histograma que en un principio se encontraba sesgado a la derecha tendrá una forma mucho más simétrica, e incluso cercana a una distribución normal.

La naturaleza de los datos composicionales tiene una incidencia directa en la estadística univariable, ya que es posible omitir variables sin perder información. Como consecuencia de esto, este tipo de datos no se representan bien en un espacio geométrico Euclidiano, que es en el cual se basan los métodos estadísticos tradicionales.

Para lidiar con el problema expuesto anteriormente, Aitchinson (1986) define un conjunto de datos composicionales con D-componentes como un vector $x = (x_1, x_2, \dots, x_D)$ en el cual cada componente es un número real que aporta información relativa respecto al total, conteniendo toda la información importante en la proporción entre ellos (Ec. 3.1).

$$\left\{ x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \mid x_i > 0 \sum_{i=1}^D x_i = cte \right\}$$

Ecuación 4.1. Conjunto de datos composicionales.

La solución a dicho problema, consiste en una familia de transformaciones logarítmicas denominada *Log-ratio transformations*. De esta familia de transformaciones, deriva la transformación *Isometric log ratio (ilr)* (Egozcue *et al.*, 2003), cuya principal ventaja respecto a otras conversiones logarítmicas es la isometría, característica que se explica mejor en la sección 4.4.1.2. y por la cual se utiliza esta transformación en estudios geoquímicos de índole ambiental.

4.2.1.2. Transformación *Isometric log-ratio (ilr)*

Como se mencionó anteriormente, este tipo de transformación permite analizar un conjunto de datos composicionales, para el cual todos los componentes aportan información relativa respecto al total, dado que la información relevante se encuentra en la razón entre sus componentes, a diferencia de los datos individuales, en los cuales la información es absoluta para cada uno de ellos.

Para análisis estadísticos univariable, se considera un sistema de dos componentes: el valor medido para cada muestra, es decir la concentración química de la muestra (x) y el resto ($1-x$), que representa la sumatoria de todas las partes restantes en la muestra. Así, la ecuación para la transformación *ilr* en un sistema de dos componentes (Ec. 4.2) se define como:

$$ilr(x) = \sqrt{\frac{1}{2}} \times \ln \frac{x}{(1-x)}$$

Ecuación 4.2. Transformación *ilr* para un sistema de dos componentes.

Como se mencionó anteriormente, esta transformación posee una importante propiedad teórica llamada isometría, la cual relaciona directamente la geometría euclidiana tradicional con el nuevo espacio geométrico generado con la transformación, y que permite trabajar con las variables convertidas adimensionales y posteriormente retransformar los resultados obtenidos hacia la base de datos original.

En la figura 4.2 se visualiza la funcionalidad de la transformación *ilr* para dos partes composicionales. En ambos gráficos los puntos negros representan datos composicionales cuya suma es un número entre 1 y 0. Dado que la razón entre ambos contiene la información importante, estos pueden desplazarse por las líneas trazadas desde el origen sin pérdidas de información. Así, pueden ser proyectados en la línea de 135° donde ambas partes suman 1. Al aplicar la transformación se obtiene el nuevo eje paralelo, donde se pueden proyectar los datos.

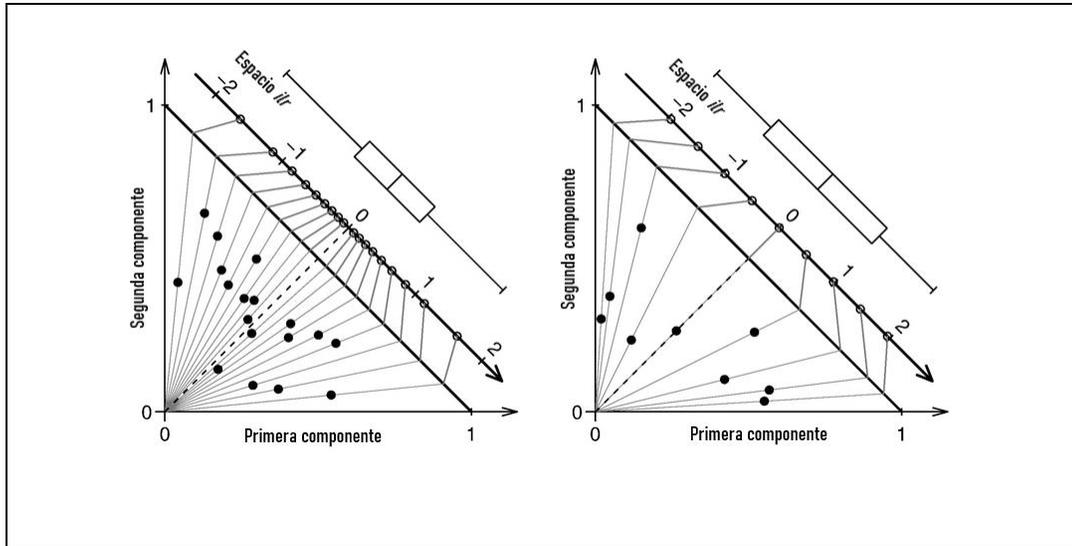


Figura 4.2. Representación gráfica del espacio generado por una transformación *ilr*. En la figura izquierda la distancia entre los puntos es irregular, mientras que en la derecha es regular. Modificado de Filzmoser *et al.*, 2010.

4.2.1.3. Estadística Univariable

4.2.1.3.1. Línea geoquímica base

Una línea geoquímica base permite conocer la distribución espacial y concentración elemental estableciendo parámetros estadísticos como la mediana y los rangos de valores anómalos. Esta, en conjunto con otros análisis como el factor de enriquecimiento y el análisis factorial permiten dilucidar posibles fuentes contaminantes y dilucidar entre orígenes antropogénicos y naturales. El comparar líneas de base de distintas temporalidades permite observar los cambios ocurridos y si las anomalías detectadas son persistentes en el tiempo.

4.2.1.3.2. Análisis Box-plot

El diagrama *Box-plot*, definido por Tukey (1977) es una herramienta estadística que permite visualizar la distribución de una variable respecto a sus valores máximo, mínimo y mediana. Entrega información sobre la existencia de valores anómalos y la simetría de la distribución.

Un gráfico de *Box-plot* (Fig. 4.3) se construye en base a la mediana (Q_2), la cual divide al set de datos en dos mitades iguales. El rango intercuartílico (RI) se construye a partir de los percentiles 25 y 75 (Q_1 y Q_3 respectivamente) y contiene el 50% de los datos. La longitud de la caja esta definida por el RI. Los límites superiores (LS) e inferiores (LI) se calculan según lo indicado en la tabla 4.5, resultando en valores que no necesariamente se encuentran dentro del set de datos, pero que son importantes dado que si existiesen valores dentro del set de datos que ubicados sobre estos, se consideran como anomalías. Los parámetros bigote superior (BS) y bigote inferior (BI) se definen como el valor más cercano a los límites (LI, LS) dentro de la base de datos.

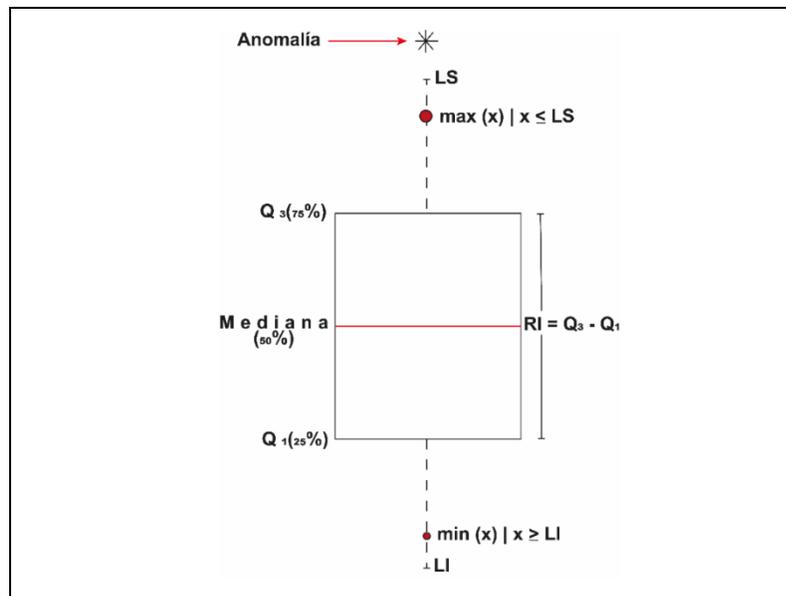


Figura 4.3. Diagrama *Box-plot* teórico

Tabla 4.5. Definición algebraica de variables presentes en un diagrama *Box-plot*.

	Variable	Fórmula
RI	Rango Intercuartílico	$RI = Q_3 - Q_1$
LI	Límite Inferior	$LI = Q_1 - 1.5 * RI$
BI	Bigote Inferior	$BI = \min(x, [x \geq LI])$
LS	Límite Superior	$LS = Q_3 + 1.5 * RI$
BS	Bigote Superior	$BS = \max(x, [x \leq LS])$

4.2.1.4. Análisis Multivariable

4.2.1.4.1. Análisis de componentes principales

El Análisis de componentes principales (ACP) permite reducir la dimensionalidad de la base de datos. Lo que busca es explicar la mayor cantidad de información contenida en el set de datos a partir de la menor cantidad de componentes como sea posible. Si la base de datos consta de variables altamente dependientes entre si, es común que una pequeña cantidad de variables (<20% de las variables originales) explique la mayor parte de la variabilidad de original de la base de datos (Filzmoser & Croux, 2003).

En estadística, el contenido de información se expresa en la variabilidad, por lo que un ACP busca la dirección dentro del espacio multivariable que contiene la máxima variabilidad. Las nuevas componentes se ordenan en forma decreciente en función del porcentaje de variabilidad explicada por cada una, es decir la primera componente explica el mayor porcentaje de varianza de los datos, y así sucesivamente.

4.2.1.4.2. Análisis factorial

El análisis factorial (AF) al igual que el ACP, es una técnica estadística multivariable que reduce la dimensión de la base de datos, explicando las relaciones de las variables observadas (las concentraciones) en función de un número menor de variables sintéticas denominadas factores.

4.2.1.5. Identificación de fuentes de proveniencia

4.2.1.5.1. Factor de enriquecimiento

El cálculo del Factor de enriquecimiento (EF) es un análisis exploratorio que busca establecer la posible influencia de fuentes naturales y antropogénicas en las concentraciones medidas en diferentes materiales. Este método fue desarrollado en un principio en estudios atmosféricos, de aguas de lluvia y marina (Chester & Stoner, 1973; Zoller *et al.*, 1974). No obstante, es un método que debe ser aplicado con criterio, y teniendo en cuenta que un cálculo o dato por sí solo no es 100% significativo. Cabe mencionar que existen algunos cuestionamientos a este método, los cuales son tratados a profundidad en el capítulo 6 de discusión.

La fórmula generalizada para el cálculo del Factor de enriquecimiento (EF) puede ser expresada como se muestra en la ecuación 4.4.

$$FE_{\text{elemento } x} = \frac{[C_{\text{elem. } x}/C_{\text{elem.ref.}}]_{\text{muestra}}}{[C_{\text{elem. } x}/C_{\text{elem.ref.}}]_{\text{corteza continental}}}$$

Ecuación 4.4. Cálculo del factor de enriquecimiento.

De la ecuación anterior se desprende que el FE se basa en la normalización de las concentraciones del elemento a evaluar ($C_{\text{elem. } x}$) con respecto a un elemento de referencia, que se caracteriza por ser conservativo en la corteza continental. Algunos elementos utilizados son: Al, Ti, o Zr, ya que son estables en los procesos ambientales. Esta memoria en particular utiliza el Sc como elemento conservativo, en primer lugar, debido a que este se encuentra tanto en las bases de aguas como de sedimentos y los compilados con los que se compara, y dado que según Reimann & de Caritat, (2005), este elemento junto a los mencionados anteriormente son los más ampliamente utilizados en este tipo de análisis. Luego estos valores se comparan con su equivalente representativo de la corteza continental, el cual se obtiene a partir de valores referenciales del medio geológico. Para efectos de este trabajo, se utilizó la compilación de Taylor & McLennan (2009) y los datos de Oyarzún *et al.* (2016).

Los resultados que se obtienen a partir del cálculo del FE pueden interpretarse como diferencias en el nivel de influencia de la fuente en el origen de los elementos. En la tabla 4.6 se muestran los criterios para la interpretación del FE.

Tabla 4.6. Criterios para la interpretación del Factor de Enriquecimiento.

Rango	Origen
$FE \leq 1$	Natural, litogénico
$FE > 10$	Importante contribución antropogénica

4.2.1.5.2. Estadística Multivariable

En la sección 4.4.1.4. se explicó la fundamentación estadística de los análisis con múltiples variables. A continuación, se describirá su utilidad en el análisis de fuentes de proveniencia.

El análisis factorial, permite identificar asociaciones geoquímicas, lo cual es bastante útil para identificar las fuentes de proveniencia de estas. Para esto, se consideran aquellos elementos que tengan un factor de carga entre $|0,5|$ y $|1|$ para cada factor en particular. En cada factor se presenta una asociación química principal con un factor de carga $> 0,5$ para cada elemento, al igual que una asociación geoquímica principal inversa con factor de carga $< -0,5$ para cada elemento. Suele suceder que algunos elementos se repitan en varios factores, así como también es posible que se presente más de una asociación geoquímica por factor debido a lo compleja que puede ser la señal química, la cual depende de la multiplicidad de fuentes existentes.

4.3. Comparación de resultados con estudios similares

Existen diferentes fuentes bibliográficas que contienen datos geoquímicos tanto para las aguas superficiales como sedimentos activos. El poder comparar datos de distintas fuentes y temporalidades permite comprender de mejor manera la geoquímica global del sector, así como podría evidenciar los cambios que ocurren a una escala pequeña de tiempo.

En esta sección se explican las diferentes fuentes de datos a comparar, las metodologías con las que fueron tomados estos datos y que parámetros pueden ser comparados.

4.3.1. Estudios realizados en aguas superficiales

Como ya se ha mencionado, se utilizaron datos obtenidos de informes emitidos por organismos públicos. La primera fuente de datos obtenidos en terreno y de manera similar a los datos de 2007/2008 corresponde al informe “Estudio, monitoreo y actualización de antecedentes técnicos para desarrollar norma secundaria de calidad para la protección de las aguas continentales en la cuenca del río Huasco, región de Atacama” (CENMA, 2016). Esta es la fuente de datos más robusta publicada, y corresponde a un estudio técnico previo a la elaboración de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental. Por otro lado, se encuentran a libre disposición y para descarga desde internet, los datos de monitoreo de calidad físicoquímica tomados por la Dirección General de Aguas, organismo dependiente del Ministerio de Obras Públicas. Sin embargo, ambos estudios contienen datos de aguas que no han sido filtradas al momento de ser tomadas, por lo que no es posible comparalas con los sets de datos publicados en este trabajo, aún así pueden ser comparadas entre sí (DGA y CENMA, 2016).

4.3.1.1. Estudio CENMA 2016

El estudio realizado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), publicado el 22 de diciembre de 2016, contiene una vasta recopilación de antecedentes referentes a la química de las aguas superficiales de la cuenca, además de los resultados que se obtuvieron en cuatro campañas de terreno (tabla 4.7).

Tabla 4.7. Campañas realizadas en estudio CENMA 2016.

<i>N°</i>	<i>Fecha</i>	<i>N° de muestras</i>
1	27 nov.- 1 dic. 2015	10
2	25 ene.-27 ene. 2016	14
3	27 abr.-30 abr. 2016	14
4	18 jul.-20 jul. 2016	14

En la figura 4.4 se observan las ubicaciones donde fueron tomadas dichas muestras, cabe mencionar que de las 14 muestras indicadas en la tabla 4.1, solo 7 caen dentro del área de este trabajo.

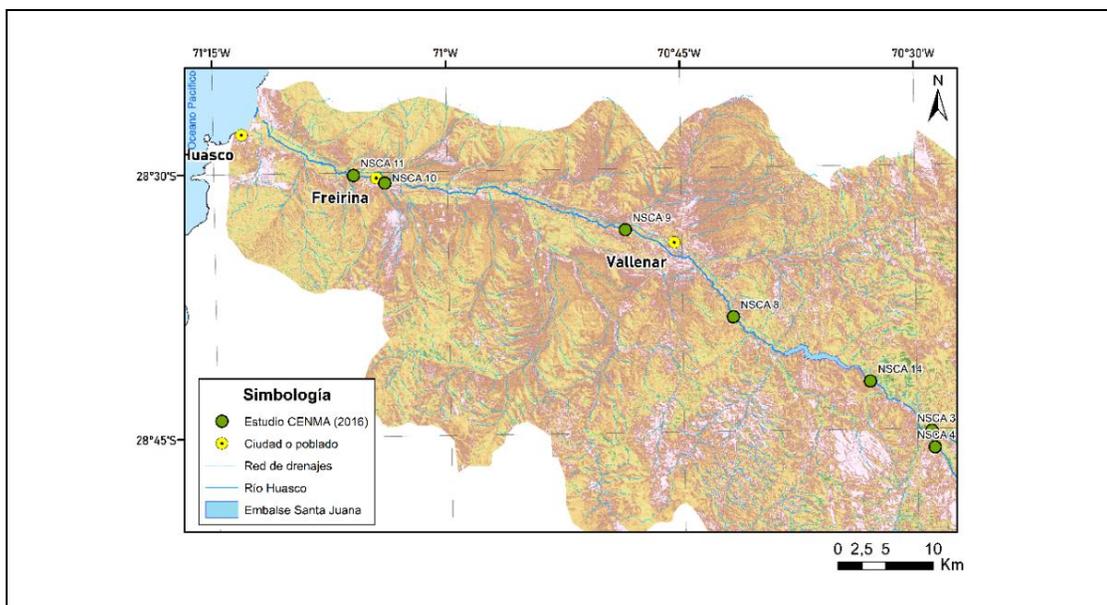


Figura 4.4. Ubicación de las muestras tomadas para el informe CENMA (2016).

Las campañas de terreno efectuadas en la realización del informe de CENMA, tomaron muestras siempre en los mismos puntos, o lo más cercano posible a estos, las coordenadas de estas muestras se encuentran en el anexo I.

Para estas muestras se cuenta con una base de datos de 21 elementos químicos (Cd, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Al, Mn, Ag, V, Ba, Co, Mo, Be, B, Fe, As, Se, Hg, PO₄, NO₃, NO₂, NH₄, CN, SO₄, F, Cl, P) medidos mediante espectroscopía de emisión atómica. De ellos, fueron eliminados (Cr, Ni, Se, Ag, Be, y Hg) por no cumplir la condición establecida para el DL en la sección 4.1.3 de este capítulo.

4.3.1.2. Dirección general de aguas

La DGA cuenta con 6 estaciones de monitoreo físico-químico activas dentro del área de estudio (figura 4.5), las cuales, según la página del organismo (www.snia.gob.cl) entregan informes de carácter mensual. No obstante, al descargar los datos de la página en una planilla Excel, falta información de algunas estaciones, además de que se entregan aproximadamente 4 mediciones por año y no 12 como indican en su página.

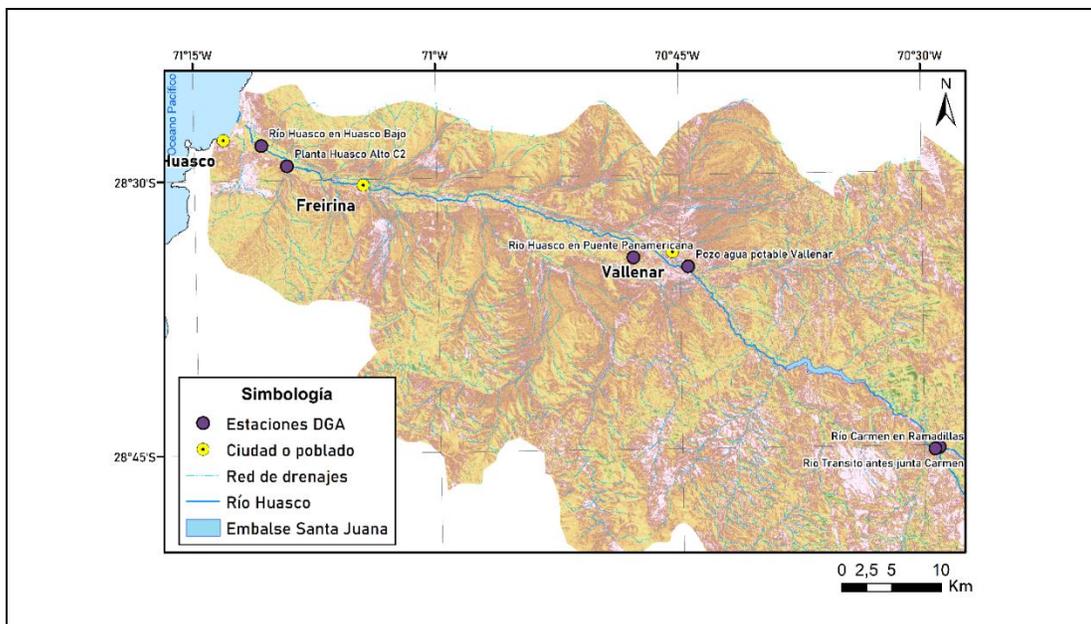


Figura 4.5. Ubicación estaciones de monitoreo físico-químicos activas DGA. Datum WGS 84

Estos informes entregan la concentración de 16 parámetros químicos (Al, As, B, Cl, Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se, Na, SO₄, Zn) además del pH y T° del agua del río.

Según indican los informes, tanto elementos mayores como metálicos son medidos por espectrofotometría de absorción atómica. De los elementos mencionados, fueron eliminados 7 (Se, Pb, Ni, Co, Mo, Cu, Cl) por no cumplir con el porcentaje establecido de muestras sobre el DL. El set de datos completo se encuentra en el anexo I.

4.3.2. Estudios realizados en sedimentos activos

Para los sedimentos, existen dos estudios que informan sobre las concentraciones de elementos químicos. El primero, consiste en el trabajo “Geoquímica y Mineralogía de los Sedimentos Fluviales de la Cuenca del río Huasco, Región de Atacama, Chile” (Lacassie & Díaz, 2019), el cual contiene información de 136 muestras, colectadas en causes activos, planicies de inundación y terrazas fluvioaluviales, en los ríos Huasco, del Carmen, Potrerillos, del Tránsito, Chollay y Estrecho. Las muestras de este estudio fueron colectadas en dos campañas entre octubre de 2007 y marzo de 2008, por lo que coinciden temporalmente con las de este trabajo. La memoria de título “Estudio geoquímico ambiental y mapa de riesgos de la cuenca del río Huasco, III región de Atacama, Chile” (Mosjos, 2017), fue realizada con los mismos datos de Lacassie & Díaz, aunque los trabajos difieren en el método estadístico aplicado. Para evitar confusiones, en este trabajo se tratará a este set de datos como publicados por Lacassie y Díaz, pudiendo ser referido el trabajo de Mosjos para efectos de la discusión.

El segundo estudio que contiene datos de concentraciones en sedimentos fluviales del Huasco se titula “Evaluación y Caracterización del polvo negro en la comuna de Huasco e implementación de medidas de mitigación” (CENMA, 2017). Este estudio informa concentraciones de metales en diferentes matrices ambientales: Material particulado sedimentable, “polvo negro” (también denominado fierrillo) depositado, suelos y sedimentos fluviales.

4.3.2.1. Lacassie & Díaz (2019)

Este estudio fue realizado en el marco del proyecto Innova-Corfo: “Evaluación hidrogeológica de la cuenca del Río Huasco, con énfasis en la cuantificación y dinámica de kis recursos hídricos superficiales y subterráneos”, coejecutado entre la Universidad Católica del Norte y SERNAGEOMIN. De las 136 muestras contempladas en su trabajo, 11 se ubican dentro del área de este estudio (Fig. 4.6). Estas muestras corresponden a un compósito de submuestras tomadas a una profundidad de entre 0 a 5 cm y almacenadas en bolsas de PVC. En cuanto al procedimiento analítico que describen, las muestras fueron secadas durante 10 días a una temperatura inferior a 60°C y posteriormente pulverizadas con un mortero de ágata. El material pulverizado fue analizado con un equipo de fluorescencia de rayos X, determinando las concentraciones de 32 elementos químicos para cada muestra.

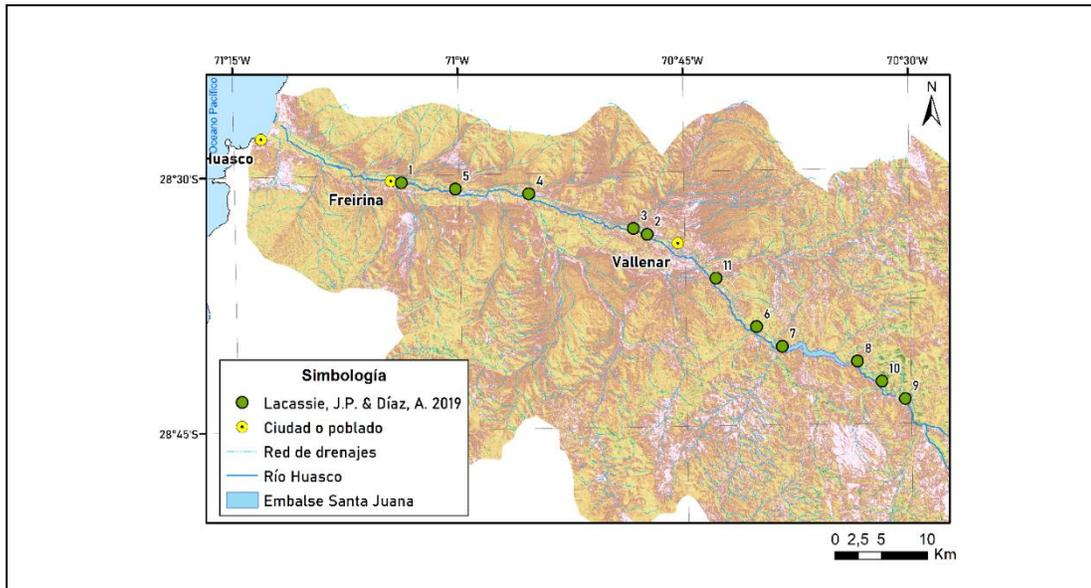


Figura 4.6. Ubicación de muestras. Elaborado a partir de Lacassie & Díaz, 2019. Datum WGS 84.

4.3.2.2. Estudio CENMA (2017).

Este informe fue realizado por el Centro Nacional del Medio Ambiente, dependiente de la Universidad de Chile, y tiene como objetivo realizar la evaluación integral de la presencia de polvo negro en las distintas matrices ambientales de la comuna de Huasco. Dentro de las matrices que analizaron se encuentran 24 muestras de sedimentos activos colectados en el río, entre las localidades de Huasco y Vallenar (Fig. 4.7) 11 metales de interés (Cd, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Mn, V, Ba, Co, Fe). Para esta base de datos todos los elementos cumplen con el criterio del DL. Lamentablemente el informe no indica los procedimientos analíticos utilizados, no obstante, la página web (www.cenma.cl) indica que cuentan con un laboratorio de química ambiental con vasta experiencia en el análisis de metales y otros contaminantes en diferentes matrices ambientales, y que los datos entregada en sus informes es confiable, trazable y acorde a protocolos validados.

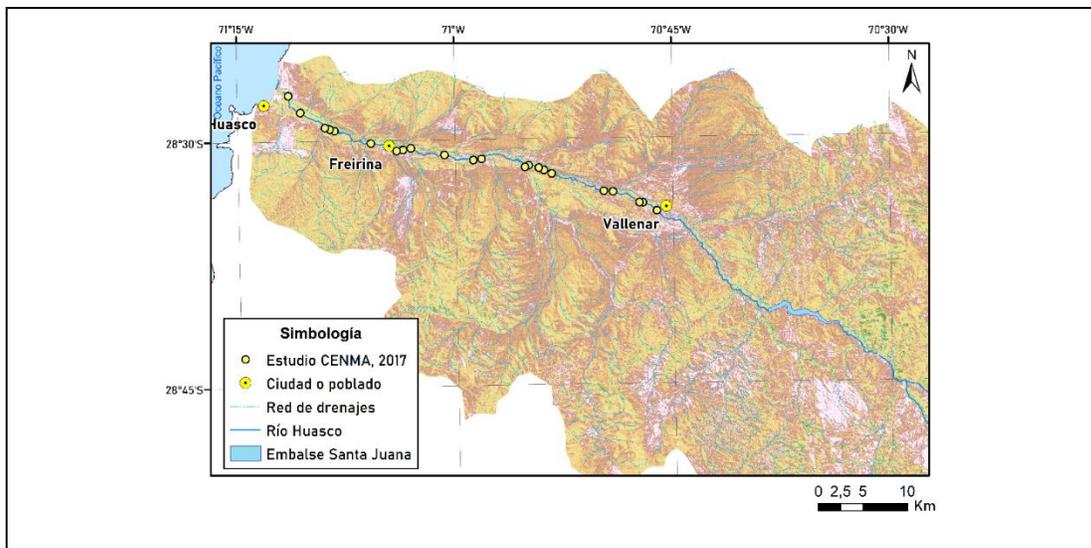


Figura 4.7. Mapa ubicación muestras de sedimentos informe CENMA, 2017.

4.3.3. Coincidencia en las bases de datos

Una vez revisados todos los parámetros medidos en los diferentes estudios, los parámetros que son comunes a todas las bases de datos de aguas superficiales son los siguientes: As, Fe, Mn y Cu, y por lo tanto se observarán las diferencias entre dichos elementos.

Por otro lado, los elementos que coinciden en todos los sets de datos de sedimentos activos son: Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, V y Zn, e igual que en el caso de las aguas superficiales, serán comparados en el capítulo de resultados. Para el caso particular de sedimentos activos, cabe mencionar que si bien existen diferencias en la metodología analítica entre los trabajos a comparar, ambos laboratorios; tanto el de SERNAGEOMIN como el Laboratorio de Química Ambiental de CENMA, trabajan con materiales de referencia certificados y buscan constantemente asegurar la exactitud de sus resultados.

4.4. Parámetros geoquímicos importantes en la evaluación de la calidad ambiental.

Los elementos químicos (metales, metaloides y no metales) son cruciales para la vida animal y vegetal. De todos los elementos de la tabla periódica, 79 son estables, y aproximadamente 23 de ellos se consideran como esenciales o probablemente esenciales. La mayoría del resto se considera como “tóxico”, y que incluso a bajos niveles de exposición, pueden generar efectos adversos (Barbosa, 2017).

La Agencia de Sustancias tóxicas y registro de enfermedades de Estados Unidos (ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry) actualiza constantemente su listado de sustancias peligrosas, y este se basa principalmente en la frecuencia con que se encuentran, toxicidad y potencial exposición para los humanos. Cabe mencionar que en esta lista se encuentran sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, en forma de compuestos, especies o elementos químicos. De las 275 sustancias que componen la lista 2019, el As, Pb, Hg ocupan el primer, segundo y tercer lugar respectivamente. Otros de los elementos que se encuentran en la base de datos se listan a continuación con su respectiva posición en el ranking: Cd (7), Cr (17), Be (43), Co (52), Ni (58), Zn (75), U (97), Ra (101), Th (102), Cu (120), Ba (136), Mn (140), Se (147), Al (183), Ag (229), Sb (244).

En cuanto a la medición de la calidad ambiental para las aguas superficiales la Norma secundaria de Calidad Ambiental (NSCA), creada según las particularidades de esta cuenca; establece límites permitidos para las concentraciones de ciertas sustancias, las cuales varían según las distintas áreas de vigilancia (Figura 4.8).

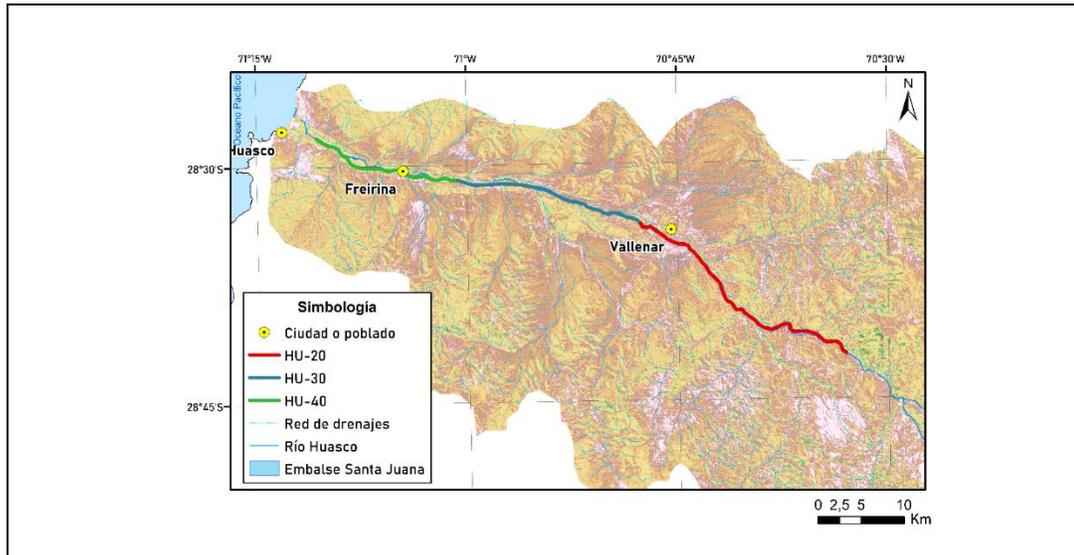


Figura 4.8. Áreas de vigilancia definidas para la NSCA del río Huasco. Elaborado a partir de los límites definidos en la resolución de la norma. *Datum WGS 84.*

Los parámetros ambientales que considera la norma y que pueden evaluados mediante la geoquímica se resumen en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Parámetros considerados en la NSCA.

Parámetro	Unidad	Área de vigilancia		
		HU-40	HU-30	HU-20
Cu _{total}	mg/L	0,04	0,008	0,04
Fe _{total}	mg/L	0,14	1,9	1,9
Zn _{total}	mg/L	0,17	0,17	0,17
Mn _{total}	mg/L	0,5	0,05	0,5
Hg _{total}	mg/L	0,001	0,001	0,001
Al _{total}	mg/L	2,7	0,18	2,7
As _{total}	mg/L	0,009	0,009	0,009
Nitrato	mg/L	2	3,9	2

Por otro lado, la legislación chilena no contempla a los sedimentos activos como elemento de protección, a pesar de que son el hábitat de organismos bentónicos y epibentónicos desempeñando un rol importante en las comunidades acuáticas. En Canadá y E.E.U.U. las legislaciones vigentes se basan en el trabajo de MacDonald *et al.*, (2000), quienes establecieron valores TEL (*Thersold Effect level*) y valores PEL (*Probably Effect Level*). El valor TEL se refiere al valor bajo el cual se espera que raramente ocurran efectos adversos en los organismos, en ese sentido estos valores podrían considerarse como una concentración “segura”, mientras que el valor PEL se refiere a las concentraciones sobre las cuales se espera que frecuentemente ocurran efectos adversos, lo que puede asimilarse a un valor máximo aceptable. Los valores TEL y PEL están establecidos para 8 metales y metaloides, y se resumen en la tabla 4.9

Tabla 4.9. Valores TEL y PEL para sedimentos. Basados en el trabajo de MacDonald *et al.*, 2000.

Elemento	Unidad de medida	Valor TEL	Valor PEL
As	ppm		33
Cd	ppm	0,99	4,98
Cr	ppm	43	111
Cu	ppm	32	149
Pb	ppm	38	148
Hg	ppm		1,06
Ni	ppm	23	48,6
Zn	ppm	120	459

5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los tratamientos estadísticos anteriormente descritos. Este capítulo presenta los resultados con el siguiente orden: en primer lugar, los resultados para muestras de agua, y en segundo lugar para muestras de sedimentos, comenzando por los elementos mayores y luego los elementos traza.

5.1. Estadística Univariable

Para efectos de la estadística univariable, las bases de datos fueron subdivididas en 2007 y 2008, a fin de facilitar la comparación entre las concentraciones de ambos años. El cálculo de los estadígrafos básicos fue realizado con los valores transformados, mientras que los gráficos fueron contruidos con los valores reales.

5.1.1. Elementos mayores

5.1.1.1. Aguas superficiales

En la tabla 5.1 se resumen los estadígrafos básicos que conforman el diagrama de *box-plot* para los elementos mayores medidos en las muestras de agua correspondientes a 2007-2008. Notar que en las tablas no siempre existe un límite superior (LS), y esto sucede porque el valor máximo (MAX) es inferior al valor calculado para el LS, lo que se traduce en una inexistencia de anomalías y un bigote superior (BS) igual al valor máximo (MAX). Por otro lado, aquellas variables que sí poseen un límite superior (LS) y un valor máximo (MAX) superior a este, presentan una o más anomalías.

Tabla 5.1. Estadígrafos básicos para elementos mayores en muestras de aguas superficiales. En naranja se resaltan las medianas superiores. Concentraciones en mg/L.

Elementos Mayores - Muestras de Agua														
Elemento	MIN		Q1		MEDIANA		Q3		BS		LS		MAX	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Na	25	19	27	30	258	149	293	305	418	446	-	-	418	446
Mg	14	16	16	20	36	30	43	58	68	76	-	-	68	76
Si	5	8	6	8	8	9	8	10	10	12	-	-	10	12
K	2	2	2	3	5	5	7	6	-	11	13	-	14	11
Ca	83	92	101	104	157	137	175	205	223	285	-	-	223	285
Cl	13	7	14	14	253	72	363	323	-	513	887	-	1458	513
NO ₃	0,01	0,03	0,05	0,03	1,1	4,5	2,1	5,5	-	-	5,2	13,6	7,6	17,7

Para la tabla anterior, se tiene que en 2007 K y Cl presentan anomalías, mientras que el ion Nitrato las presenta en ambos períodos.

Al comparar las medianas, se observa que estas aumentaron significativamente de 2007 a 2008 para el Nitrato (300% respecto al año anterior), mientras que disminuyeron significativamente en el Na y Cl (42% y 72% respectivamente). Para los elementos Mg y Ca el valor de la mediana es mayor en 2007. Los elementos Si y K no presentan mayores variaciones de un año a otro.

A continuación, se presentan los perfiles O-E confeccionados para estos elementos. El Na, Ca, Mg, K y Cl presentan patrones similares en sus perfiles, con un aumento de sus concentraciones de este a oeste, con un aumento notoriamente sostenido desde la latitud de Vallenar.

En la figura 5.1, se observan las variaciones en las concentraciones de Ca con respecto al oeste-este. Las concentraciones aumentan desde el punto más al este hacia el oeste, con valores máximos (223 y 285 mg/L respectivamente) que se ubican en la desembocadura. La pendiente del gráfico aumenta notoriamente a la latitud de Vallenar.

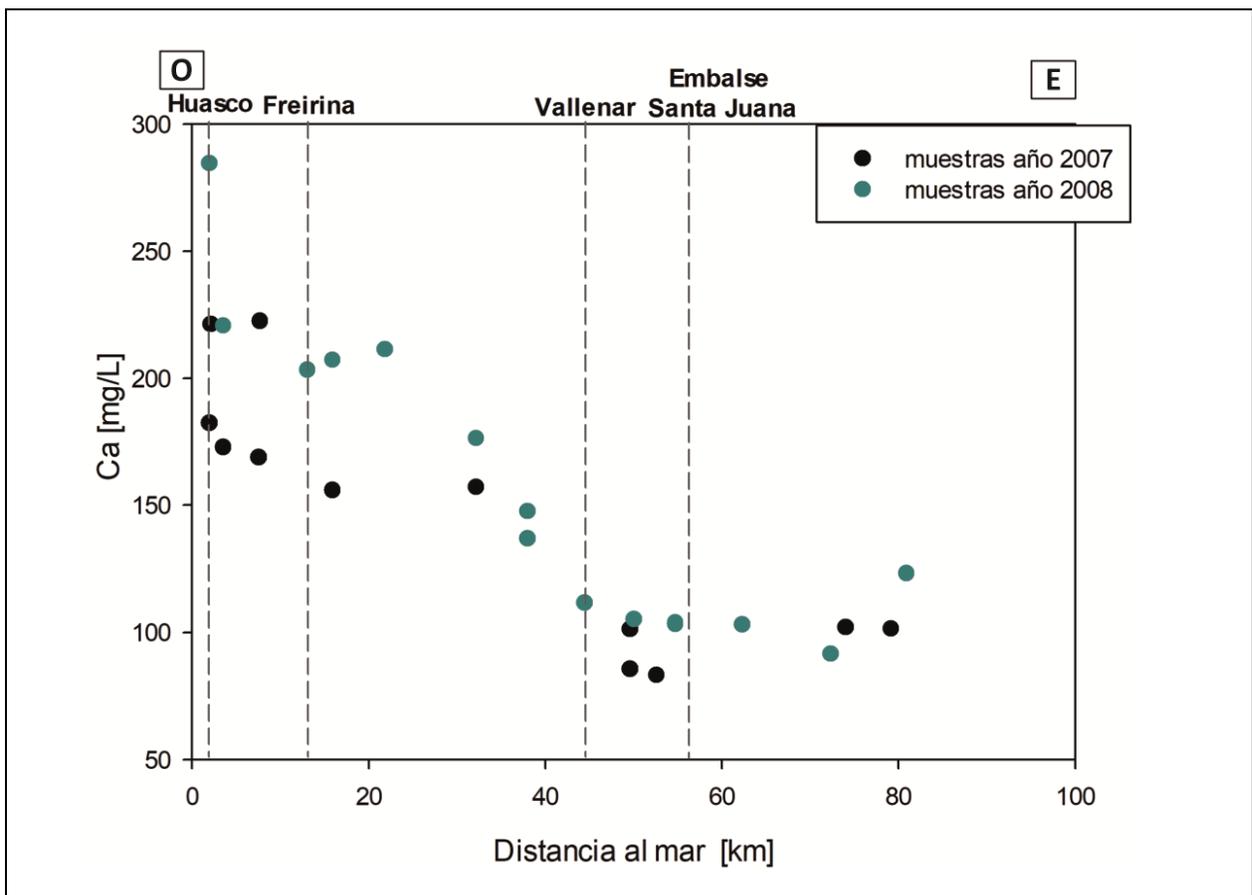


Figura 5.1. Perfil O-E concentraciones Ca en aguas superficiales.

En la figura 5.2. Se grafican las concentraciones de Na en un perfil O-E, para las cuales se observa la misma tendencia que en el gráfico anterior. Al igual que en el caso del Ca, las concentraciones máximas (418 mg/L en 2007 y 446 mg/L en 2008) se encuentran en la zona de la desembocadura, y estas aumentan de forma notoria en el km 45 de la figura.

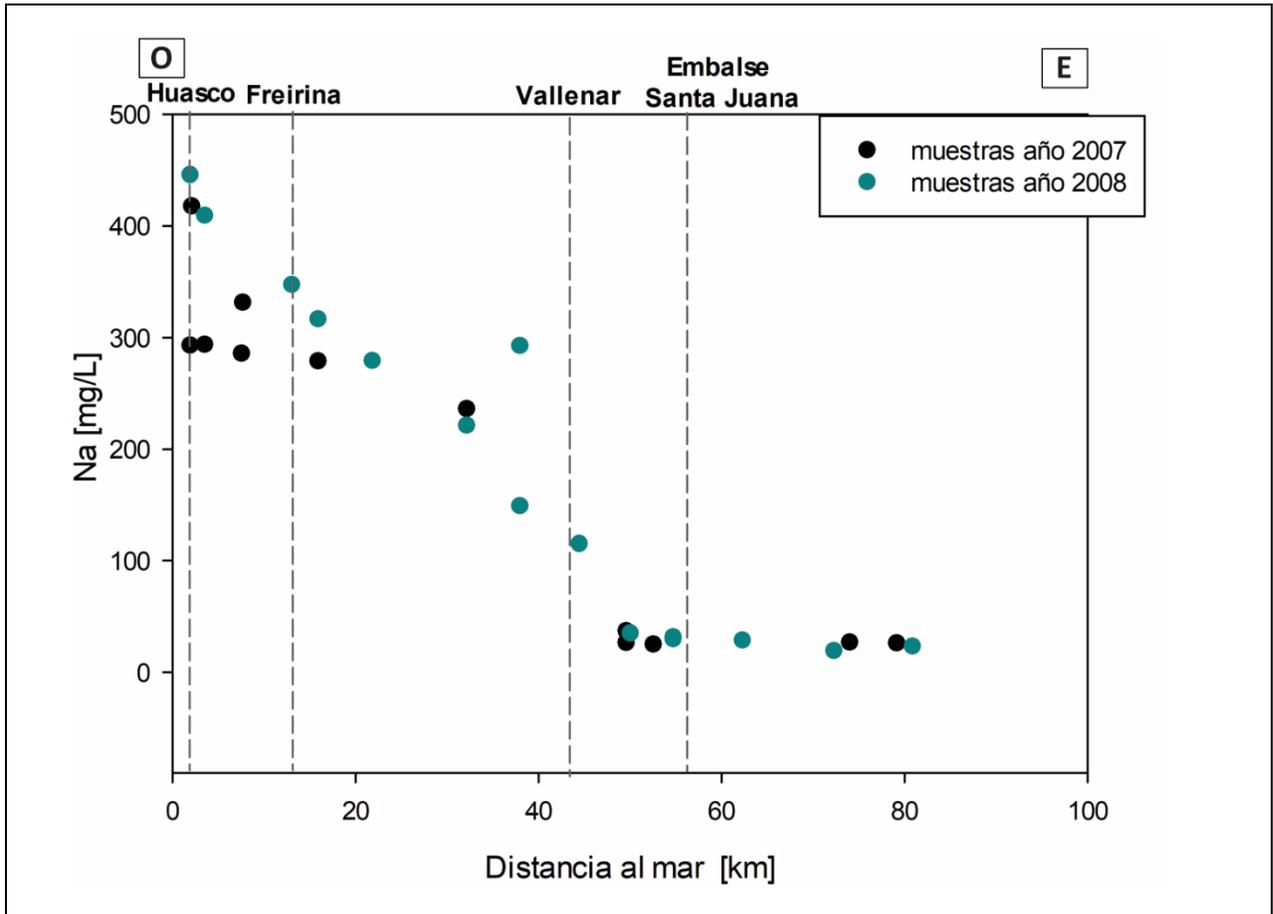


Figura 5.2. Perfil O-E concentraciones Na en aguas superficiales.

La figura 5.3 grafica el perfil O-E para el Mg. Se observa un aumento de las cocentraciones hacia el oeste, siendo este más notorio a partir del kilómetro 45 aproximadamente. Al igual que en las figuras anteriores, los valores máximos (68 mg/L y 76 mg/L) para cada año se encuentran en la zona oeste del perfil.

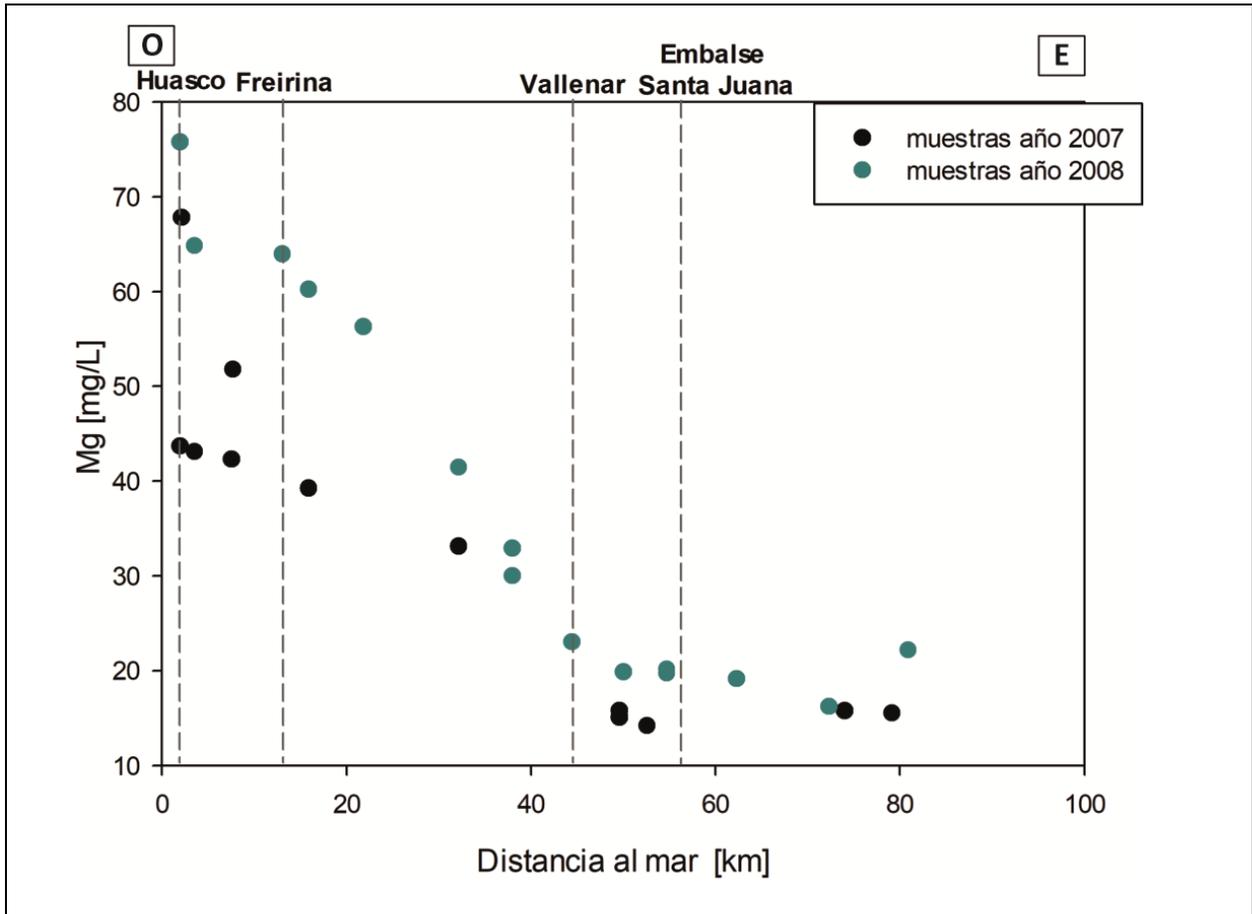


Figura 5.3. Perfil O-E concentraciones Mg en aguas superficiales.

En la figura 5.4 se grafica el perfil O-E para el K, el cual muestra una clara tendencia a aumentar hacia el O, pero a diferencia del Ca, Na y Mg, el cambio que ocurre al kilómetro 45 es más suave, haciéndose más abrupto en las muestras más cercanas al océano. Los valores máximos medidos para ambos años (14 mg/L y 11 mg/L) se encuentran en la zona de la desembocadura. El valor máximo medido en 2007 representa un valor anómalo, y se indica en la figura con una simbología de mayor tamaño.

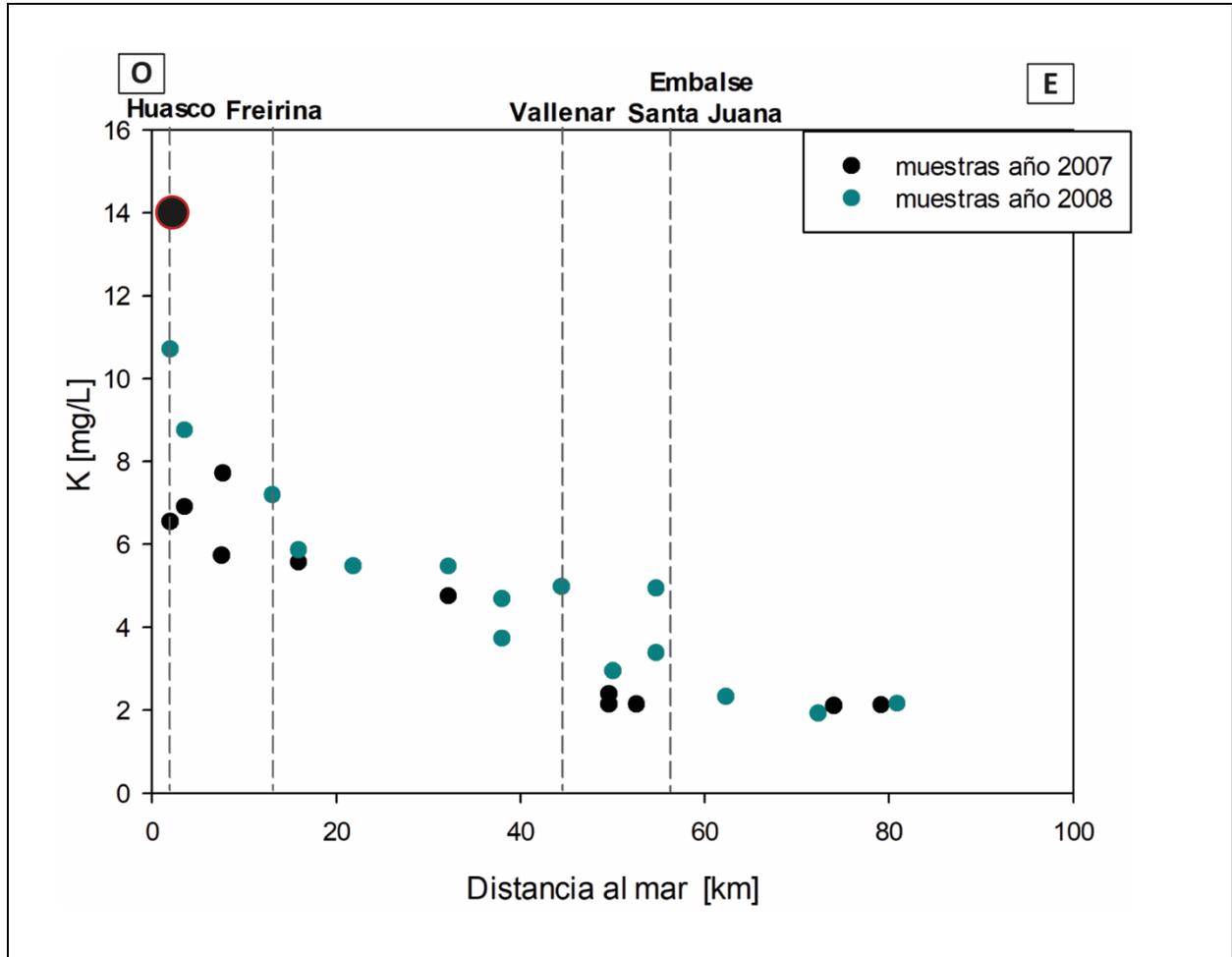


Figura 5.4. Perfil O-E concentraciones de K en aguas superficiales. La muestra indicada en mayor tamaño y circuncrita en rojo corresponde a un valor anómalo según lo reportado en la tabla 5.1.

La figura 5.5 muestra el perfil O-E para las concentraciones de Cl, se observa un patrón similar al de los gráficos anteriores. Destaca un valor claramente anómalo (1458 mg/L) justamente en las cercanías del mar. Al igual que en las figuras anteriores los valores máximos medidos en ambos años se ubican en la zona oeste del perfil.

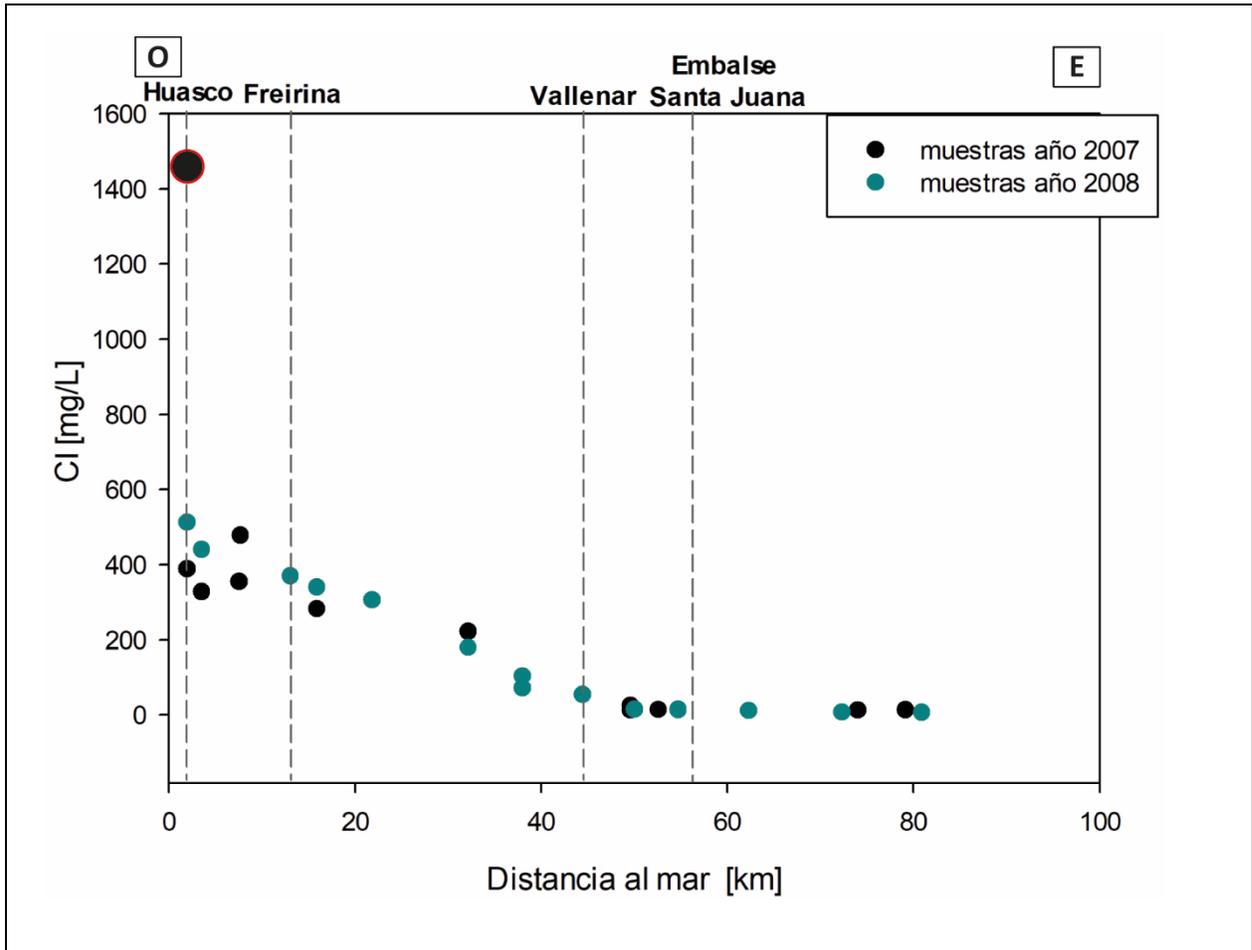


Figura 5.5. Perfil O-E de concentraciones Cl en aguas superficiales. La muestra indicada en mayor tamaño y circuncrita en rojo corresponde a un valor anómalo según lo reportado en la tabla 5.1.

La figura 5.6 grafica el perfil O-E de concentraciones de Si. Las concentraciones tienden a disminuir desde la precordillera hacia el embalse, donde comienzan a aumentar hacia el oeste. Para el año 2008 estas aumentan hasta Freirina, mientras que para el 2007 disminuyen hacia Vallenar, hasta el km 35 aproximadamente, donde comienzan a aumentar en dirección a Freirina, donde se alcanza la concentración más alta (10 mg/L en 2007 y 12 mg/L en 2008) medida en ambos años. Ya hacia la zona de la desembocadura, las concentraciones comienzan a descender.

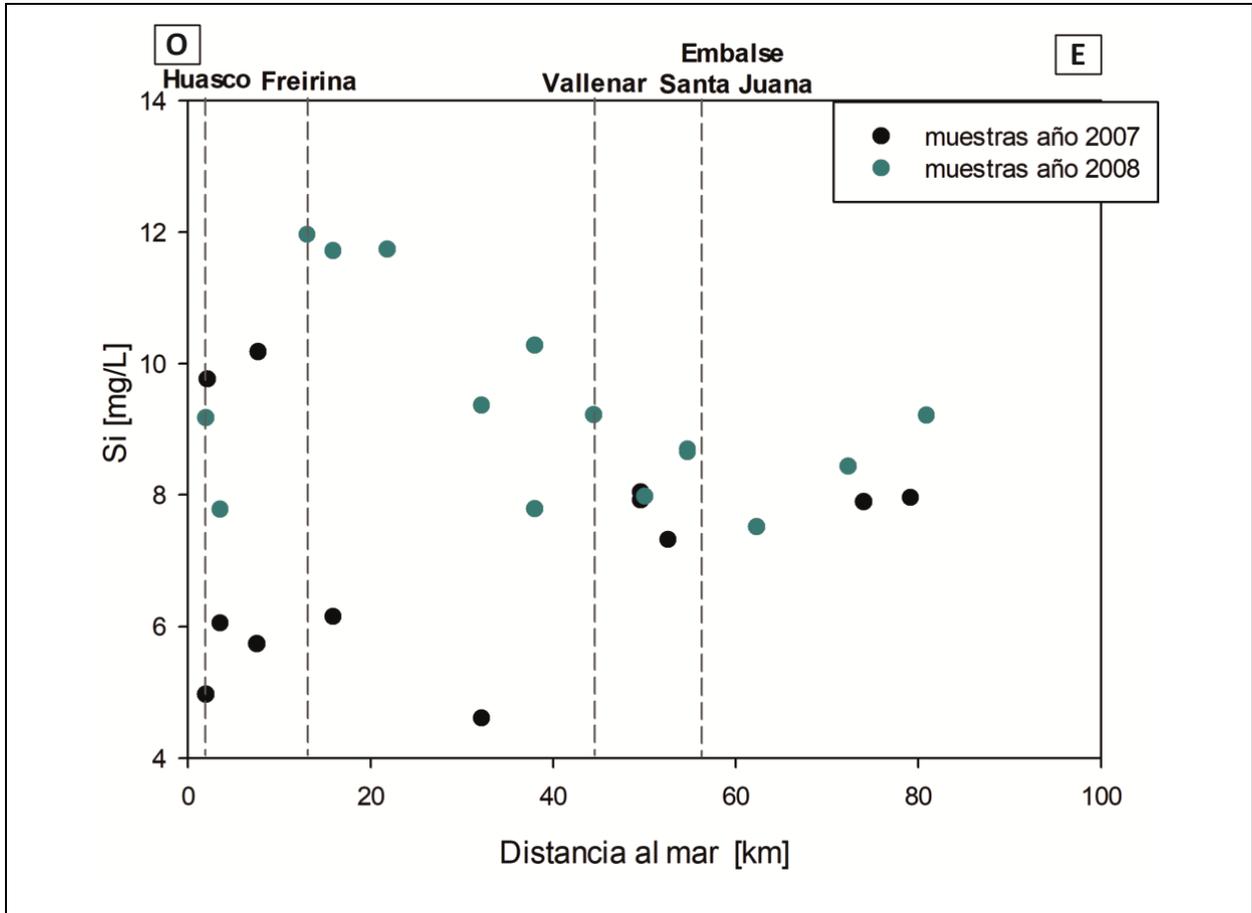


Figura 5.6. Perfil O-E concentraciones de Si en aguas superficiales.

La figura 5.7. Grafica las concentraciones de NO_3 en un perfil de orientación O-E. Se observan concentraciones relativamente constantes, en la zona comprendida entre los 0 y 25 km las concentraciones son las más bajas, mientras que entre los 35 y 46 km se encuentran los valores máximos de ambos años (8 mg/L en 2007 y 18 mg/L en 2008). Hacia el este, al interior el valle, las concentraciones disminuyen, y se mantienen en un rango entre 1 a 6 mg/L.

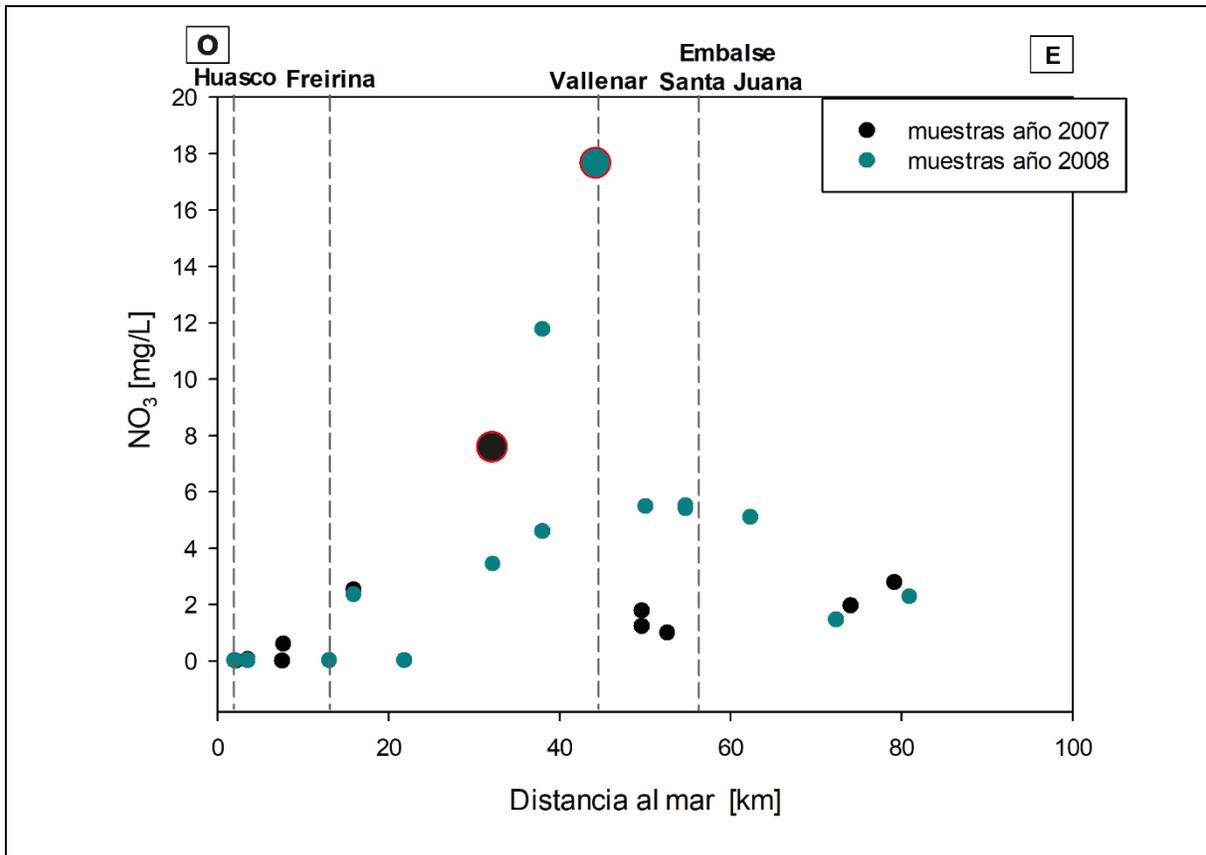


Figura 5.7. Perfil O-E concentraciones de NO_3 . Las muestras indicadas en mayor tamaño y circunscritas en rojo corresponde a un valor anómalo según lo reportado en la tabla 5.1.

Las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 (concentraciones de Ca, Na, Mg, K y Cl respectivamente) muestran una clara tendencia a aumentar hacia la zona oeste, donde desemboca el río. En los perfiles de todos ellos a partir de la latitud de Vallenar (km 45 en los perfiles), se observa un cambio de pendiente, pasando de una pendiente baja a alta, lo que implica un aumento sostenido en las concentraciones hacia el oeste.

5.1.1.2. Sedimentos activos:

En la tabla 5.2 se resumen los estadígrafos básicos para cada elemento mayor medido en las muestras de sedimentos de los años 2007 y 2008.

Tabla 5.2. Estadígrafos básicos para elementos mayores en muestras de sedimentos. En naranja se resaltan las medianas más altas. Concentraciones en ppm.

Elementos Mayores - Muestras de Sedimentos Activos														
Elemento	MIN		Q1		MEDIANA		Q3		BS		LS		MAX	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Ca	2215	32420	25836	43557	36391	118016	86938	192638	182875	324380	-	-	182875	324380
Ti	333	150	1773	296	2187	796	3871	902	4584	990	-	-	4584	990
Mn	311	377	461	458	539	503	777	716	1047	882	-	-	1047	882
Fe	3476	4650	18443	10127	21052	25526	27744	28710	36691	33190	-	-	36691	33190

Al analizar la tabla, se observa que todos los valores máximos no exceden el valor del BS ($BS = 1,5 \cdot (Q3 - Q1)$), lo que puede asumirse como la inexistencia de anomalías.

Al comparar las medianas se puede notar que en 2007 son mayores las del Ti y Mn, mientras que en 2008 son mayores las del Ca y Fe. Las variaciones más significativas se observan en la mediana del Ti, que disminuyó en un 63% entre 2007 y 2008, y la mediana del Ca que aumentó en un 224% en 2008 respecto a 2007.

A continuación, se presentan los perfiles O-E elaborados para los elementos mayores de los sedimentos activos.

En la figura 5.8 se grafica el perfil O-E para el Ca. Lo primero que se puede ver al observar la figura, es un valor alto ubicado justo en la zona del embalse. Otros valores elevados se pueden observar al oeste del mismo, sin embargo, como se ve en los valores de los estadígrafos, estos no son aómalos.

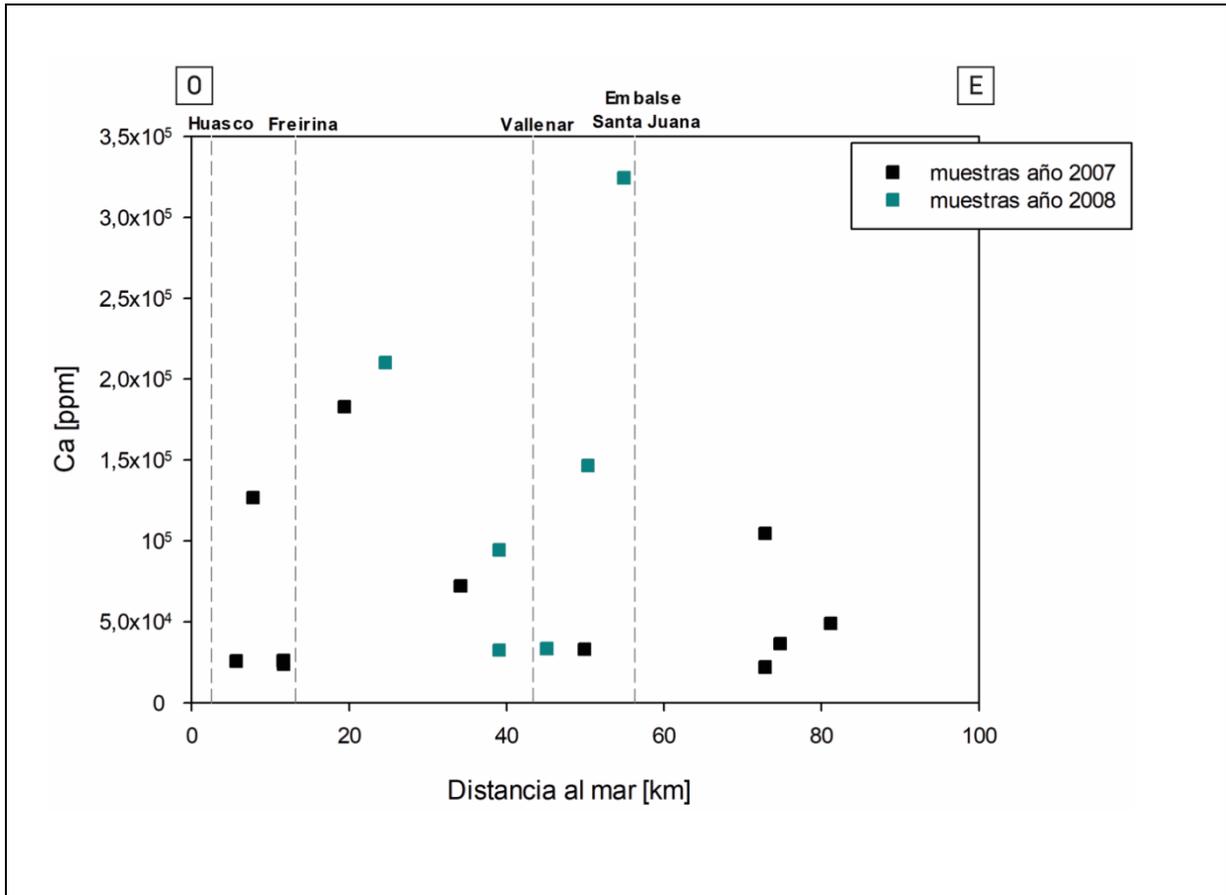


Figura 5.8. Perfil O-E concentraciones de Ca en sedimentos activos.

La figura 5.9. muestra el perfil O-E de concentraciones de Ti en sedimentos activos. Dado que las muestras tomadas en 2008 abarcan una menor extensión que las de 2007 y que pareciera, en un principio no asimilarse la tendencia entre un año y otro, es necesario observar las pendientes y puntos en los que cambian de signo, lo que también se aprecia como un quiebre. En 2007, desde este a oeste, la pendiente es positiva hasta los 72 km, punto en el que cambia de signo y se mantiene negativa hasta los 50 km, donde ocurre nuevamente un quiebre y la pendiente se hace positiva hasta los 20 km, donde se alcanza el valor mínimo (333 ppm), y la pendiente se vuelve negativa. En 2008, se observa entre los 55 y 50 km que la pendiente es negativa, al igual que la pendiente en ese mismo tramo el año anterior, y a partir de los 50 km hacia el oeste, la pendiente pasa a ser positiva.

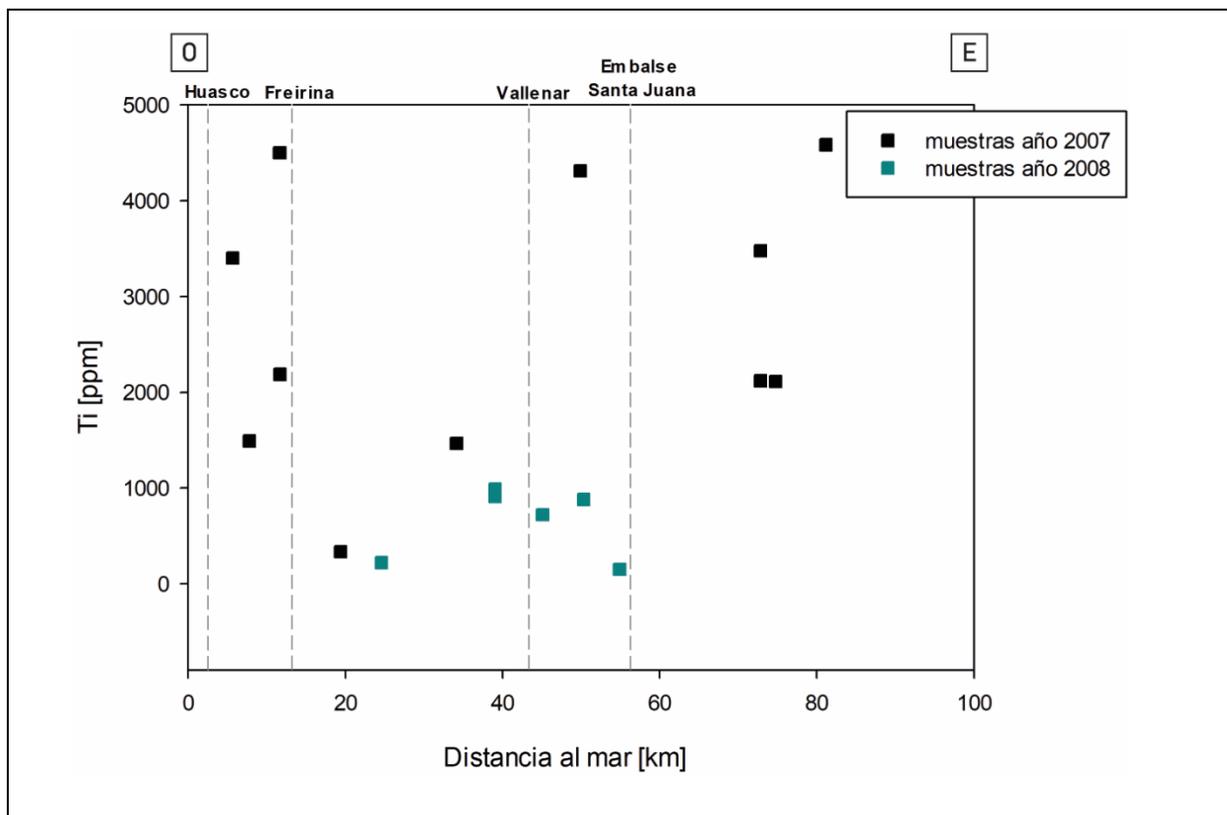


Figura 5.9. Perfil O-E concentraciones de Ti en sedimentos activos.

En la figura 5.10. se observa el perfil O-E con las concentraciones de Mn en muestras de sedimentos activos. En la figura no se observa claramente si las concentraciones de 2007 son superiores a las de 2008. Las concentraciones 2008 disminuyen desde el embalse hacia el oeste. Los valores 2007, también parecieran ir disminuyendo de este a oeste, con un alza (valor máximo = 1046 ppm) en Freirina.

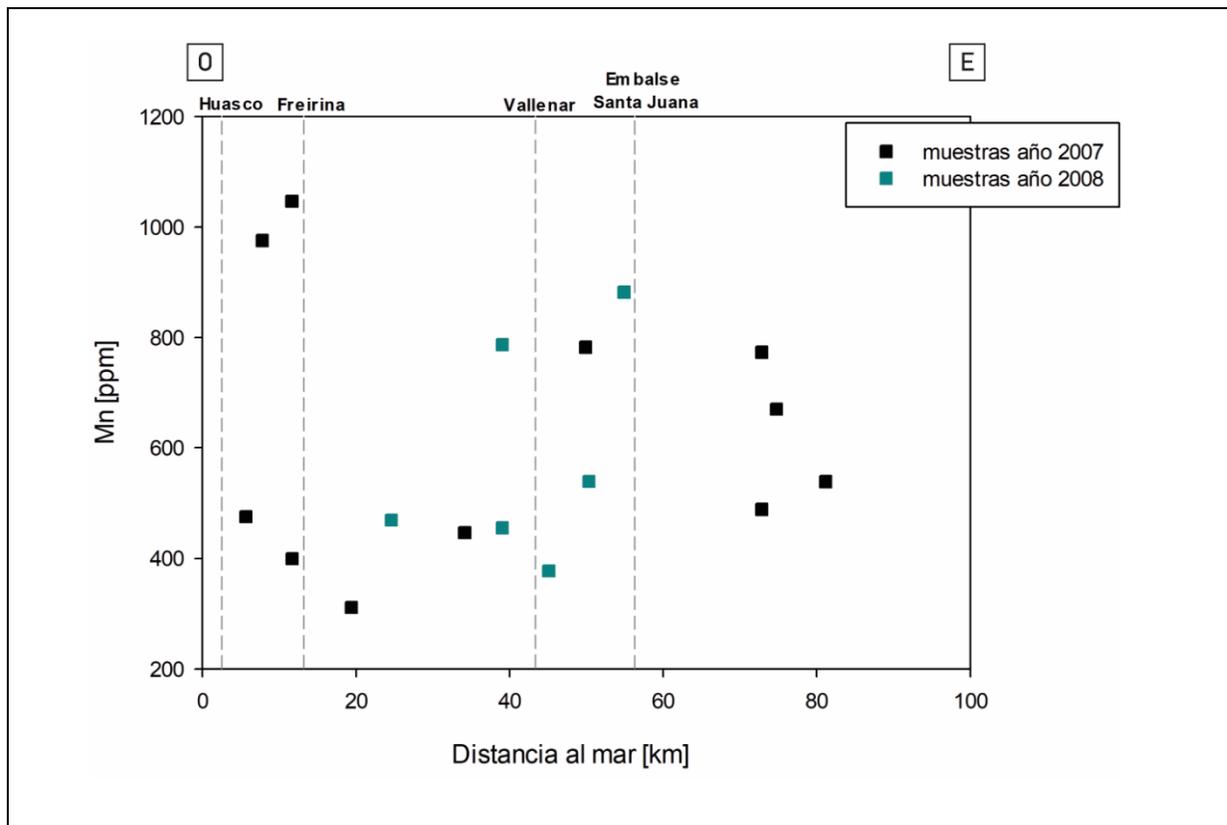


Figura 5.10. Perfil O-E de concentraciones de Mn en sedimentos activos.

La figura 5.11. grafica las concentraciones de oeste a este de Fe en los sedimentos activos del río. Se observa una tendencia similar a la descrita para el titanio: en el año 2007 se observa que los cambios de pendiente ocurren a los 72, 50 (donde ocurre el valor máximo = 36691 ppm) y 20 km, mientras que, en 2008, a diferencia del Ti, el cambio de pendiente ocurre a los 40 km, con un valor máximo de 33190 ppm.

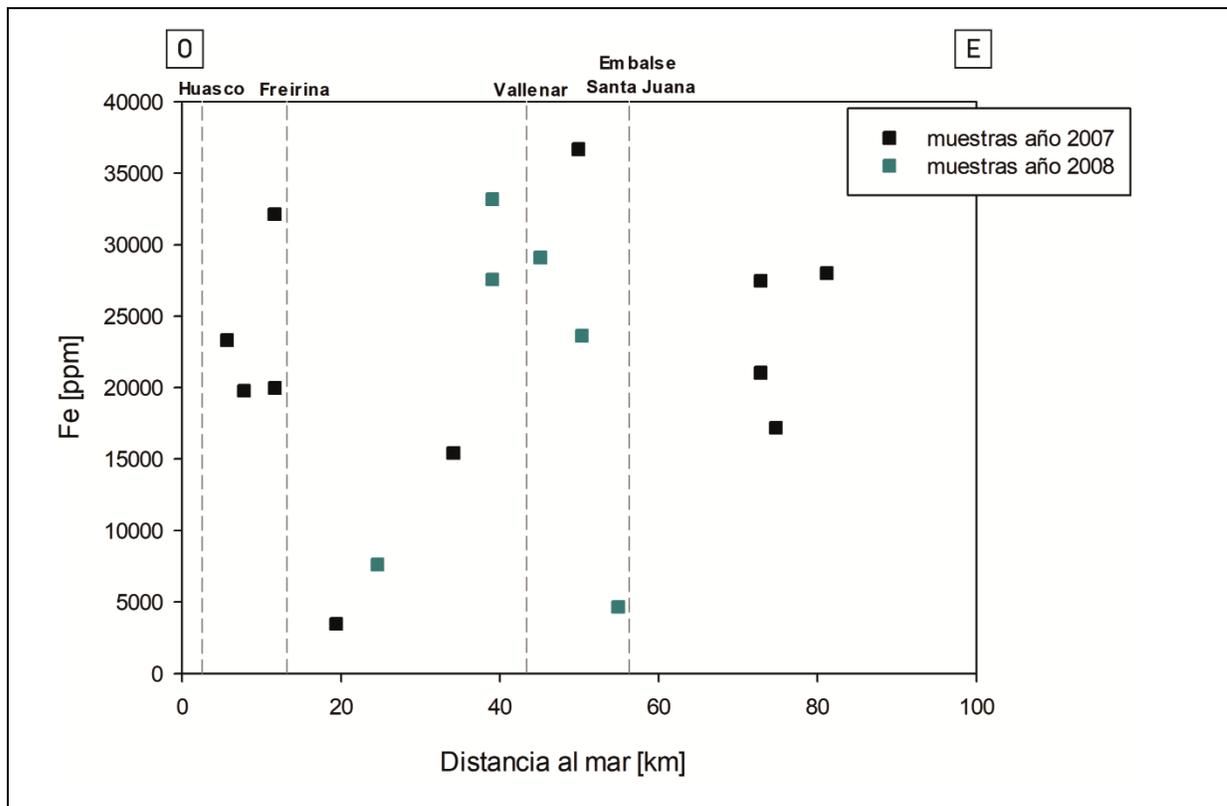


Figura 5.11. Perfil O-E concentraciones de Fe en sedimentos activos. Elaborado en R.

valor. Por otro lado, la muestra 6-190108 del año 2008 (km 25 aprox.), presenta los valores mínimos para el Fe y Ti, y máximos para el Ca y Mn.

5.1.2. Elementos traza

5.1.2.1. Aguas superficiales

La tabla 5.3 presenta los estadígrafos básicos calculados para los elementos trazas medidos en aguas superficiales.

Tabla 5.3. Estadígrafos descriptivos de elementos trazas en muestras de agua. Concentraciones en $\mu\text{g/L}$. En naranja se resalta la mediana más alta para cada elemento.

Elementos Trazas- Muestras de Agua ($\mu\text{g/L}$)														
Elemento	MIN		Q1		MEDIANA		Q3		BS		LS		MAX	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Li	46	38	50	60	88	104	113	158	142	237	-	-	142	237
B	229	163	233	252	697	742	1022	1006	1118	1855	-	-	1118	1855
Al	1	0,5	1	4	3	12	5	20	-	-	10	44	13	121
Sc	0,8	0,5	1	2	1,3	2	1,4	3	1,7	3	-	-	1,7	3
V	0,01	0,8	0,7	1,5	0,9	3	1,8	4	3	5	-	-	3	5
Mn	0,03	3	8	7	14	22	20	25	-	-	38	52	129	101
Fe	2	5	6	5	9	5	15	30	-	-	29	68	143	72
Co	0,01	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,07	0,025	0,09	-	-	0,05	0,09	0,47
Ni	1,5	0,1	1,8	0,1	2,7	0,1	3	0,1	3,8	-	-	0,1	3,8	3,6
Cu	0,1	1,3	0,6	1,7	0,7	2	0,9	2,2	1	-	-	3	1	3,8
Zn	1,1	14	2,1	37	2,5	54	2,9	128	-	-	4	265	4,2	429
As	0,3	2,6	2	4,1	3	5,2	4,5	6,8	-	8,5	-	-	4,9	8,5
Se	0,8	0,25	1,3	0,8	3,1	1,1	4	2,9	-	3,2	8	-	11,9	3,2
Rb	1,4	1,5	1,9	2,5	2,3	3	2,7	3,5	-	-	4	5	6	5,6
Sr	388	302	478	412	970	599	1176	1000	-	1559	2224	-	2956	1559
Mo	0,6	2,8	3,9	4,1	4	4,8	4,5	5,4	5,1	7,2	-	-	5,1	7,2
Sb	0,02	0,09	0,08	0,12	0,09	0,15	0,1	0,18	0,12	0,25	-	-	0,12	0,25
Ba	23	18	25	25,86	29	28	33	37	36	-	-	55	36	259
Pb	0,009	0,05	0,014	0,05	0,025	0,05	0,03	0,08	0,05	0,9	-	-	0,05	0,9
U	4	2,5	5	4,6	6	5,5	8	6,3	9	7,7	-	-	9	7,7
F	50	450	476	494	511	520	576	549	700	-	-	630	700	650

De la tabla 5.3 se desprende que aquellos elementos que presentan anomalías en 2007 son Se y Sr, mientras que en 2008 son el Co, Ni, Cu, Ba y F. Los parámetros que presentan anomalías en ambos períodos son Al, Mn, Fe, Zn y Rb. En 2007 el elemento más abundante, es decir aquel con una mediana más elevada es el Sr, mientras el menos abundante es el Pb.

Para 2008 se tiene que la variable B presenta la mediana más elevada, mientras la variable Co presenta la mediana más baja. Respecto a esta última afirmación, cabe mencionar que si bien en la tabla se presenta como el valor más bajo, esto se debe a que el Co presenta el límite de detección (DL) más bajo sumado a que varias muestras se encuentran bajo el DL. Lo anterior se evidencia en que la mediana coincide con el cuartil 1 (Q1) y el mínimo (MIN), y estos valores son el DL partido en dos, según lo descrito en la sección 4.1.3. Algo similar ocurre con el Pb y Ni, por lo que en realidad debe considerarse a todos estos elementos como los que se encuentran en menor abundancia.

Los elementos U, F, Ba y B presentan variaciones inferiores al 10% en sus medianas entre 2007 y 2008. La mediana de 12 elementos (Li, Al, Sc, V, Mn, Cu, Zn, As, Rb, Mo, Sb y Pb) es superior en 2008, mientras que los 5 restantes (Fe, Co, Ni, Se y Sr) presentan un valor mayor en 2007. Las variaciones más significativas entre las medianas de un año a otro se observan en el Al (aumento en 3,72 veces respecto a 2007), V (aumento en 2,36 en comparación al 2007), Cu (aumento en 1,79 veces), Zn (aumento 21 veces respecto al año anterior) y el Co (disminución en 0,8 veces en cuanto a la mediana 2007).

A continuación, se presentan los perfiles O-E para los elementos trazas medidos en aguas superficiales. En ellos se pueden apreciar ciertas tendencias, por lo que en esta sección se presentan ordenados según dos grupos; el primero contiene a los elementos que presentan una tendencia similar en 2007-2008 (Li, B, Al, Sc, Mn, Co, Ni, Zn, As, Se, Sr, Mo, Ba, Pb y U) y el segundo, que contiene a los elementos cuyas tendencias 2007-2008 difieren (Fe, Cu, Rb, Sb, y F).

Dentro del grupo de elementos con patrones similares en 2007-2008, se distingue un subgrupo numeroso de elementos que siguen un patrón similar al descrito para los iones mayores, es decir que aumentan sus concentraciones hacia el oeste. Este subgrupo se compone de Li, B, Sc, V, Mn, Co, Ni, Zn, As, Se, Sr, Ba y U, cada cual con sus particularidades las que son descritas en cada perfil.

La figura 5.12 presenta el perfil O-E para el Li, en el cual se observa que la tendencia de aumentar hacia el oeste es más marcada en 2008, y se diferencia de la de 2007 en que algunas muestras cercanas a la desembocadura tienden a disminuir las concentraciones. El valor máximo para ambos años se ubica en la zona cercana a Huasco (142 $\mu\text{g/L}$ en 2007 y 237 $\mu\text{g/L}$ en 2008). Si bien la tendencia descrita anteriormente se puede observar en todo el perfil, esta se hace más evidente aguas abajo del Embalse Santa Juana.

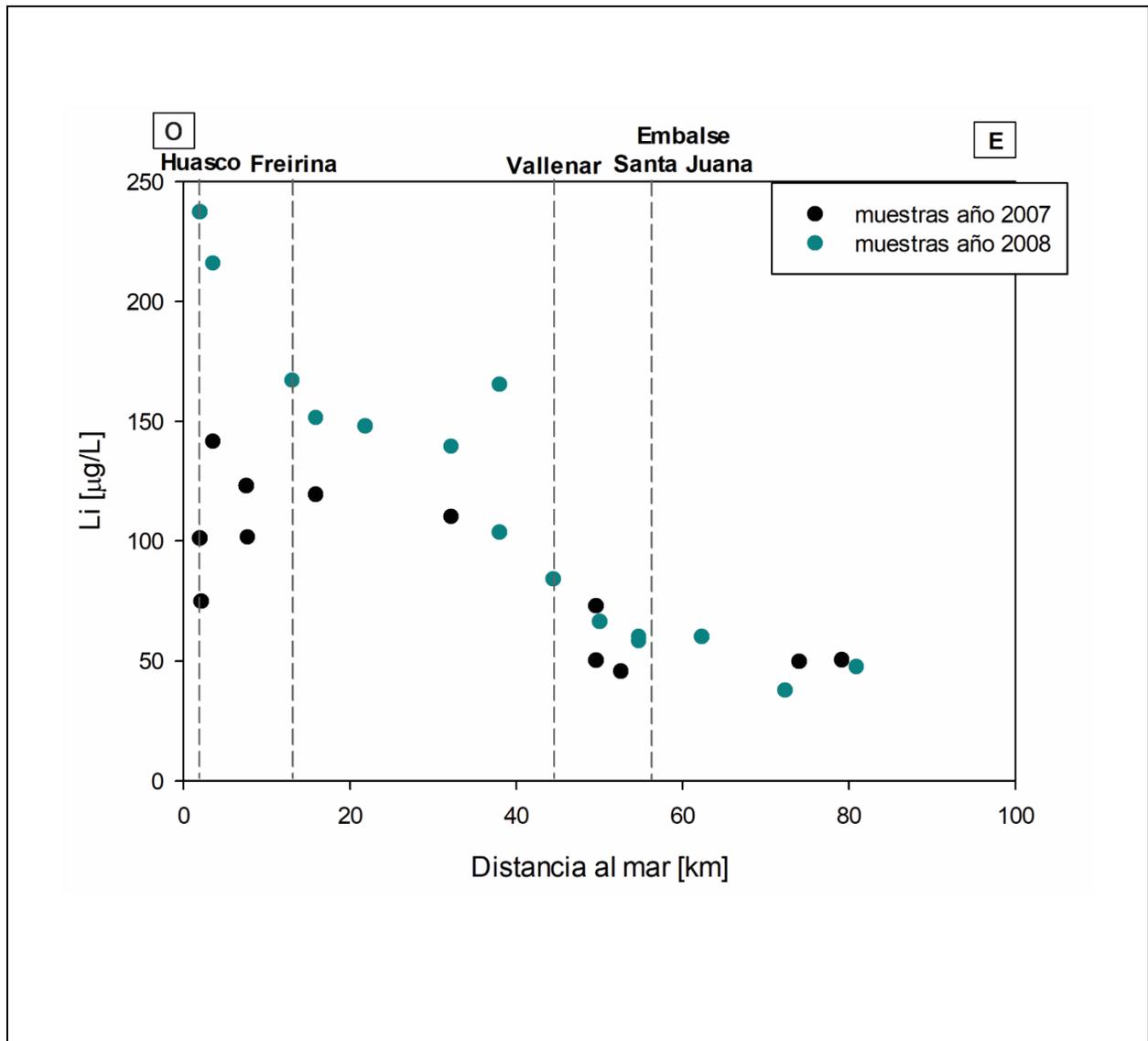


Figura 5.12. Perfil O-E concentraciones de Li en aguas superficiales.

El perfil O-E del B (figura 5.13) muestra como aumentan las concentraciones de este elemento de este a oeste, siendo este un aumento más gradual: entre los 80 y 50 km las concentraciones se encuentran en un mismo rango (entre 160 y 270 $\mu\text{g/L}$), a partir del km 50 aumentan hacia el oeste hasta el km 38 aprox., donde las concentraciones nuevamente se mantienen en un rango (920 - 1.1150 $\mu\text{g/L}$) hasta el km 5 aprox. punto en el cual las concentraciones 2007 disminuyen, y las 2008 aumentan.

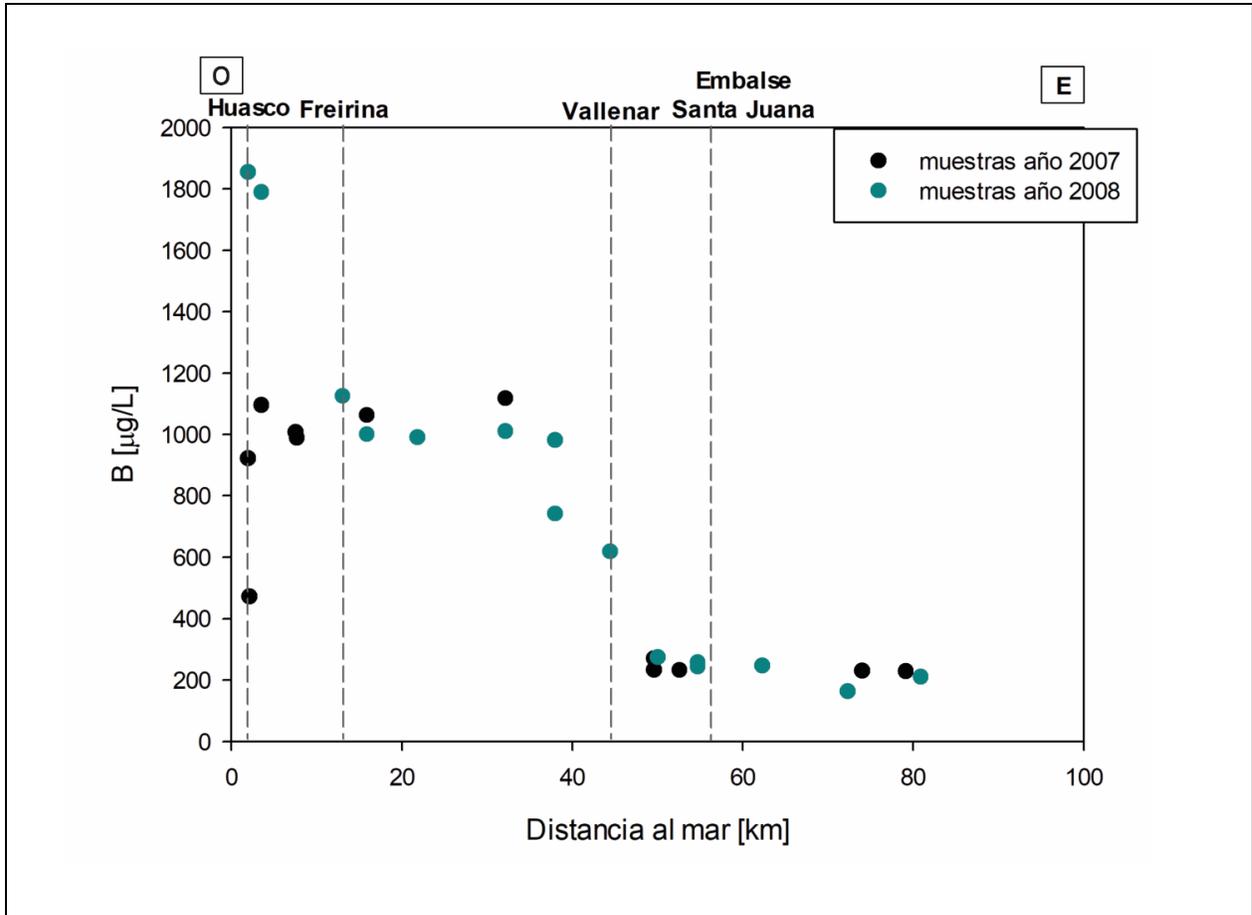


Figura 5.13. Perfil O-E Concentraciones de B en aguas superficiales.

El perfil O-E de concentraciones de Sc en aguas superficiales (figura 5.14) muestra de manera mucho más marcada lo observado en el perfil del B (fig. 5.13): en 2008 los valores entre los 80 y 38 km se mantienen en un valor de 2 $\mu\text{g/L}$, entre los 45 y 16 km aprox. los valores permanecen constantes en 3 $\mu\text{g/L}$, y ya en la zona cercana a Huasco, los valores disminuyen a 0,5 $\mu\text{g/L}$. Si bien esto no es tan notorio en 2007, si se puede ver que las concentraciones varían entre 0,8 $\mu\text{g/L}$ (MIN) y 1,7 $\mu\text{g/L}$ (MAX), con una disminución de los valores desde el este hacia el oeste, hasta el km 35 donde se alcanza el mínimo, ocurre un cambio de signo en la pendiente y los valores aumentan hacia el oeste aguas abajo de este punto.

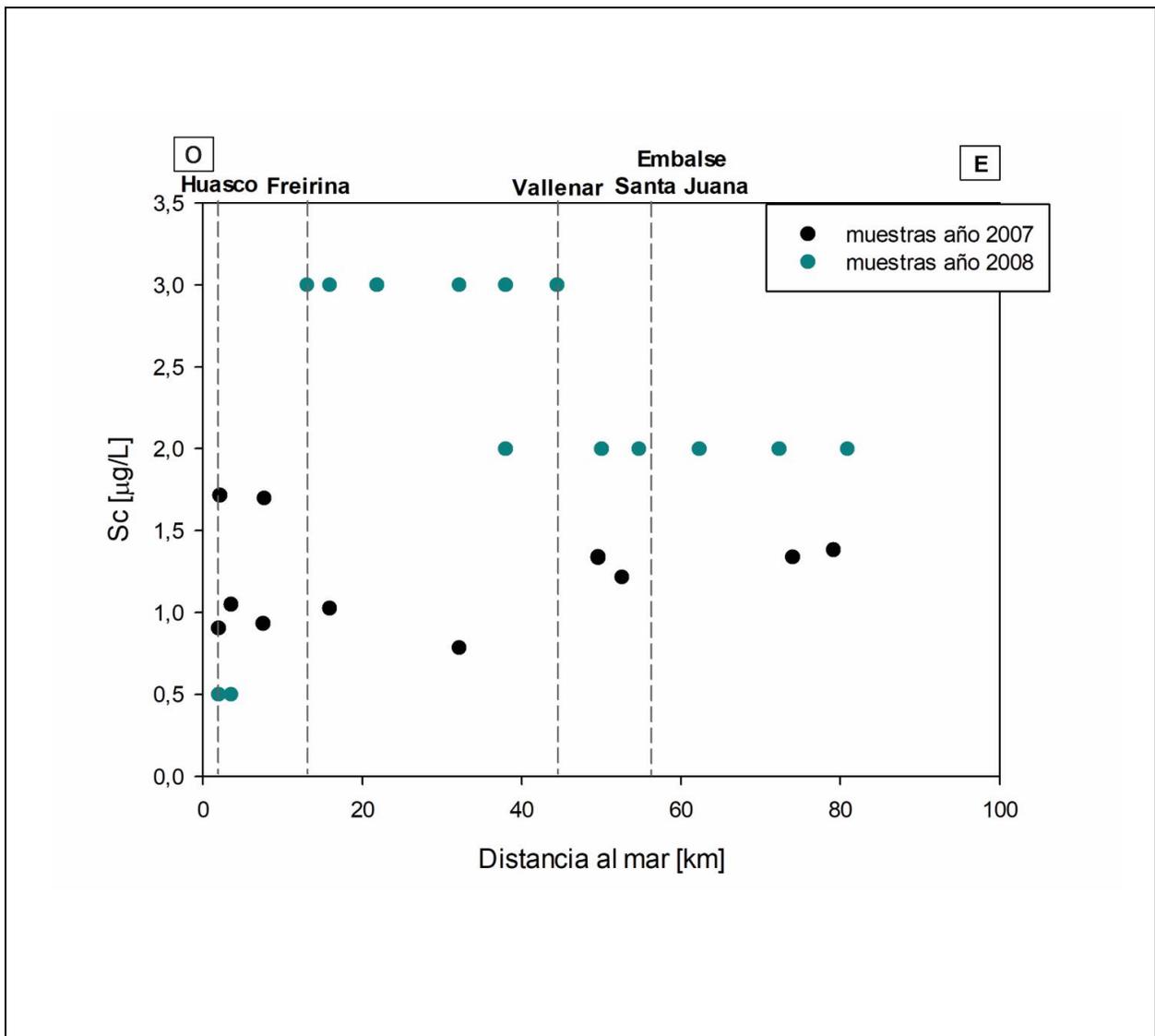


Figura 5.14. Perfil O-E concentraciones de Sc en aguas superficiales.

Las concentraciones de V en las aguas superficiales (figura 5.15) muestran tendencias similares entre 2007 y 2008: en la parte alta del valle las concentraciones son bajas y fluctúan entre los 0,8 y 01 $\mu\text{g/L}$, aumentan aguas abajo hacia el oeste, hasta Freirina, donde en ambos años se alcanza la concentración máxima (5 $\mu\text{g/L}$ en 2008 y 3 $\mu\text{g/L}$ en 2007). Desde Freirina hacia el oeste las concentraciones disminuyen, de forma más marcada en 2007 y de manera más sutil en 2008.

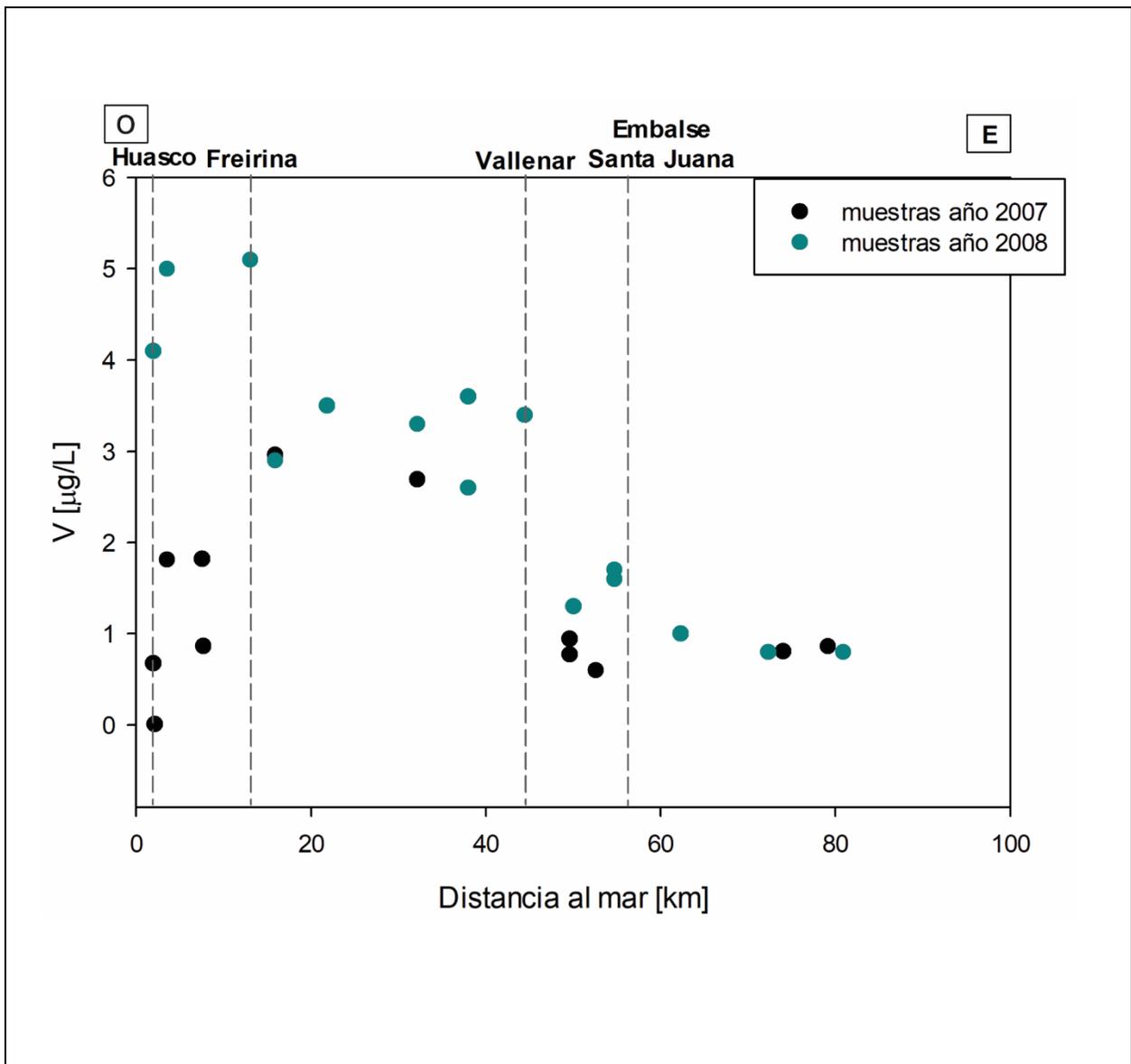


Figura 5.15. Perfil O-E concentraciones de V en aguas superficiales.

En el perfil O-E de concentraciones de Mn (figura 5.16) se observa que las concentraciones de Mn disminuyen desde el este aguas abajo en dirección oeste, hasta el área comprendida entre el embalse Santa Juana y Vallenar, donde ocurre un cambio en el signo de la pendiente y los valores comienzan a aumentar hacia el oeste; en el caso de las concentraciones de 2008, estas aumentan hasta alcanzar valores anómalos (64 $\mu\text{g/L}$ y 101 $\mu\text{g/L}$) en la costa, mientras que en 2007 aumentan hasta el valor máximo (129 $\mu\text{g/L}$) ubicado en el km 17 del perfil, y disminuyen hacia la zona más cercana al océano.

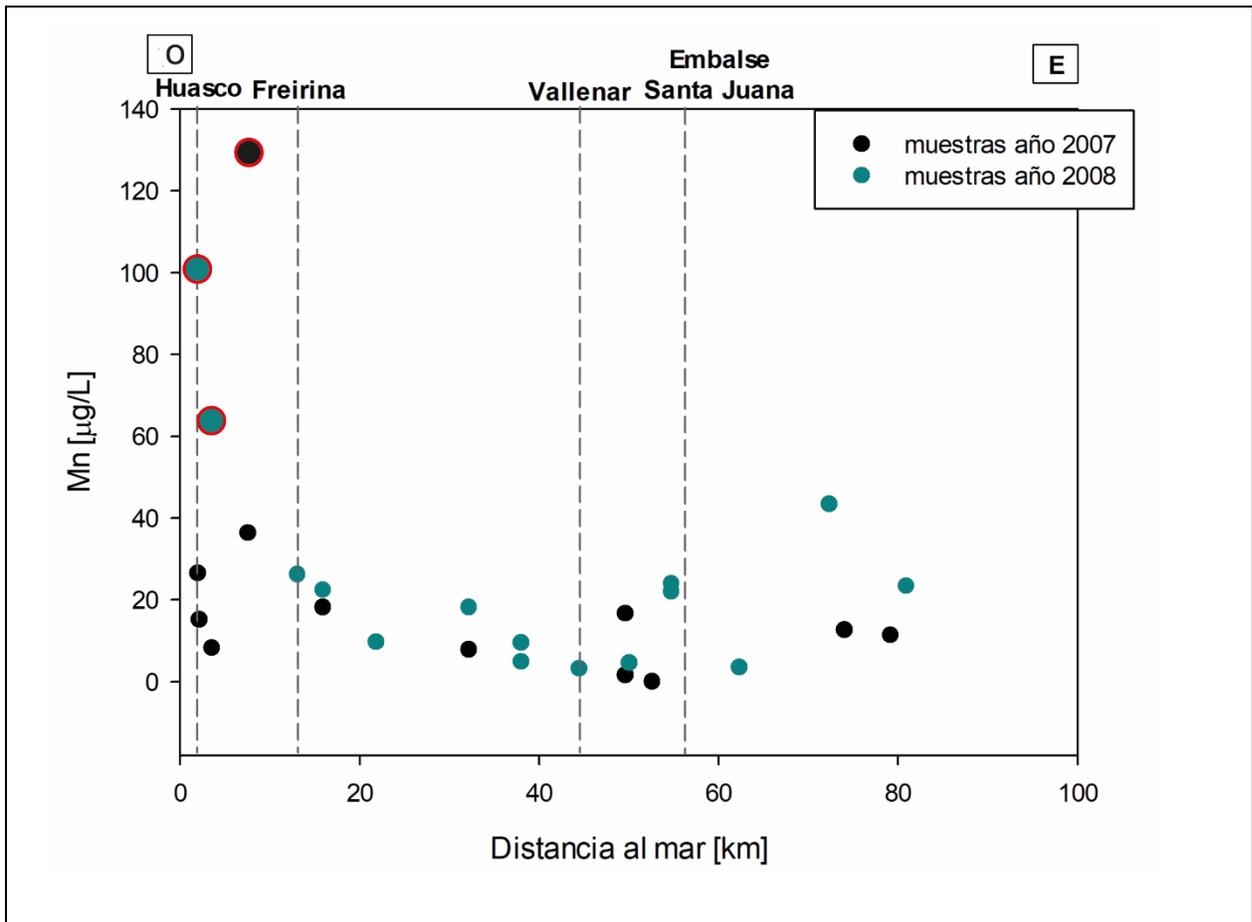


Figura 5.16. Perfil O-E concentraciones de Mn en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

En la figura 5.17 se puede ver el perfil O-E de concentraciones de Co en aguas superficiales. Si bien esta figura pareciera no encajar en aquellas con un patrón similar en ambos años se debe considerar que la tendencia de 2008 pareciera ser lineal por efecto de las muchas muestras que no superan el límite de detección y por ende se les asignó un valor arbitrario (igual al DL dividido en 2, en este caso $0,01 \mu\text{g/L}$), sin embargo, aquellas muestras que sí se encuentran por sobre el DL muestran una tendencia de este a oeste que aumenta hasta el embalse Santa Juana, y luego aumenta hacia la desembocadura, donde alcanza el valor máximo para ese año. En 2008 se observan 2 valores anómalos; uno de ellos ($0,15 \mu\text{g/L}$) a los 72 km, y el otro, que coincide con el máximo ($0,47 \mu\text{g/L}$) en la desembocadura. Por otro lado, las concentraciones 2007, muestran un patrón similar al que se ha descrito en los elementos anteriores para este año, con aumentos de las concentraciones de este a oeste, y con un decaimiento llegando a la costa.

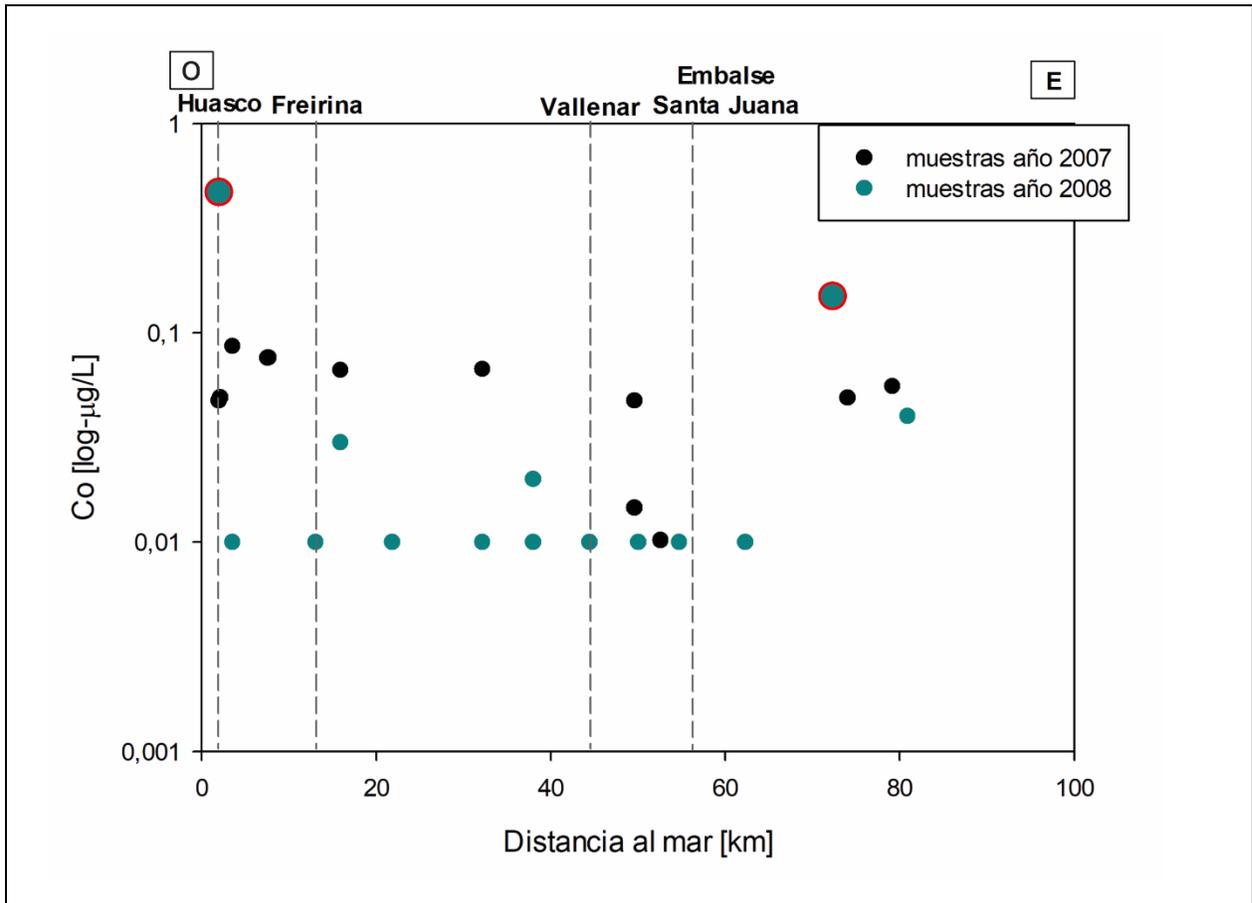


Figura 5.17. Perfil O-E concentraciones de Co en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

La figura 5.18 muestra el perfil O-E de concentraciones de Ni en aguas superficiales. En el se observa el mismo fenómeno descrito en el perfil del Co: para 2008 una gran cantidad de muestras que no superan el DL y por lo tanto se les asignó un valor arbitrario de 0,1 $\mu\text{g/L}$. Las concentraciones que superan el DL para el Ni en 2008 se ubican entre los 15 y 22 km, con una anomalía que corresponde al valor máximo (3,6 $\mu\text{g/L}$). Las concentraciones medidas en 2007 presentan valores cercanos a los 2 $\mu\text{g/L}$ en la parte alta del valle, que van en aumento aguas abajo hacia el oeste, alcanzando el valor máximo (3,8 $\mu\text{g/L}$) a los 7,5 km.

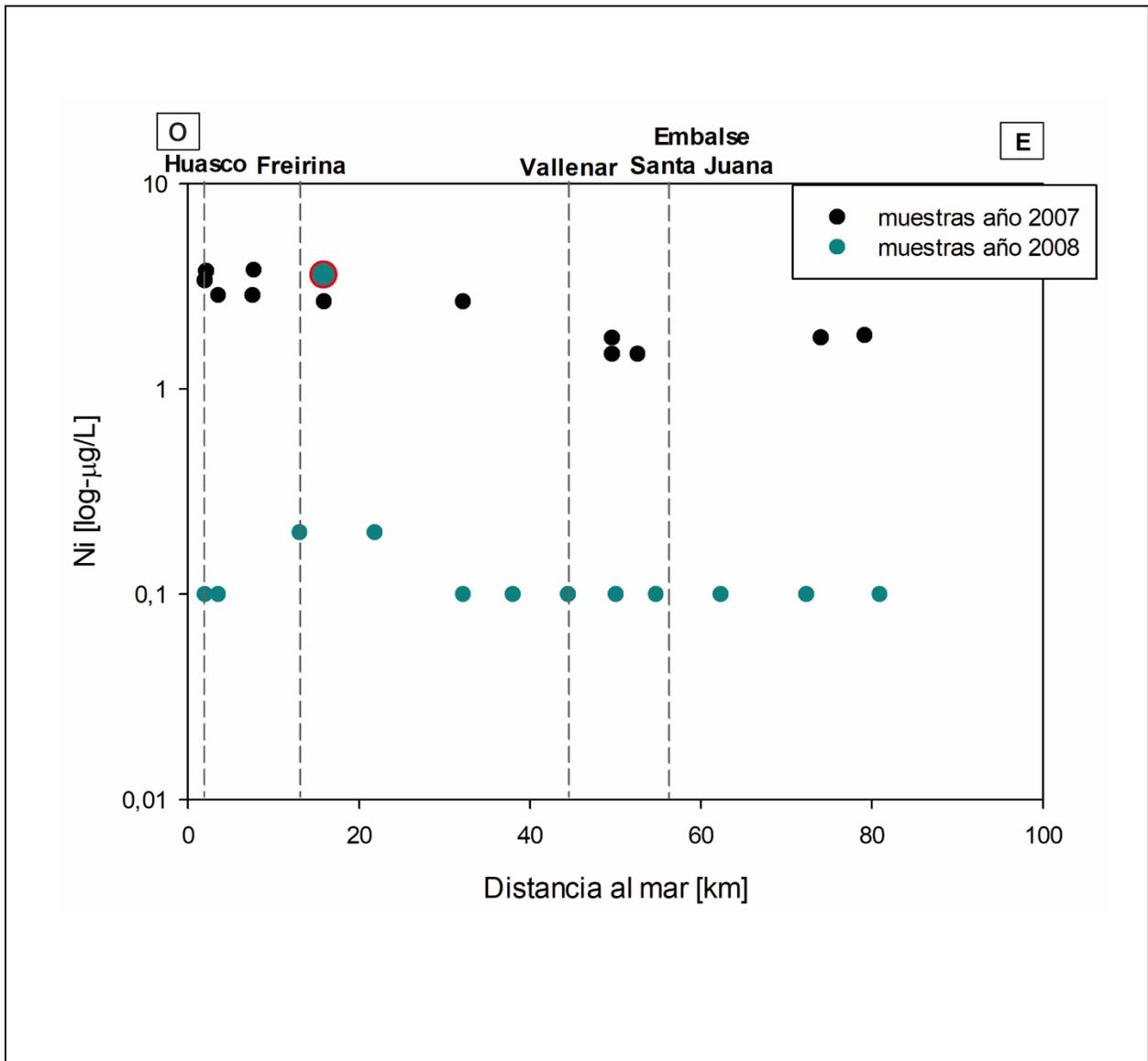


Figura 5.18. Perfil O-E concentraciones de Ni en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

Las concentraciones de As (figura 5.19) en aguas superficiales exhiben una tendencia semejante entre aquellas medidas en 2007 y 2008, y que en términos generales reflejan un aumento de este a oeste llegando a un máximo cercano a la costa, pero con un decaimiento en las muestras más cercanas al oeste. En el año 2007 las concentraciones van aumentando desde el este hasta la latitud de Freirina, donde se midió el valor máximo (5 $\mu\text{g/L}$), y luego decaen a medida que se avanza al oeste, hasta el valor mínimo medido (0,3 $\mu\text{g/L}$). En 2008 el aumento de este a oeste es sostenido, con un par de muestras que salen de esta tendencia, hasta llegar a un máximo (8,5 ppm), que decae en la muestra de más al oeste.

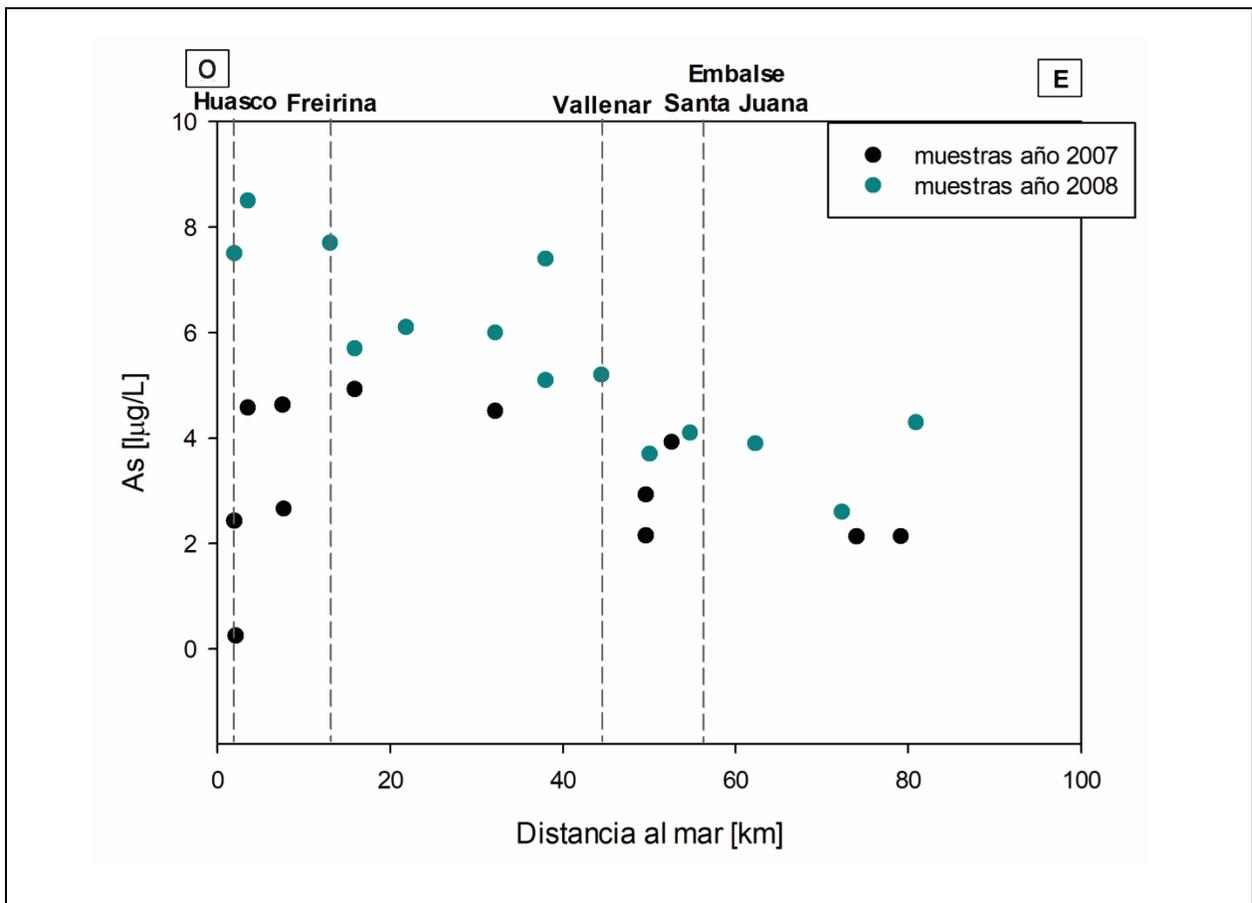


Figura 5.19. Perfil O-E concentraciones de As en aguas superficiales.

Para el perfil O-E de concentraciones de Se en aguas superficiales (fig. 5.20), se tiene que de este a oeste las concentraciones aumentan. En la parte alta del río, aguas arriba de Vallenar, las concentraciones fluctúan entre 0,8 y 1,5 $\mu\text{g/L}$, aguas debajo de Vallenar, las concentraciones aumentan hacia el oeste; en el caso de los datos 2008, entre los 32 y 13 km, los valores se fluctúan alrededor de los 3 $\mu\text{g/L}$ (rango ente 2,9 y 3,2, siendo este último el valor máximo) y luego decaen en la desembocadura. En 2007 para el tramo comprendido entre los 32 y 7 km las cocentraciones varían entre los 3,5 hasta 4,6 $\mu\text{g/L}$, aguas abajo de los 7 km las concentraciones decaen, a excepción de la anomalía (12 $\mu\text{g/L}$) que se observa en el km 2.

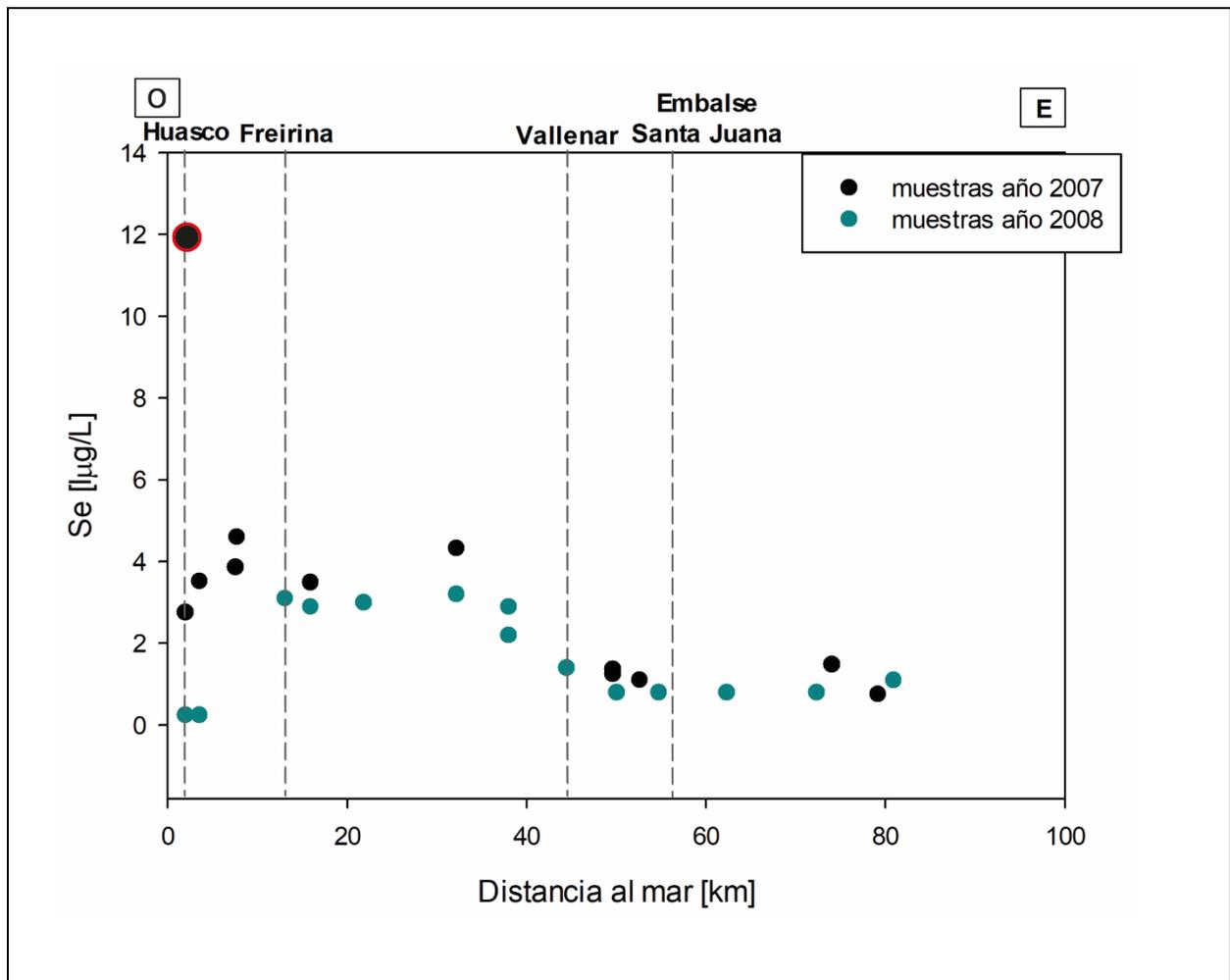


Figura 5.20. Perfil O-E concentraciones de Se para aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

La figura 5.21 representa el perfil O-E de concentraciones de Sr en aguas superficiales. Se observa que la tendencia para ambos años es bastante constante, así como también que las concentraciones no fluctúan de manera importante entre ambos años, y con un aumento de pendiente a la latitud de Vallenar. Los valores máximos ($2956 \mu\text{g/L}$ y $1559 \mu\text{g/L}$) en ambos años son alcanzados a la altura de Huasco, siendo el máximo de 2007, un valor anómalo según los cálculos de estadígrafos descriptivos.

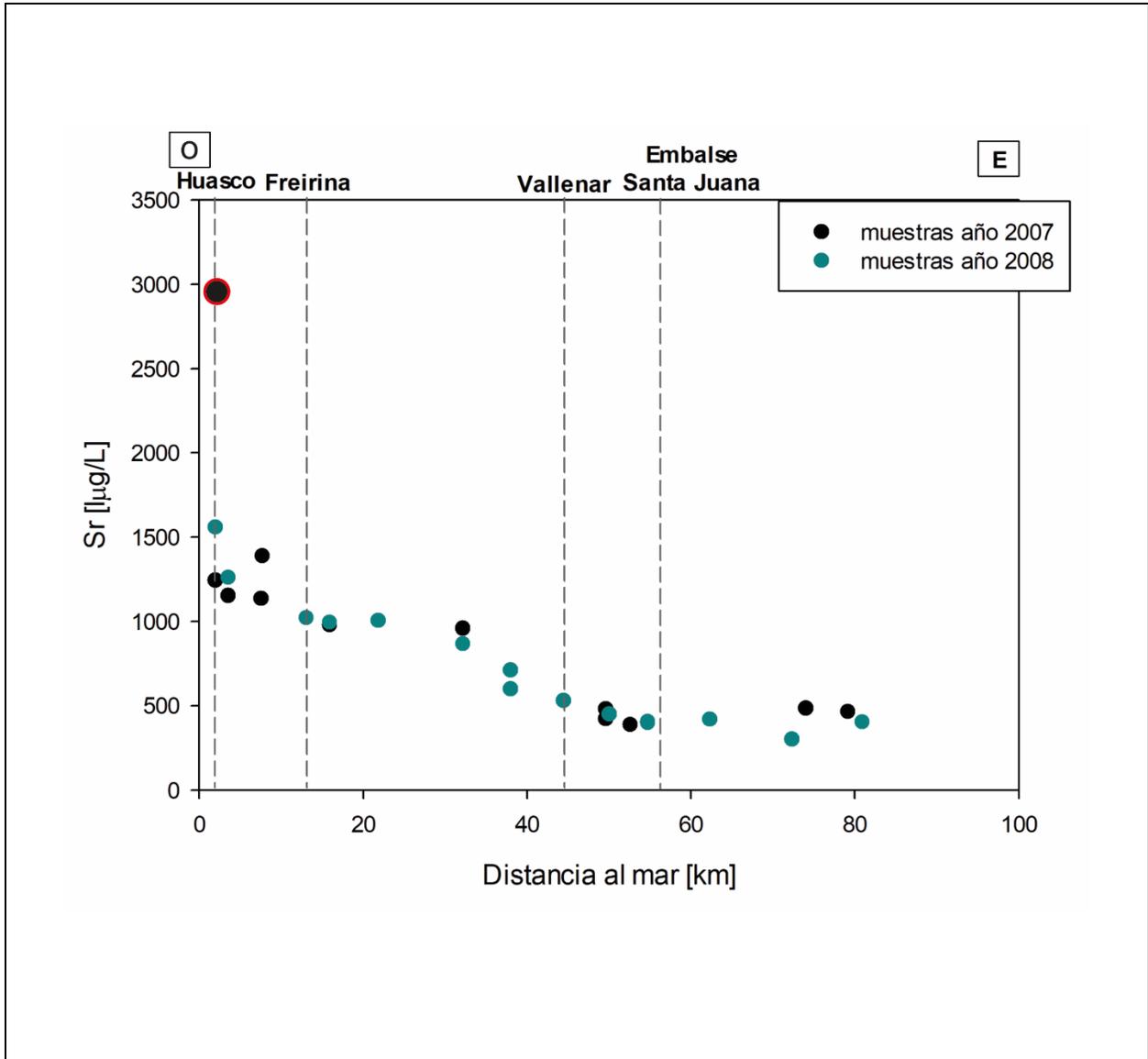


Figura 5.21. Perfil O-E concentraciones de Sr para aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

En el perfil O-E con las concentraciones de Ba en aguas superficiales (fig. 5.22), si se obvía la anomalía ubicada entre el embalse Santa Juana y Vallenar, las concentraciones en el resto del río fluctúan entre los 18 y 42 $\mu\text{g/L}$. Las concentraciones medidas entre un año y otro varían muy poco, esto en el gráfico se puede observar en que algunos puntos color cian se superponen a los puntos negros cercanos.

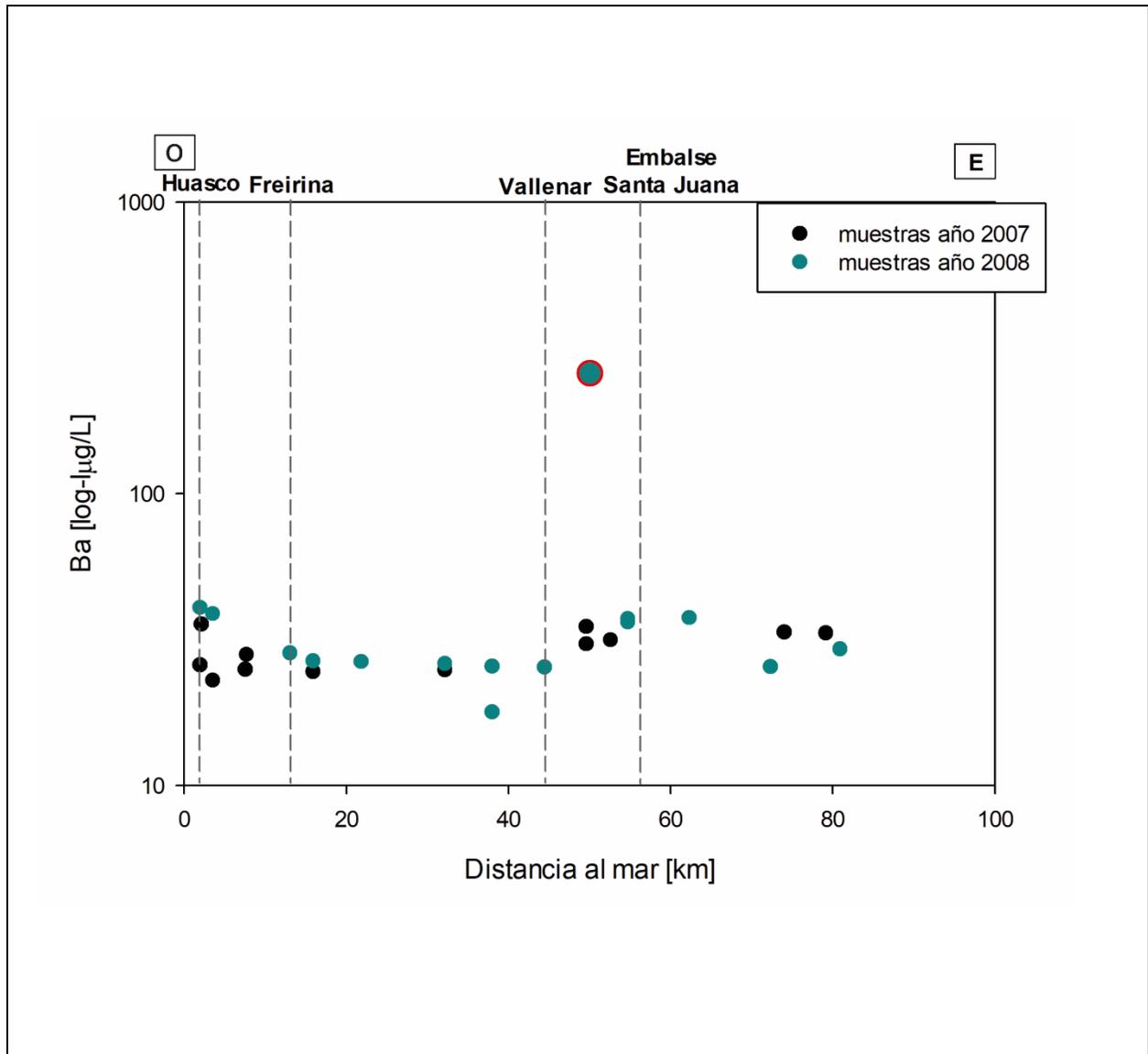


Figura 5.22. Perfil O-E concentraciones de Ba en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

La figura 5.23 presenta el perfil de concentraciones O-E para el U. Los valores medidos en 2007 son superiores a los medidos en 2008. De este a oeste las concentraciones analizadas en 2008 aumentan hasta el km 35, mientras que las analizadas en 2007 parecieran disminuir, sin embargo, se mantienen en un rango acotado entre 4,2 y 5,2 $\mu\text{g/L}$. Para 2007 entre los km 35 y 3, se observa un aumento considerable en las concentraciones respecto al tramo descrito anteriormente, pero que la tendencia dentro del mismo es a disminuir, lo que se hace más abrupto en las muestras más cercanas al oeste. Para el año 2008, desde el km 35 hacia el oeste las concentraciones disminuyen y en Freirina suben abruptamente hasta el valor máximo (7,7 $\mu\text{g/L}$). Ya en la zona costera, y como ocurrió en 2007 las concentraciones bajan.

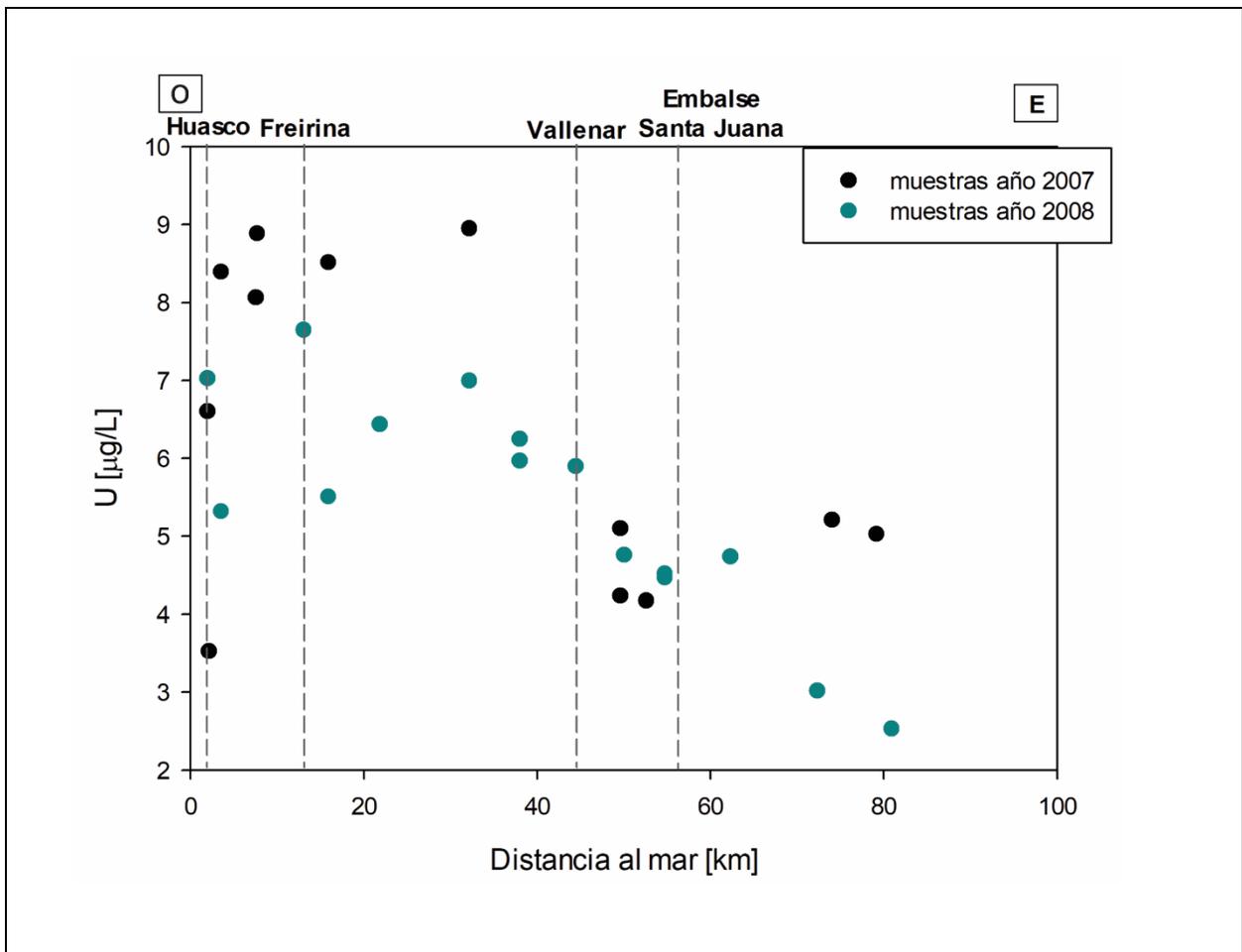


Figura 5.23. Perfil O-E concentraciones de U en aguas superficiales.

En la figura 5.24. Se grafican las concentraciones de Al respecto al mar. Este elemento se encuentra en el grupo de elementos cuyas tendencias en 2007 y 2008 son similares, sin embargo, a diferencia de los perfiles anteriores, el aluminio sigue una tendencia opuesta. Las concentraciones de aluminio decrecen aguas abajo desde el este hacia el oeste. Las concentraciones máximas de ambos años se encuentran en el km 75 aproximadamente, y son de 13 $\mu\text{g/L}$ en 2007 y 121 $\mu\text{g/L}$ ppm en 2008, ambos valores anómalos según el cálculo de estadígrafos básicos. A partir de la figura, también es posible acotar que las concentraciones del año 2008 son superiores a las de 2007.

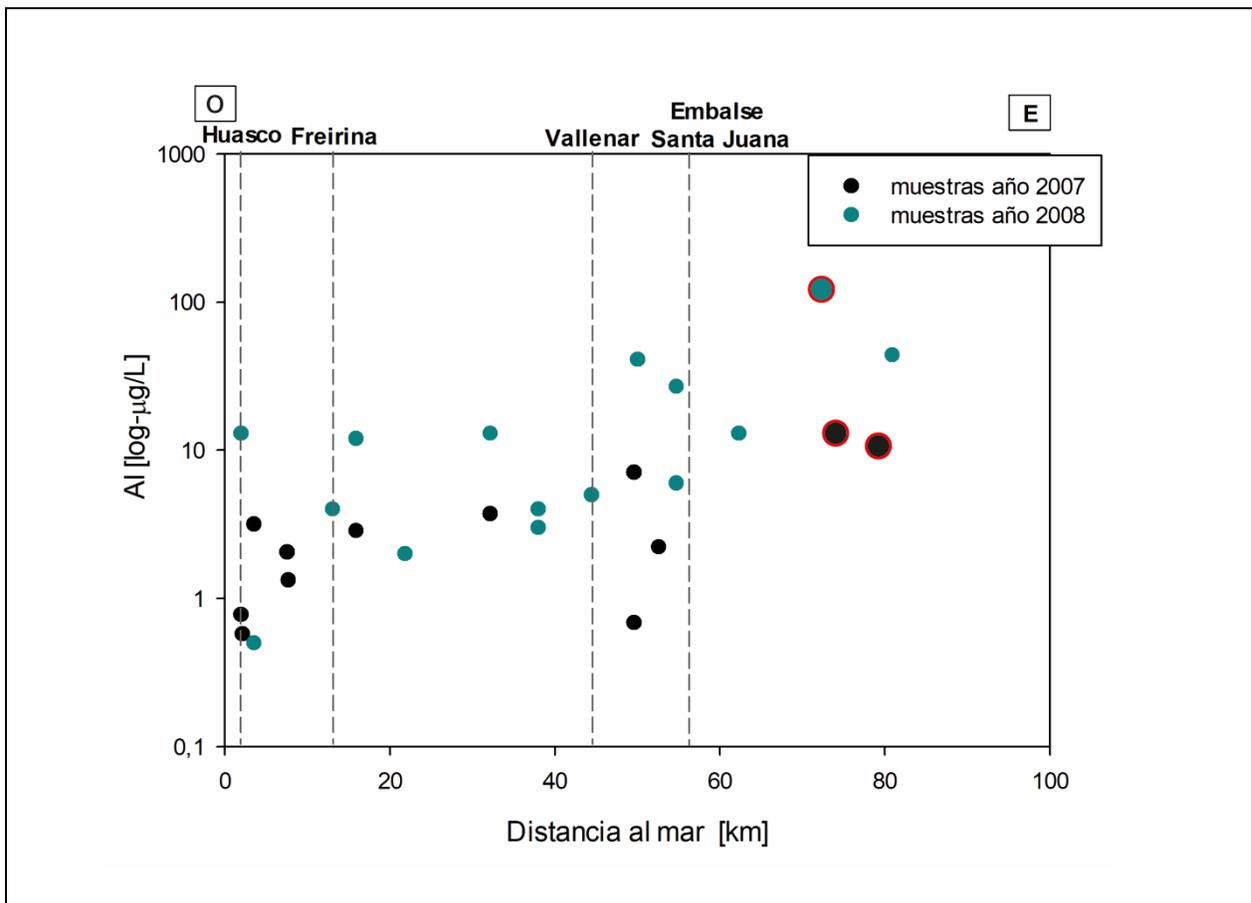


Figura 5.24. Perfil O-E concentraciones de Al en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

A continuación, se presentarán los perfiles de aquellos elementos cuyos patrones difieren de un año a otro. Los elementos con esta característica son: Fe, Cu, Zn, Mo, Sb, Pb y F.

En el perfil O-E de concentraciones de Fe en aguas superficiales se ilustra en la figura 5.25. El patrón que se observa en el año 2007 asemeja al patrón ya descrito en el grupo anterior de perfiles: las concentraciones más bajas ocurren aguas arriba de Vallenar, las concentraciones decrecen desde el km 80 aguas abajo hasta la zona oeste del embalse, puntualmente en el km 40 donde ocurre el valor mínimo ($2 \mu\text{g/L}$) y los valores cambian de tendencia a aumentar hacia el oeste, llegando a valores anómalos (55 y $143 \mu\text{g/L}$) a los 7 y 2 km. En 2008 hay muchas concentraciones bajo el límite de detección ($\text{DL} = 10 \mu\text{g/L}$), las cuales se concentran mayoritariamente en la parte inferior del valle (aguas abajo de los 22 km). Aguas abajo del embalse Santa Juana las concentraciones aumentan hacia el oeste en un rango amplio de valores (desde $16 \mu\text{g/L}$ hasta $72 \mu\text{g/L}$), siendo este último una anomalía y punto de quiebre a partir del cual las concentraciones disminuyen hacia el oeste.

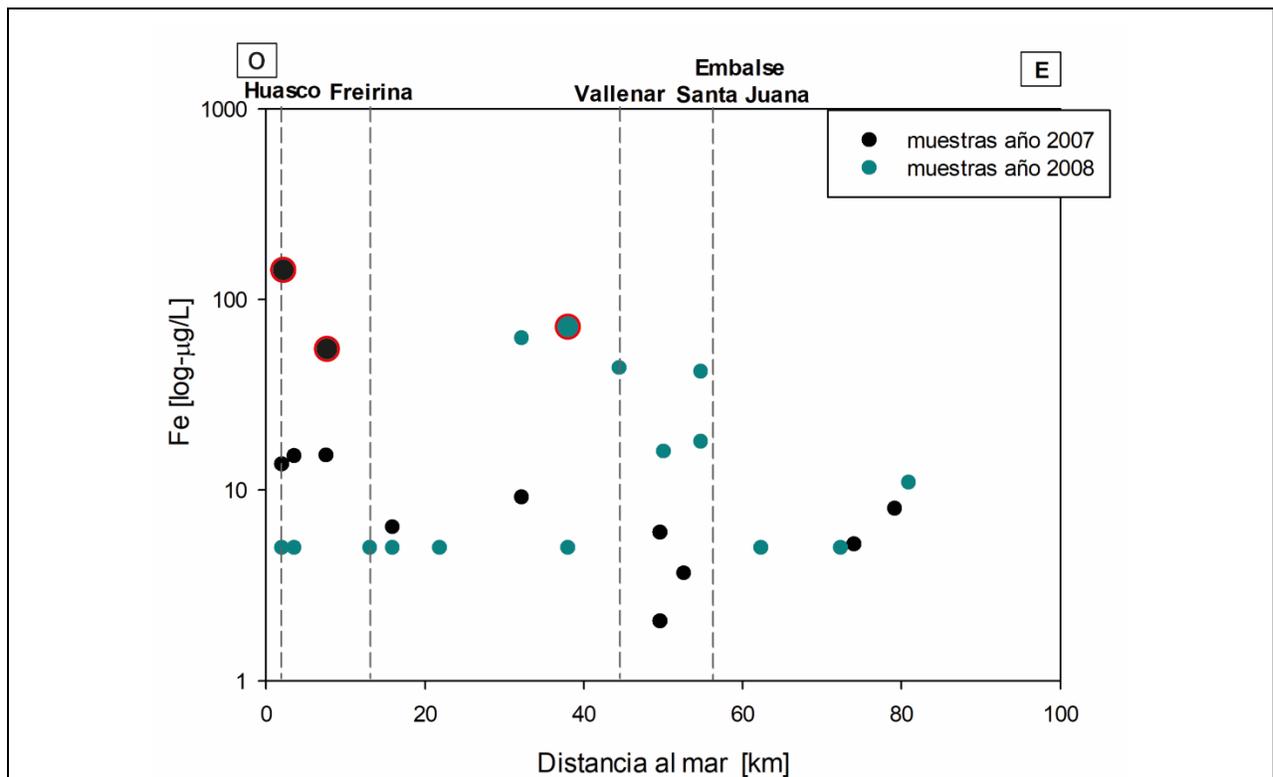


Figura 5.25. Perfil O-E concentraciones de Fe en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

En la figura 5.26 se observa el perfil O-E de concentraciones de Cu. Las concentraciones de 2008 son claramente más elevadas que las de 2007. En la parte alta del valle, las concentraciones de cobre no presentan grandes variaciones de un año al otro, fluctúan entre 0,9 y 1,8 $\mu\text{g/L}$. Al avanzar hacia el oeste, las concentraciones de 2007 disminuyen desde el valor máximo (1,3 $\mu\text{g/L}$) al valor mínimo (0,06 $\mu\text{g/L}$) en el mar. Las concentraciones 2008 aumentan gradualmente hacia el oeste, desde el mínimo (1,3 $\mu\text{g/L}$) hasta el valor máximo (3,8 $\mu\text{g/L}$), que además corresponde a una anomalía, y se ubica en el mar. Destaca el importante cambio que se observa en la desembocadura: de un año a otro las concentraciones prácticamente se cuadruplicaron.

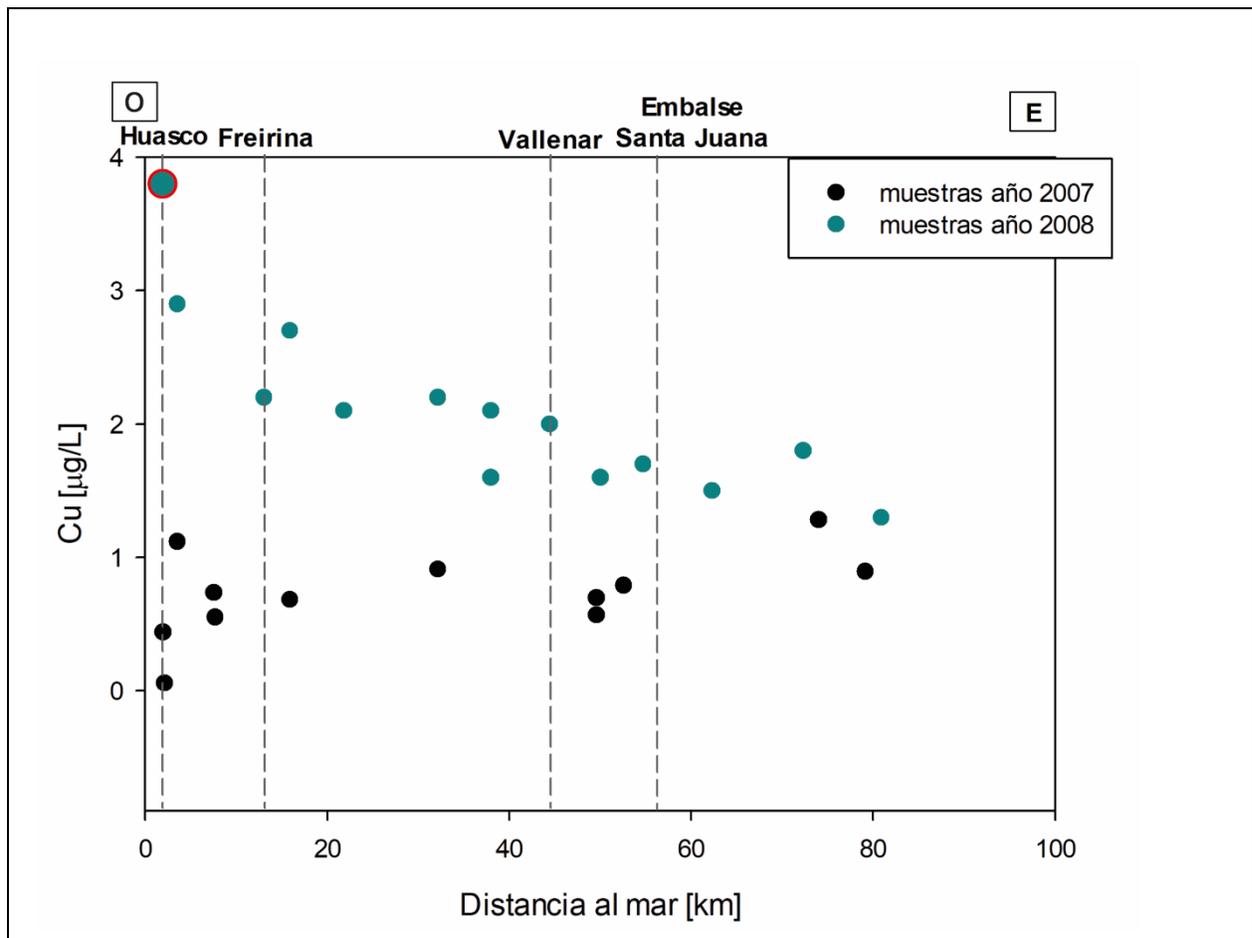


Figura 5.26. Perfil O-E concentraciones de Cu en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

La figura 5.27 contiene el perfil O-E de concentraciones de Zn en las aguas superficiales. Las concentraciones son 2007 hasta dos órdenes de magnitud inferiores a las de 2008. Para el año 2007, se observa que de este a oeste las concentraciones disminuyen desde 3,2 $\mu\text{g/L}$ en el km 80 a 1,4 $\mu\text{g/L}$. Ya en el km 50 se alcanza el valor máximo (4,2 $\mu\text{g/L}$), punto donde los valores comienzan a disminuir, llegando al mínimo (1 $\mu\text{g/L}$) en la costa. En 2008 se observan dos cambios en el signo de la pendiente del gráfico, el primero ocurre con un aumento desde el este, en los 50 km donde se alcanza el valor máximo (429 $\mu\text{g/L}$) la pendiente cambia de signo y los valores disminuyen aguas abajo hasta alcanzar el mínimo (13 $\mu\text{g/L}$) en el km 21, punto desde el cual la pendiente cambia de signo y los valores aumentan a medida que se acercan al mar.

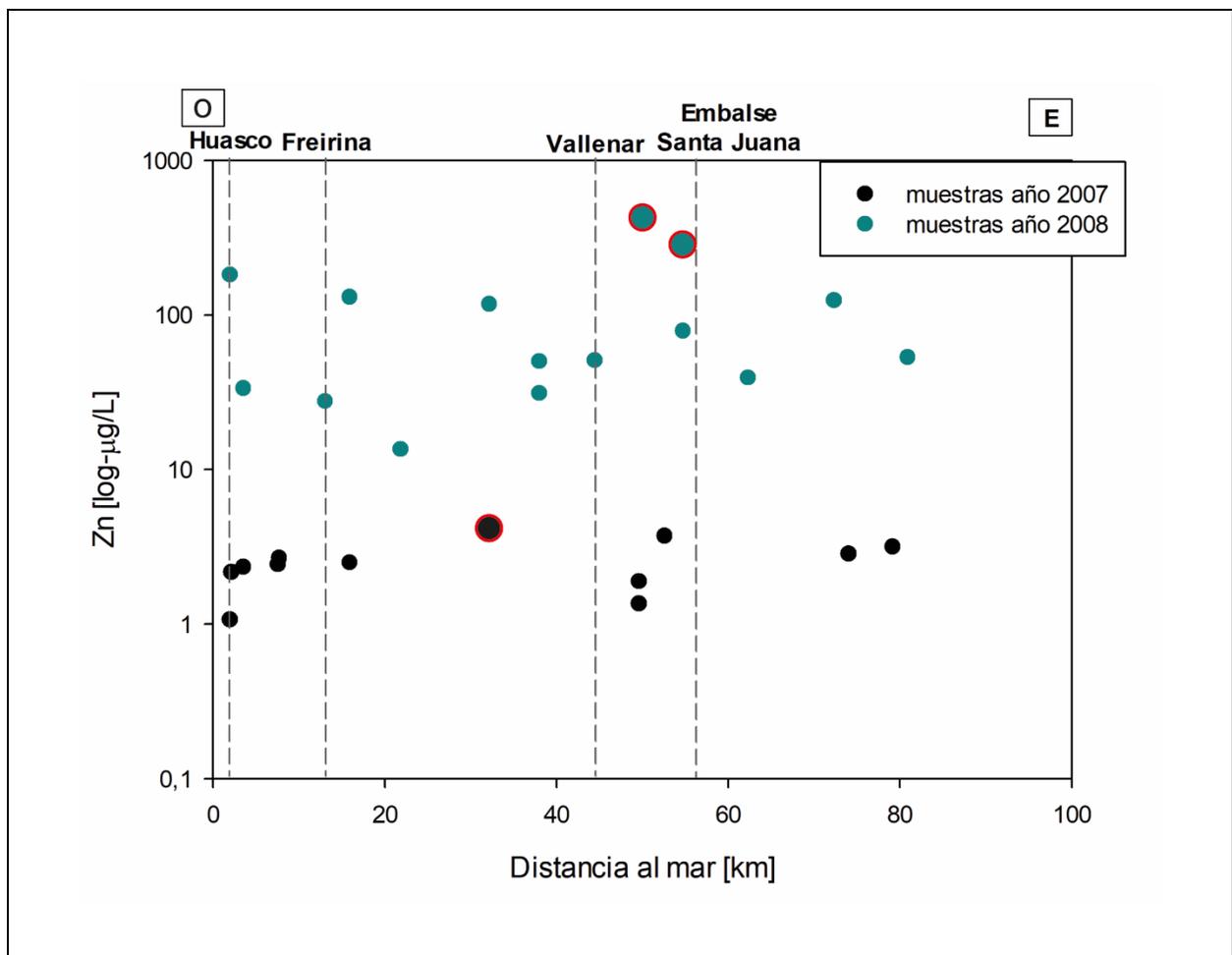


Figura 5.27. Perfil O-E de concentraciones de Zn en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

En la figura 5.28 se observa el perfil O-E de concentraciones de Mo en aguas superficiales. Para el año 2007 se tiene que las concentraciones de molibdeno aumentan de manera discreta desde 3,9 $\mu\text{g/L}$ hasta el peak (5,1 $\mu\text{g/L}$) en los 15 km, punto en donde comienzan a disminuir hacia el oeste. Para el año 2008 las concentraciones aumentan desde el valor mínimo (2,8 $\mu\text{g/L}$) en el este hacia el oeste hasta alcanzar su peak en la zona de Vallenar (7,2 $\mu\text{g/L}$), y aguas abajo de la ciudad, las concentraciones disminuyen constantemente hasta la desembocadura.

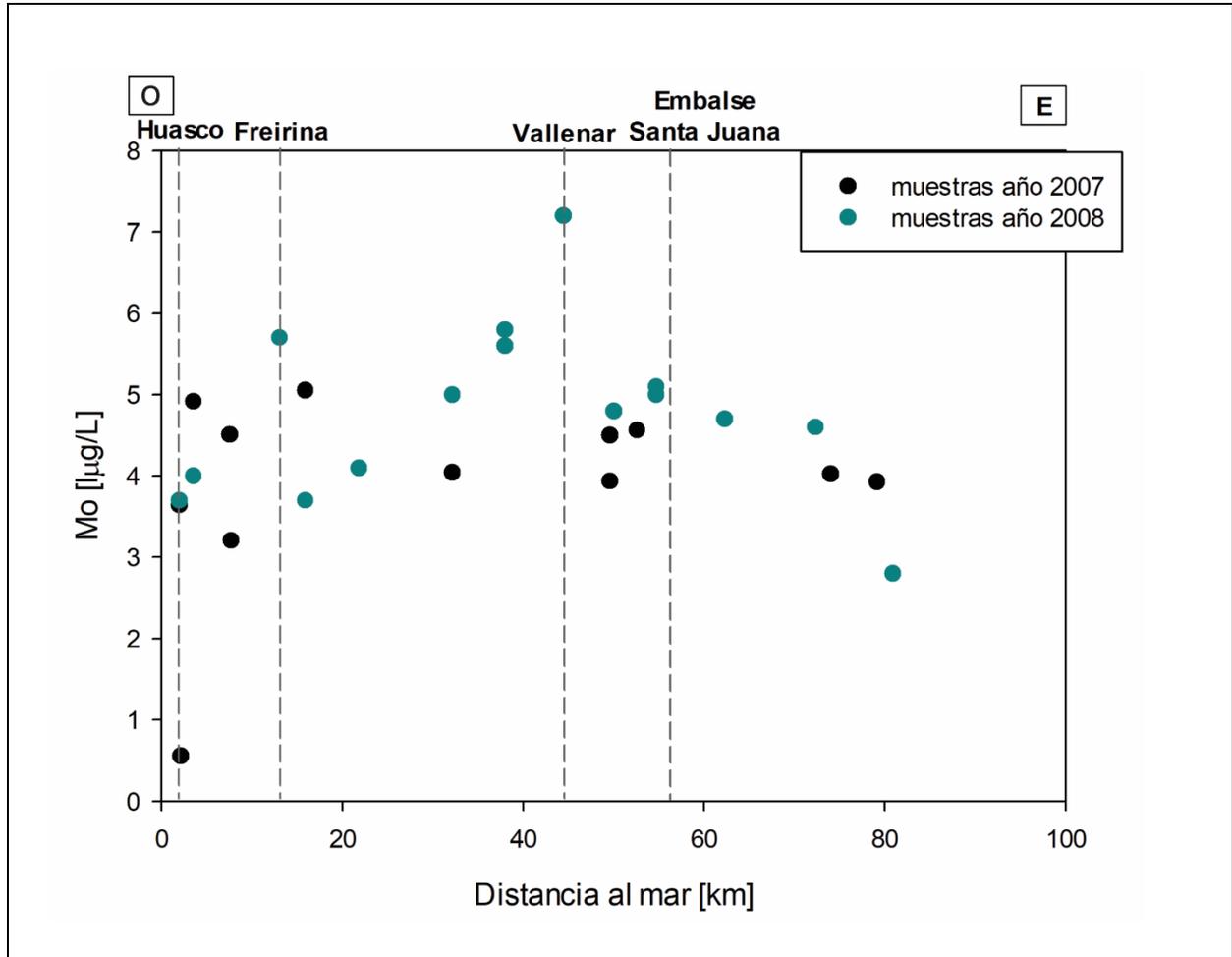


Figura 5.28. Perfil O-E de concentraciones de Mo en aguas superficiales.

En la figura 5.29 se observa el perfil O-E de concentraciones de Sb en aguas superficiales. Las concentraciones 2007 son inferiores a las de 2008. En 2007 las concentraciones aumentan discretamente desde el este hacia el oeste hasta alcanzar un valor máximo (1,2 $\mu\text{g/L}$) a los 16 km, punto que no se observa en el gráfico dado que justo sobre el se ubica una muestra 2008 con la misma concentración. Desde este peak las concentraciones disminuyen hasta la zona costera. En 2008 se observa una tendencia general de este a oeste en la que las concentraciones aumentan hacia el poniente, con algunos quiebres, que de este a oeste son: en el km 60 donde se alcanza el valor mínimo (0,09 $\mu\text{g/L}$), el siguiente a la altura de Vallenar, y el último en el km 16. El valor máximo de este año (0,25 $\mu\text{g/L}$) se alcanza a la altura de Huasco.

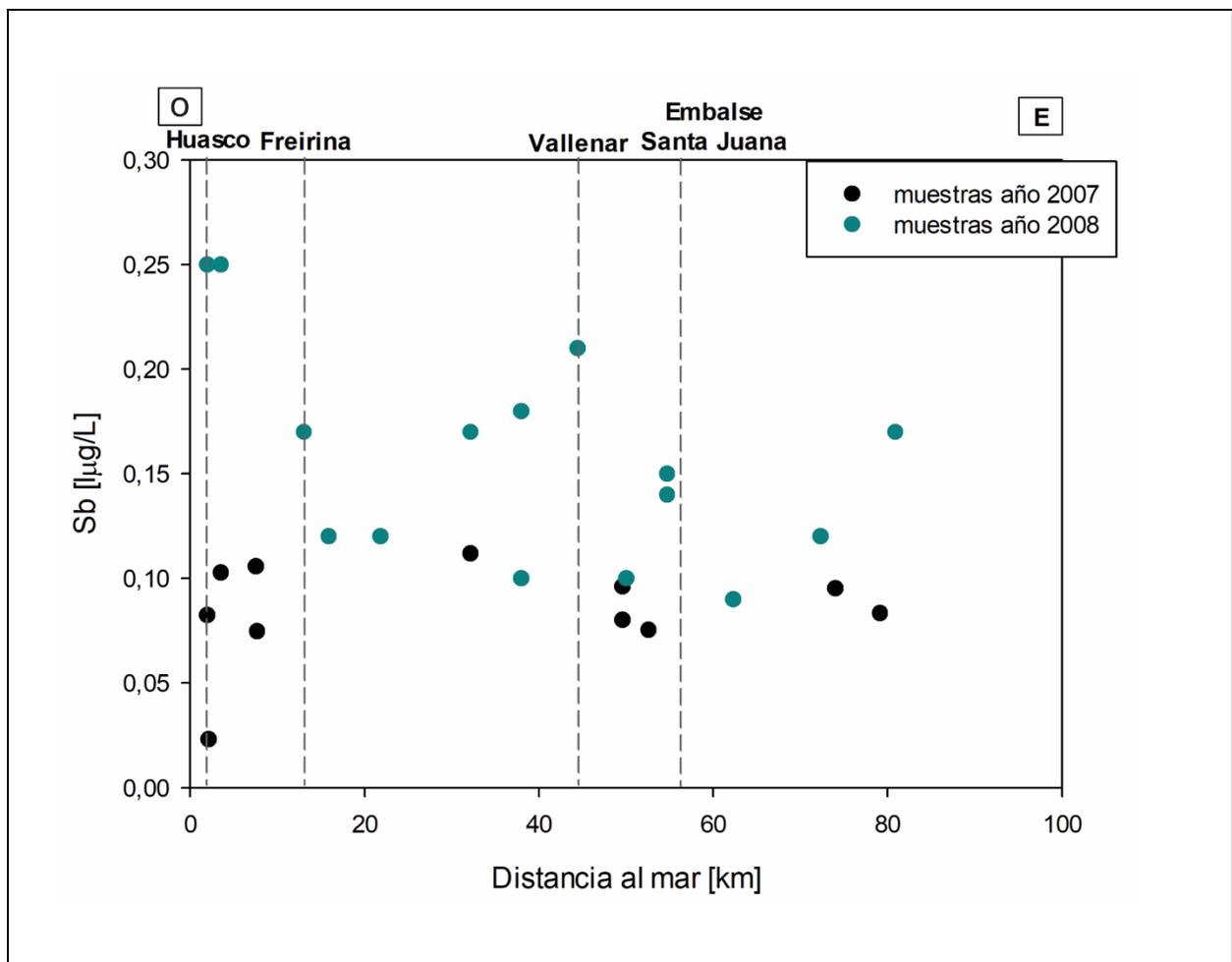


Figura 5.29 Perfil O-E concentraciones de Sb en aguas superficiales.

El perfil O-E de concentraciones de Pb (figura 5.30) En 2007 las concentraciones aumentan de forma discreta desde el este hasta el km 32, donde los valores alcanzan su máximo y comienzan a disminuir a medida que se avanza hacia la desembocadura. muestra que en 2008 hay muchas muestras bajo el límite de detección (DL), no se puede precisar si las concentraciones van aumentando o disminuyendo desde el punto más al oriente, pero sí se puede notar un aumento desde el embalse que se mantiene constante ($0,1 \mu\text{g/L}$) hasta el km 32. También se puede identificar un valor máximo ($0,9 \mu\text{g/L}$) en el km 16.

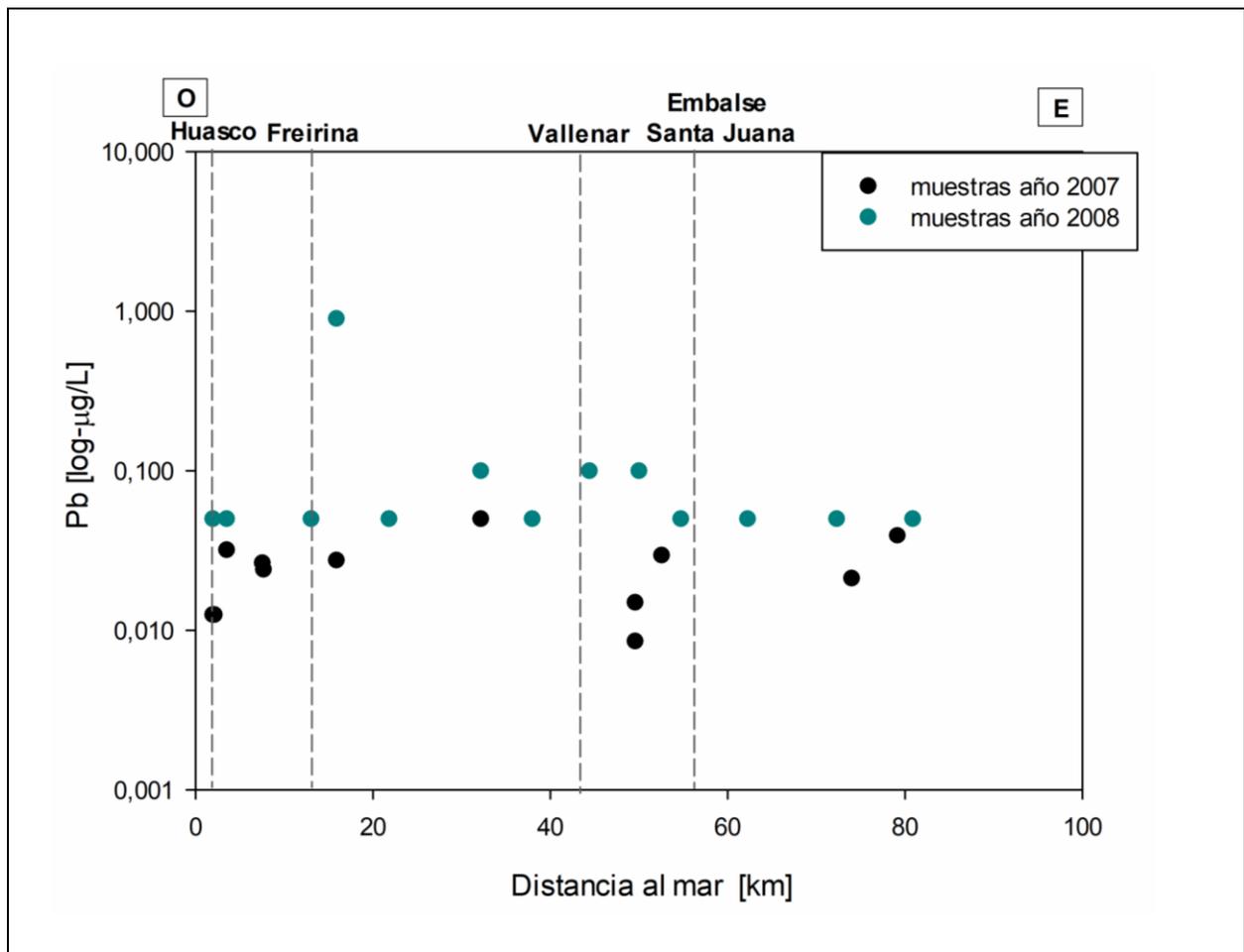


Figura 5.30. Perfil O-E concentraciones de Pb en aguas superficiales.

En la figura 5.31 se presenta el perfil O-E de concentraciones de F en aguas superficiales. En 2007 las cocentraciones aumentan de este a oeste hasta el valor máximo (700 $\mu\text{g/L}$) que se encuentra en el km 8, entre Huasco y Frerina, punto a partir del cual las concentraciones disminuyen hacia el poniente. En el año 2008 se observa un incremento de las concentraciones en dirección al oeste, y si bien se pueden notar algunas pequeñas alzas y bajas, el alza es clara hasta el km 38, donde se alcanza el valor máximo, que es también un valor anómalo (650 $\mu\text{g/L}$) punto a partir del cual las concentraciones descienden aguas abajo. A la altura de Freirina, se alcanza el mínimo (450 $\mu\text{g/L}$) vuelve a cambiar la tendencia y las concentraciones se elevan hacia la desembocadura.

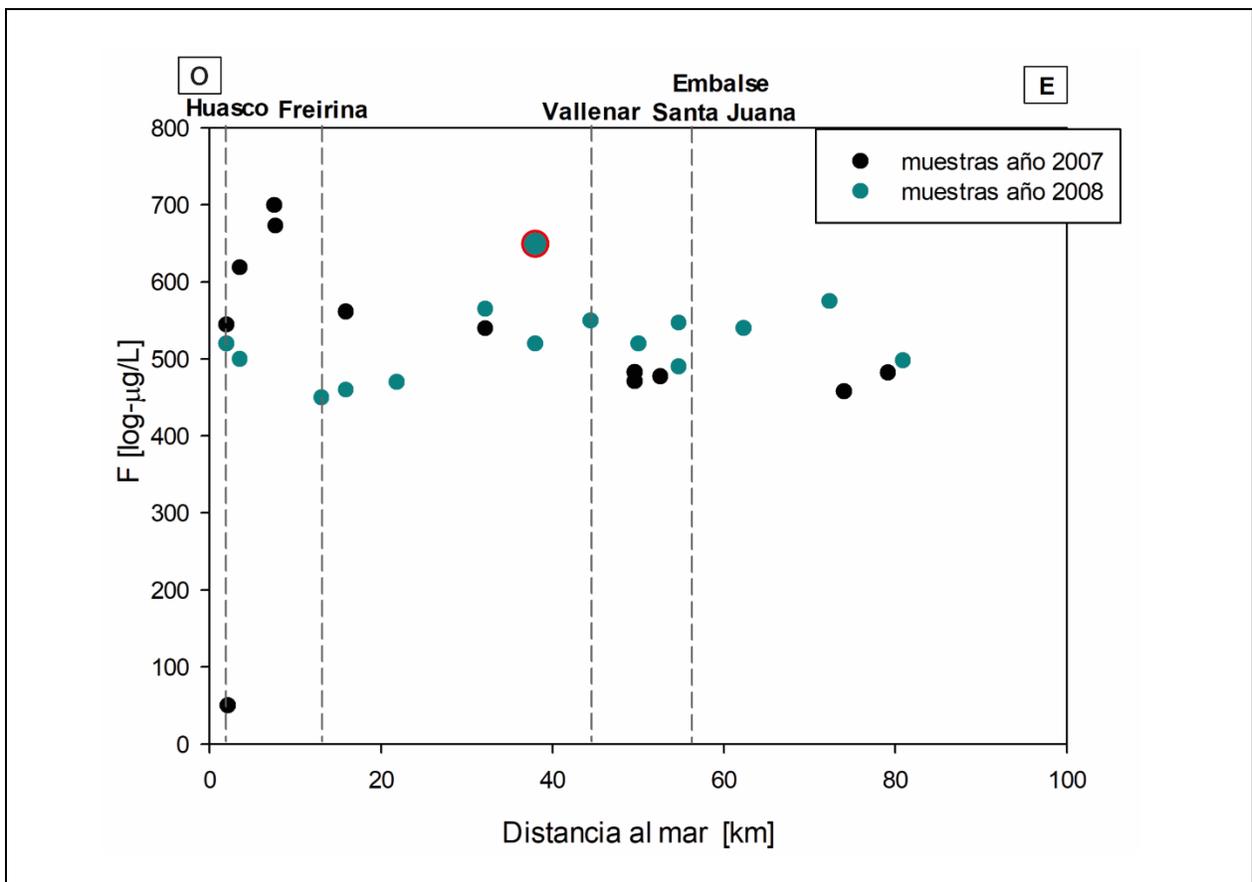


Figura 5.31. Perfil O-E concentraciones de F en aguas superficiales. Las muestras circunscritas en rojo y de mayor tamaño corresponden a valores anómalos según los parámetros calculados en la tabla 5.3

5.1.2.2. Sedimentos Activos

La tabla 5.4 resume los estadígrafos básicos para los sedimentos activos.

Tabla 5.4. Estadígrafos descriptivos calculados para elementos trazas en sedimentos activos.
Concentraciones en ppm. En naranja se resalta la mediana superior.

Elementos Traza- Muestras Sedimentos activos (ppm)														
Elemento	MIN		Q1		MEDIANA		Q3		BS		LS		MAX	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Sc	7,9	0,9	30,2	1,3	47,1	3	50	3,1	-	-	60	3,5	60	3,5
V	11	13	46	26,4	54	64,9	80	73,5	-	-	108	85	108	85
Cr	5,5	4,8	20,9	9,9	31,8	26,1	36,3	34,7	-	-	55,8	39	55,8	39
Co	1,1	2,8	6,7	4,3	8,6	9,2	27,8	10,8	-	-	53,9	11,4	53,9	11
Ni	9,7	3,8	17,1	6,7	22	13,53	31,3	17,8	-	-	37,4	20	37,4	20
Cu	3,8	26,3	31,3	27,5	62,5	39,17	98	60,7	-	-	256	138	256	138
Zn	24,6	36,2	79,8	50,1	96,5	67,3	127,9	86,72	259	-	-	94,1	565	94
Ga	1,3	0,8	7,4	1,6	12,2	4	13,2	4,4	-	-	16,7	4,4	16,7	4,4
Ge	0,2	0,1	0,7	0,1	1,2	0,1	1,2	0,1	-	-	1,6	0,1	1,6	0,1
As	3,6	5,6	9,4	10,1	10,3	12,1	13,4	12,3	22,7	16,7	-	-	25,6	20
Rb	7,3	2,5	40,3	3,7	78,7	7,3	86,1	8	-	-	105	10,7	105	11
Sr	161,5	74	215,6	108	232,5	188	259,8	330	344	-	-	440	421	440
Y	2	2,2	12,2	4,1	20	6,9	21,4	8,2	-	-	30,7	9,3	30,7	9,3
Mo	1,6	0,9	2,4	1,2	3,5	1,4	3,7	1,5	-	-	6	1,8	6	1,8
Ag	0,3	0,02	0,5	0,1	0,6	0,3	0,6	0,4	0,8	-	-	1	1	1
Cd	0,07	0,16	0,12	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	2	0,8	-	-	3,3	0,8
Sn	0,2	0,21	2,1	0,8	2,6	1,5	3,5	1,9	-	-	4,3	3,9	4,3	3,9
Sb	0,3	0,16	1,5	0,2	1,7	0,4	2,3	0,7	4,1	-	-	0,9	4,4	0,9
Cs	0,4	0,8	2,8	1	3,7	1,7	4,2	2,1	-	-	5,9	2,2	5,9	2,2
Ba	77	62	217	68,7	430	83	452	114,5	-	-	584	142	584	142
La	11	2,2	23,7	3,9	29,4	9,4	37,3	12,3	73,5	-	-	15,3	455	15
Ce	3,8	4,04	24,4	7	37,2	15,8	46,2	20	-	-	55,6	25,4	55,6	25
Pb	1,2	4,23	11,1	5,4	11,8	11,8	13,6	23,2	18,4	-	-	54	27,5	54
Bi	0,1	0,06	0,3	0,1	0,4	0,2	1,8	0,4	-	-	2,2	0,7	2,2	0,7
Th	2	0,6	9,7	1,2	16,8	4,3	20,2	5,8	-	-	25,6	8,2	25,6	8,2
U	1,7	1,96	2	2,2	2,5	2,3	3,1	2,6	5,8	-	-	3,4	8,5	3,4

Según la tabla anterior, los elementos V, Co, As presentan medianas superiores en 2008, mientras que el Cd y Pb no presentan variaciones de un año a otro. Las medianas de 21 de los 26 parámetros listados son superiores en 2007. De estos 21 elemento, aquellos con mayor variación (disminución superior a un 50% en 2008 respecto a 2007) son: Sc (93%), Ge (91%), Rb (90%),

Ba (80%), Sb (76%), Th (74%), La (68%), Ga (67%), Y (67%), Mo (60%), Ce (57%), Cs (54,05), Ag (50%), Bi (50%). Las medianas más elevadas para cada año corresponden al Ba y Sr respectivamente. Por otro lado las medianas más bajas son el Cd en ambos años.

Los perfiles para sedimentos activos se presentan ordenados según las tendencias que presentan. Se pueden diferenciar dos grupos que presentan tendencias generales marcadas: aquellos que en 2007 presentan cambios en el signo de la pendiente o quiebres de pendiente a los 74, 50 y 20 km (Sc, V, Cr, Co, Ga, As, Rb, Y, Ag, Sn, Sb, La, Ce, Bi, Th, Zn, Ge, Cs, Ba, Pb, Ni y Cu), cada cual con sus propias particularidades. Una característica común que comparten los gráficos de los elementos mencionados es todos ellos alcanzan su valor mínimo en el km 20, en la muestra identificada con el código 5-1904-7. Por otro lado, se observa un segundo grupo de elementos (Sr, Mo y U) que presentan una tendencia de disminución general en sus concentraciones, desde el este hacia el oeste.

La figura 5.32 muestra el perfil O-E de concentraciones de Sc en sedimentos activos. Para el año 2007 se observan dos de los cambios de pendientes descritos en el párrafo anterior. Las concentraciones 2007 van aumentando desde el este aguas abajo hasta el km 74, donde se alcanza el valor máximo (60 ppm), y ocurre un quiebre en la pendiente, punto desde el cual las concentraciones disminuyen aguas abajo hasta alcanzar el valor mínimo (8 ppm) en el km 20. En 2008 se observa una tendencia con valores más bajos, que aumentan desde el este del Embalse Santa Juana hacia el oeste con un cambio sutil de pendiente a los 40 km, donde se alcanza el máximo (3,5 ppm) y los valores disminuyen aguas abajo de ese punto. Se podría asumir como un patrón plano, con variaciones poco notorias entre el mínimo (0,9 ppm) y el máximo (3,5 ppm).

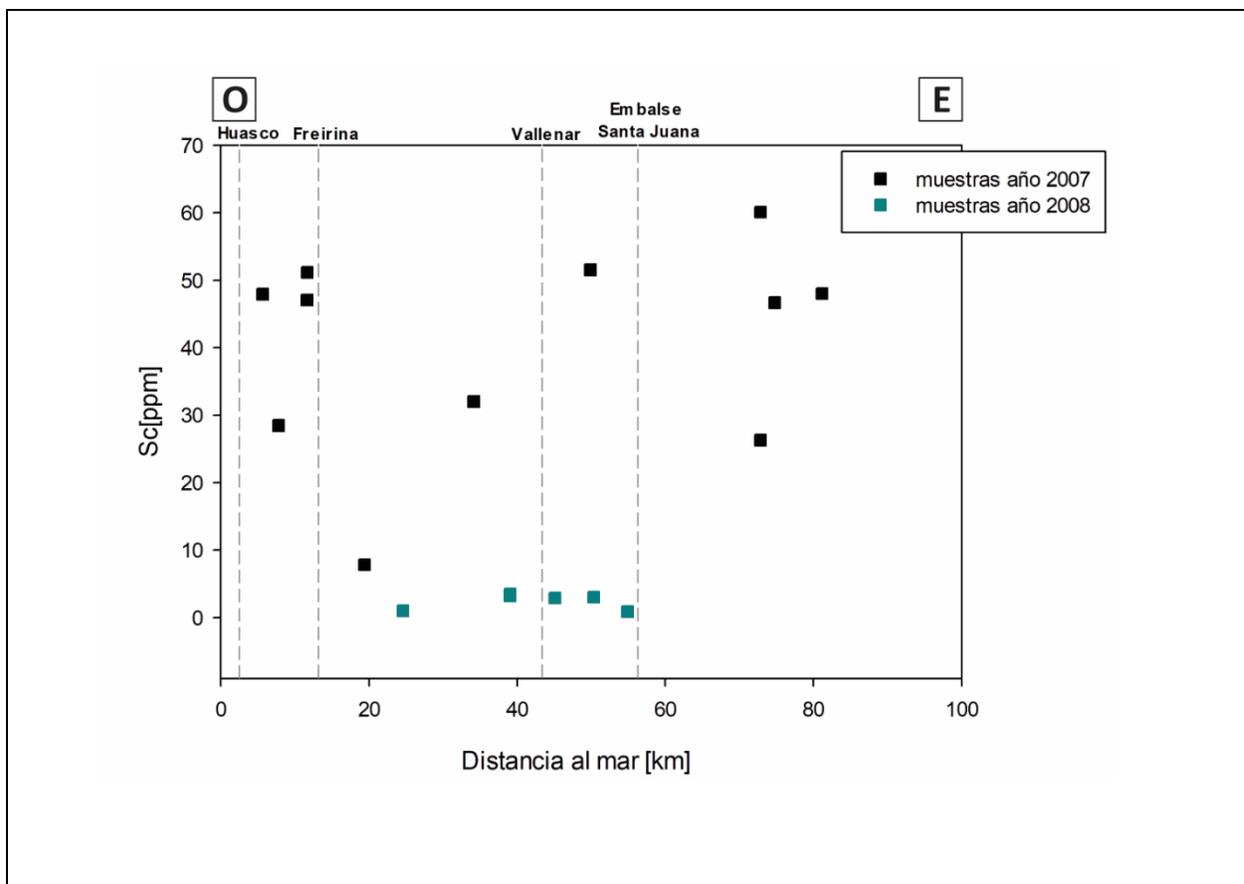


Figura 5.32. Perfil O-E concentraciones de Sc en sedimentos activos.

En la figura 5.33 se observa el perfil O-E de concentraciones de V en sedimentos activos. Para el año 2007 se observan los cambios de pendiente a los 74, 50 y 20 km: los valores disminuyen desde el este hacia el km 74, al oeste de esta latitud las concentraciones aumentan hasta alcanzar el máximo (108 ppm) en el km 50 y luego descienden hacia el O alcanzando el mínimo (11 ppm) en el km 20. En 2008 se observa un aumento de las concentraciones desde el este en dirección aguas abajo hacia el oeste llegando al valor máximo (85 ppm) en el km 40. Desde el km 40 las concentraciones disminuyen hacia el oeste.

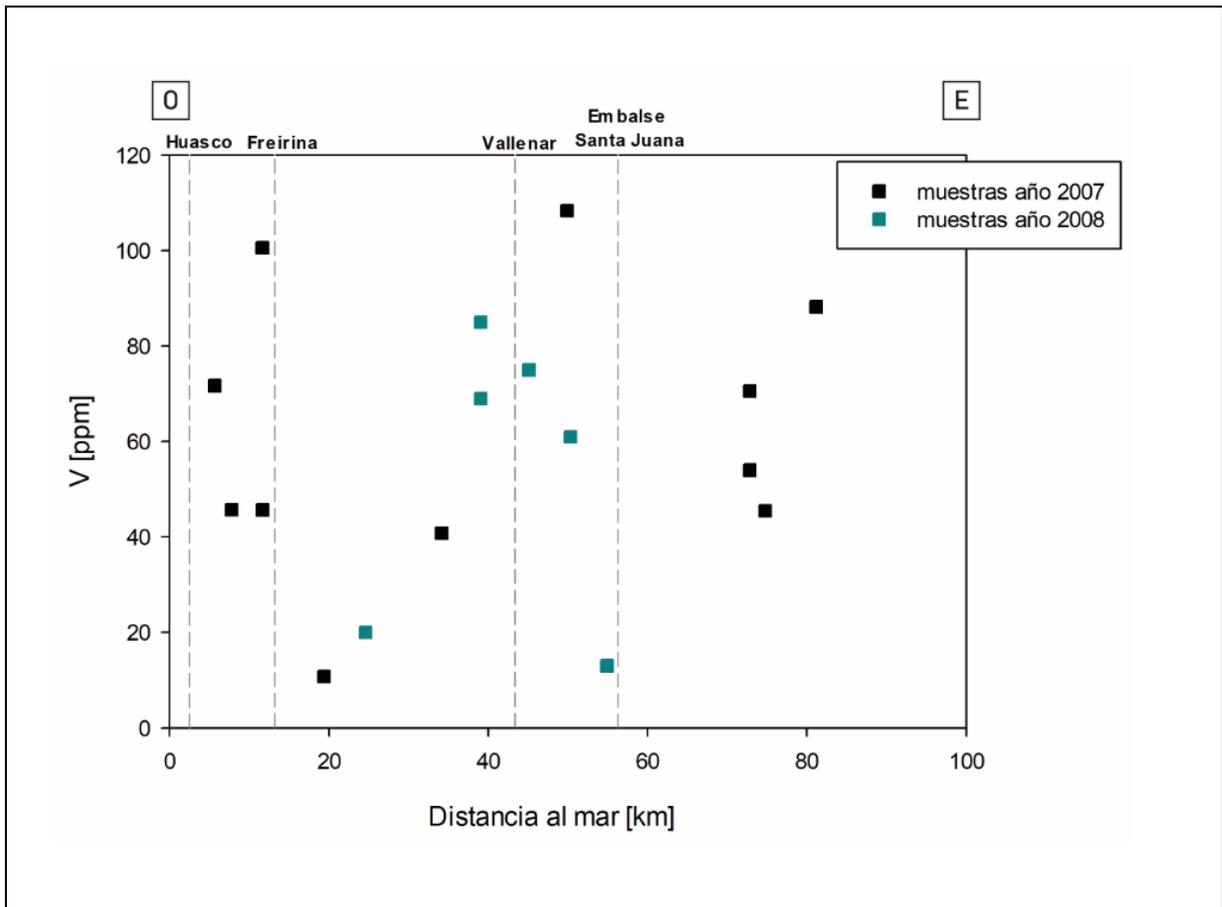


Figura 5.33. Perfil O-E concentraciones de V en sedimentos activos.

La figura 5.34. muestra el perfil O-E de concentraciones de Cr en sedimentos activos. Se observa que en 2007 se mantienen los cambios de pendiente descritos para el V: las concentraciones disminuyen de este a oeste, desde el valor máximo ubicado en la primera muestra al este (56 ppm) hasta el km 74 donde se observa un quiebre y las concentraciones aumentan aguas abajo hasta en el km 50. Desde el punto anterior las concentraciones disminuyen hacia el oeste alcanzado el valor mínimo (5,5 ppm) en el km 20 y cambiando el signo de la pendiente a negativo, por consiguiente, las concentraciones aumentan desde ese punto hacia el oeste. Para 2008 se observa un aumento de concentraciones de este a oeste, pero a diferencia de los elementos mencionados anteriormente (Sc y V) el quiebre en la pendiente se observa a los 50 km, donde se alcanza el valor máximo (39 ppm) y las concentraciones disminuyen desde este punto en dirección al oeste.

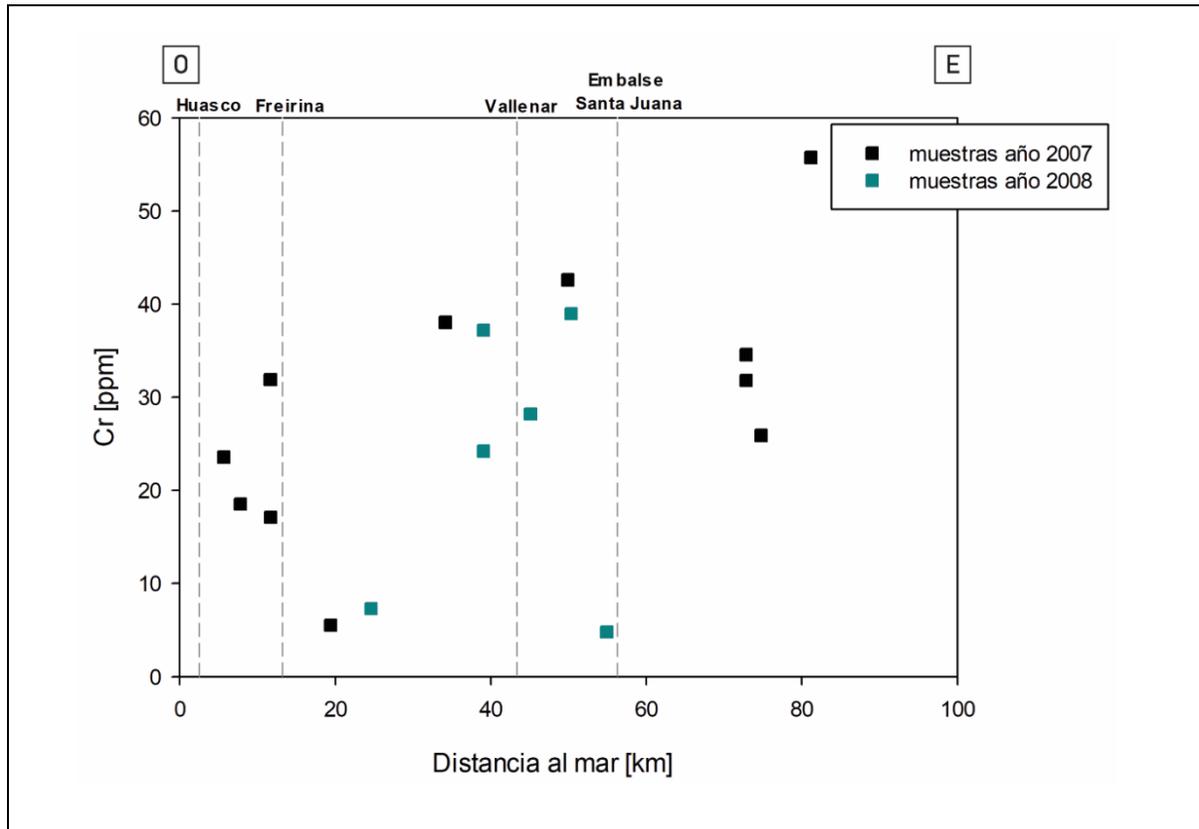


Figura 5.34. Perfil O-E concentraciones de Cr en sedimentos activos.

La figura 5.35 muestra el perfil O-E de concentraciones de Co. En 2007 se observa un quiebre de pendiente a los 74 km, con una disminución de los valores hacia el oeste, hasta el km 20, donde se llega al valor mínimo (1 ppm). Se observa además que justo al oeste de Freirina, 6 kilómetros al oeste del punto anterior, se encuentra el valor máximo (54 ppm) medido para ese año. La tendencia que se observa en 2008 muestra que las concentraciones aumentan desde aguas abajo del embalse en dirección al oeste hasta los 46 km, donde se alcanza el máximo (11,4 ppm) la pendiente cambia de signo, y las concentraciones disminuyen a medida que se avanza al oeste.

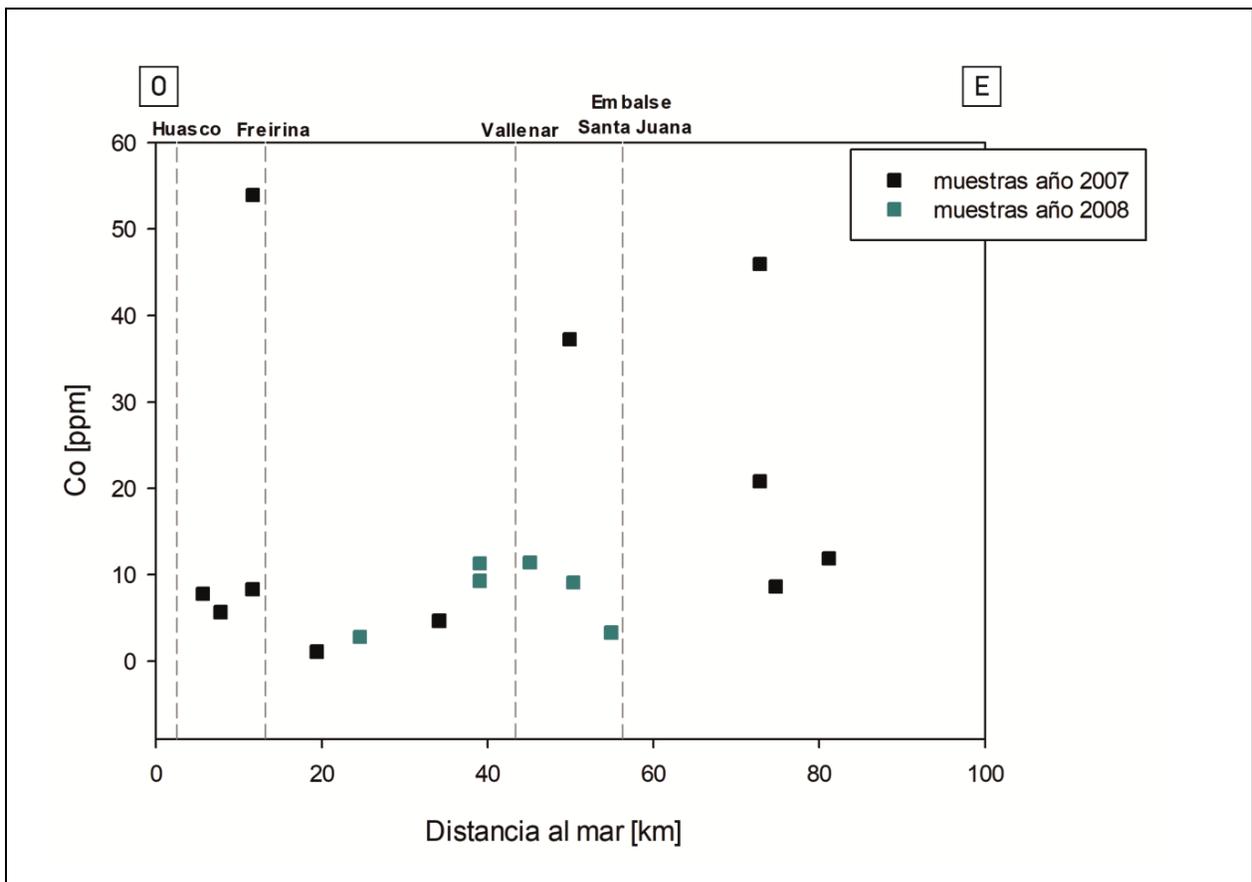


Figura 5.35. Perfil O-E concentraciones de Co en sedimentos activos.

El perfil O-E de concentraciones de Ga en sedimentos activos (fig. 5.36) muestra que en 2007 no son claros los quiebres de pendiente a los 50 y 74 km y las concentraciones son relativamente constantes manteniéndose en un rango entre 8,6 - 16,7 ppm, este último el valor máximo. A partir del km 50, la pendiente se hace positiva hasta el km 20, punto en el cual se alcanza el valor mínimo (1,25 ppm) y la pendiente donde se vuelve negativa. En 2008 se observa que las concentraciones aumentan desde el este hacia el oeste hasta el km 45, donde alcanzan el valor máximo (4,4 ppm) y las concentraciones comienzan a disminuir aguas abajo.

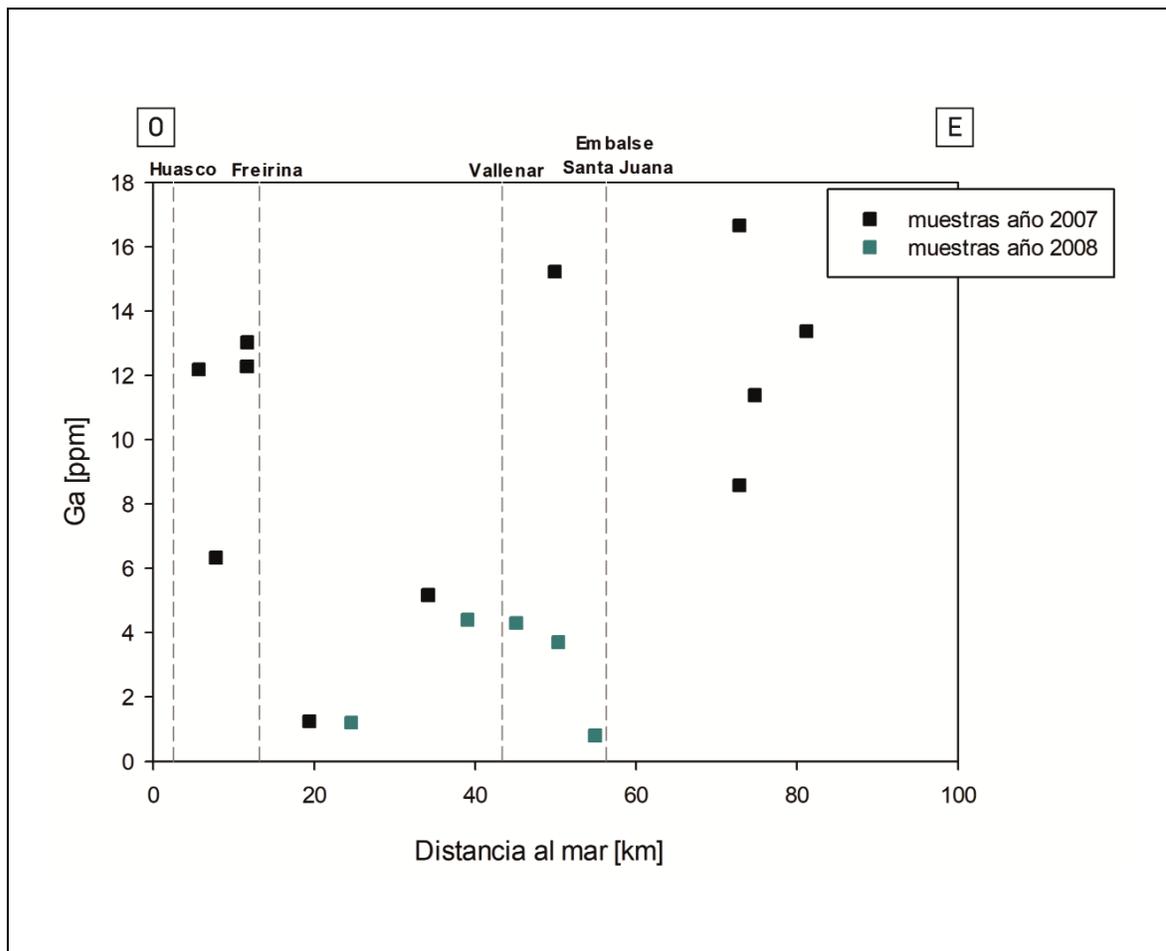


Figura 5.36. Perfil O-E concentraciones de Ga en sedimentos activos.

El perfil O-E de concentraciones de As en sedimentos activos (fig. 5.37) muestra en 2007 una pendiente negativa hasta el km 74, donde se alcanza el valor máximo (25,5 ppm) el cual es también una anomalía. Aguas debajo de este punto la pendiente cambia a signo positivo hasta el km 20, donde se alcanza el valor mínimo (3,6 ppm) y vuelve a cambiar el signo de la pendiente; los valores se elevan hasta Freirina y disminuyen hacia el oeste. Para 2008 se tiene que entre Vallenar y el embalse las concentraciones no varían de forma importante (11,9-12,3 ppm) hasta aguas debajo de la misma ciudad, donde se observa un valor anómalo (19,5 ppm) en el km 40 y la pendiente se hace positiva, con una baja de las concentraciones hacia el oeste.

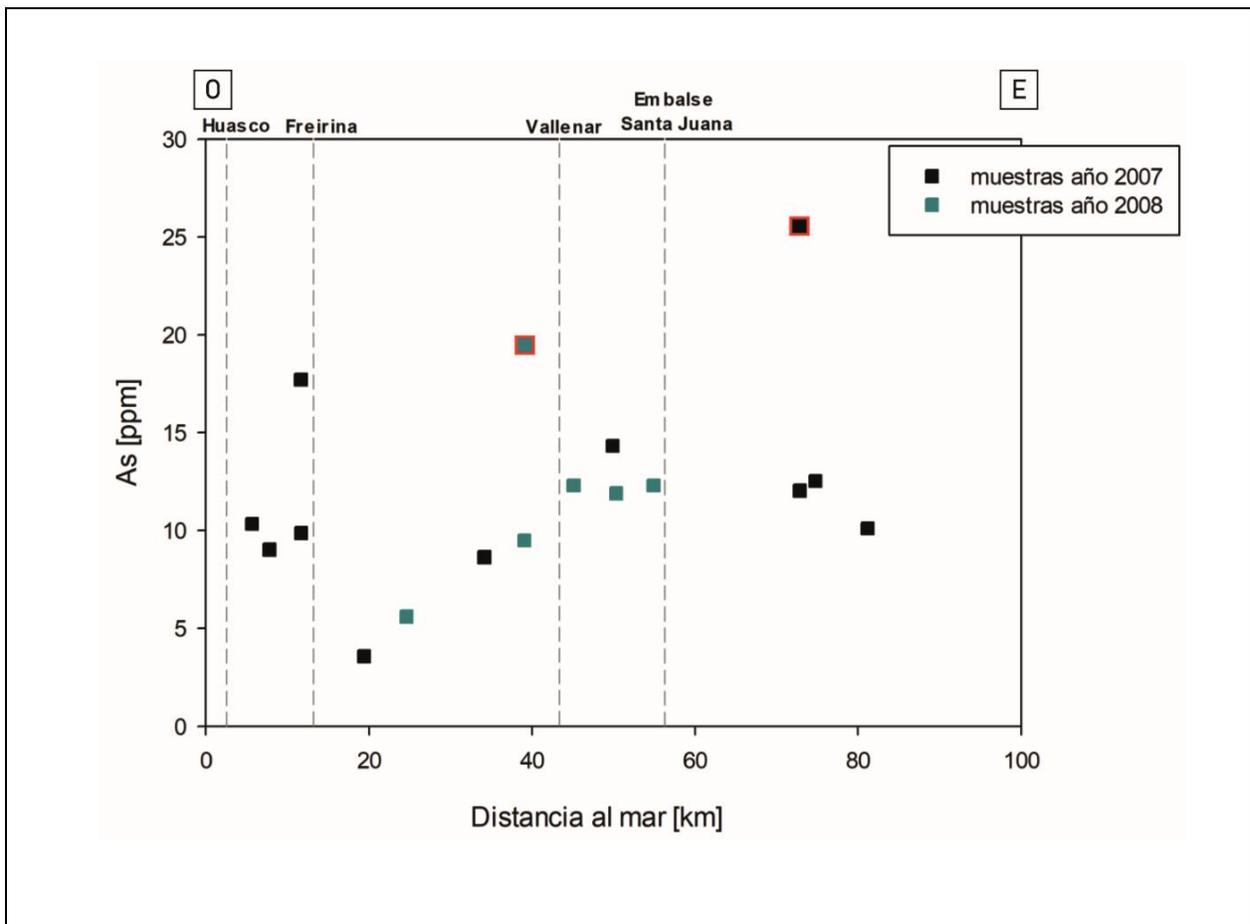


Figura 5.37. Perfil O-E concentraciones de As en sedimentos activos. Las muestras indicadas en borde rojo y mayor tamaño corresponden a valores anómalos, según lo presentado en la tabla 5.4.

La figura 5.38 grafica las concentraciones de Rb en sedimentos activos. En el año 2007 se puede observar que la pendiente es negativa entre los 82 y 74 km, se alcanza el valor máximo (105 ppm) a los 74 y la pendiente se vuelve positiva con una disminución de las concentraciones hacia el oeste hasta el km 20 donde se alcanza el mínimo (7,27 ppm). Desde este punto hacia el oeste, las concentraciones aumentan. En 2008 las concentraciones aumentan desde el este en dirección al oeste, entre el embalse Santa Juana y Vallenar, y hasta aguas debajo de Vallenar, donde se encuentra el valor máximo (10,7 ppm), y la pendiente cambia a signo positivo.

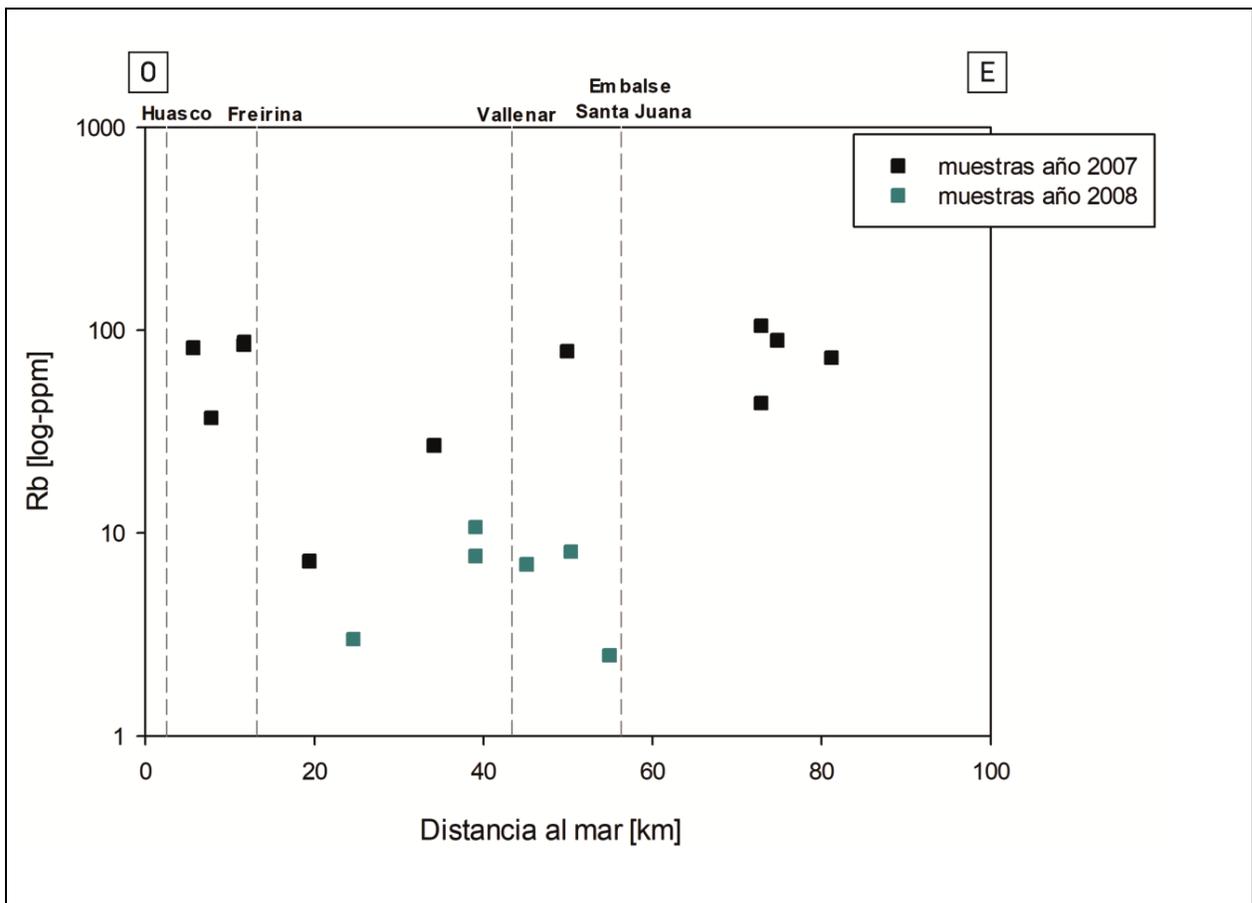


Figura 5.38 Perfil O-E concentraciones de Rb en sedimentos activos.

La figura 5.39 muestra las concentraciones de Y en sedimentos activos. Para el 2007 se observa que desde el este en el km 84 aguas abajo hasta el km 74, las concentraciones aumentan hasta el valor máximo (30,7 ppm), desde este punto las concentraciones disminuyen constantemente hacia el oeste hasta el km 20, donde se registra el valor mínimo (2 ppm). Desde este punto aguas abajo hacia Freirina las concentraciones aumentan, marcando otro cambio de pendiente hacia el oeste. En 2008, aguas abajo del embalse las concentraciones aumentan hasta el km 40, donde alcanzan el valor máximo (9,3 ppm) y comienzan a disminuir hacia el oeste.

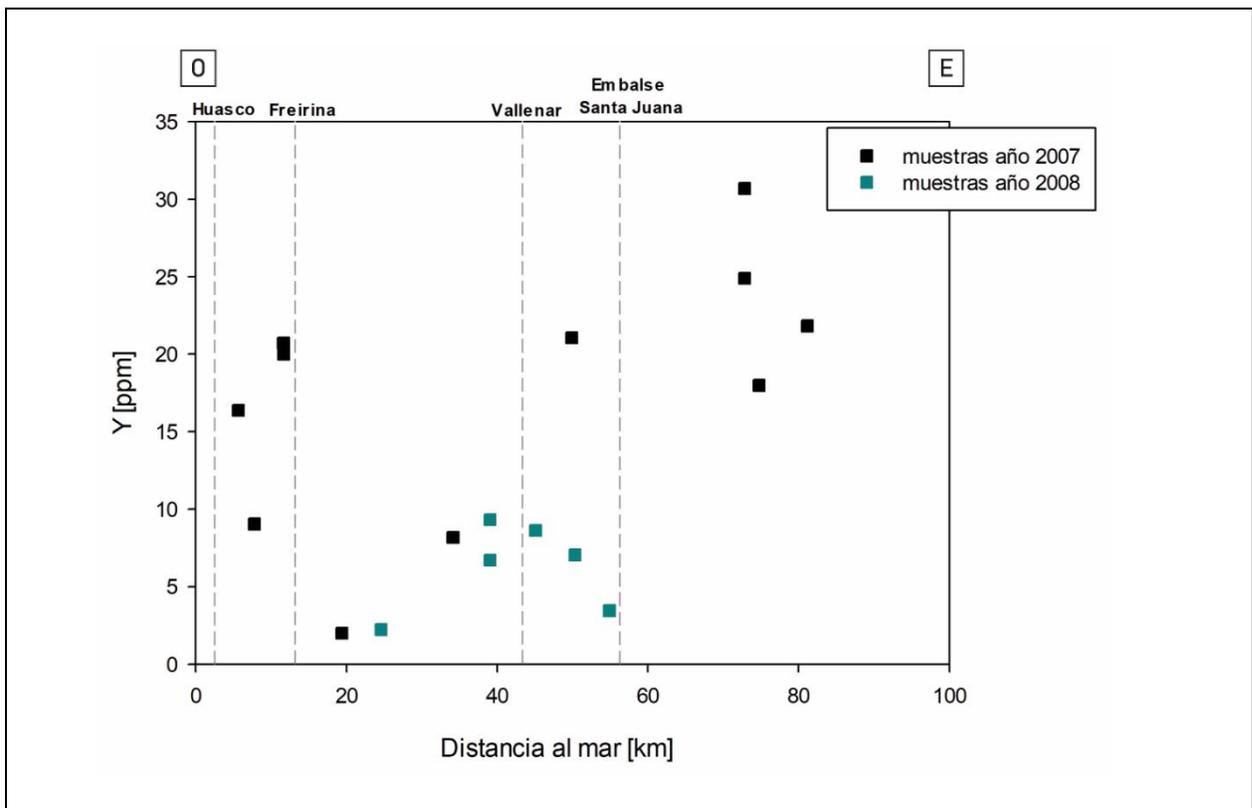


Figura 5.39. Perfil O-E concentraciones de Y en sedimentos activos.

El perfil O-E de concentraciones de Ag en sedimentos activo (fig. 5.40) muestra en 2007 un aumento de las concentraciones desde el km 84 en dirección al este hasta el km 36, donde alcanzan el valor máximo (1 ppm), y que disminuye drásticamente hasta el valor mínimo en el km 20, punto desde el cual la pendiente se vuelve negativa, y los valores aumentan hacia el oeste. Para el 2008 se tiene una pendiente negativa entre el embalse y Vallenar, donde se alcanza el valor máximo (1 ppm) y las concentraciones disminuyen aguas abajo de la ciudad.

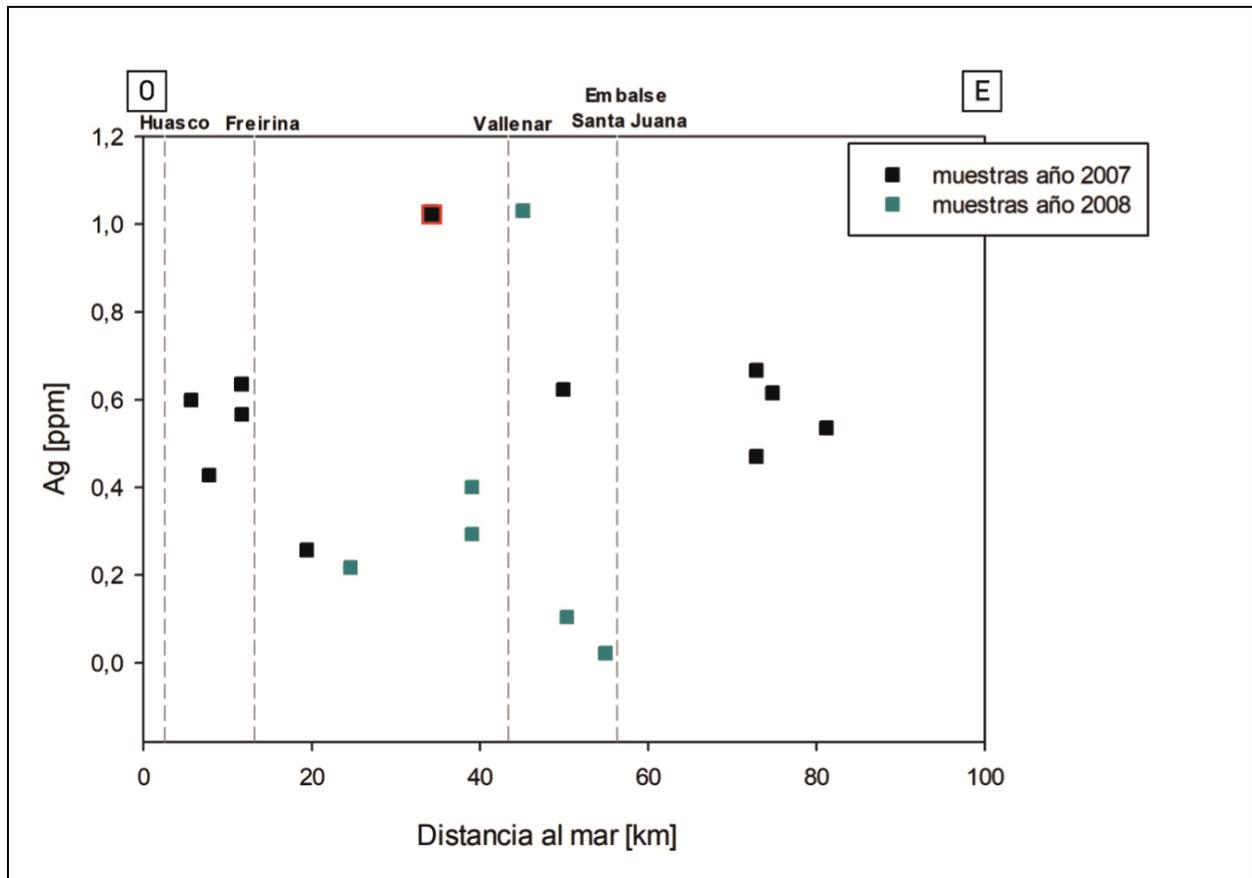


Figura 5.40. Perfil O-E concentraciones de Ag en sedimentos activos. La muestra indicada en borde rojo y mayor tamaño corresponde a un valor anómalo, según lo presentado en la tabla 5.4.

En la figura 5.41 se perfilan las concentraciones de Sn en sedimentos activos. En 2007 las concentraciones en su mayoría fluctúan entre los 1,2 ppm hasta 4,3 ppm (valor máximo), se observan los quiebres en la pendiente del gráfico: los valores disminuyen desde el este hasta el primer quiebre en el km 74, punto a partir del cual las concentraciones aumentan hasta el km 35. En el km 20 se alcanza el valor mínimo (0,2 ppm) y las concentraciones comienzan a aumentar aguas abajo de este. En 2008 la tendencia es más clara: los valores aumentan sostenidamente desde el embalse en dirección oeste alcanzando su máximo (3,9 ppm) en Vallenar, aguas abajo de este punto, las concentraciones disminuyen en dirección oeste.

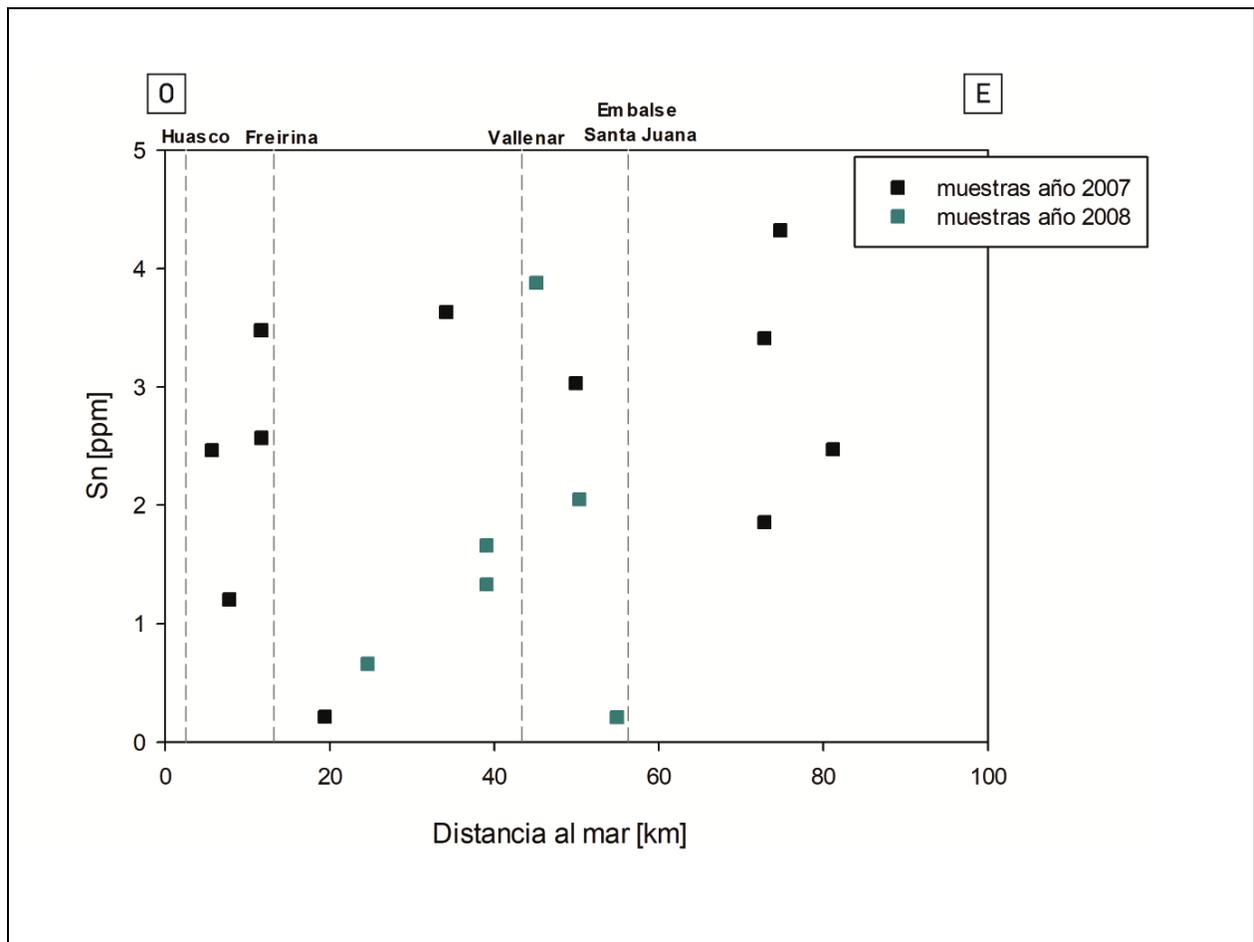


Figura 5.41. Perfil O-E concentraciones de Sn en sedimentos activos.

El perfil O-E de concentraciones de Sb (fig. 5.42) muestra en 2007 que estas disminuyen desde el valor máximo (4,4 ppm) en el km 84 en dirección aguas abajo, con un cambio en el signo de la pendiente, que se mantiene positiva hasta el km 20, donde los valores disminuyen hasta el mínimo (0,3 ppm), recuperándose en la zona de Freirina. En 2008 se observa una pendiente negativa a la salida del embalse con un aumento en el km 50 donde se alcanza el máximo (0,93 ppm), cambia el signo de la pendiente y por consiguiente comienzan a disminuir los valores hacia el oeste hasta el km 24, donde se midió el valor mínimo (0,16 ppm).

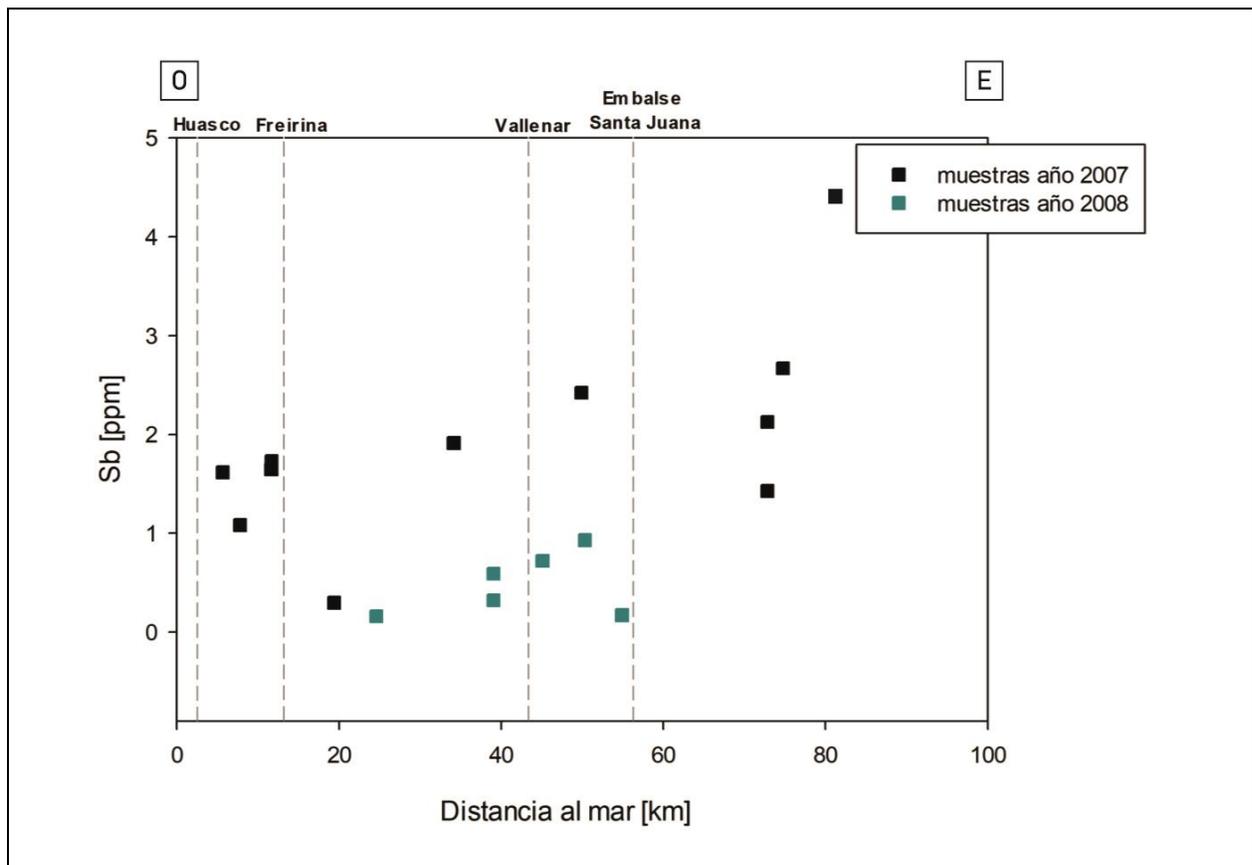


Figura 5.42. Perfil O-E concentraciones de Sb en sedimentos activos.

La figura 5.43 muestra el perfil O-E elaborado para el La, en el cual la observación más notoria corresponde a la anomalía (454 ppm) medida en 2007 en el km 75, que escapa por mucho del rango en el que se mueven el resto de los valores en ambos períodos (2,2 ppm a 39,03 ppm). En 2007 las concentraciones disminuyen desde el km 75 en dirección oeste hasta el km 20, donde se midió el valor mínimo (11,04 ppm), y punto a partir del cual las concentraciones vuelven a aumentar hacia el oeste. En 2008 los valores aumentan desde el este donde se ubica el valor mínimo (2,2 ppm) en dirección oeste, alcanzando el máximo (15,3 ppm) en el km 39. A partir del máximo los valores disminuyen en dirección oeste.

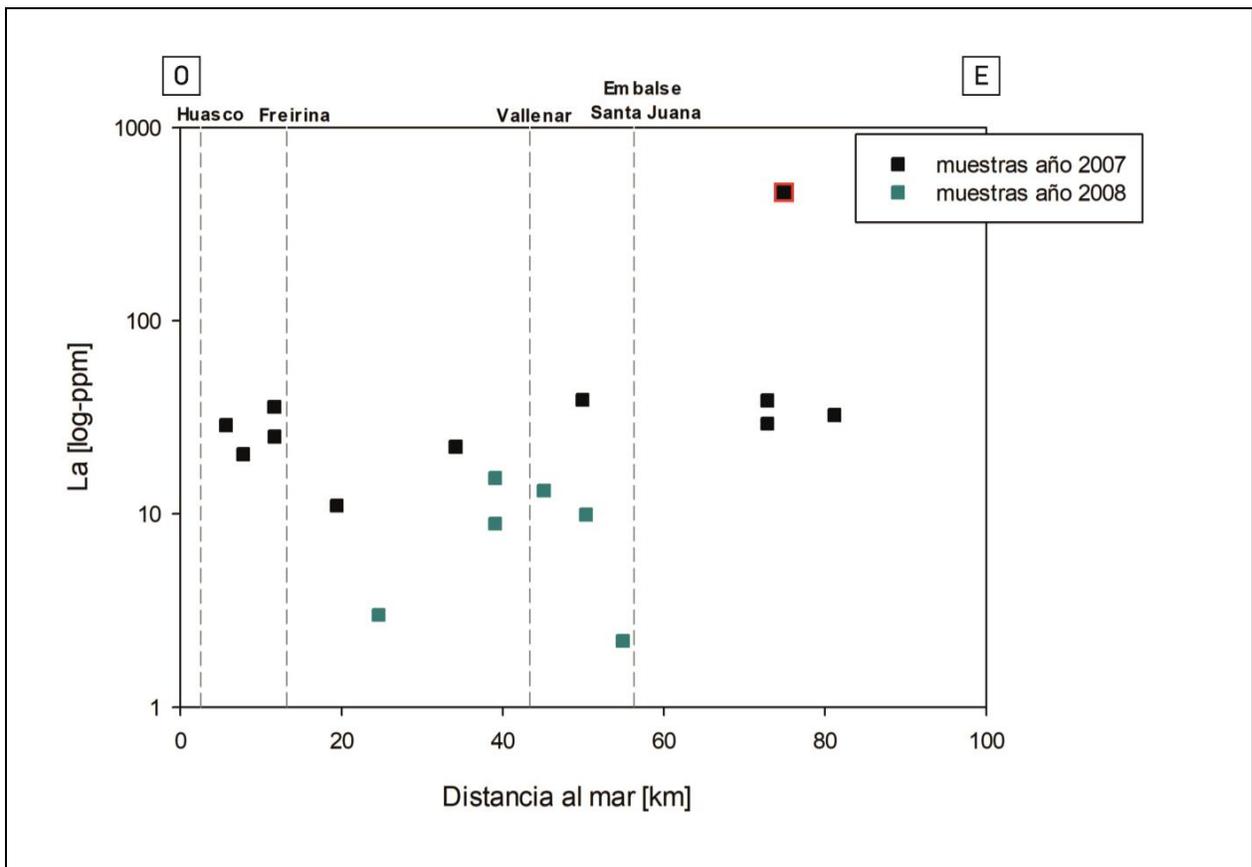


Figura 5.43. Perfil O-E concentraciones de La en sedimentos activos. La muestra indicada en borde rojo y mayor tamaño corresponde a un valor anómalo, según lo presentado en la tabla 5.4.

La figura 5.44 muestra el perfil O-E de Ce. Para 2007 se aprecia que desde el km 84 las concentraciones aumentan en dirección oeste hasta el km 72 donde se alcanza el valor máximo (55,6 ppm), la pendiente cambia a signo positivo y los valores comienzan a disminuir aguas abajo en dirección oeste, hasta el km 20 donde alcanzan el valor mínimo (3,83 ppm). Desde el km 20 hacia Freirina los valores aumentan. Para 2008 se observa que los valores van incrementando desde el este hacia el oeste alcanzando el valor máximo (25,4 ppm) en el km 39. A partir del punto mencionado la pendiente cambia de signo y los valores disminuyen hacia el mar.

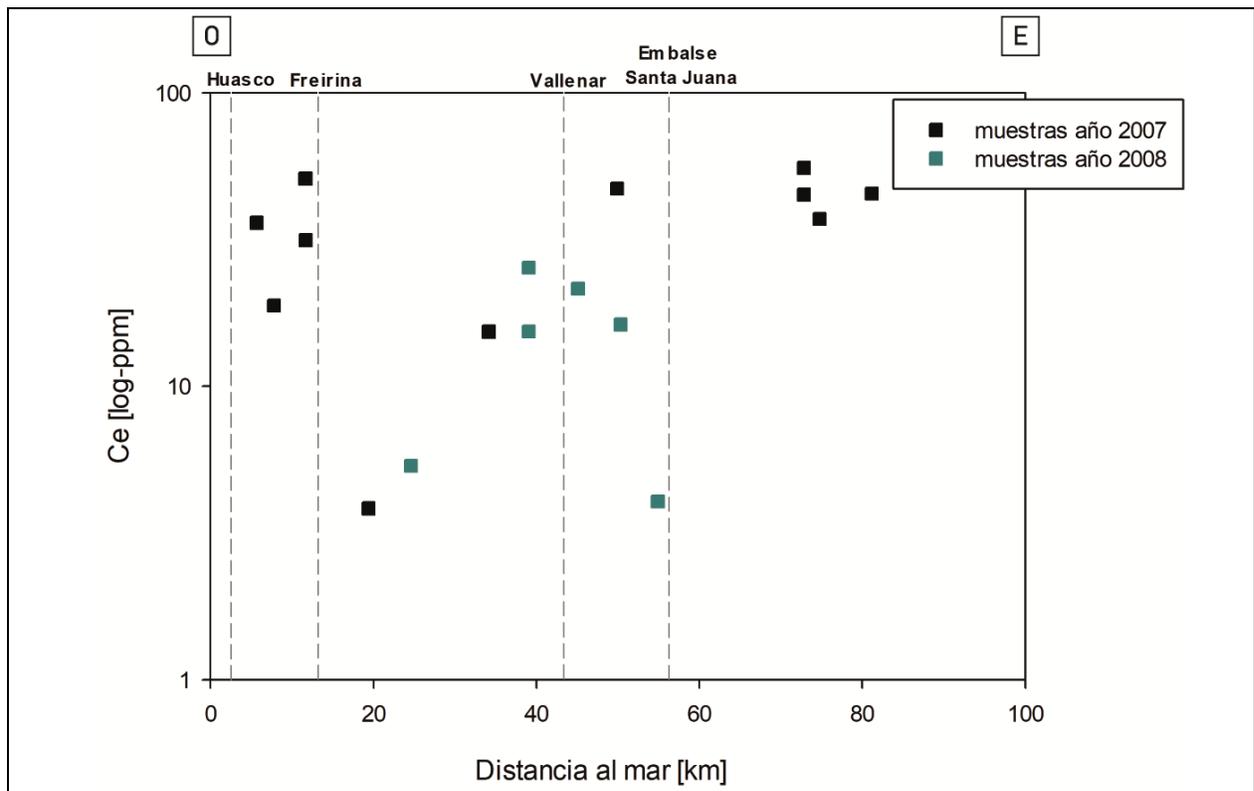


Figura 5.44. Perfil O-E concentraciones de Ce en sedimentos activos.

En la figura 5.45 se perfilan las concentraciones O-E de Bi en sedimentos activos. Para el año 2007 se observa que las concentraciones aumentan en dirección al oeste hasta el km 72, donde se observa un quiebre y los valores comienzan a disminuir hacia el oeste hasta el km 20 donde alcanzan el valor mínimo (0,14 ppm) y punto a partir del cual los valores aumentan sostenidamente hacia la desembocadura, alcanzando el valor máximo (2,22) en el km 8. En 2008 los valores aumentan desde el este en dirección aguas abajo hacia la ciudad de Vallenar, donde alcanzan el valor máximo (0,74 ppm) y cambia el signo de la pendiente, lo que se traduce en una disminución de las concentraciones aguas abajo de este punto.

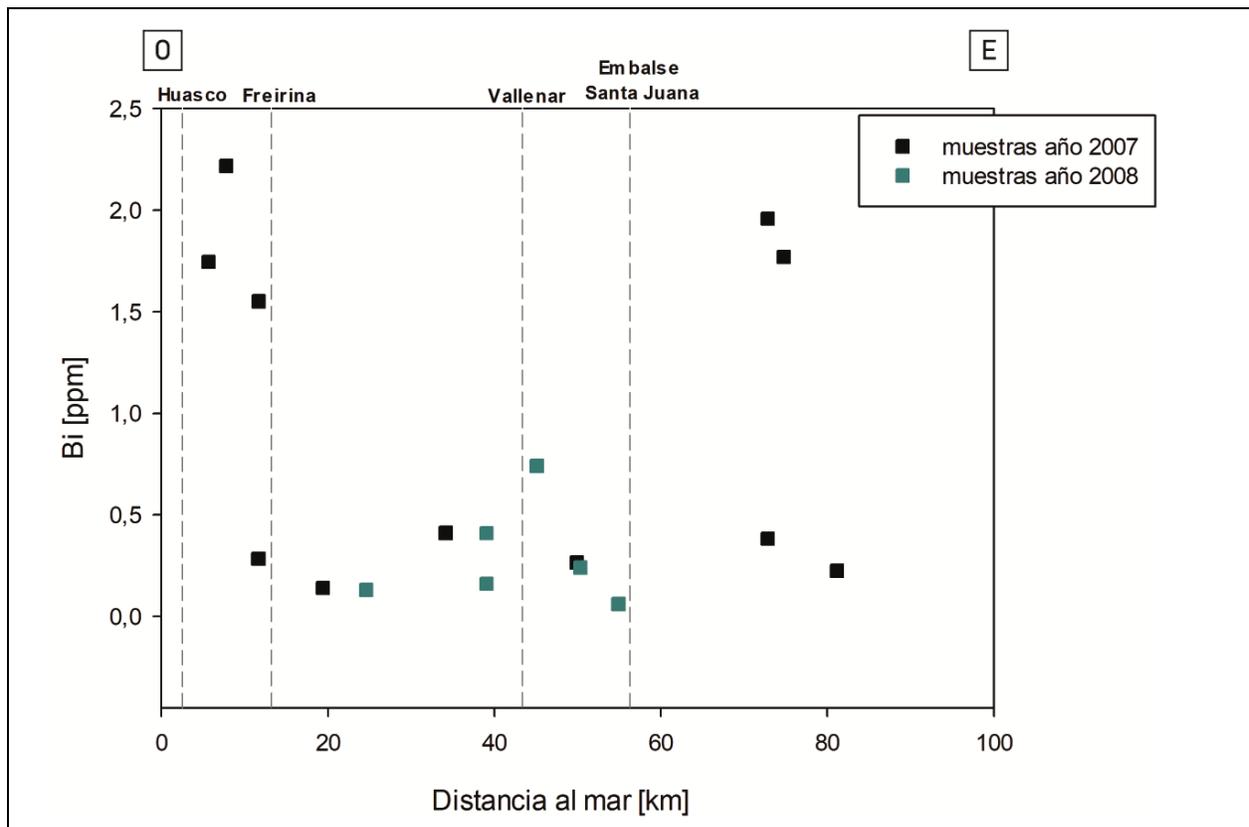


Figura 5.45. Perfil O-E concentraciones de Bi en sedimentos activos.

La figura 5.46 muestra el perfil O-E de concentraciones de Th en aguas superficiales. Para 2007 se observa que las concentraciones aumentan desde el este hacia el oeste, hasta el km 76, donde se alcanza el valor máximo (25,6 ppm) y ocurre un cambio en el signo de la pendiente, por lo que las concentraciones comienzan a disminuir aguas abajo hasta el km 20 donde alcanzan el mínimo (2 ppm). A partir del punto anterior, las concentraciones aumentan hacia Freirina, incluso a valores cercanos al máximo, que disminuyen hacia la desembocadura. Para el 2008 se complejiza la descripción dado que ocurren muchos cambios y el signo pendiente cambia en todos los puntos; se puede mencionar que el valor máximo (8,2 ppm) se encuentra en el km 39 y el mínimo (0,6 ppm) en el km 55.

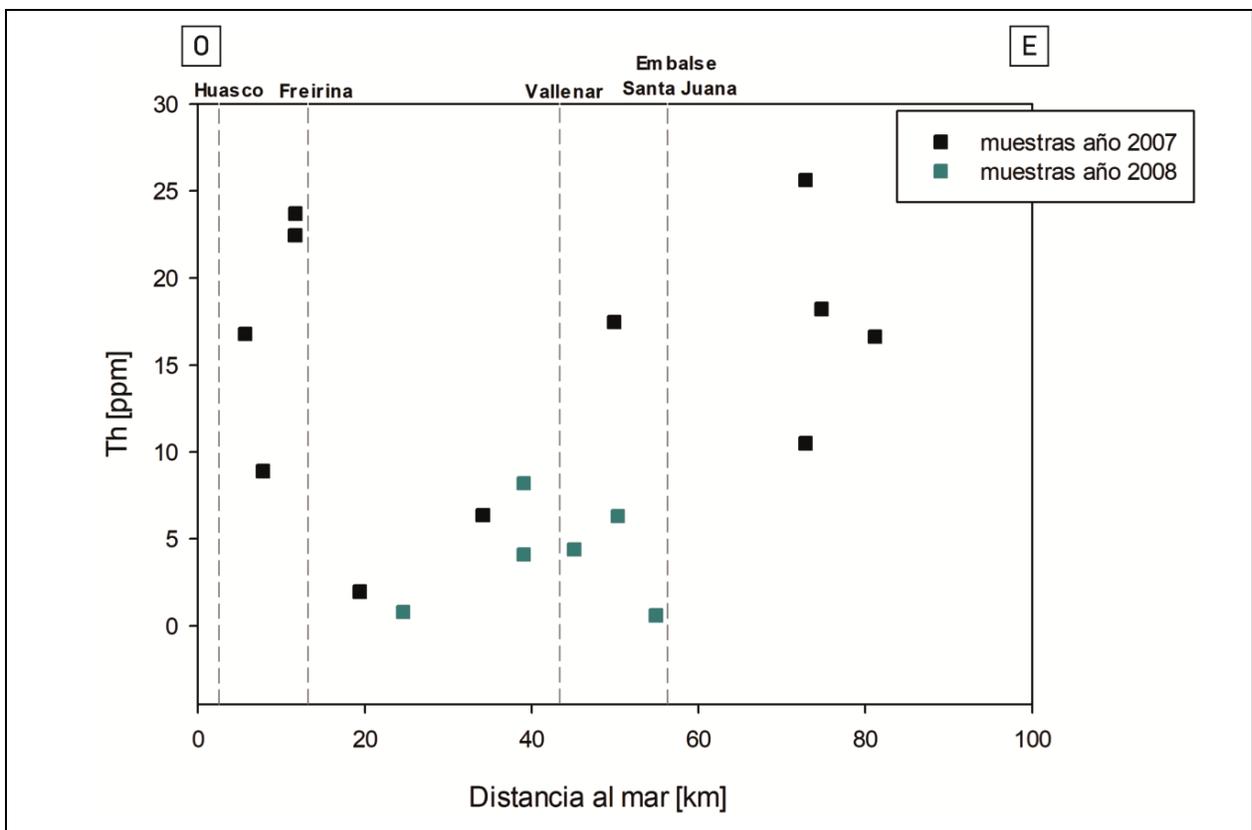


Figura 5.46. Perfil O-E concentraciones de Th en sedimentos activos.

En la figura 5.47 se perfilan las concentraciones de Zn en sedimentos activos. En ella se puede observar que las concentraciones en 2007 aumentan desde el este en dirección al oeste, desde el km 84 hasta el km 72 donde se alcanza el valor máximo (567,4 ppm) y ocurre un cambio del signo de la pendiente, por lo que las concentraciones disminuyen en valor hacia el oeste hasta alcanzar el mínimo (24,6 ppm) en el km 20. A partir del km 20 las concentraciones aumentan hacia la desembocadura. En 2008 se podría decir a modo general que a partir de los 50 km hacia el oeste las concentraciones disminuyen hasta el mínimo (36,2 ppm) en el km 24.

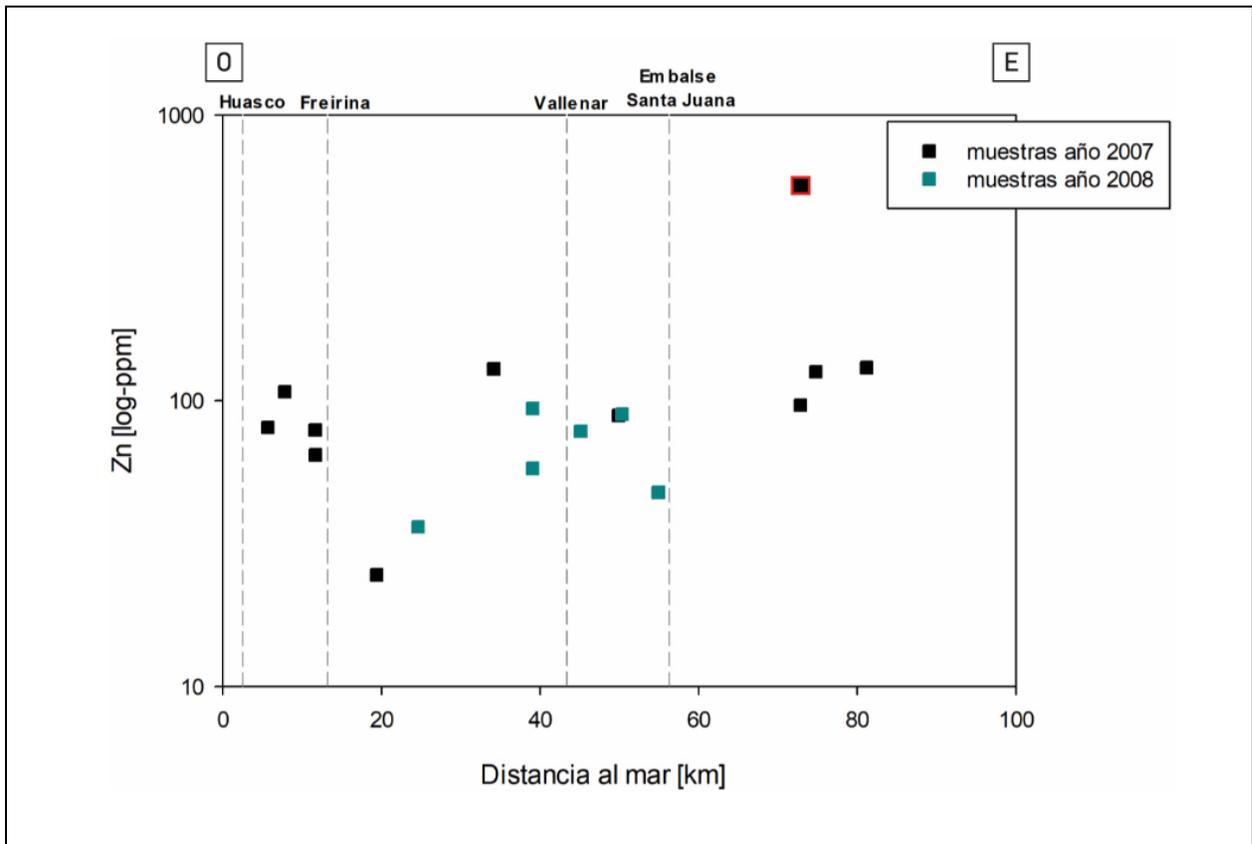


Figura 5.47. Perfil O-E concentraciones de Zn en sedimentos activos. . La muestra indicada en borde rojo y mayor tamaño corresponde a un valor anómalo, según lo presentado en la tabla 5.4.

En el perfil O-E de concentraciones de Ge en sedimentos activos (fig. 5.48) se tiene que para 2007 existe un aumento de las concentraciones desde el este hacia el km 72 donde se alcanza el máximo (1,55 ppm), ocurre un cambio en la pendiente y las concentraciones disminuyen su valor hacia el oeste, alcanzando el mínimo (0,17 ppm) en el km 20. Desde este punto hacia el oeste las concentraciones aumentan en la localidad de Freirina y se mantienen relativamente constantes hacia la desembocadura. En 2008 se observa patrón con pendiente cero, es decir que en todos los puntos donde se tomaron muestras la concentración de Ge es 0,1 ppm. Cabe mencionar que este valor fue efectivamente medido y no corresponden a muestras bajo el DL.

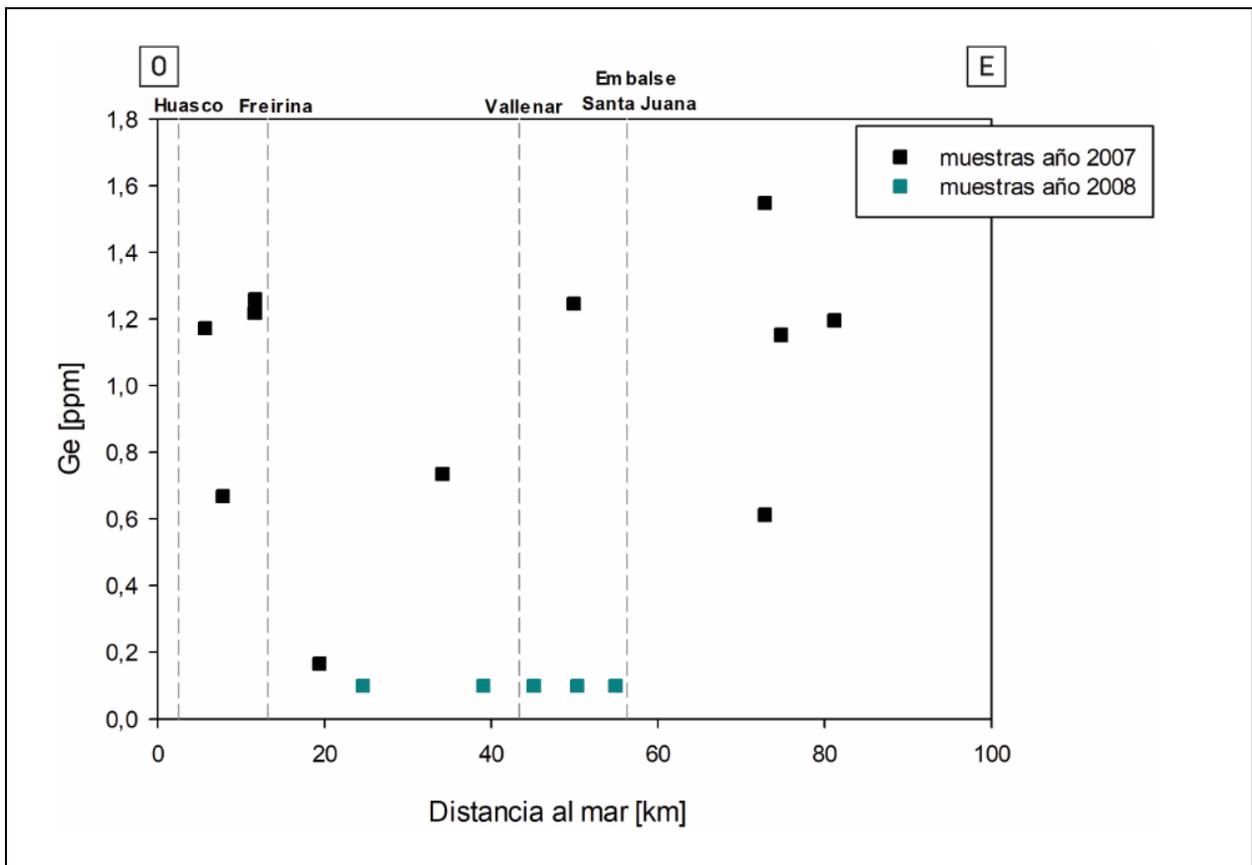


Figura 5.48. Perfil O-E concentraciones de Ge en sedimentos activos.

El perfil O-E de concentraciones de Cs en sedimentos activos (fig. 5.49) muestra en 2007 un aumento de los valores hacia el oeste hasta el km 72 donde se alcanza el valor máximo (5,9 ppm), punto a partir del cual las concentraciones disminuyen en dirección al oeste hasta alcanzar el valor mínimo (0,4 ppm) en el km 20. Desde el km 20 hacia el oeste las concentraciones aumentan en la zona de Freirina, y se mantienen relativamente constantes hacia la desembocadura. Para 2008 se observa el valor mínimo (0,8 ppm) en la muestra más cercana al embalse y a partir del cual las concentraciones aumentan hacia el oeste, entre los km 50 y 40 las concentraciones se mantienen relativamente constantes (entre 1,7 y 2,2 ppm siendo este último el valor máximo). Desde el km 40 hacia el oeste las concentraciones de cesio disminuyen.

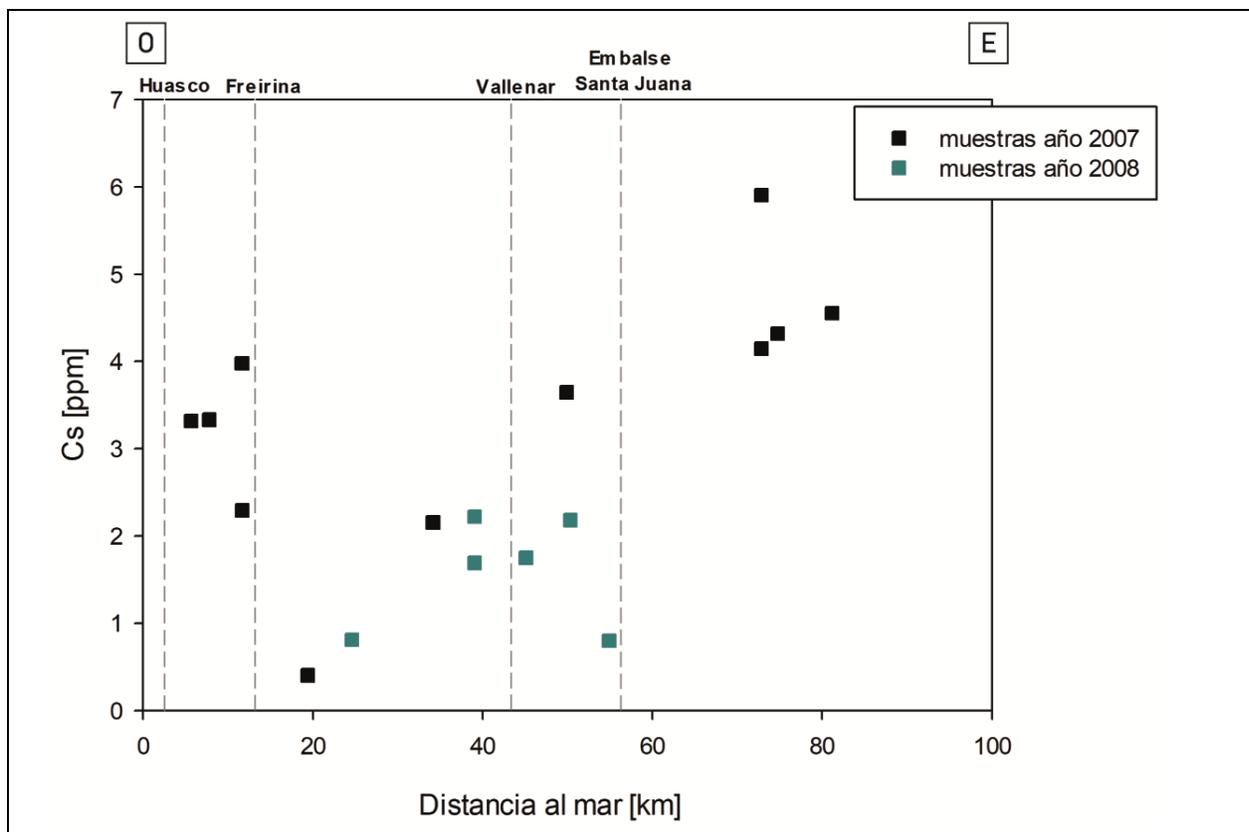


Figura 5.49. Perfil O-E concentraciones de Cs en sedimentos activos.

La figura 5.50 presenta el perfil O-E de concentraciones de Ba en sedimentos activos. En ella se observa que en 2007 las concentraciones aumentan desde el km 84 hacia el oeste, hasta el km 72, donde se registra el valor máximo (583 ppm) y cambia el signo de la pendiente, por lo que las concentraciones disminuyen hacia el oeste hasta el km 20 donde alcanzan el mínimo (76,5 ppm). A partir del punto anteriormente mencionado las concentraciones aumentan aguas abajo hasta Freirina y disminuyen desde hacia el oeste de dicha localidad. En 2008 las concentraciones disminuyen desde la primera muestra más cercana al embalse que marca el valor máximo (141,8 ppm) hacia el oeste, y si bien el valor mínimo (62 ppm) se encuentra en el km 40, las concentraciones de las muestras más próximas tanto por el este como el oeste tienen valores cercanos a dicho número.

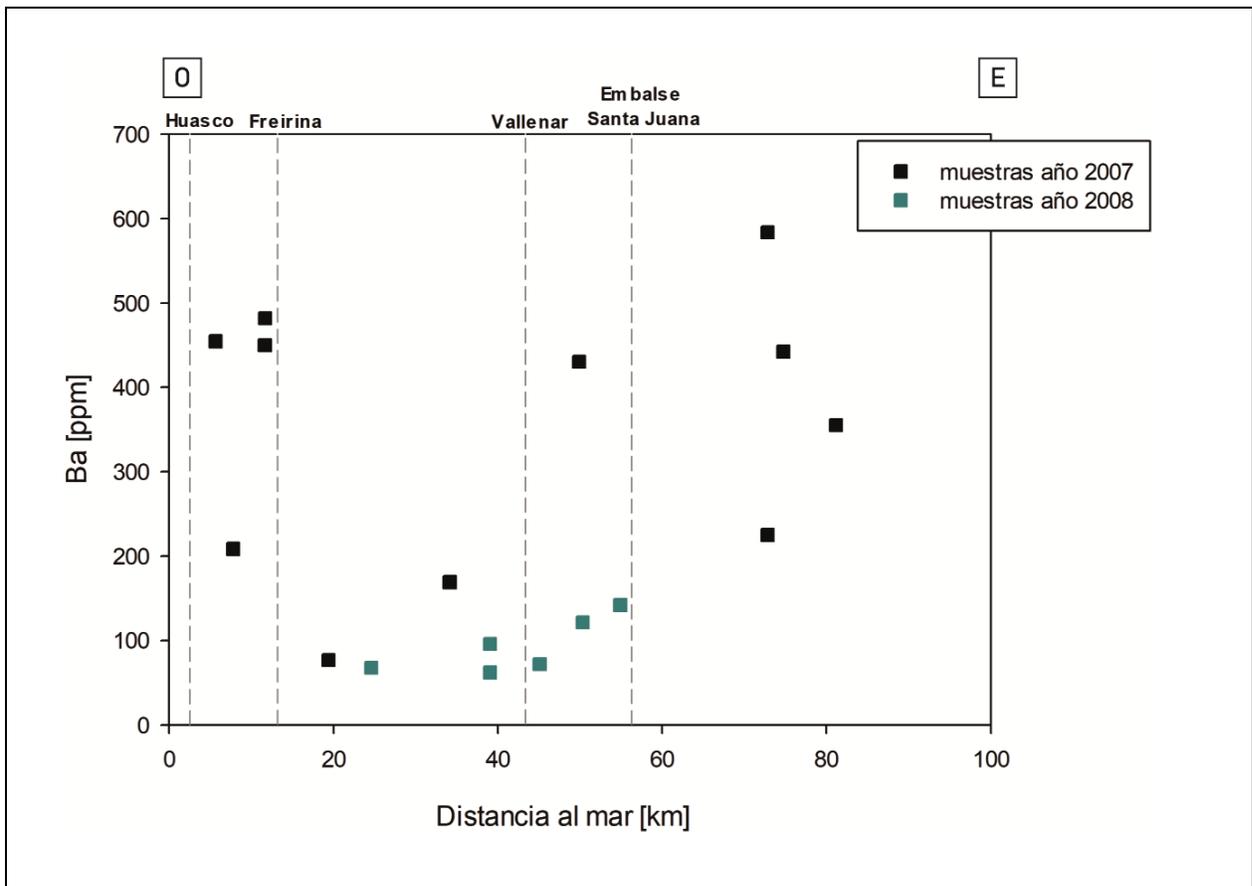


Figura 5.50. Perfil O-E concentraciones de Ba en sedimentos activos.

En la figura 5.51 se presenta el perfil O-E de concentraciones de Pb en sedimentos activos. Para 2007 se puede observar que las concentraciones aumentan desde la muestra más oriental hacia el oeste, llegando al valor máximo (27,5 ppm) en los 72 km, donde cambia el signo de la pendiente y las concentraciones disminuyen en dirección al oeste hasta el km 20, donde alcanzan el valor mínimo (1,2 ppm) y a partir del cual las concentraciones comienzan a aumentar en dirección oeste hacia Freirina, donde se ve que los valores son más cercanos entre si (aproximadamente 11-15 ppm) hacia el mar. En 2008 se observa un aumento abrupto de las concentraciones desde el valor mínimo (4,23 ppm) en el km 55 al máximo (54 ppm) en el km 50, punto a partir del cual las concentraciones comienzan a disminuir hacia el oeste.

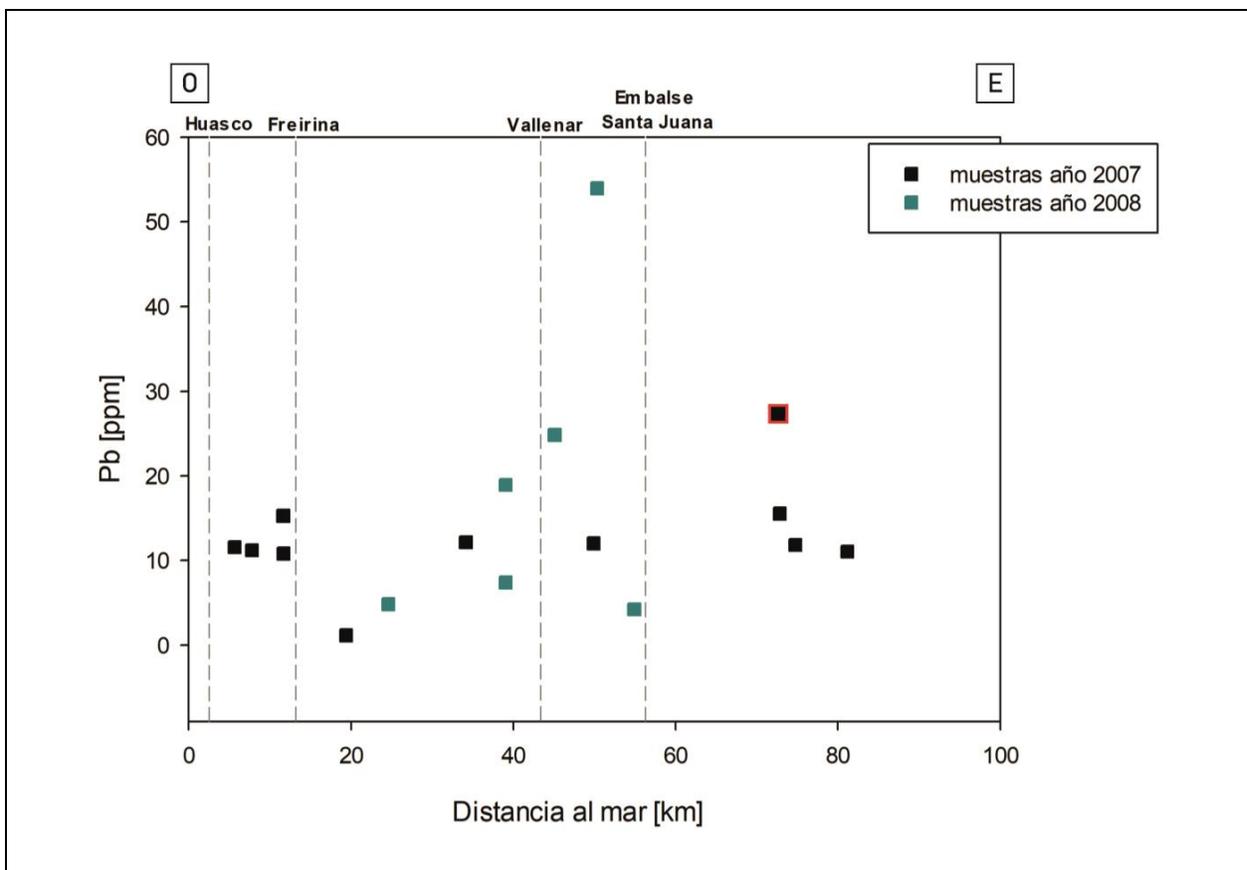


Figura 5.51. Perfil O-E concentraciones de Pb en sedimentos activos. La muestra indicada en borde rojo y mayor tamaño corresponde a un valor anómalo, según lo presentado en la tabla 5.4.

La figura 5.52 muestra el perfil O-E de concentraciones de Cd en sedimentos activos. Para 2007 se observa que las concentraciones aumentan desde el km 84 hacia el oeste hasta el peak ubicado en el km 72, donde se alcanza el valor máximo (3,3 ppm) y las concentraciones disminuyen hasta el valor mínimo (0,05 ppm) en el km 20. A partir de la muestra señalada anteriormente, los valores aumentan hacia el oeste, hacia la zona de Freirina y disminuyen levemente desde esta localidad en la misma dirección. De forma más generalizada se puede decir que las concentraciones disminuyen desde el este hacia el oeste. En cuanto a lo que se observa en 2008 las concentraciones disminuyen desde el máximo (0,84 ppm) ubicado en cercanías del embalse Santa Juana, en dirección aguas abajo hasta el km 40 donde alcanzan el valor mínimo (0,16 ppm). La muestra más al oeste de este año muestra un leve aumento en las concentraciones en esa dirección, sin embargo, la tendencia general es con un aumento de las concentraciones a medida que las muestras se alejan del océano.

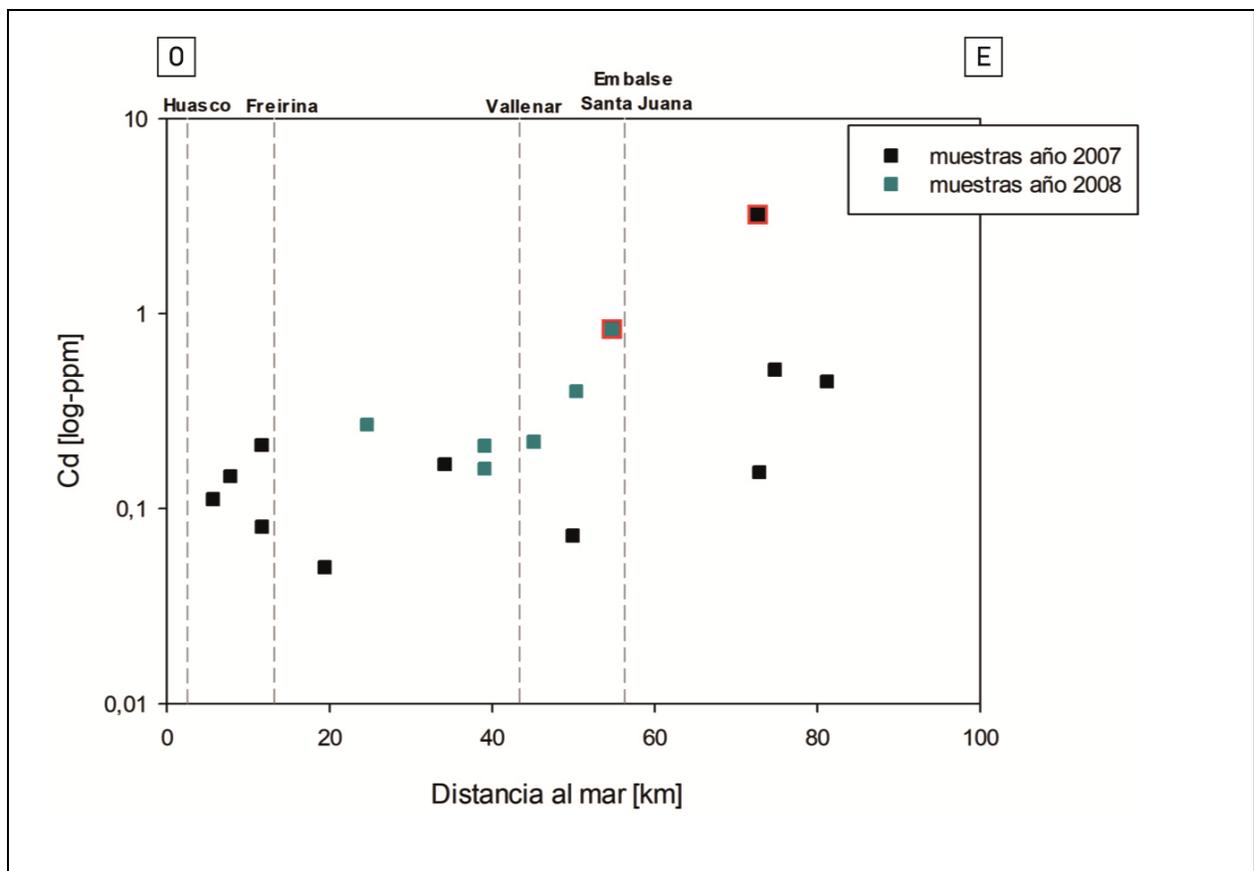


Figura 5.52. Perfil O-E concentraciones de Cd en sedimentos activos. Las muestras indicadas en borde rojo y mayor tamaño corresponden a valores anómalos, según lo presentado en la tabla 5.4.

El perfil O-E de concentraciones de Ni en sedimentos activos (fig. 5.53) muestra que en ambos años hay una tendencia general en la que las concentraciones disminuyen desde el este en dirección aguas abajo hacia el océano. En 2007 se observa que los valores más elevados se encuentran en la parte alta del valle, al este del embalse Santa Juana, con un valor máximo (37,4 ppm) en el km 72 que marca el cambio en el signo de la pendiente, que implica que los valores comienzan a disminuir hacia el mar llegando al valor mínimo (9,7 ppm) en el km 20. Alcanzado el valor mínimo, las concentraciones aumentan en la localidad de Freirina, punto a partir del cual las concentraciones disminuyen hacia el mar. En 2008 se observa un aumento de las concentraciones desde la primera muestra al oeste del embalse en la misma dirección. En el km 50, las concentraciones de níquel alcanzan el valor máximo (20 ppm) y los valores disminuyen hacia la desembocadura, llegando al valor mínimo (3,8 ppm) en la muestra más cercana a esta.

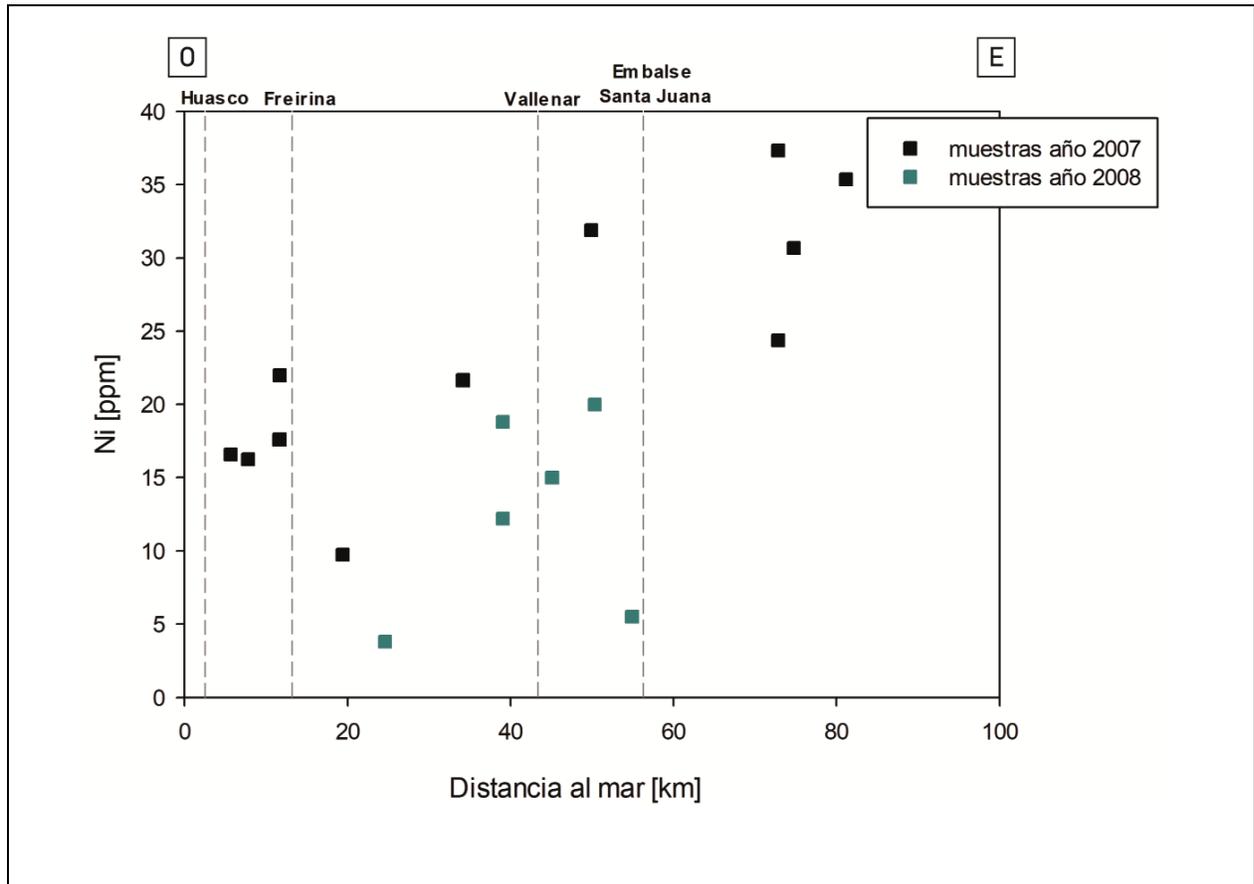


Figura 5.53. Perfil O-E concentraciones de Ni en sedimentos activos.

En la figura 5.54 se observa el perfil O-E de concentraciones de Cu en sedimentos activos. Para 2007 se tiene que las concentraciones aumentan desde el km 84 en dirección al oeste, con un quiebre en la pendiente en el km 72. Al oeste del embalse Santa Juana, las concentraciones aumentan en la misma dirección, hasta alcanzar su valor máximo: en la localidad de Vallenar para el caso de las muestras de 2008 (138 ppm), y en el km 35 para las de 2007 (255 ppm). Hacia el oeste de estos valores peak, las concentraciones disminuyen, de forma más moderada en 2008, y de manera más abrupta en 2007. Desde el km 20 en dirección al mar, las concentraciones de cobre medidas en los sedimentos muestreados en 2007 aumentan.

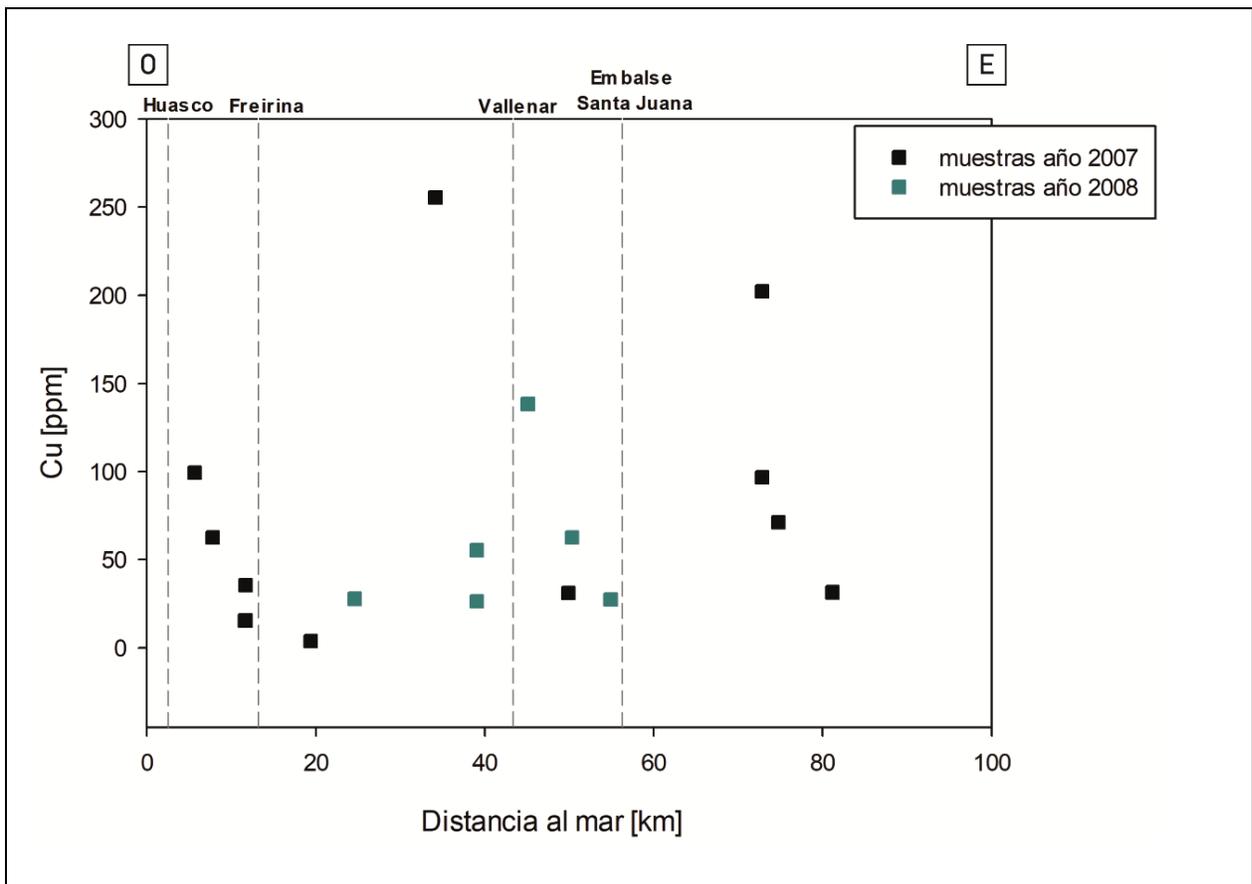


Figura 5.54. Perfil O-E concentraciones de Cu en sedimentos activos.

A continuación, se presentan los perfiles para los elementos Sr, U y Mo, en los cuales no se observa esta característica común.

En el perfil O-E de concentraciones de Sr en sedimentos activos (fig. 5.55) se tiene que para 2007 que estas aumentan desde el km 84 hacia el oeste, hasta el km 72 donde ocurre un cambio en el signo de la pendiente y los valores disminuyen hasta el km 35. En el km 20 observa un cambio abrupto hacia el oeste con respecto al punto anterior, donde el estroncio alcanza su concentración máxima (421 ppm). Avanzando aguas abajo de la localidad de Freirina las concentraciones llegan al mínimo (161 ppm), lo que conlleva a un cambio de pendiente con un aumento de las concentraciones desde dicho punto hacia la costa. En 2008 se observa que las concentraciones disminuyen hacia el oeste aguas abajo del embalse Santa Juana, alcanzando su valor mínimo (73 ppm), lo que implica un cambio en el signo de la pendiente y un aumento de las concentraciones hacia el oeste, hasta alcanzar su valor máximo (440 ppm) en el km 24.

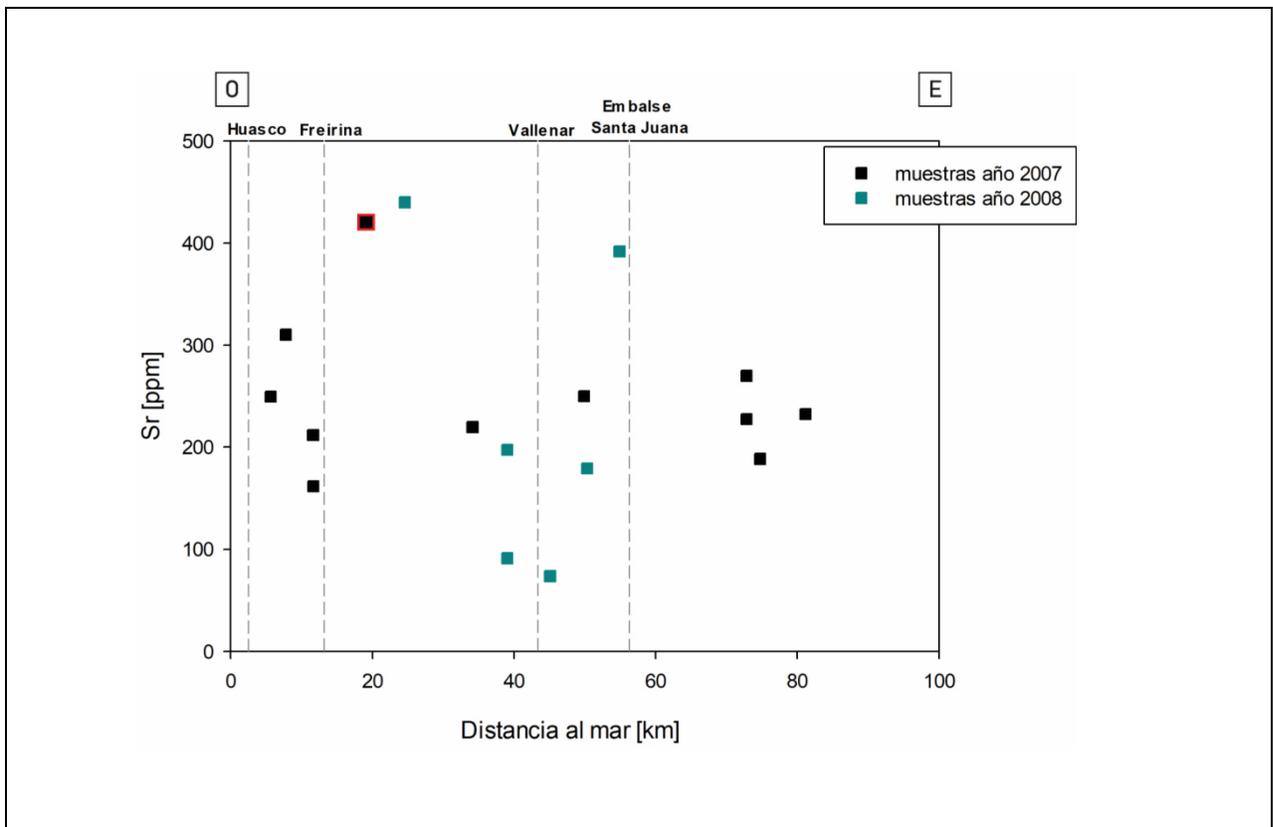


Figura 5.55. Perfil O-E concentraciones de Sr en sedimentos activos. . La muestra indicada en borde rojo y mayor tamaño corresponde a un valor anómalo, según lo presentado en la tabla 5.4.

En la figura 5.56 se presenta el perfil O-E de concentraciones de U en sedimentos activos. En cuanto a las concentraciones medidas en 2007 se puede observar que estas aumentan desde el km 84 en dirección al oeste, alcanzando el valor máximo (8,5 ppm). Desde el embalse Santa Juana en dirección aguas abajo, las concentraciones de uranio aumentan en ambos años, hasta el km 24, donde las muestras 2008 alcanzan el valor máximo (3,4 ppm) y el km 20 en el caso de las muestras 2007, donde si bien no se alcanza el máximo, si se puede observar un peak, a partir del cual las concentraciones disminuyen en dirección al océano, hasta el valor mínimo (1,7 ppm) en la muestra más cercana a la costa.

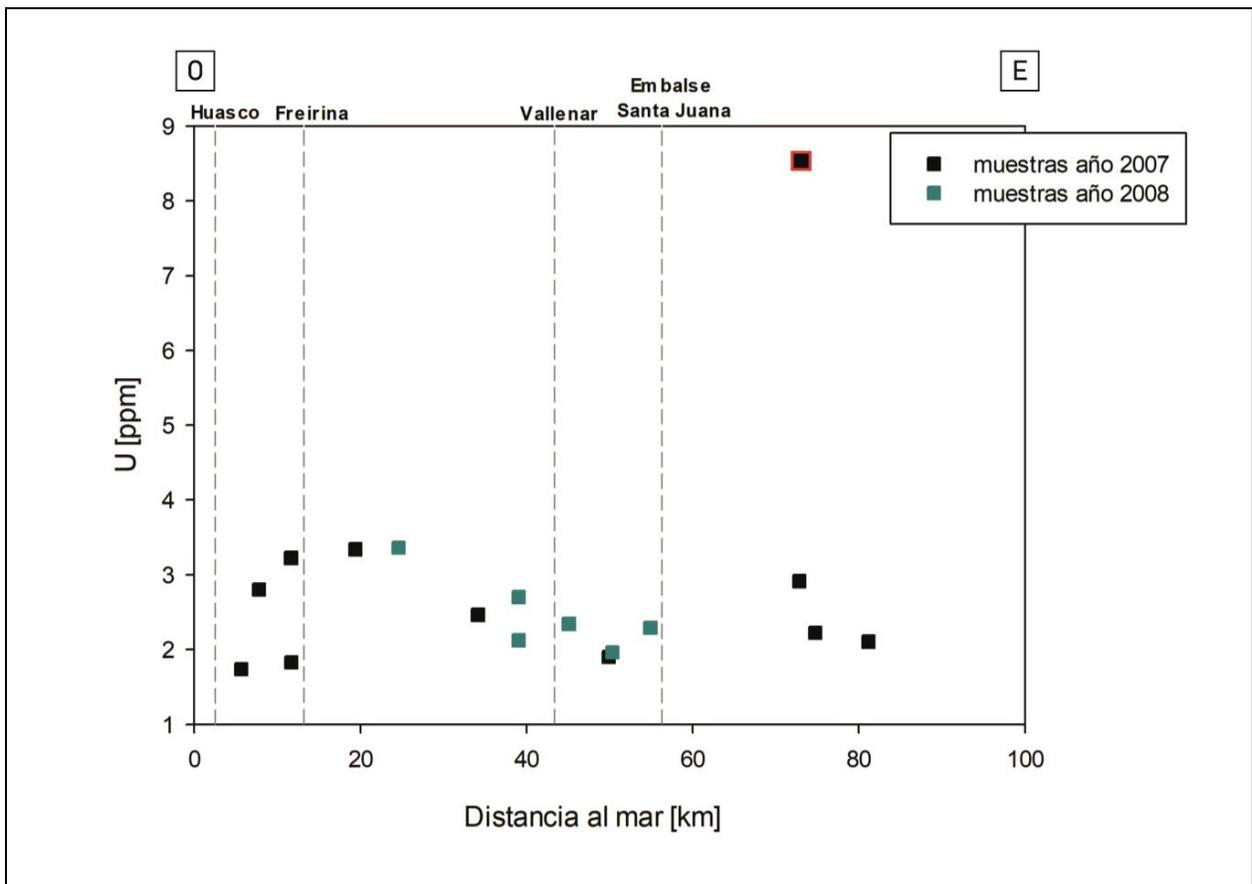


Figura 5.56. Perfil O-E concentraciones de U en sedimentos activos. La muestra indicada en borde rojo y mayor tamaño corresponde a un valor anómalo, según lo presentado en la tabla 5.4.

El perfil O-E de concentraciones de Mo en sedimentos activos (fig. 5.57) muestra en 2007 una disminución de las concentraciones desde el km 84 hasta el 72, en donde una de las dos muestras tomadas en ese punto alcanza el valor máximo (6 ppm). Al oeste del embalse Santa Juana, las concentraciones de aumentan en dirección aguas abajo hasta alcanzar un peak; en el caso de las muestras de 2008 este corresponde al valor máximo (1,8 ppm) y se alcanza al este de Vallenar, en el caso de las muestras de 2007 se alcanza a los 35 km. A partir del peak anterior, las concentraciones disminuyen en dirección aguas abajo.

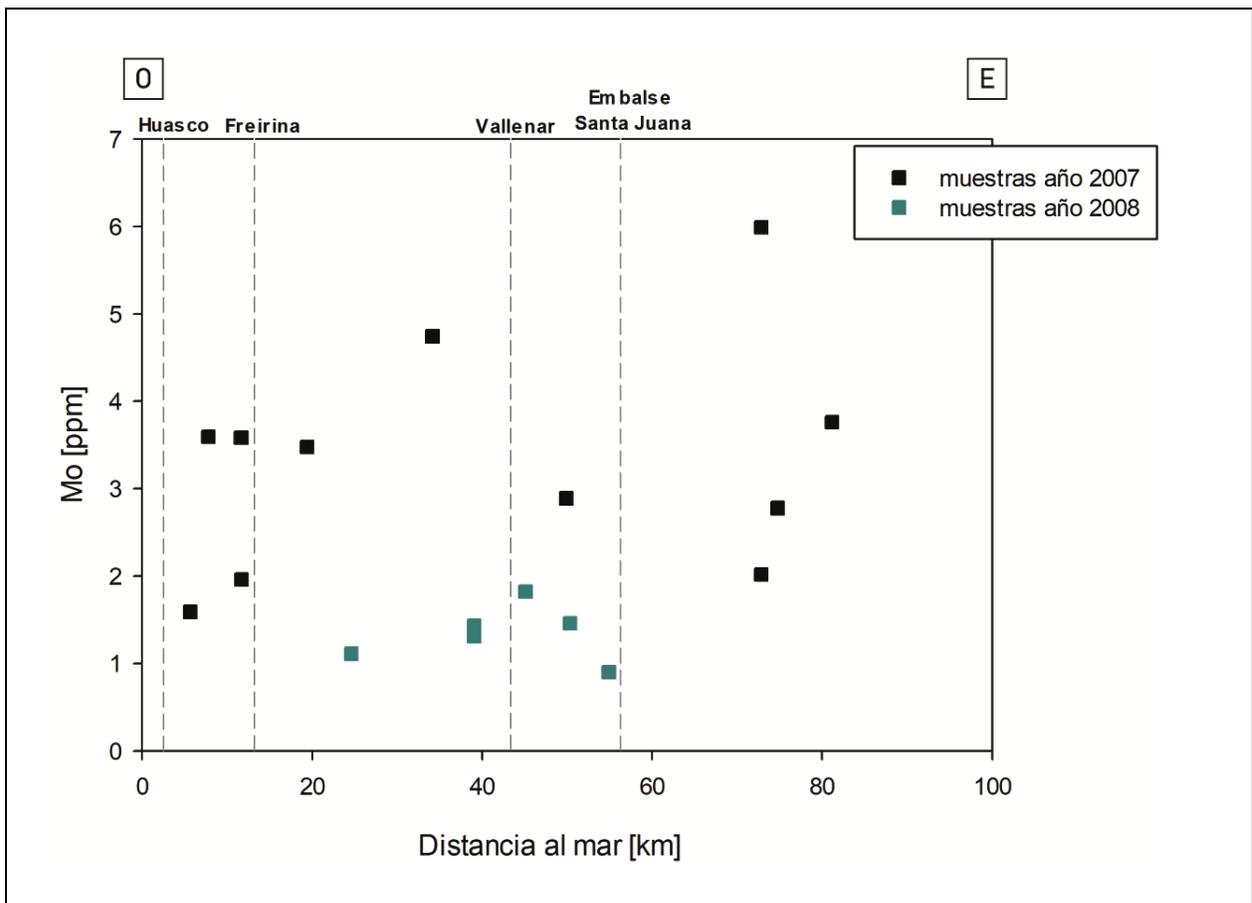


Figura 5.57. Perfil O-E concentraciones de Mo en sedimentos activos.

5.2. Estadística Multivariable

5.2.1. Análisis de componentes principales (ACP)

Las figuras 5.58 y 5.59 muestran los resultados obtenidos para el ACP realizado en aguas superficiales y sedimentos activos respectivamente. Este análisis se llevo a cabo utilizando el lenguaje de programación R. Cabe mencionar que los valores utilizados en este análisis corresponden a valores transformados a *ilr*, los cuales se encuentran en el anexo número II.

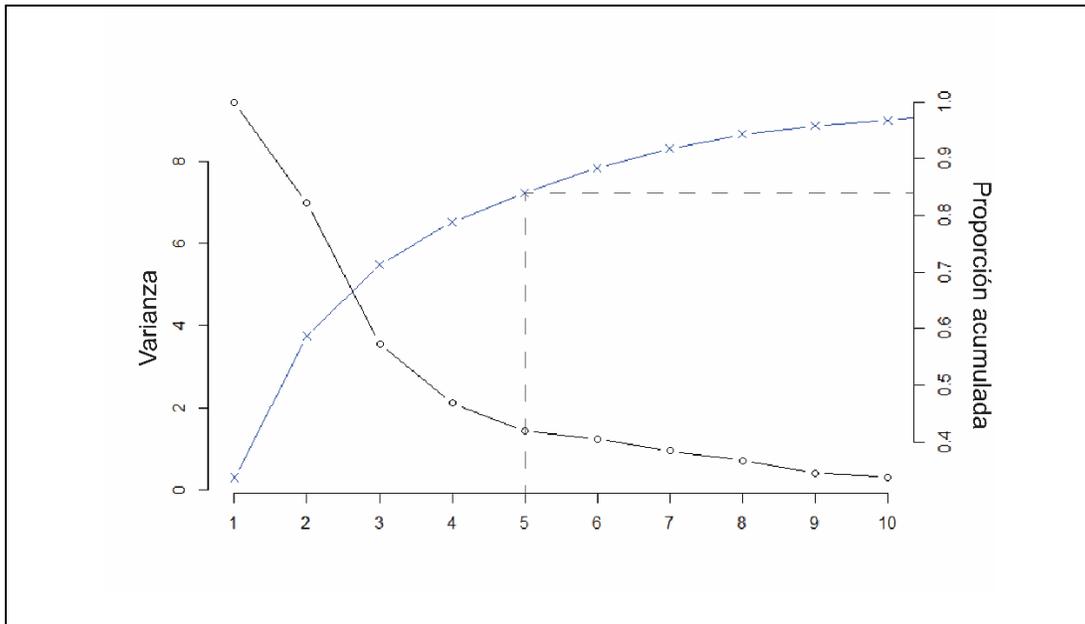


Figura 5.58. Análisis de Componentes Principales para muestras de agua superficial.

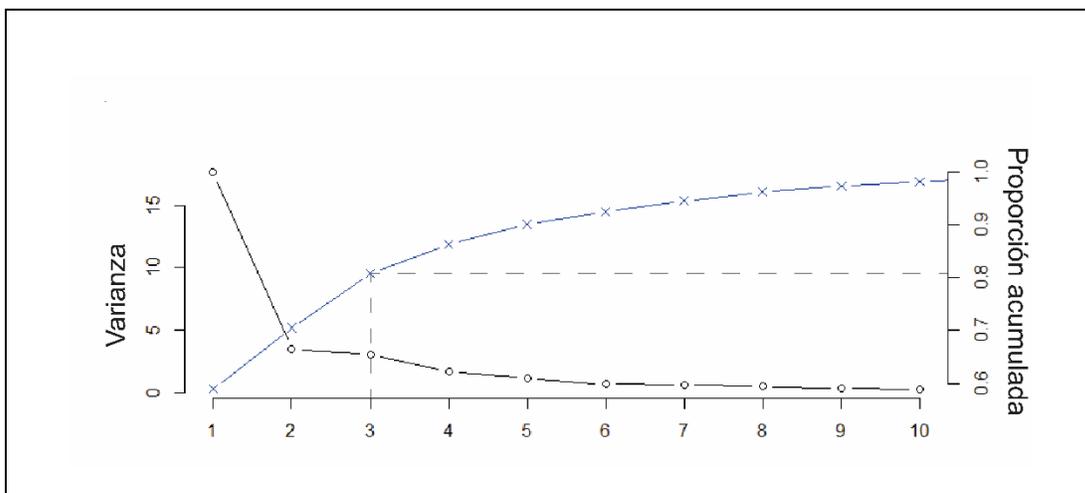


Figura 5.9. Análisis de Componentes Principales para muestras de sedimentos activos.

De la figura 5.58 se desprende que el número de componentes que explican sobre un 80% de la variabilidad de los datos de aguas superficiales es de 5. De forma análoga, de la figura 5.59 se infiere que el número de componentes principales que explican la mayor variabilidad de los datos de sedimentos activos es de 3.

5.2.2. Análisis Factorial

Los análisis factoriales para ambas matrices fueron realizados con el lenguaje de programación R, a partir de los datos transformados, resultando en una tabla con cada componente y los pesos estandarizados de cada elemento en la componente. Ambas tablas se encuentran en el Anexo II. La figura 5.60 resume los resultados obtenidos en aguas superficiales. Cabe mencionar que en ella sólo se resumen los elementos con pesos estandarizados iguales o mayores a 0,5 o iguales o menores a -0,5.

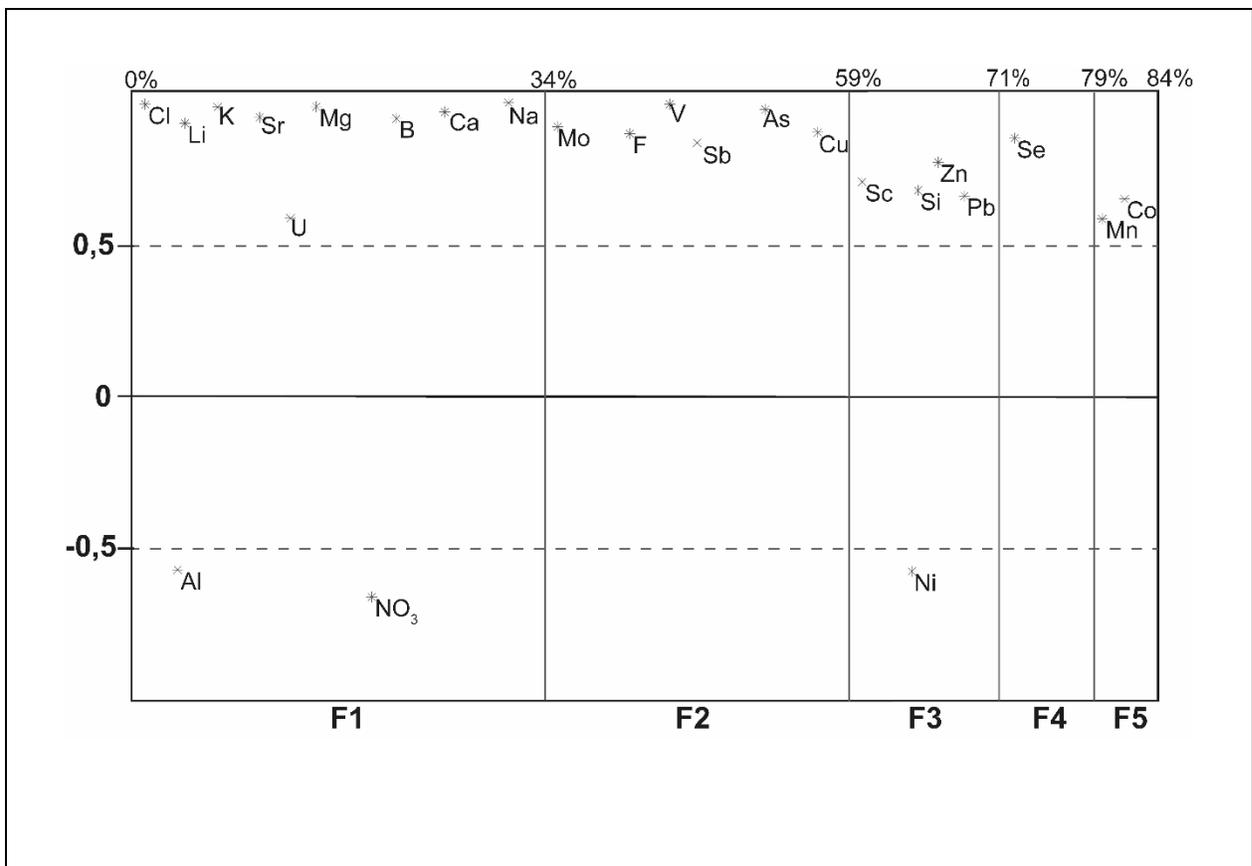


Figura 5.60. Resumen Análisis Factorial en aguas superficiales

En la figura 5.60, que expone el análisis factorial realizado a las muestras de agua, se observan 5 factores que explican el 81% de la variabilidad del set de datos. Los factores se componen de las siguientes asociaciones elementales:

El primer factor (F1), representa un 34% de la variabilidad de los datos y se compone de una señal principal dada por Mg, Na, K, Cl, Ca, Sr, B, Li, U y de forma inversa Al y NO₃.

El segundo factor (F2), que representa un 25% de la variabilidad, contiene una asociación principal de V, As, Cu, Sb, Mo y F.

El tercer factor (F3) representa un 12% de la variabilidad del set de muestras y está definido por una asociación principal de Zn, Sc, Si, Pb y Ni de manera inversa.

El factor 4 (F4) representa un 8% de la variabilidad de la base de datos, y se compone de una señal de Se.

El quinto factor (F5) representa un 5% de la variabilidad del set de datos, y se compone de una señal de Mn y Co.

La figura 5.61 resume los resultados obtenidos en el AF aplicado a sedimentos activos.

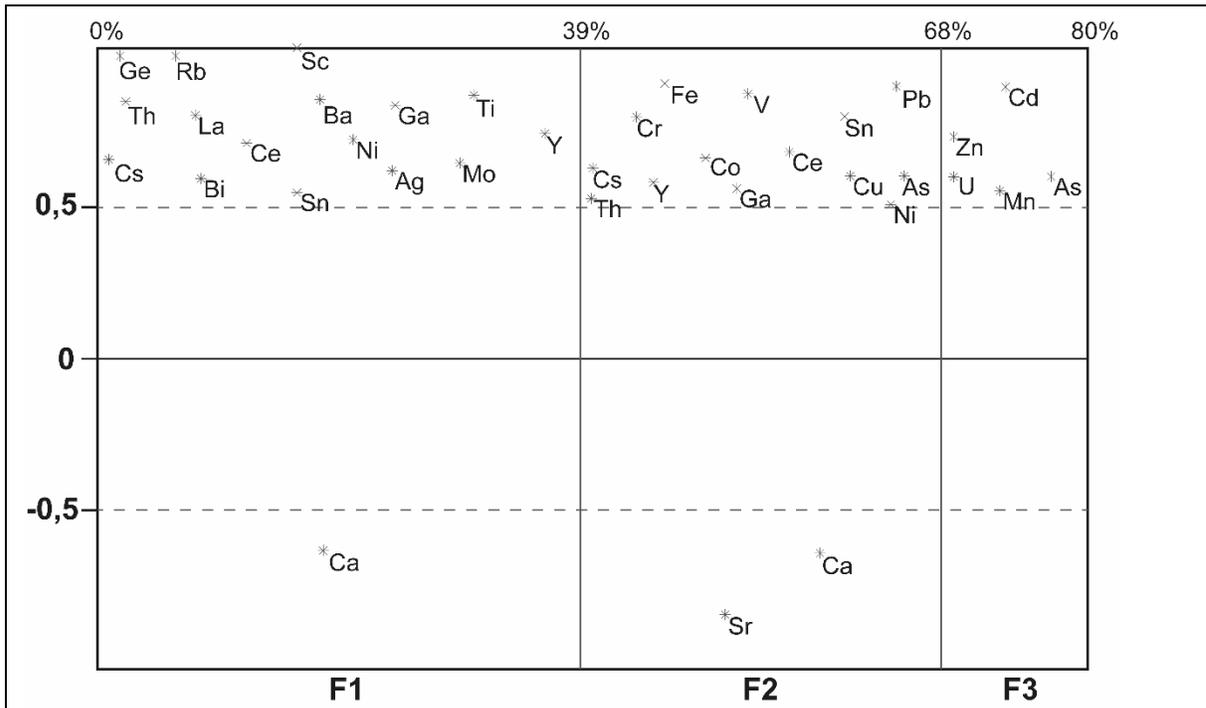


Figura 5.61. Resumen Análisis Factorial en sedimentos activos.

En la figura 5.61, que explica el análisis factorial realizado a los sedimentos se observan 3 factores, que explican el 80% de la variabilidad del set de datos, contiene las siguientes asociaciones:

El factor n° 1 (F1) representa el 39% por ciento de la variabilidad de la base de datos y tiene como principal asociación a los elementos Sc, Ge, Rb, Th, La, Ba, Ga, Ti, Cs, Ce, Ni, Ga, Y, Bi, Sn, Ag, Mo y de manera inversa Ca.

El factor n° 2 (F2) representa un 29% de la variabilidad de los datos, con asociación principal Fe, V, Pb, Cr, Sn, Co, Ce, Cs, Th, Y, Ga, Cu, As, Ni. Y de manera inversa se presentan Sr y Ca.

El factor n°3 (F3) representa un 12% de la variabilidad del set, y tiene por asociación Cd, Zn, U, As y Mn.

5.3. Factor de enriquecimiento.

En la figura 5.62. se muestran los factores de enriquecimiento calculados para las muestras de aguas superficiales. Para este cálculo se utilizó el compilado de Gaillardet *et al.* (2003), utilizando como elemento conservativo el Sc.

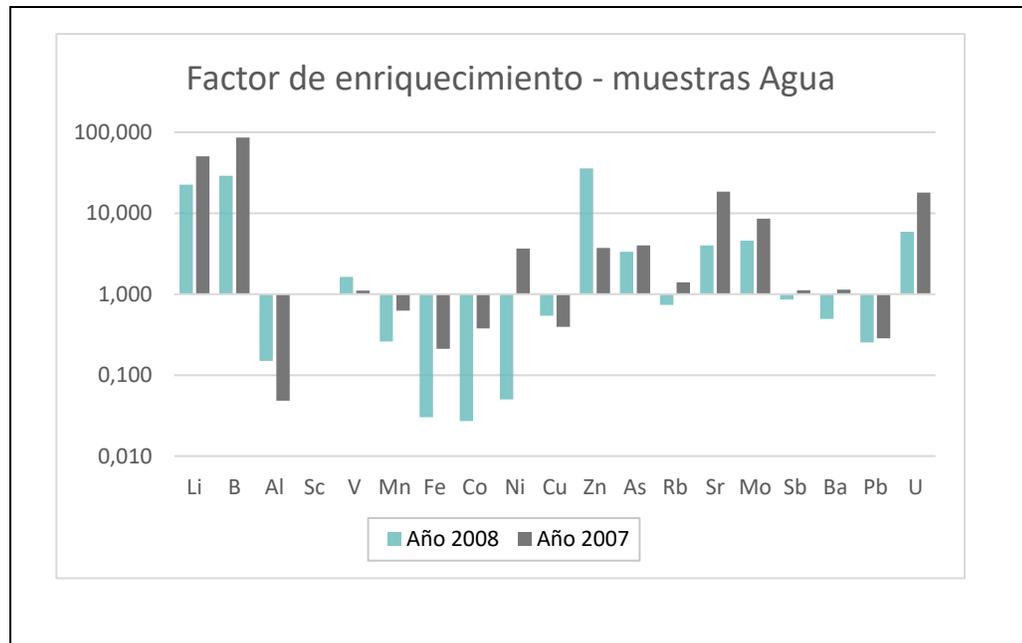


Figura 5.62. Factor de enriquecimiento para muestras de agua. Elaborada en Excel.

La tabla 5.5. resume los posibles componentes que pudiesen estar afectando en las fuentes de proveniencia de los elementos.

Tabla 5.5. Resumen del factor de enriquecimiento muestras de aguas superficiales.

Rango	Origen	
FE < 1	Natural	Al, Mn, Fe, Co, Ni ₍₂₀₀₈₎ , Cu, Rb ₍₂₀₀₈₎ , Sb ₍₂₀₀₈₎ , Ba ₍₂₀₀₈₎ , Pb
1 > FE	Fuentes con contribución Antropogénica importante.	Li, B, V, Ni ₍₂₀₀₇₎ , Zn, As, Rb ₍₂₀₀₇₎ , Sr, Mo, Sb ₍₂₀₀₇₎ , Ba ₍₂₀₀₇₎ , U.

En la figura 5.63 se muestran los factores de enriquecimiento obtenidos para las muestras de sedimentos. Este fue calculado por Gutiérrez (2021) en base al elemento conservativo Sc, y tomando como niveles de referencia el compilado de Taylor & Mc Lennan, 2009. Cabe

mencionar también que Gutiérrez calculó el FE para elementos de su interés, y no abarca todos los elementos de la base de datos presentada.

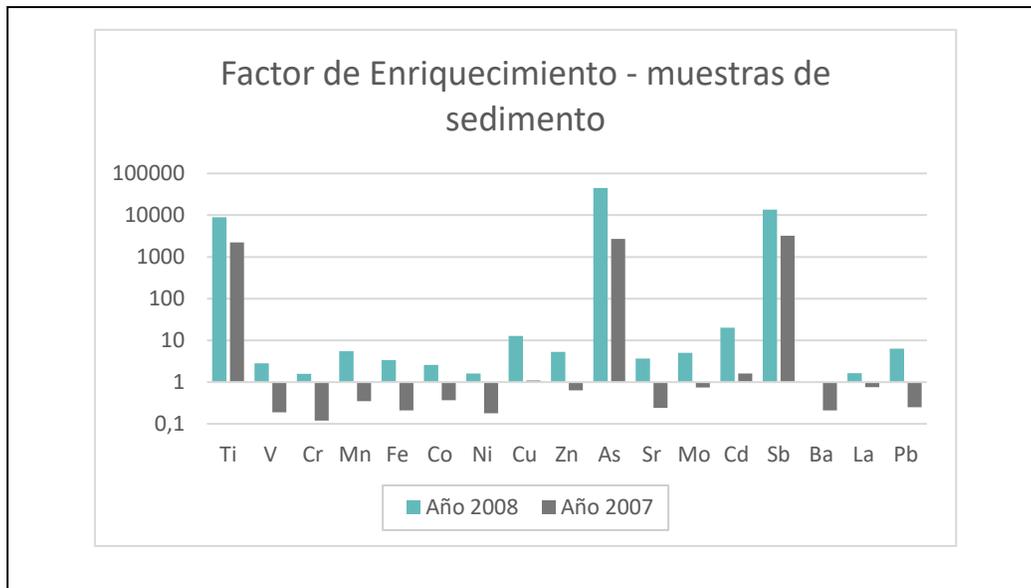


Figura 5.63. Factor de enriquecimiento para sedimentos activos. Elaborada en Excel a partir de los cálculos de Gutiérrez (2021).

La tabla 5.6, elaborada a partir de la figura, resume las posibles componentes que pudiesen estar actuando en el origen de los elementos.

Tabla 5.6. Resumen del factor de enriquecimiento muestras de sedimentos activos.

Rango	Origen	
FE < 1	Natural	V ₍₂₀₀₇₎ , Cr ₍₂₀₀₇₎ , Mn ₍₂₀₀₇₎ , Fe ₍₂₀₀₇₎ , Co ₍₂₀₀₇₎ , Ni ₍₂₀₀₇₎ , Zn ₍₂₀₀₇₎ , Sr ₍₂₀₀₇₎ , Mo ₍₂₀₀₇₎ , Ba ₍₂₀₀₇₎ , Pb ₍₂₀₀₇₎ .
1 > FE	Fuentes con contribución Antropogénica importante	Ti, V ₍₂₀₀₈₎ , Cr ₍₂₀₀₈₎ , Mn ₍₂₀₀₈₎ , Fe ₍₂₀₀₈₎ , Co ₍₂₀₀₈₎ , Ni ₍₂₀₀₈₎ , Cu, Zn ₍₂₀₀₈₎ , As, Sr ₍₂₀₀₈₎ , Mo ₍₂₀₀₈₎ , Cd, Sb, La ₍₂₀₀₈₎ , Pb ₍₂₀₀₈₎ .

5.4. Comparación con otras bases de datos

En esta sección se presentan gráficos similares a los perfiles oeste-este que contienen información de diferentes fuentes y temporalidades. El detalle de las fuentes, muestreos y procedimientos fue explicado en el capítulo 4. Para efectos del estudio comparativo en aguas superficiales fueron utilizadas solo las bases de datos compiladas de otras fuentes, ya que las metodologías para la toma de muestras de este trabajo (agua filtrada con filtro de 0,22 μm) difieren de la metodología utilizada por los informes compilados (agua sin filtrar). Esta diferencia en las metodologías afecta directamente a las concentraciones, dado que el agua filtrada representa la fracción de elementos disueltos en la misma, mientras que la sin filtrar representa a los elementos que se encuentran tanto disueltos como en partículas suspendidas.

5.4.1. Aguas superficiales

La figura 5.64 muestra el perfil comparativo para el As en aguas superficiales. Los datos DGA se muestran en dos períodos: 2007-2008, que corresponde al período de muestreo de este trabajo y 2015-2016 que corresponde al período de muestreo del informe de CENMA (2016). En el perfil se puede observar que en la parte alta del valle (desde Vallenar hacia el este) las concentraciones de este elemento son mayores en 2015-2016, no así en la parte baja, en particular en la estación más cercana al puerto de Huasco, donde las concentraciones 2007-2008 son superiores.

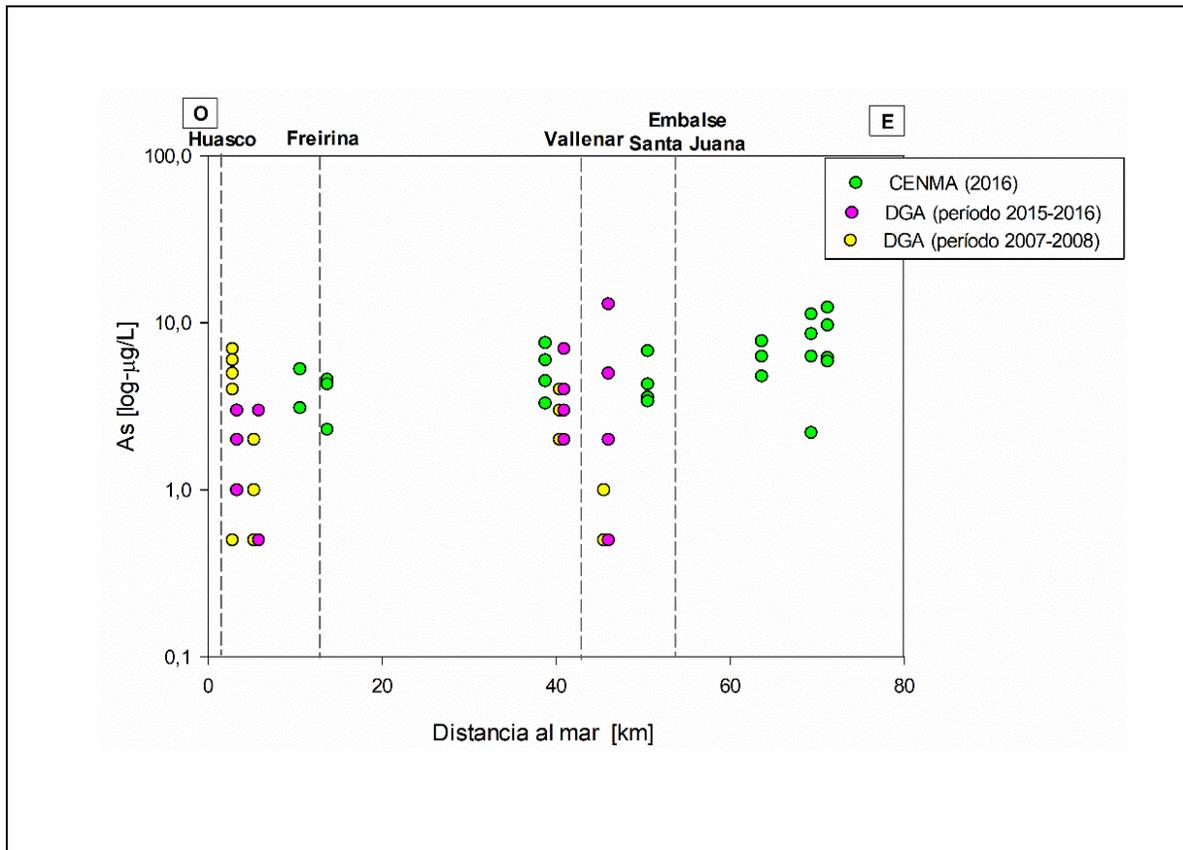


Figura 5.64. Perfil O-E comparativo concentraciones de As en aguas superficiales.

La figura 5.65 representa el perfil O-E comparativo para el cobre en aguas superficiales. En el caso de los datos de la DGA 2007-2008; se observa un rango de valores constante entre los 10 (DL dividido en dos) y 20 $\mu\text{g/L}$, a excepción de la estación más cercana al mar, donde se midieron 30 $\mu\text{g/L}$, en junio de 2007. Los datos de 2015 y 2016 son más elevados en la parte alta del valle, llegando a los 43 $\mu\text{g/L}$ en el caso de los datos de CENMA (2016), en una muestra tomada durante la campaña número 3 (abril de 2016) y a los 63 $\mu\text{g/L}$ medidos en junio de 2015 por la DGA. En el caso de los datos CENMA (2016) es posible observar una disminución de las concentraciones desde el este aguas abajo en dirección al oeste.

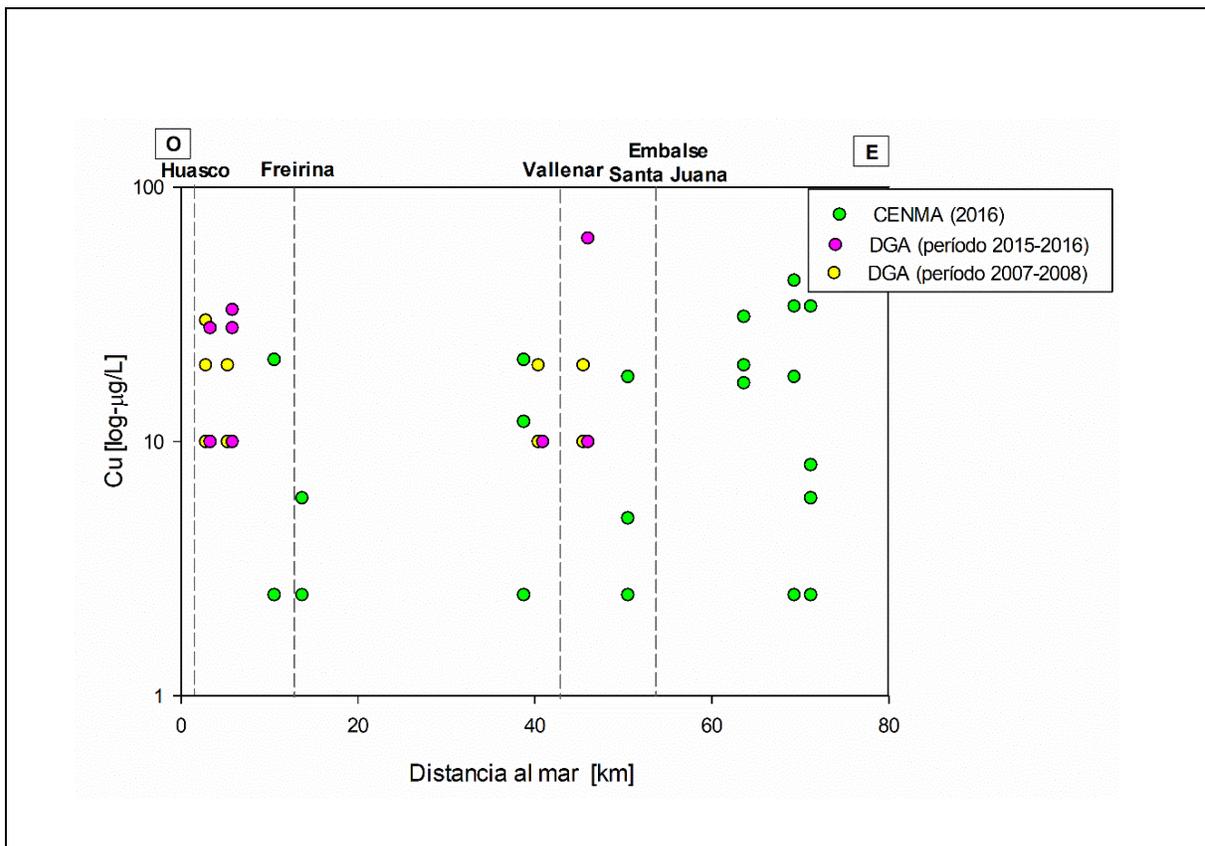


Figura 5.65 Perfil O-E comparativo concentraciones de Cu en aguas superficiales.

La figura 5.66 muestra el perfil O-E comparativo de concentraciones de Mn en aguas superficiales. Es notorio que las concentraciones de 2007-2008 son inferiores a las de 2015-2016 en prácticamente todas las estaciones a excepción de la estación más cercana a la costa. En la parte alta del valle, en particular al este del embalse Santa Juana, la variación de las concentraciones de manganeso entre 2007-2008 y 2015-2016 es de un orden de magnitud para la misma estación de la DGA, alcanzado el valor máximo (8723 $\mu\text{g/L}$) en junio de 2015.

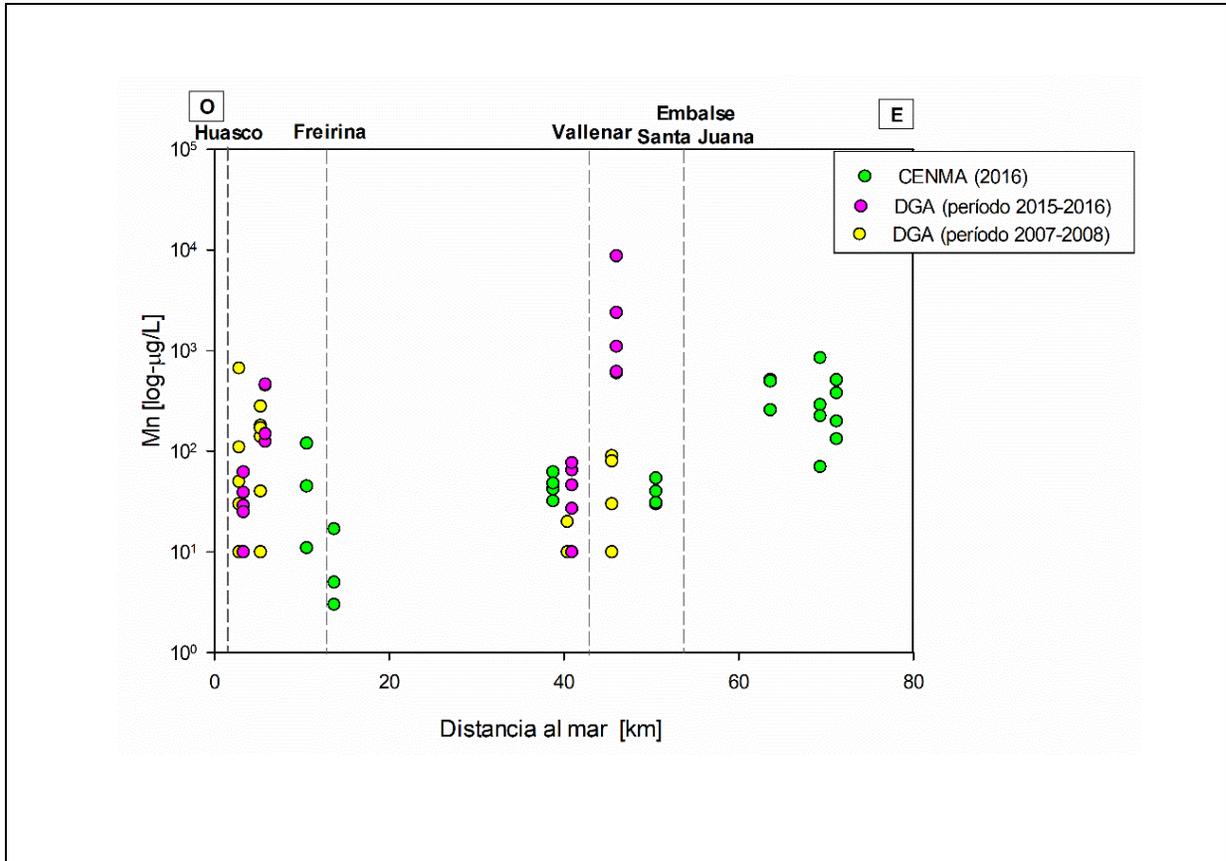


Figura 5.66. Perfil O-E comparativo de concentraciones de Mn en aguas superficiales.

En la figura 5.67 se plotean las concentraciones de Fe obtenidas de las bases de datos comparables. Las concentraciones pesquisadas en 2007-2008 son inferiores a las de 2015-2016. Por otro lado en las concetraciones medidas en el informe CENMA (2016) se observa una clara tendencia a disminuir desde el este aguas abajo hacia el oeste, lo que no es tan claro para los datos de la DGA del mismo período, puesto que en la estación planta Huasco Alto C2 (la segunda más cercana al océano), se observa un alza en las concentraciones, la que también es notoria en los valores 2007-2008. El valor más elevado medido para este elemento corresponde a 57306 $\mu\text{g/L}$, medidos en junio de 2015.

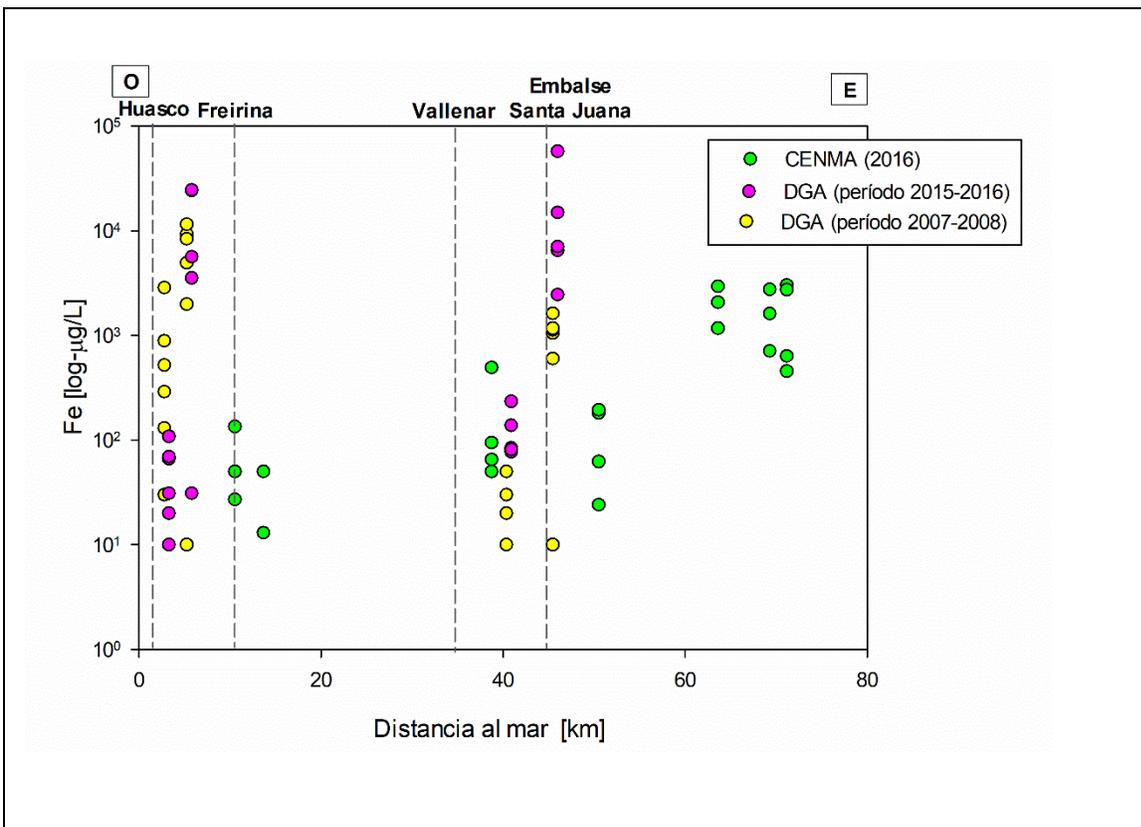


Figura 5.67. Perfil O-E comparativo de concentraciones Fe en aguas superficiales.

Para los 4 elementos comparados se perciben aspectos en común. En primer lugar, para los 4 gráficos la muestra con mayor valor fue medida por la DGA en junio de 2015, en la zona cercana a Vallenar. Otro rasgo común que comparten los gráficos es que los datos de 2015-2016 son superiores a lo largo de todo el río, a excepción de la desembocadura, donde los valores DGA 2007-2008 son superiores.

5.4.2. Sedimentos activos

Similar a lo realizado con aguas superficiales, se obtuvieron datos de otras fuentes con distinta temporalidad, cuyos detalles se encuentran descritos en el capítulo de metodología. Para los sedimentos activos los datos si pueden ser comparados, dado que la metodología tanto de toma de las muestras como de análisis de laboratorio es similar, y por ende no debiese afectar la composición geoquímica de las muestras.

La figura 5.68 muestra el perfil O-E con las concentraciones de Ba en sedimentos activos recopilados de las diferentes bases de datos. A primera vista se observa que las concentraciones medidas en el Informe CENMA (2017) son inferiores. Las concentraciones que se informan en este trabajo, tienden a disminuir desde el este hacia el oeste, y si bien no es tan claro en que punto estas comienzan a aumentar, este podría estar entre los 40 y 20 km. Desde los 20 km hacia la desembocadura, las concentraciones tienden a aumentar. En el caso de los datos de Lacassie & Díaz (2019), se observa que a modo general las concentraciones aumentan desde el este hacia el oeste, con un valor excepcionalmente más bajo, ubicado cercano al km 40, y cercano al valor más bajo medido en este trabajo para ese mismo período. Los datos del informe CENMA (2015) muestran un valor mínimo que se ubica en las cercanías del km 40, punto desde el cual las concentraciones aumentan en dirección aguas abajo hasta el km 30, donde alcanzan el valor peak y comienzan a disminuir hacia la desembocadura.

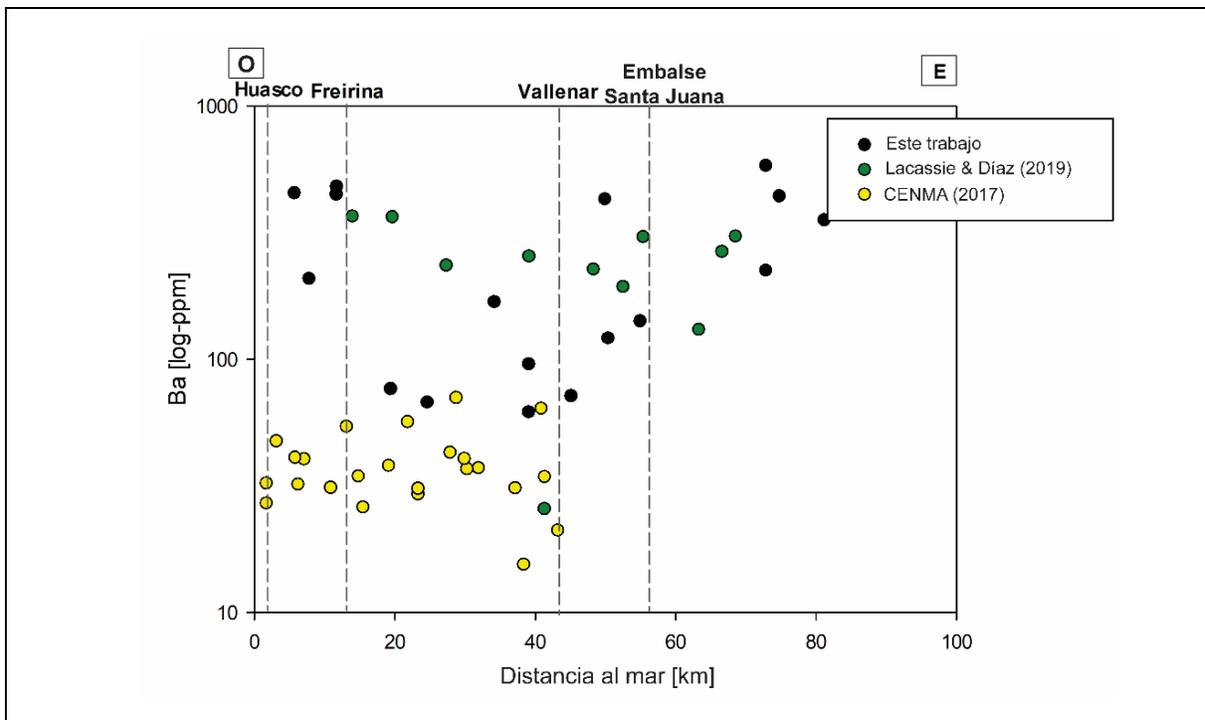


Figura 5.68. Perfil O-E comparación concentraciones de Ba en sedimentos activos.

La figura 5.69 grafica el perfil O-E comparativo de las cocentraciones de Co en sedimentos activos. De modo general se observa que las concentraciones disminuyen desde el este en dirección al oeste, para el caso de los datos obtenidos del informe CENMA (2015) así como los de este trabajo. En el caso de los datos publicados por Lacassie, J.P. & Díaz, A. (2019) se observa que las concentraciones de cobalto aumentan su concentración desde el este en dirección al oeste. Las concentraciones que se grafican para el año 2015 son levemente inferiores a las del período 2007-2008.

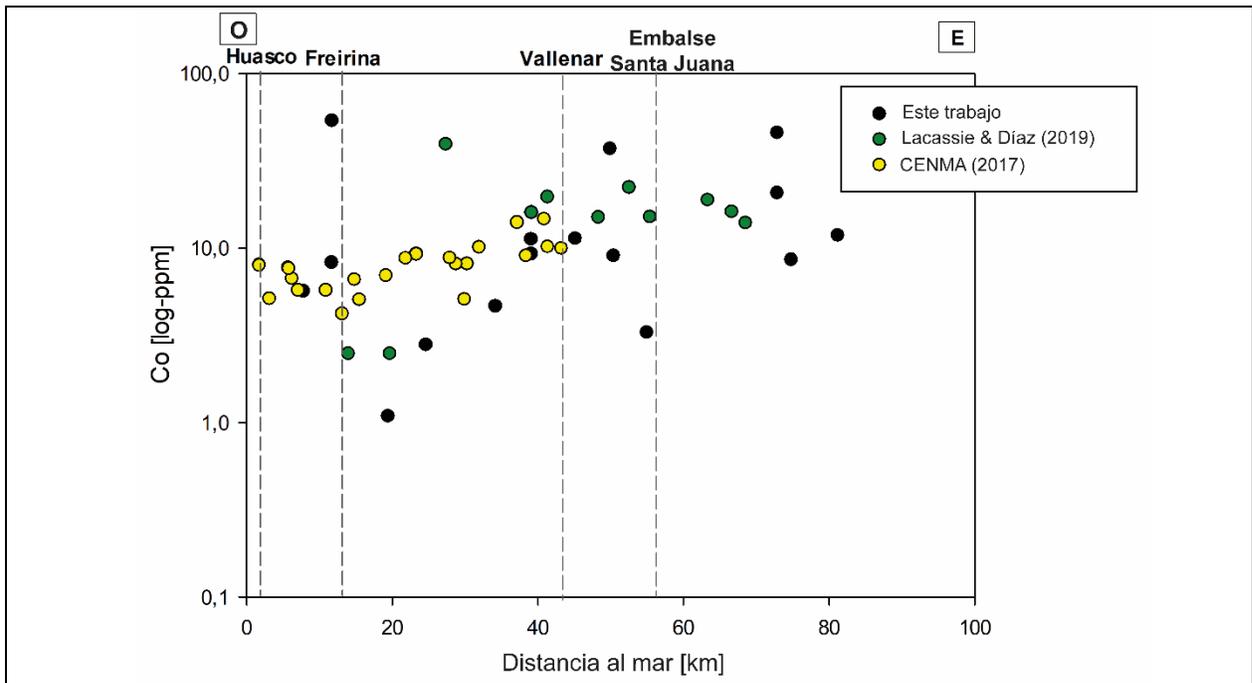


Figura 5.69. Perfil O-E comparación concentraciones de Co en sedimentos activos.

La figura 5.70 grafica el perfil O-E comparación de concentraciones de Cr en sedimentos activos. Las concentraciones pesquisadas para el año 2015 son inferiores a las del período 2007-2008. Se observa que las concentraciones disminuyen desde el este hacia las proximidades del km 20, punto donde cambia el signo de la pendiente y las concentraciones aumentan hacia la desembocadura.

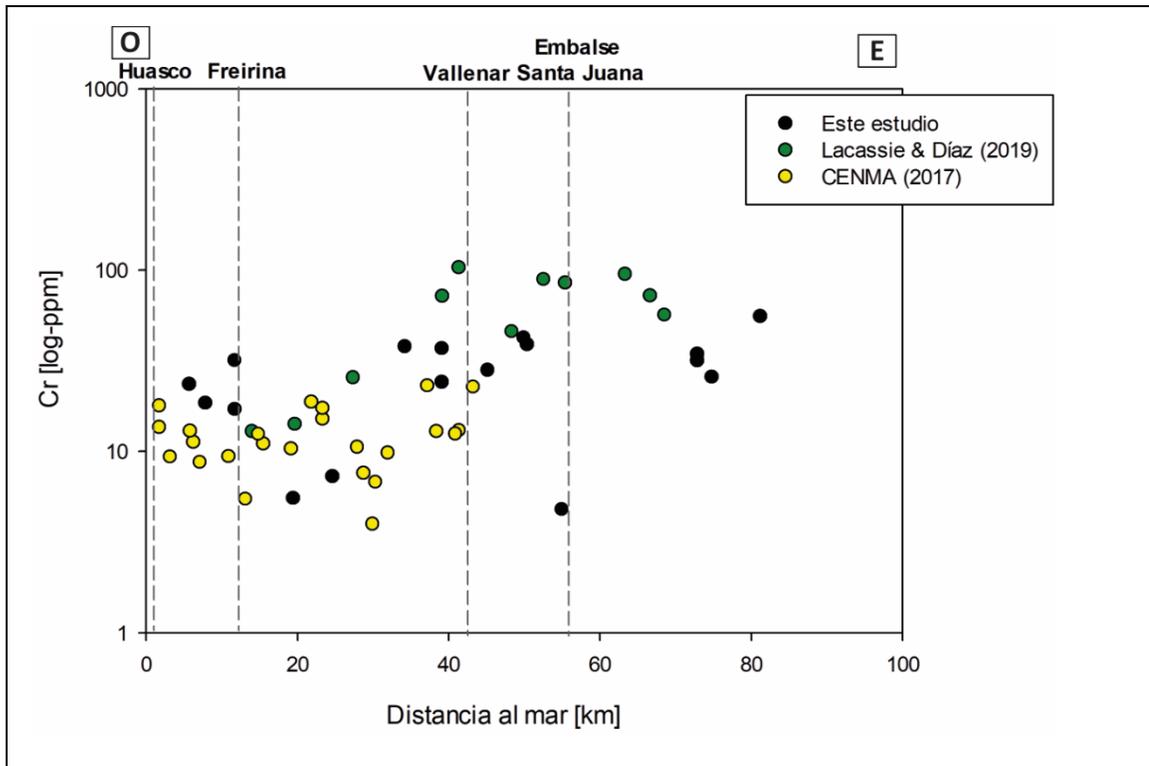


Figura 5.70. Perfil O-E de concentraciones de Cr según todas las bases de datos.

La figura 5.71 muestra el perfil O-E comparación de concentraciones de Cu en sedimentos activos. En el caso del cobre no se observan diferencias notables entre las concentraciones del período 2007-2008 y 2015. Por otro lado, se observa que las concentraciones de las tres bases de datos disminuyen desde el este hacia el oeste, teniendo las concentraciones medidas en este trabajo la particularidad de llegar al valor mínimo en el km 20 y aumentar hacia la desembocadura.

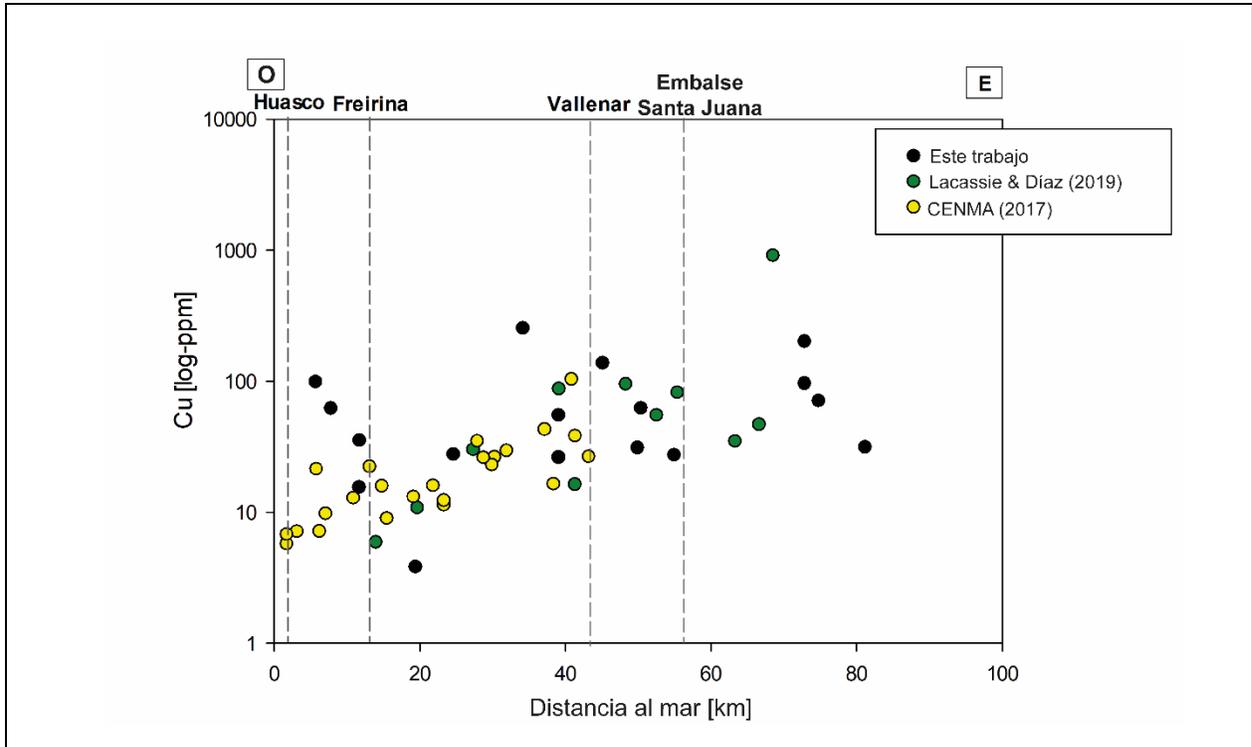


Figura 5.71. Perfil O-E concentraciones de Cu según todas las bases de datos.

La figura 5.72 muestra el perfil O-E de comparación de concentraciones de Fe en sedimentos activos. Las concentraciones más elevadas son las registradas por Lacassie & Díaz (2019), seguidas por las de este trabajo, se debe considerar que el período de muestreo de ambas fue durante 2007 y 2008, mientras que las concentraciones del informe CENMA (2017) son inferiores. Un rasgo común a las tres bases de datos es que entre las latitudes de Vallenar y Freirina las tendencias tienen una pendiente de valor positivo, mientras que a partir de Freirina, tanto las concentraciones de CENMA (2017) como las de este trabajo aumentan hacia el mar.

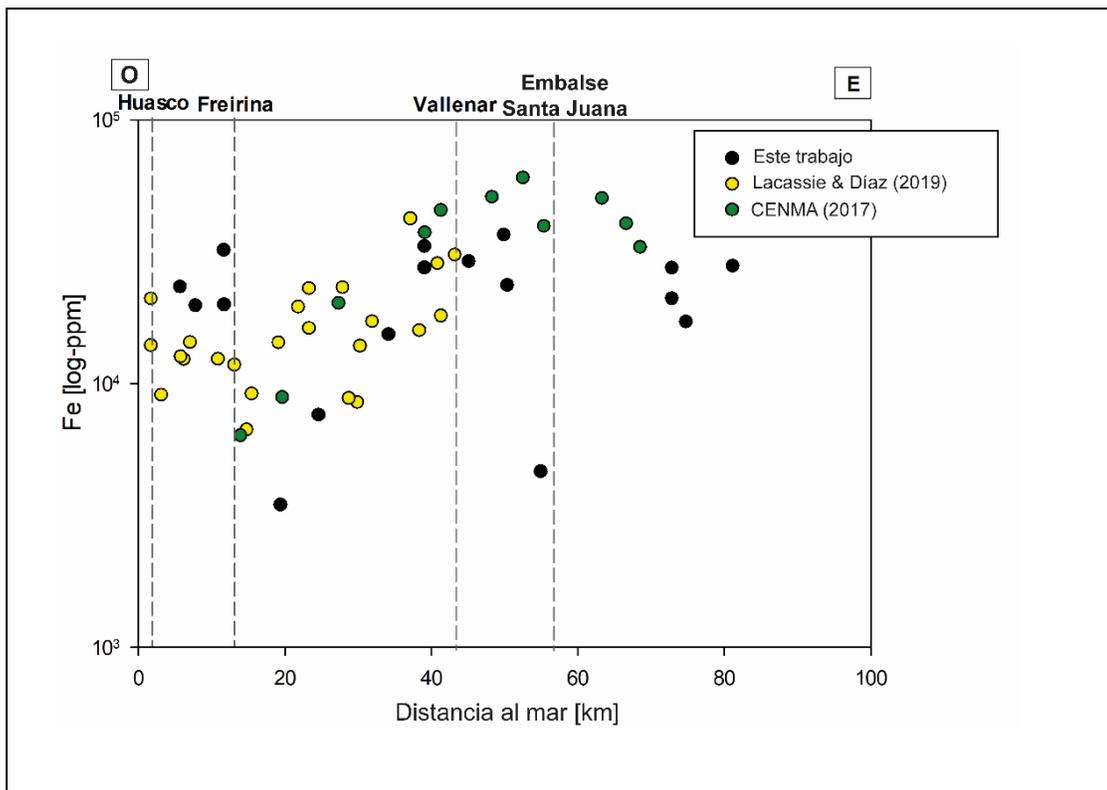


Figura 5.72. Perfil O-E comparación concentraciones de Fe en sedimentos activos.

La figura 5.73 grafica el perfil comparativo O-E de concentraciones de Mn en sedimentos activos. Las concentraciones de Manganese son más elevadas en las bases de datos del período 2007-2008 en la parte central del valle hasta el km 20, punto desde el cual se notan más elevadas las concentraciones de la base de datos de CENMA (2017).

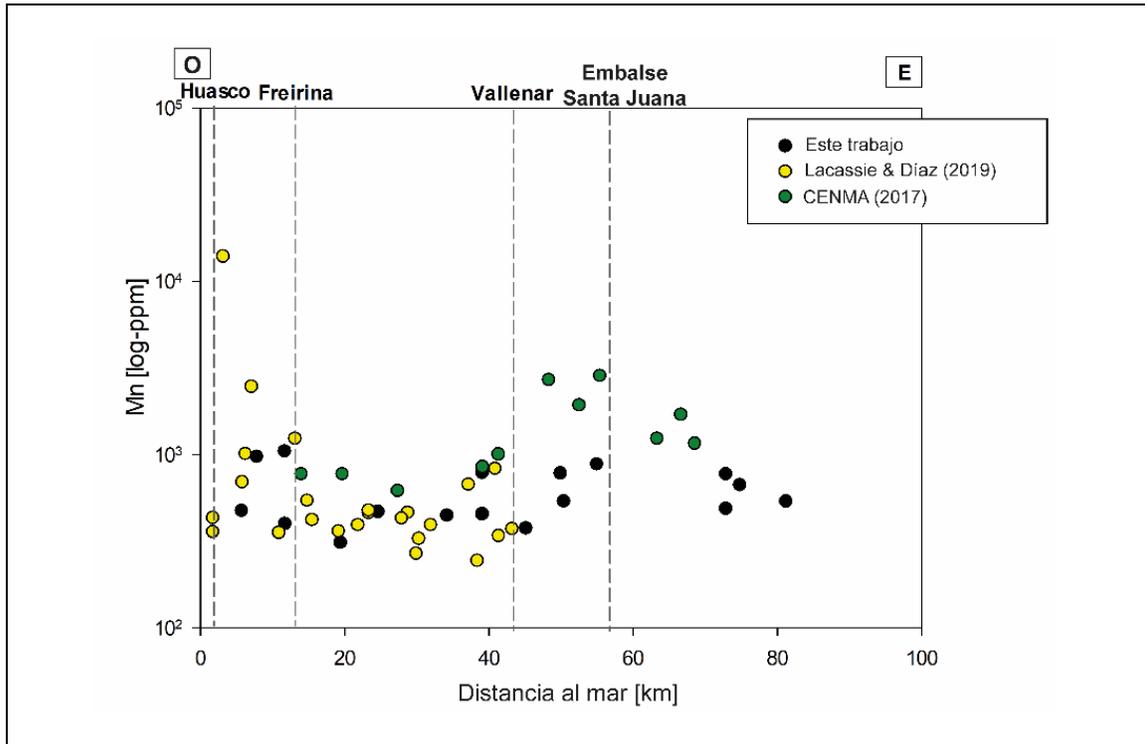


Figura 5.73. Perfil O-E Concentraciones de Mn según todas las bases de datos.

La figura 5.74 grafica las concentraciones de Ni obtenidas a partir de todas las bases de datos. Comparativamente las concentraciones más elevadas son las que se informan en el trabajo de Lacassie, J.P. & Díaz, A. (2019), en segundo lugar, se encuentran las de este trabajo y por último las concentraciones más bajas son las medidas en el año 2015. En los tres casos se observa una tendencia general en la que los valores disminuyen desde el este hacia el oeste. Notar también que en cercanías del km 24 se registran las concentraciones mínimas para ambas fuentes de datos del período 2007-2008, mientras que en 2015, en cercanías de este punto se encuentra el valor máximo.

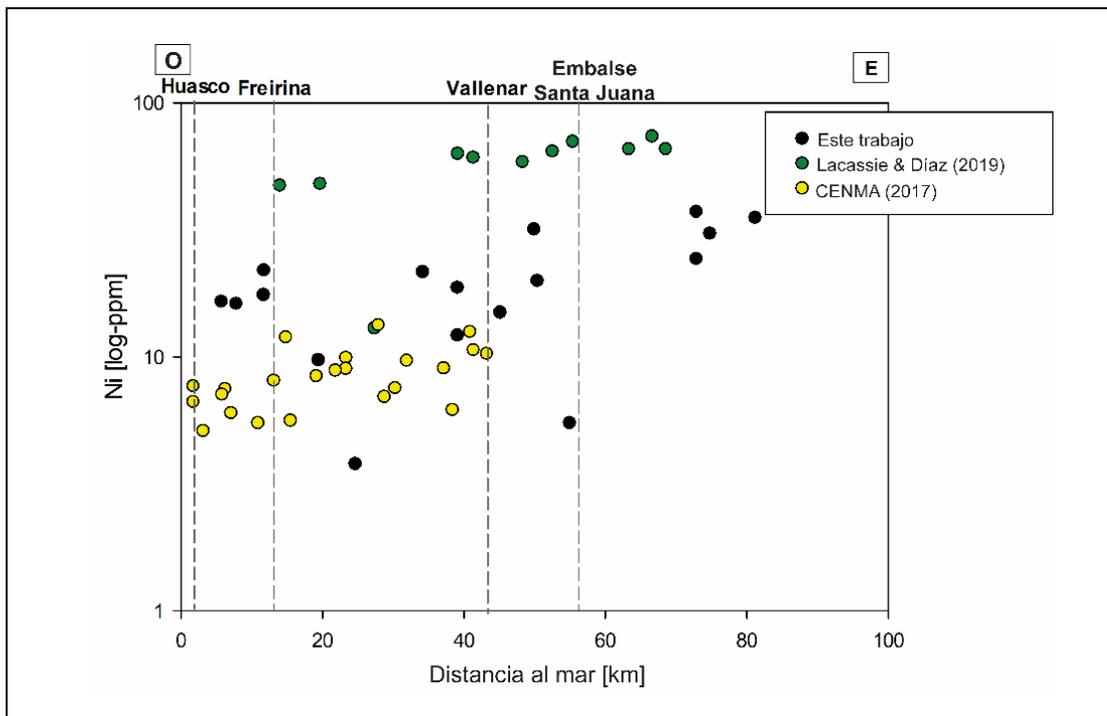


Figura 5.74. Perfil O-E comparación concentraciones de Ni en sedimentos activos.

La figura 5.75 grafica las concentraciones de V obtenidas a partir de todas las bases de datos. Las concentraciones informadas en este trabajo son superiores a las que fueron recopiladas de otros trabajos. Se observa que para los tres sets de datos las muestras que se encuentran desde los 40 km hacia el este son las que poseen concentraciones más altas. Por otro lado, las concentraciones comienzan a disminuir en dirección al oeste, esto es mas notorio desde los 40 km hacia el oeste para los datos de este trabajo como los de 2015, con un posterior aumento hacia la desembocadura.

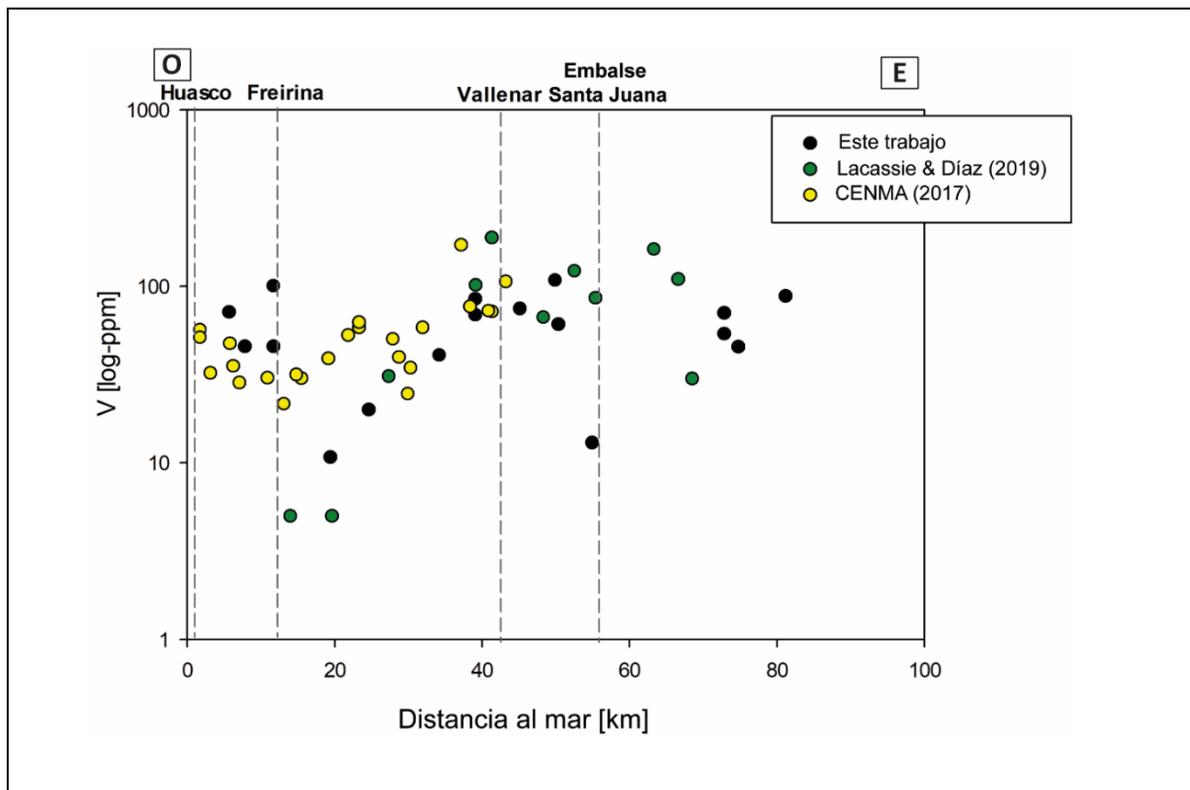


Figura 5.75. Perfil O-E comparación concentraciones de V en sedimentos activos.

En la figura 5.76 se observa el perfil O-E comparación de concentraciones de Zn en sedimentos activos. Las concentraciones 2007-2008 informadas por Lacassie J.P & Díaz, A. en 2019, son levemente superiores al resto de los datos, mientras que las concentraciones medidas en 2015 son las más bajas. Se observa claramente que, para las tres bases de datos las concentraciones disminuyen desde el este en dirección aguas abajo hacia el oeste.

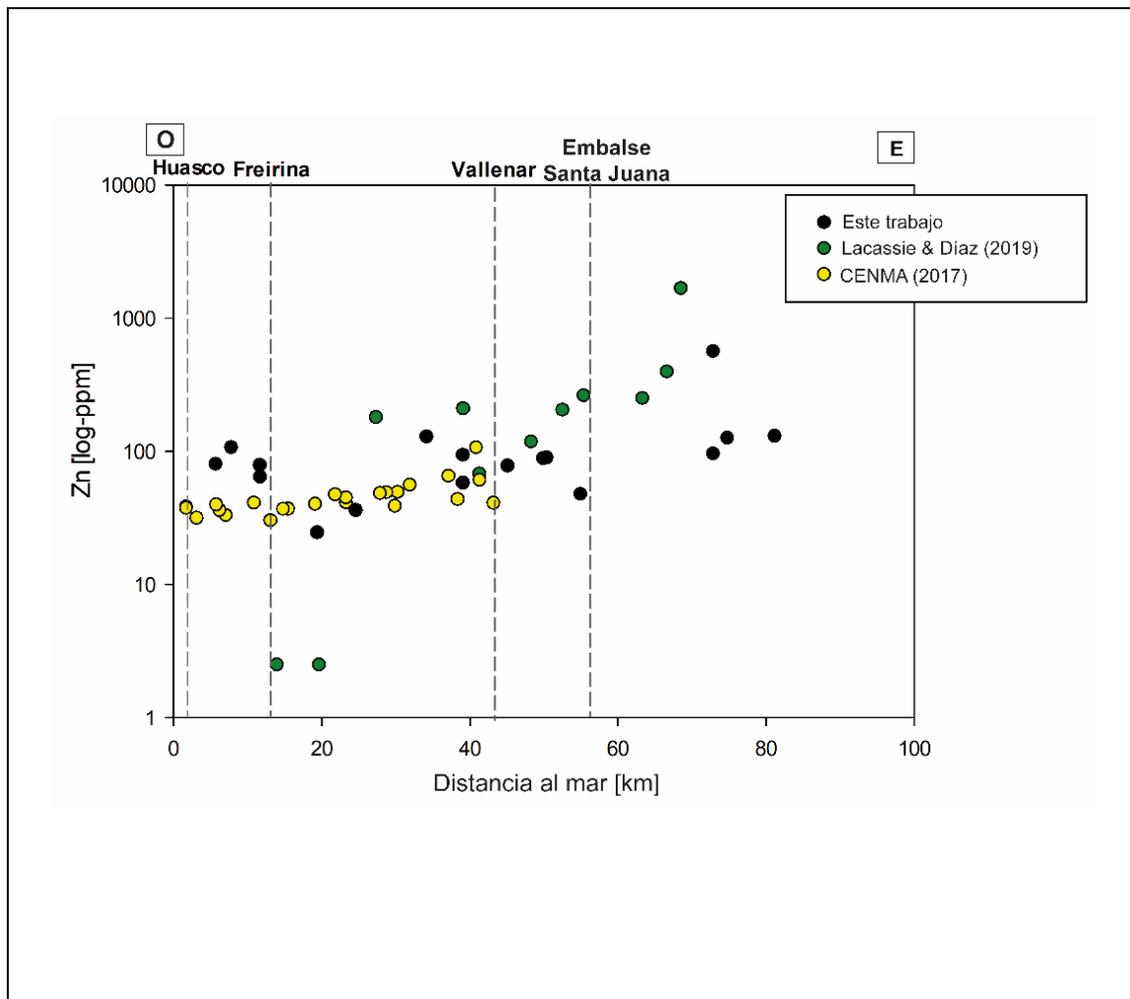


Figura 5.76. Perfil O-E concentraciones de Zn en sedimentos activos.

6. DISCUSIÓN

6.1. Distribución y Origen de Elementos Mayores

6.1.1. Aguas superficiales

El **Calcio** es el elemento más abundante en las aguas superficiales, y se distribuye con una clara tendencia a aumentar hacia la desembocadura, al igual que el **Magnesio, Potasio, Sodio y Cloro**. Estos elementos en general, no presentan variaciones importantes entre las medianas de las concentraciones de un año a otro, a excepción del Cl y Na, ambas medianas mayores en 2007. Por otro lado, todos estos elementos se encuentran fuertemente asociados (con pesos estandarizados superiores a 0,9) al primer factor (F1) del análisis factorial realizado a aguas superficiales, junto a otros elementos trazas, estos últimos con menores pesos estandarizados. Los cationes mencionados forman parte de los grupos 1A y 2A de la tabla periódica, tienen bajo potencial iónico y electronegatividad, lo que permite que pasen fácilmente a soluciones iónicas mediante la meteorización química de los silicatos, lo que los vuelve altamente móviles en el ciclo exógeno (Oyarzún *et al.*, 2016). En la misma línea, las aguas marinas tienen como principales iones al Mg, Ca, K, Na, Cl y SO₄ (Wilson, 1975), lo que se relaciona de manera directa con el aumento de las concentraciones que se observa en los perfiles O-E construidos en este trabajo. Moya (2009), en su trabajo de memoria, estudió la composición hidroquímica de las aguas de la cuenca del Huasco, a partir de los datos de las estaciones de monitoreo de la DGA, de las cuales solo 2 de las que analizó comprenden a la parte baja de la cuenca. A pesar de esto, existe un aumento muy notorio en las concentraciones de los iones antes mencionados en la estación más cercana al mar, lo que se explica por dos factores: el primero y más importante sería el aporte proveniente desde el océano, y el segundo la disolución de rocas calcáreas, evidenciada por un aumento del ion bicarbonato, y que se hace más evidente en la estación Puente Panamericana.

También calculó los estados de saturación del agua con respecto a las fases minerales calcita, dolomita y yeso mediante el software PHREEQC (Parkhurst, 1995), y cuyos resultados se resumen en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Índices de saturación calculados para las estaciones DGA de la parte baja de la cuenca.
Tomado de Moya, 2009.

Estación	IS Calcita	IS Dolomita	IS Yeso
Río Huasco en Puente Panamericana	0,65	0,88	-1,03
Río Huasco en Huasco Bajo	0,87	1,51	-0,71

Todos los índices de saturación aumentan en la estación Río Huasco en Huasco bajo, encontrándose la calcita y dolomita en un estado de saturación, y el yeso en estado de subsaturación. Así los resultados obtenidos en este trabajo reflejan la influencia de las aguas y aerosoles marinos en la composición de elementos mayores en las aguas del río Huasco, las cuales tienen un alcance hasta aproximadamente 40 km al interior del valle.

El **Nitrato** presenta una variación importante entre sus medianas 2007-2008, con un aumento de tres veces su valor en 2008 respecto al año anterior. Por otro lado, exhibe anomalías en ambos años, en 2007 a la altura de los 35 km y en 2008 a la latitud de Vallenar, y las concentraciones más bajas son alcanzadas en la parte inferior del valle, en las zonas más cercanas a la costa. El nitrato aparece asociado de manera inversa al primer factor (F1) del análisis factorial. Por otro lado, desde el km 18 hacia el este, son varias (71% de las muestras) las que superan los valores establecidos por la NSCA. Moya (2009) graficó las concentraciones de nitrato versus el tiempo de los registros de la DGA, no encontrando una dependencia de factores naturales como el caudal. Se observa también en sus gráficos de concentración promedio de la estación DGA respecto al mar, que esta varía muy poco, de 0 a 0,01 miliequivalentes por litro en todas las estaciones. Ambas evidencias llevan al autor a concluir que los factores que varían la concentración son externos a la dinámica del río. Si bien la agricultura no es la actividad económica más relevante en la zona, esta si es bastante presente; el embalse Santa Juana, el más grande de la región de Atacama, tiene como finalidad garantizar el agua para más de 10 mil hectáreas de cultivos agrícolas a lo largo del valle (<https://www.riohuasco.cl/embalse-santa-juana/>). Otro antecedente relevante respecto a esta actividad es que esta se desarrolla

principalmente en la parte media y alta del valle, debido a que en la parte baja los suelos son altamente salinos y solo persiste la olivicultura tradicional (Luque & Sandoval, 2018). Justamente, en la zona media del valle (entre los 20 y 45 km aprox.) es donde la NSCA permite mayores concentraciones de nitrato a diferencia de otras zonas del cauce. Al contrastar los resultados con los antedecedentes mencionados, podría apuntarse a las prácticas agrícolas como una de las fuentes más importantes para este anión en las aguas superficiales, principalmente al este del km 18, así como también la presencia de la ciudad de Vallenar, puesto que los residuos domiciliarios pueden ser también fuentes de nitrato y se observa una anomalía importante en esa zona. Según Fowler *et al.* (2013), las actividades antropogénicas han modificado de manera importante el ciclo global del nitrógeno, siendo los fertilizantes nitrogenados la mayor fuente de esta perturbación. Castillo (2019) describe en su seminario de título las comunidades de macroinvertebrados bentónicos (MIB) presentes en la cuenca del río Huasco. Estos responden a las variaciones ambientales como bioindicadores, y ensamblajes de MIB altamente tolerantes se asocian con condiciones de eutrofización y deterioro del hábitat evidente. En el río Huasco describen este tipo de ensamblajes altamente tolerantes, mientras que en sus afluentes observó mayor cantidad de organismos poco tolerantes.

Por último, cabe mencionar que si bien las evidencias presentadas indican que la agricultura sería la principal fuente de nitrato, estas no son 100% concluyentes, y podrían ser confirmadas, e incluso precisadas mediante un análisis isotópico, a través de el cual si es posible discriminar si el nitrato proviene de fertilizantes, disolución de minerales, residuos domiciliarios, etc., como lo hicieron Jorquera *et al.* (2014) en su trabajo en las cuencas de la Ligua, Aconcagua y Maipo. En el trabajo mencionado, los autores diferencian relaciones isotópicas entre $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ que se concentran en distintas zonas geográficas: en la Cordillera de los Andes, donde se asocia a nitratos depositados de manera natural, en el río Mapocho aguas abajo de la ciudad de Santiago, donde se relaciona a residuos sépticos y en el Valle Central donde esta relación se vincula a los fertilizantes aplicados en predios agrícolas.

El **Silicio**, no presenta mayores variaciones en su mediana de un año a otro, siendo esta levemente inferior en el año 2007. Las concentraciones más elevadas para este elemento se localizan entre las localidades de Vallenar y Freirina, se asocia al factor número 3 del análisis factorial junto al Sc, Zn, Pb de manera positiva y Ni de manera negativa. El silicio es el segundo

elemento más abundante en la corteza terrestre y se encuentra en los silicatos, de ellos los más permanentes en la corteza son el cuarzo, feldespatos alcalinos y plagioclasas, los cuales al ser sometidos a meteorización química mediante el ácido carbónico presente en las aguas lluvias, generan ácido silícico (Exley, 1998). El ácido silícico es la forma más común en la que se encuentra el silicio disuelto en aguas naturales.

6.1.2. Sedimentos Activos

Para el **Calcio**, se observa una distribución geográfica relativamente constante, con un claro aumento en la zona del embalse, y otro en la zona cercana a Freirina. Además, comparativamente las concentraciones del año 2008 son mayores a las del año 2007. Respecto al AF, el calcio se asocia a los factores 1 y 2, en ambos de manera inversa. Lo anterior puede ser interpretado como la existencia de dos fuentes distintas para este elemento. Lacassie & Díaz (2019) describen la mineralogía de los sedimentos, la distribución geográfica de los elementos y asocian cada muestra a un nodo, obtenido a partir del uso de redes neuronales artificiales. En el trabajo mencionado, en la descripción mineralógica detallan la presencia de calcita o baritocalcita en los sedimentos. Indican además que gran parte de las muestras del río Huasco están asociadas al nodo 4, en el cual predomina el CaO. En el perfil O-E se observa un aumento notorio de las concentraciones de este elemento en la zona del embalse, donde también se encuentran las rocas calcáreas del Grupo Chañarcillo, lo que posiciona a esta unidad como una de las fuentes de Ca en los sedimentos. Por otro lado, las rocas de la Formación Punta del Cobre, también podrían ser una de las fuentes de Ca en los sedimentos, dado que también se alcanzan valores elevados para este elemento entre Freirina y Vallenar, zona donde afloran, y que justamente contienen facies calcáreas en su miembro intermedio.

Los resultados para el **Hierro** muestran que comparativamente la mediana de 2007 se vio aumentada en un 21% en 2008. En el análisis factorial se encuentra en el segundo factor, asociado a 13 elementos de manera positiva y al Ca y Sr de manera negativa. Los factores de enriquecimiento obtenidos para este elemento son inferiores a 1 en 2007 y superiores a 1 en 2008. Este elemento tiene gran presencia en la zona debido a la presencia de la franja ferrífera de la Cordillera de la Costa, la cual se manifiesta en el valle del Huasco en una serie de depósitos de tipo Fe-Cu-Au y Fe-apatito asociados a las unidades geológicas del Cretácico inferior (plutones Infiernillo, Retamilla y La Higuera) y del Jurásico superior-Cretácico inferior (fm. Punta del

Cobre). Los yacimientos más importantes del sector son del tipo Fe-apatito, de ellos destaca el de clase mundial Los Colorados, ubicado 35 km al norte de Vallenar (Bilenker *et al.*, 2015). Según los autores citados en el párrafo anterior, este yacimiento se hospeda en las rocas de la fm. Punta del Cobre y las muestras que obtuvieron contienen hasta un 90% de magnetita, 5-10% de cuarzo, clinopiroxeno, ortopiroxeno, y escasas titanita y calcita. Durante los últimos 30 años el yacimiento ha sido explotado por Compañía Minera del Pacífico (CMP). El material obtenido del rajo los Colorados es preconcentrado y enviado a su planta peletizadora ubicada a 5 km del puerto de Huasco, para luego de ser procesado, ser transportado en embarcaciones desde el puerto Guacolda II, 4 km al sur de la ciudad de Huasco. Para contrastar los resultados obtenidos se hace más fácil analizar el valle por zonas; la parte alta, que comprende la zona aguas arriba del embalse Santa Juana, la parte media; definida aguas abajo del embalse hasta el km 20 y la parte baja, aguas abajo del km 20 hasta la desembocadura. Según los antecedentes, en la parte alta del valle el sustrato geológico corresponde a las rocas del grupo Chañarcillo; además unos kilómetros más hacia el este se juntan los ríos Carmen y del Tránsito, por otro lado, se encuentra el muro del embalse, el cual significa una interrupción abrupta del curso del río y por ende un lugar propicio para la acumulación de sedimentos, así como de minerales pesados como la magnetita o piritita. En la zona media del valle ocurre la mayor variación de concentraciones, siendo el sustrato geológico la Formación Punta del Cobre y los plutones del Cretácico inferior, rocas que alojan a los depósitos de Fe del sector, lo que explicaría esta variabilidad y el hecho de que las mayores concentraciones se encuentren en esta zona. Por último en la parte baja del valle se observa un aumento en las concentraciones, el cual podría deberse a la acumulación de minerales pesados, que tienden a acumularse en las desembocaduras, o bien debido a la actividades mineras en el sector, sin embargo esta última posibilidad pierde fuerza debido a que el factor de enriquecimiento (FE) para el año 2007 es inferior a 1, lo que indica que no existen fuentes antropogénicas contribuyendo de manera importante. Cabe mencionar que el FE por si solo no sustenta esta información, pero en conjunto al análisis factorial se puede tener una idea más clara. El hierro aparece en el análisis factorial en el segundo factor asociado a más metales (V, Cu, Co, Pb, Cr), metaloides (As) y tierras raras (Ce, Sc e Y) lo que se asocia a una señal proveniente del contexto metalogénico, y en particular a la franja ferrífera, lo cual es discutido a cabalidad en la sección 6.2.2. de elementos trazas.

El **Manganeso** tiene concentraciones relativamente altas al este del embalse Santa Juana, hasta aproximadamente en el kilómetro 40 en el perfil, y más hacia el oeste, vuelven a aumentar las concentraciones, no exhibiendo un patrón tan constante. La variación de la mediana entre un año y otro es baja, con una disminución inferior al 10% entre un año y otro. En el análisis factorial, aparece en el tercer factor asociado a Cd, Zn, U y As. En la zona, particularmente al norte de Freirina, se encuentra el distrito minero Sierra la Bandera, del cual no se conoce información de recursos (Vivallo *et al.*, 2008). En los perfiles de este trabajo justamente es la zona de Freirina donde se encuentran las concentraciones más elevadas de este elemento. Lacassie y Díaz (2019) atribuyen las concentraciones de Mn en la zona a los depósitos minerales de Mn de la zona. Los elementos asociados al Mn en el análisis factorial son principalmente calcófilos, a excepción del U, que se considera siderófilo, siendo en su mayoría elementos que pueden ser asociados a los depósitos minerales presentes.

La distribución geográfica del **Titanio** indica altas concentraciones en la zona este del embalse, así como también al oeste de Freirina. La variación de las medianas de un año a otro es grande: en 2008 se redujo en un 74% respecto a 2007. En el análisis factorial aparece en el factor número 2 asociado a 15 elementos, lo que se discute en profundidad en la sección 6.2.2. dedicada al origen de elementos trazas. Respecto a lo anterior, en primer lugar, las altas concentraciones en el sector del embalse pueden deberse a la sedimentación producida al interrumpir el curso del río, generando una zona donde se acumulan minerales pesados provenientes del curso superior del río. Diversos estudios geoquímicos (Knipping *et al.*, 2015 a,b; Deditus *et al.*, 2018) se han enfocado en la composición química de las magnetitas que se encuentran en el depósito los Colorados, las cuales contienen núcleos ricos en Ti y elementos traza. Por otro lado, Palma *et al.*, 2020, resume las concentraciones de Ti y otros elementos en magnetitas yacimientos del tipo IOA, incluido Los Colorados, siendo las concentraciones de Ti las más altas para este yacimiento, con un promedio de aprox. 2.000 ppm y un máximo de hasta 8.000 ppm, rango dentro del cual caen las concentraciones medidas en los sedimentos de este trabajo. Esta idea se ve reforzada por la presencia de pequeños yacimientos de TiO_2 , ubicados al sur-este de Freirina, siendo las quebradas que drenan por ellos cercanas a muestras con alto contenido de este metal. Existe escasa información del yacimiento Ñisñiles, dentro del cual el rutilo sería el principal mineral para la extracción de titanio (Vivallo *et al.*, 2008).

6.2. Distribución y Origen de Elementos Trazas

6.2.1. Aguas superficiales

La mayoría de los elementos medidos en aguas superficiales presentan concentraciones más elevadas en 2008. Por otro lado, muchos de ellos mantienen una tendencia general similar entre un año y otro y no evidencian fuentes puntuales que pudiesen estar ingresando metales o metaloides al sistema.

Una de las principales diferencias en la dinámica del río entre ambos períodos de muestreo es el caudal. El trabajo de Salas *et al.* (2016) describe y analiza los eventos y variables climáticas que afectan la dinámica hidrológica de la cuenca, detectando eventos de altos caudales y de sequía. Justamente describen un evento climático ocurrido entre 2007 y 2008: durante junio-julio de 2007 se registraron precipitaciones de 5,3-7,0 mm en la cabecera de la cuenca, mientras que en los mismos meses de 2008 se registraron precipitaciones entre 48-50 mm, lo que no explica el aumento de los caudales ocurrido entre la primavera de 2007 y verano de 2008, sugiriendo una fuerte precipitación nival durante los meses de invierno en la sub-cuenca del río del Tránsito

En cuanto a las posibles fuentes de estos elementos en las aguas superficiales, estas serán analizadas a partir de los factores presentes en el análisis factorial.

El primer factor se compone de los elementos Mg, Na, K, Cl, Ca, Sr, B, Li, U y de manera inversa el NO_3 y Al. Todos los elementos que se presentan con pesos estandarizados positivos, tienen en común el aumento constante de sus concentraciones desde el este hacia el oeste. Lo anterior evidencia que el principal aporte de estos elementos a las aguas superficiales se ubica en la zona oeste, siendo este el océano Pacífico y los aerosoles que genera. Dentro de las características físicoquímicas del agua de mar destaca la salinidad, la cual es relativamente constante, y cuyos principales compuestos son Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Sr^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{B}(\text{OH})_4^-$, $\text{B}(\text{OH})_3$, HCO_3^- , Br^- , CO_3^{2-} , OH^- , CO_2 (Millero *et al.*, 2008). Por tanto, es esperable que las concentraciones de los elementos que se encuentran en mayor abundancia en el océano aumenten en el río a medida que este se acerque a la fuente. En cuanto al Li en la zona no existen fuentes continentales como salmueras, aunque si se han descrito evaporitas en la fm. Nantoco (Mourgues *et al.*, 2009), no obstante, esta aflora de forma reducida en la zona, sumado a que no se observan

aumentos importantes de este elemento en la zona donde aflora el grupo Chañarillo, se puede presumir que la fuente principal de este elemento se encuentra en el océano. Las concentraciones de litio en el agua de mar fluctúan entre 0,1 y 0,2 ppm (Choubey *et al.*, 2017), rango en el cual se encuentran las concentraciones medidas en este trabajo. Si bien los factores de enriquecimiento se encuentran por sobre el 1, estos no superan el valor 100, lo cual es bastante inferior a los resultados obtenidos por Tapia *et al.*, (2018), quienes reportan un FE 5398 veces mayor que el promedio mundial (Gaillardet *et al.*, 2003) en la cuenca del Salado Bajo, siendo este inferior al FE que obtuvo para el mismo elemento en las cuencas de los Andes y el Salado Alto, concluyendo que el origen de este elemento estaría en las salmueras y evaporitas presentes en los Andes y Salado Alto, mientras que para el Salado Bajo, que se encuentra alejado de estas fuentes, sería la fm. Punta del Cobre, el regolito de Atacama e Ignimbritas. Lo anterior podría considerarse en este contexto, sin embargo, no como fuente principal dadas las concentraciones que son más bajas y la distribución geográfica de las mismas, que aumentan aguas abajo desde el este hacia el oeste. El U presenta un enriquecimiento superior al del promedio mundial (Gaillardet *et al.*, 2003). Las concentraciones de uranio en el agua de mar fluctúan entre 3 a 3,3 $\mu\text{g/L}$ (Oguma *et al.*, 2011), por lo que son inferiores a las del río Huasco, por otro lado; se ha reconocido a los depósitos de tipo IOA como posibles fuentes de U (Sillitoe, 2003; Groves *et al.*, 2010; Richards & Mumim, 2013; Barton, 2014), lo que podría considerarse como una posible fuente. Cabe también mencionar como posible fuente de uranio el uso de fertilizantes fosforados (Schung & Haneklaus, 2008; Wang *et al.*, 2009), siendo este uranio propenso a la lixiviación bajo las condiciones de Eh y Ph a las que se manejan los suelos (Jaques *et al.*, 2005; Read *et al.*, 2008). El Al se presenta de manera inversa en este factor, lo que en la práctica se observa como un patrón inverso en el perfil O-E; las concentraciones de este elemento disminuyen desde el este en dirección al oeste. El aluminio es insoluble a pH 6-8,5 por lo que se presenta a bajas concentraciones en aguas naturales (Edzwald, 2020), y posiblemente tienda a una mayor disolución aguas arriba del embalse, dada la interrupción del curso del río, que permite un mayor tiempo de contacto y por ende una mayor tasa de disolución. Por último, el ion nitrato, que si bien en el perfil exhibe anomalías en la zona central del valle, su tendencia general es a disminuir desde el este en dirección al oeste; pero como se mencionó en la sección de elementos mayores, es posible que en la zona media haya un mayor ingreso de este elemento proveniente de la fertilización de los suelos cultivados.

El segundo factor se compone de Cu, As, Sb, Mo, V y F. Todos estos elementos tienen una media mayor en 2008. En cuanto a los FE calculados a partir del promedio mundial reportado por Gaillardet *et al.*, 2003 este es cercano a 1 para el V, Cu y Sb, mientras es superior a 1 para el As y Mo. Según la clasificación geoquímica de Goldschmidt, Mo, Cu, As y Sb son elementos calcófilos, el V es un elemento que tiende a asociarse a los ferromagnesianos, por lo que es esperable encontrarlos dentro de la impronta geoquímica de los depósitos minerales de la zona. Por otro lado, el flúor es un halógeno cuyo estudio ha sido de especial interés en los depósitos tipo IOA (La Cruz *et al.*, 2019; Palma *et al.*, 2019) puesto que apatitos ricos en F, tendrían un origen más bien magmático en este tipo de depósitos. V y As muestran patrones en común: ambos elementos presentan alzas que se mantienen en la parte media del valle; donde afloran las rocas mesozoicas que albergan a los depósitos del sector, en ellos no se observan aumentos puntuales, lo que permitiría considerarlos como elementos naturales, cuyas concentraciones no se observan afectadas por actividades antropogénicas. En cuanto al Mo, este presenta el mayor del FE de los elementos del factor; además presenta sus peaks de concentración en Vallenar y Freirina, zonas donde se encuentran relaves catastrados por SERNAGEOMIN cuyo material proviene principalmente de la minería de cobre (SERNAGEOMIN, 2020). El Antimonio presenta un comportamiento similar al del Mo, con peaks en la zona de Vallenar y Huasco, pero con un FE cercano a 1, lo que no anula la existencia de fuentes puntuales provenientes de la actividad antropogénica, por lo que si bien puede considerarse como de origen principalmente natural, se debe ser cauteloso con la persistencia de estas fuentes puntuales. El cobre posee un FE cercano a 1, además al observar el perfil O-E no se observan aumentos puntuales, lo que puede interpretarse como un origen principalmente natural. Las concentraciones de flúor en las aguas naturales pueden fluctuar entre 100 a 10000 $\mu\text{g/L}$ (Edmunds & Smedley, 2013) en ese sentido las concentraciones de este estudio se sitúan en la parte inferior de este rango, lo que es concordante con un origen natural asociado a la geología del sector, aún así no se puede desconocer la existencia del programa nacional de fluoración del agua potable, cuya cobertura es del 82,3%, y que permite concentraciones entre 600-1000 $\mu\text{g/L}$ de F en el agua potable (Romero *et al.*, 2017), también dentro del rango en el cual oscilan las concentraciones de este trabajo, lo que sumado a que los peaks se encuentran aguas abajo de los centros poblados, no es posible descartar que las concentraciones no tengan una componente antropogénica.

El tercer factor se compone de Zn, Sc, Si, Pb y Ni, este último de manera inversa. La mediana de todos los elementos asociados de forma positiva al F3 es mayor en 2008, con diferencias muy notorias en el Zn (aumentó 21 veces su valor en 2008 respecto a 2007) y Pb (aumento al doble en 2008 en comparación al año anterior). Por otro lado, la mediana del Ni es mayor en 2007. El FE fue obtenido para el Ni, Zn y Pb, siendo el Sc el elemento conservativo utilizado en su cálculo. El Pb presenta un valor inferior a 1 en ambos años, para el Ni estos valores son cercanos a 10 en 2007 y cercanos a 1 en 2008, mientras que el FE calculado para el Zn es superior a 1 en 2007 y superior a 10 en 2008. Se han descrito dentro del grupo Chañarcillo depósitos de Pb-Zn y Ba (Lieben *et al.*, 2000), por lo que estos podrían asociarse al origen de ambos elementos. El aumento en las concentraciones en 2008 podría asociarse al derretimiento de hielos que aumentó los caudales durante ese verano. Según Oyarzún *et al.*, 2016 el Zn es el elemento más móvil durante la meteorización de depósitos de sulfuros, lo que hace presumir que durante 2008 el derretimiento de nieves en la parte alta de la cuenca, donde se encuentran grandes depósitos epitermales, haya movilizó este elemento aguas abajo, lo que explicaría el aumento en el FE de un año a otro. Lo anterior es concordante con los perfiles O-E de ambos elementos, donde las mayores concentraciones se encuentran en la parte alta de la cuenca, en el sustrato del grupo Chañarcillo. El Sc presenta un perfil con pendientes planas en 2008, es decir con concentraciones constantes en tres tramos del río. El escandio es un elemento que se considera inmóvil durante la meteorización química debido a su baja solubilidad (Chassé *et al.*, 2019), lo que explicaría los patrones homogéneos observados en el perfil y además justifica su uso como elemento conservativo en el cálculo de FE. Por otro lado, los aumentos en el perfil O-E podrían atribuirse a la presencia de la franja ferrífera, dado que los depósitos que hospeda son considerados como potenciales fuentes de REE. La afirmación anterior se sustenta en que las concentraciones aumentan en la zona donde se encuentran estos depósitos. El Si en la sección dedicada a elementos mayores fue atribuido a fuentes naturales, específicamente meteorización de silicatos. Por último, en este factor se encuentra de manera inversa el Ni, la cual podría interpretarse a un comportamiento opuesto al de el resto de los elementos en este factor; sus concentraciones son más elevadas en 2007, mientras que si bien es un elemento que puede estar presente naturalmente, sus concentraciones en 2007 aumentan hacia la desembocadura. En la zona se encuentra la termoeléctrica Guacolda, ubicada 6 km al sudoeste de Huasco, la cual genera energía eléctrica mediante la combustión de petcoke, un derivado del petróleo que genera gases y

material particulado fino respirable (PM 10 y 2,5) que contiene níquel, dióxido de azufre, vanadio y otros metales (CENMA, 2017). En ese sentido el vanadio debiese compartir este origen, sin embargo, este elemento se encuentra mucho más presente en los depósitos minerales, lo que puede superponerse al vanadio originado por la combustión.

El cuarto factor se compone de un elemento: el Se, que se encuentra en el grupo 15 de la tabla periódica, entre el azufre y telurio. En particular genera alótropos y compuestos similares al azufre (Boyd, 2011). Dado el comportamiento químico afín de ambos elementos, es que este elemento se encuentra presente principalmente en los sulfuros. La fuente de este elemento podría asociarse a los sulfuros presentes en los depósitos del sector, lo que se condice con la distribución geográfica que se observa en el perfil O-E, con aumentos en la zona media del valle, entre Vallenar y Huasco. No obstante, la anomalía presente en las cercanías de Huasco podría referirse a una fuente puntual.

El quinto factor del análisis se compone de dos elementos: Co y Mn. Ambos perfiles O-E tienen cosas en común; para el año 2007 ambos presentan la misma tendencia, que es a modo general a aumentar hasta alcanzar un peak en la zona de Freirina, el cual corresponde al valor máximo para el Co y una anomalía para el Mn. En 2008 ocurre lo mismo: La anomalía de Mn que se ubica en Huasco coincide con la de Co, mientras que en la parte alta de la cuenca; particularmente en el km 72, donde se encuentra una muestra con un elevado contenido de Mn (sobre la media) que coincide con una anomalía de Co. Los FE de ambos elementos son inferiores a 1. En la zona existen depósitos de ambos elementos, y además ambos tienen un FE que indica un origen natural, por lo que las fuentes serían de este origen. Por otro lado, la relación directa entre ambos elementos podría acusar que forman complejos juntos, son originados por la misma fuente teniendo ambos elementos una movilidad similar en el medio ambiente.

6.2.2. Sedimentos activos

En cuanto a los sedimentos activos también se observa una constante: la mayoría de las medianas obtenidas son mayores en 2007, a excepción del V, Co, Cu, As e Y, cuyas medianas son mayores en 2008, y los elementos Pb y Cd, cuyas medianas no varían de un año a otro.

A continuación, se presentan los factores obtenidos para los sedimentos activos, todos estos presentan una fuerte componente ligada a la franja ferrífera.

El primer factor se compone de Ge, Ga, Rb, Sc, Th, La, Ce, Cs, Bi, Sn, Ni, Ba, Ag, Mo, Ti, Y, y de manera inversa el Ca. Las medianas del Ca e Y son mayores en 2008. El Sc, Y, Ce y La son Tierras Raras, que tanto en 2007 como 2008 presentan patrones similares, con concentraciones elevadas en la parte alta de la cuenca y en la zona de Freirina para 2007, y un peak en al oeste de Vallenar en 2008. Diversos estudios han demostrado que la mineralogía y litología del sustrato rocoso contribuyen ampliamente a la distribución de tierras raras en suelos, sedimentos, cursos superficiales y plantas (Migaszewski & Galuzca, 2015). Los mismos autores indican que estos elementos se concentran principalmente en minerales accesorios: como el zircón, apatito, monacita. En la parte alta de la cuenca se encuentra como sustrato el plutón los morteros, el cual podría estar aportando estos minerales, lo que se observa como las altas concentraciones aguas arriba del embalse Santa Juana. Por otro lado en la parte baja, se encuentran los depósitos de tipo IOA, así como los plutones del Cretácico inferior. El Th se clasifica químicamente como un actínido, ocurre en estado tetravalente en la naturaleza y al igual que el grupo anterior de elementos, se concentra naturalmente en minerales accesorios (Mors *et al.*, 2006) y si se contrasta con el grupo anterior de elementos, tienen un perfil de distribución geográfica muy similar, por lo que podrían asociarse todos al mismo origen. Los elementos Ga, Ge, Bi y Sn son calcófilos según la clasificación de Goldschmidt, y pueden encontrarse en sulfuros cuya presencia es amplia en todo el sector. Ba, Rb y Cs son elementos litófilos, siendo el Rb y Cs metales alcalinos y el Ba alcalino térreo. Tanto el Rb como el Cs se asocian al potasio (K), y reaccionan de forma similar dentro de su ciclo geoquímico, por otro lado, las concentraciones promedio de Rb son cercanas a 120 ppm en rocas ígneas y 110 ppm en rocas sedimentarias, mientras que las de Cs son inferiores a 1 ppm en rocas ígneas y 4 ppm en rocas sedimentarias (Hortsman, 1957). Las concentraciones de Rb se condicen con las concentraciones promedio de Hortsman (1957), mientras que las de Cs son superiores, sin embargo, si se condicen con el cambio de sustrato: en la parte alta, donde las concentraciones son mayores el sustrato rocoso corresponde a la Formación Cerrillos, mientras que donde el sustrato coincide con los plutones del Cretácico inferior, estas concentraciones son menores. El Ba por otro lado, es geoquímicamente afín al Ca, siendo este último reemplazado por el bario según las reglas de Goldschmidt (1954), lo anterior se suma a que en la zona existen descripciones de baritocalcita (Lascassie & Díaz 2019) en los sedimentos del río, expresándose

esta sustitución entre ambos elementos como una relación inversa en el análisis factorial. Por último los elementos Mo, Ti, Ni y Ag. El Ti se ha reconocido tanto en los depósitos de la franja ferrífera como en depósitos por si solos. El Ni presenta concentraciones elevadas en la parte alta del valle, las cuales coinciden con el estudio de Lacassie & Díaz (2019). Las concentraciones de plata más elevadas coinciden con las zonas de distritos argentíferos; además estas presentan una anomalía en 2007 y una concentración elevada en las cercanías de la ciudad de Vallenar, siendo la misma zona geográfica donde Lacassie & Díaz (2019) encuentran anomalías, las que atribuyen a fuentes de contaminación puntuales asociadas a la pequeña minería, sin embargo, las concentraciones medidas en este trabajo no superan 1 ppm, mientras que las del trabajo mencionado se encuentran entre 1 y 5 ppm. El Mo es un elemento que puede encontrarse en concentraciones elevadas en la zona. Las concentraciones más elevadas se encuentran en la parte alta del valle: esto podría deberse a la presencia de depósitos en la parte alta de cuenca; y por otro lado, las concentraciones de este elemento son más elevadas en rocas sedimentarias (Jarrell *et al.*, 1980).

El segundo factor se compone de Fe, V, Pb, Cr, Sn, Cs, Co, Th, Y, Ga, Ce, Cu, As, Ni, y de manera inversa Ca y Sr. Este factor comparte 7 elementos (Sn, Cs, Th, Y, Ga, Ce, Ni) con el primer factor. Esto se explicaría por la diversidad de depósitos existentes en la zona y cuyas señales geoquímicas se solapan, con mayor razón si se trata de sedimentos activos en el curso de agua más importante en la zona. No obstante, en este factor se encuentran los elementos que se encuentran principalmente ligados a la franja ferrífera: Fe, V, Co, Y, Ce, Cu y As. Los depósitos del tipo IOA son potenciales fuentes de Fe, tierras raras y Co (Sillitoe, 2003; Groves *et al.*, 2010; Barton, 2014). Las magnetitas descritas para el depósito los Colorados son en general ricas en V (Rojas *et al.*, 2018), mientras que las piritas del mismo depósito contienen metales base como Ni, Co, Cu y también As (Reich *et al.*, 2016). Salazar *et al.* (2018) en estudios genéticos de este tipo de depósitos, plantean que el Ga se incorpora a las magnetitas de estos depósitos durante las primeras etapas de su formación. Como se mencionó para el F1, el Th puede ser incluido en los minerales accesorios, el Sn puede incluirse en la estructura de sulfuros y el Cs puede incluirse en redes minerales en reemplazo del potasio. El Cr es un elemento que se encuentra en cantidades variables en rocas ígneas ácidas y volcánicas en concentraciones entre 10-16 ppm y entre 60-120 ppm en rocas sedimentarias (Kabata-Pendias & Pendias, 2000), rango en el cual se encuentran las concentraciones de este trabajo. El Pb en la naturaleza se encuentra comúnmente asociado a

minerales de plata y sulfuros (Casas, 2006), y justamente las concentraciones mas elevadas de este elemento se encuentran cercanas a distritos argentíferos. Los elementos Sr y Ca aparecen de forma inversa en este factor, lo que en la práctica se observa como altas concentraciones en las zonas donde el resto de los elementos del factor presentan bajas concentraciones, estos presentan altas concentraciones; un buen ejemplo de esto se observa en el km 20. Ca y Sr pertenecen al grupo 2A de la tabla periódica y presentan características geoquímicas muy similares entre si, y este último sustituye al calcio en plagioclasas, pero no así en piroxenos (Green, 1980), lo que marcaría la diferencia con F1, siendo principalmente plagioclasas las representadas en este factor. La relación inversa se explicaría en que estos minerales no concentran mayormente a los elementos con pesos estandarizados positivos del factor.

El tercer factor corresponde a los elementos Cd, Zn, U, Mn y As. Cd, Zn, U y As presentan concentraciones anómalas en la zona este del valle, aguas arriba del embalse Santa Juana. As, Cd y Mn han sido utilizados como *pathfinder* para depósitos epitermales (Brookins, 1986), por lo que sus concentraciones son más elevadas aguas arriba del embalse. Por otro lado, el As presenta una anomalía en cercanías de la ciudad de Vallenar, la cual podría asociarse las actividades mineras que se desarrollan ahí, mientras que el alza en las cercanías de Freirina podría venir de los depósitos de la franja ferrífera, como se discutió en el F2. Las concentraciones de Cd son elevadas en la parte alta, donde las actividades antrópicas son menos presentes que en la parte baja, y disminuyen hacia la parte baja, por lo que su origen no podría asociarse a fuentes humanas. El Mn si bien presenta concentraciones variables, las más elevadas se encuentran en la zona de Freirina, donde se encuentran sectores de interés económico por este metal. En el grupo Chañarcillo se hospedan una gran cantidad de depósitos de Pb-Zn (Lieben *et al.*, 2000), por lo que es una posible fuente para el zinc. Por último, el U, que es un elemento que puede concentrarse en minerales accesorios; sin embargo, no se asocia a los otros elementos que en los factores anteriores fueron asociados a estos minerales, y en particular, no se asocia al Th, que es uno de los elementos a los cuales se asocia frecuentemente en la naturaleza (Mors *et al.*, 2006). De todas formas en el perfil O-E del uranio se observan altas concentraciones aguas arriba del embalse y también en cercanías de Freirina, lo que concuerda tanto con la franja ferrifera como con la presencia de rocas plutónicas.

6.3. Comparación de valores 2007-2008 y valores 2015-2016

De manera análoga a las variaciones observadas al comparar las concentraciones 2007-2008, al comparar las concentraciones 2007-2008 con las 2015-2016 se desprende que para las aguas superficiales estas son superiores en el período 2015-2016, mientras que para los sedimentos activos estas alcanzan los valores más bajos en 2015-2018.

Las precipitaciones en la cuenca ocurren mayormente como nieve, y se concentran principalmente entre los meses de mayo a agosto. La nieve acumulada en la criósfera genera una escorrentía importante durante el verano, además de aumentos en el nivel de agua en el embalse Santa Juana (Salas *et al.*, 2016). Los autores mencionados estudiaron la dinámica hidrológica mediante el análisis del nivel de agua en el embalse, parámetro que permite determinar fácilmente períodos de recarga, identificando 6 períodos asociados a eventos climáticos; uno de ellos en el período 2007-2008 y otro en 2015. Entre 2007 y 2008 se detectó que la escorrentía aumentó de un año a otro debido a fuertes precipitaciones nivales en 2007 y cuyo deshielo en 2008 aumentó la escorrentía superficial durante el verano. Por otro lado, en 2015 se registraron precipitaciones de entre 61 a 76 mm junto a una gran cantidad de precipitación nival (DGA, 2015), lo que generó alzas en el nivel del embalse durante los días posteriores. En la figura 6.1 se observan los caudales medios mensuales de 2 estaciones de la DGA durante el período 2007-2016. En ella se observa que efectivamente los caudales en 2008 son superiores a los de 2007, y además se observa un alza de los caudales a partir de 2015 y que se dispara en 2016.

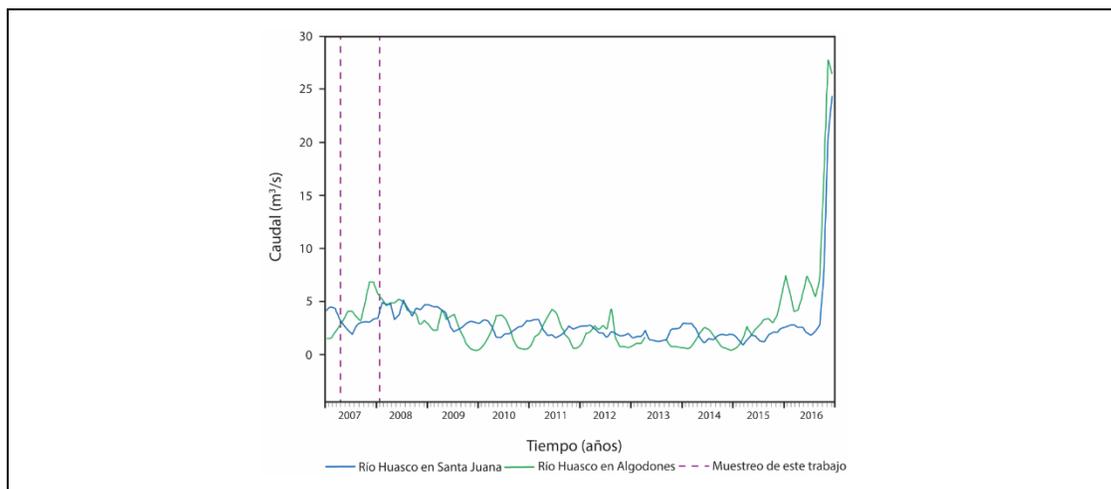


Figura 6.1. Evolución de los caudales del río Huasco. Elaboración a partir de estadísticas DGA

Los cambios en la componente natural son evidentes, mientras que para la componente antrópica no se tienen registros de accidentes o derrames importantes al río. Por otro lado, según el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), en las comunas de Huasco, Vallenar y Freirina fueron aprobados 33 proyectos durante 2007 y 2008, de ellos 32 lo hicieron mediante una declaración de impacto ambiental (DIA) y 1 a través de un estudio de impacto ambiental (EIA), el cual corresponde al proyecto Mina el Morro. Por su parte, entre 2015-2016 fueron aprobados 26 proyectos, 22 a través de DIA y 4 mediante EIA, estos últimos pertenecientes al sector energético, en particular parques fotovoltaicos Cabe destacar que en su mayoría, las DIA en ambos períodos, corresponden a actividades de transporte de sustancias a escala inter-regional. En este sentido, no existen mayores cambios en la componente antrópica que puedan estar generando cambios en la dinámica de la composición química del río.

Para aguas superficiales se observa que en el período 2007-2008 las concentraciones son más elevadas en 2008 para la mayoría de los elementos. Al ampliar el período de análisis, se observa que las concentraciones 2015-2016 son más altas que en 2007-2008. En cuanto a los elementos utilizados para hacer este análisis, en la base de datos 2007-2008 que se presenta en este trabajo As, Mn y Cu presentan concentraciones más elevadas en 2008, mientras el Fe lo hace en 2007. Las concentraciones 2007-2008 obtenidas de la DGA son inferiores a su símil del período 2015-2016 para todos los elementos mencionados. La diferencia entre los datos obtenidos del organismo estatal con los de este trabajo radica en el filtrado: los datos de la DGA no son filtrados al momento de tomar la muestra y tampoco en los laboratorios, por ende representan la fracción total; incluyendo aquellas partículas que se encuentran suspendidas en la masa de agua, por otro lado los datos que se presentan en este trabajo son filtrados, por tanto representan la fracción disuelta presente en las aguas.

En este sentido, se observa una relación directa entre los aumentos en el caudal del río y las concentraciones de los elementos en sus aguas. Existe evidencia de que las tormentas son el principal mecanismo de removilización de metales hacia los ríos (Villanueva *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017). Lo anterior es notorio en los perfiles comparativos de los elementos Mn y Fe, cuyas concentraciones son evidentemente más elevadas en casi todas las estaciones de la DGA, mientras que Cu y As presentan concentraciones levemente más elevadas en casi todas las estaciones. Todos los elementos mencionados presentan concentraciones más elevadas para

2007-2008 en la estación más cercana al mar. El hecho de que las concentraciones aumenten en 2015-2016 se asocia a los aumentos de los caudales debido a la mayor tasa de deshielo. La desembocadura es la zona más alejada de la cordillera donde nace el río, además es la zona con mayor impacto industrial, lo que explicaría el comportamiento inverso respecto al resto del río. Tapia, *et al.*, 2018 estudio un fenómeno similar en el río el Salado, en la parte norte de la región, concluyendo que existe una removilización de Cu, Mo y Sb posterior al evento de 2015, evidenciada en un aumento en las concentraciones de estos elementos en las aguas superficiales, y siendo estos cambios más evidentes en la parte baja de la cuenca. Estudios en Escocia han concluido que el Al, Cd, Cu, Fe, Mn y Pb aumentan sus concentraciones por efecto del deshielo (Abrahams *et al.*, 1989).

Para los sedimentos activos la situación es inversa; y si bien no es tan notoria entre 2007-2008, si es notoria en 2015-2016. Existen trabajos que han descrito cambios en la geoquímica de sedimentos activos posterior al evento aluvional de marzo de 2015. En el trabajo mencionado anteriormente (Tapia *et al.*, 2018) se describe un aumento en las concentraciones de Cu, Mo y en menor medida Li, As, Cd y Sb en los sedimentos del río Salado. De manera contraria a lo descrito en el párrafo anterior en el trabajo de Aguilar *et al.* (2021), se analizan concentraciones pre (2011-2012) y post (2015-2019) al evento de tormenta, notando que estas aumentan en todos los metales estudiados. Ambas publicaciones identifican fuentes antropogénicas como el origen de los elementos que analizaron: en el trabajo de Tapia *et al.* (2018) se plantea que las concentraciones aumentan debido a la removilización de estos elementos en la zona, que ha sido históricamente impactada por operaciones mineras, mientras que Aguilar *et al.* (2021) plantean que posiblemente sedimentos de zonas no impactadas por operaciones mineras fueron redistribuidos a las zonas mayormente impactadas, mientras que los sedimentos de zonas mineras fueron redistribuidos aguas abajo de su lugar de origen. En este estudio no se observa una componente antropogénica tan clara asociada a la composición geoquímica de los elementos, sin embargo, es posible que sedimentos removilizados desde zonas aguas arriba, del embalse hayan ingresado al río, generando un efecto de dilución de las concentraciones de los elementos comparados, los cuales tienen su origen principalmente en la geología de la parte baja de la cuenca.

6.4. Calidad Ambiental en ambas matrices

Se evaluó la calidad ambiental tanto de aguas como sedimentos a partir de los parámetros descritos en el capítulo 4. Aquellos parámetros para los cuales solo se contaba con información de 2007-2008 fueron evaluados sólo en ese período, mientras que aquellos parámetros que se incluyen en las normativas y que fueron comparados en 2015-2016, fueron evaluados en ambos períodos. En el anexo III se encuentran los perfiles O-E con la línea que marca el valor del estándar.

Para la matriz agua se analizó bajo los valores establecidos en la norma secundaria de calidad ambiental (NSCA); los parámetros Al, NO₃ y Zn fueron evaluados solo en 2007-2008, mientras los parámetros As, Cu, Mn y Fe fueron estudiados en los períodos 2007-2008 y 2015-2016. Tanto para el Al como el As no hay muestras que superen el valor umbral. En el Zn 3 valores superan la norma. Para el Cu solo 4 valores 2015-2016 superan lo establecido por la norma. Para el Mn 8 observaciones de 2015-2016 superan el umbral, mientras que solo una de 2007-2008 sale de la norma. Los parámetros Fe y NO₃ presentan varias muestras sobre los valores normados. Para el caso del nitrato la mayoría de los valores medidos superan la NSCA, lo que es particularmente preocupante si se considera que parte del valle se destina a la agricultura y que el nitrógeno es uno de los principales nutrientes que se agrega como fertilizante a los suelos. Existe un reporte, de 2015 sobre el humedal de la desembocadura, que describe una condición de eutrofización en él (Tabilo *et al.*, 2016). En el caso del Fe, tanto los valores 2007-2008 reportados por la DGA como valores 2015-2016 exceden con creces los valores umbrales. Las estaciones más cercanas a la desembocadura son las que presentan los valores más elevados, y que además superan lo establecido por la NSCA en ambos períodos evaluados. Desde el km 40 hacia el este, solo las concentraciones 2015-2016 superan la norma. Cabe mencionar que los valores normados por la NSCA son totales, es decir medidos en aguas sin filtrar, en ese sentido, no existe certeza de si realmente más valores de Zn y Al superan la norma.

Los sedimentos fueron evaluados bajo el parámetro PEL (*Probably Effect Level*), dado que sobre esos niveles serían esperables consecuencias en los organismos. Y de manera equivalente a lo realizado con las aguas superficiales se analizaron As, Cd y Pb para el período 2007-2008 y Cr, Cu, Zn y Ni para los dos períodos considerados en este estudio. Los elementos As, Cd, Pb y Cr

no presentan muestras que superen el valor PEL. Para el Zn se tiene que dos valores superan el valor PEL. Para el Cu tres muestras se encuentran sobre el parámetro. Para el Ni, 8 muestras, todas del trabajo de Lacassie, J.P. & Díaz, A. 2019, se encuentran sobre el parámetro de calidad utilizado. Los autores mencionados abordan lo anterior en su publicación, indicando que podría tratarse de un error analítico.

7. CONCLUSIÓN

Después analizar espacio-temporalmente las concentraciones elementos mayores y trazas en los períodos 2007-2008 y 2015-2016 se pueden obtener conclusiones de diversa índole.

Respecto a la geoquímica de aguas superficiales descrita para el período 2007-2008 se presenta una componente importante asociada a aerosoles marinos y la cercanía al océano, cuya influencia se extiende aproximadamente 40 km hacia el interior del valle, y no se restringe solo a elementos mayores (Ca, Na, Mg, K y Cl) sino que también a elementos como el Li, Sr, B y U. Por otro lado también refleja la presencia de diversos depósitos minerales en la zona; en particular de hierro, Zn-Pb, Co y Mn. Dentro de los parámetros analizados dos de ellos se consideran de origen principalmente antropogénico; el níquel y el nitrato. El primero tiene su origen en los gases provenientes de la combustión de petcoke para la generación de energía, mientras el segundo estaría siendo movilizado desde los suelos tratados con fertilizantes.

Más específicamente, en las aguas superficiales se distinguen tres zonas caracterizadas por su geoquímica; aguas arriba de la ciudad de Vallenar las aguas exhiben asociaciones asociadas a los depósitos de Pb-Zn. Aguas abajo de la ciudad de Vallenar hasta la localidad de Freirina, donde la impronta geoquímica se caracteriza por la presencia de elementos asociados principalmente a los depósitos de la franja ferrífera, y de cobalto y manganeso. La tercera zona, aguas abajo de Freirina y que en parte se solapa con la segunda zona; afectada principalmente por la presencia de aerosoles marinos. Desde un punto de vista medioambiental, la presencia de actividad antropogénica se concentra en la segunda y tercera zona, y donde los resultados demuestran el impacto de esta presencia.

La geoquímica de sedimentos activos refleja la diversidad de depósitos presentes en la zona; Ti, Ag, óxidos de hierro-apatito, Co, Mn, Pb-Zn e incluso presentan señales provenientes de la parte alta de la cuenca. En esta matriz no se encontró evidencia de orígenes antropogénicos, sin embargo, tanto los depósitos de hierro como las plantas de concentración de este elemento se encuentran en la zona, por lo que un estudio más acabado en sedimentos preindustriales permitiría mayor certeza.

En sedimentos activos solo es posible identificar dos zonas con diferentes dominios geoquímicos; aguas arriba del embalse, donde los sedimentos exponen señales geoquímicas asociadas a los

depósitos presentes en la cabecera del río, con asociaciones de Cd, Zn, As y aguas abajo del embalse, donde confluyen una diversidad de señales geoquímicas asociadas a la diversidad de depósitos presentes (Pb-Zn, Ag, Fe-apatito, Co, Mn y Ti) y que se solapan entre sí.

Si bien ambas matrices presentan una fuerte influencia de los depósitos presentes, las señales son más diferenciadas en aguas superficiales, dado que los procesos para que los elementos se integren a ellas son más complejos que los procesos que integran metales a los sedimentos activos.

Al comparar las concentraciones 2007 y 2008 de aguas superficiales estas son en su mayoría más elevadas en 2008 y de forma inversa, en sedimentos activos estas son mayores en 2007. La removilización de elementos en este período es posterior a un evento climático que conllevó mayor caída de nieve en la cabecera del río, y cuyo derretimiento generó aumentos en el caudal y removilización de los elementos.

En un período más amplio de tiempo se observa un fenómeno similar; comparativamente, las concentraciones pesquisadas en 2015-2016 son más elevadas que las de 2007-2008, al igual que los caudales reportados por dos estaciones dentro de la cuenca. El evento meteorológico registrado en marzo de 2015 fue de mayor envergadura al registrado entre 2007-2008, generando una mayor removilización de elementos a la observada entre 2007 y 2008. Dentro de los elementos más móviles en aguas superficiales se encuentran el Zn, el Fe y Mn, siendo lo anterior más evidente en la fracción total para los últimos dos parámetros.

En cuanto a la calidad ambiental evaluada en ambas matrices se puede concluir que las aguas superficiales presentan más excedencias que los sedimentos. Dentro de los parámetros analizados en sedimentos, ninguno presenta excedencias en el período 2015-2016, por lo que en ese sentido la baja en las concentraciones expuesta en el párrafo anterior no estaría influyendo negativamente en la calidad ambiental de los sedimentos. En las aguas superficiales ocurren gran parte de los excesos en Cu y Fe ocurren en 2015-2016, por lo que la removilización natural de estos elementos afecta a la calidad de las mismas. No se cuentan con datos respecto de la concentración de Zn en aguas superficiales en 2015-2016, sin embargo, dado a que se considera un elemento móvil y cuyo aumento entre 2007-2008 fue bastante considerable. El nitrato solo fue evaluado en 2007-2008 presentando una gran cantidad de elementos sobre lo normado, además de ser

considerado como un contaminante y cuyos efectos adversos se están haciendo presentes en el río.

Para poder mejorar la gestión del recurso, se recomienda un estudio más acabado de la geoquímica de las rocas del sector, a modo de establecer valores base para comparar con los sedimentos activos. En cuanto a las aguas superficiales se recomienda realizar estudios de los isotopólogos del nitrato, lo que permitiría dilucidar empíricamente los diferentes aportes de este compuesto al río.

REFERENCIAS

- ABRAHAMS, P.W., TRANTER, M., DAVIES, T.D. & BLACKWOOD, I.L. 1989.** Geochemical studies in a remote scottish upland catchment II. Streamwater chemistry during snow-melt. *Water. Air. Soil Pollution*. **43**: 231–248.
- ACEITUNO, P. 1988.** On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector: part I. *Surface climate, Monthly Weather Review*. **116**: 505– 524.
- AGUILAR, G., RIQUELME, R., MARTINOD, J. & DARROZES, J. 2013.** Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean Geology*. **40**: 79-101.
- AGUILAR, G., VALDÉS, A., CABRÉ, A. & GALDAMES, F. 2021.** Flash floods controlling Cu, Pb, As and Hg variations in fluvial sediments of a river impacted by metal mining in the Atacama Desert. *Journal of South American Earth Sciences*. **109**: 103290.
- AITCHISON J. 1986.** The statistical analysis of compositional data. Chapman & Hall. 416 pp. Londres.
- ARÉVALO, C. & WELKNER, D. 2008.** Geología del Área Carrizal bajo-Chacritas. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 111:67 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- ARÉVALO, C., MOURGUES, F.A., & CHÁVEZ, R. 2009.** Geología del Área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 120: 64p., 1 mapa escala 1:100.000.
- BARBOSA, F. 2017.** Toxicology of metals and metalloids: Promising issues for future studies in environmental health and toxicology. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, **80** : 137-144.
- BARTON M. D. 2014.** Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. *Geochemistry of Mineral Deposits*. Elsevier Inc . 515–536.
- BILENKER, L.; SIMON, A.; REICH, M.; LUNDSTROM, C.; GAJOS, N.; BINDEMAN, I.; BARRA, F. & MUNIZAGA, R. 2016.** Fe-O stable isotope pairs elucidate a high temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*- **177**: 94–104.
- BÖRGEL, R. 1983.** Geomorfología y Geografía de Chile. Tomo II. Instituto Geográfico Militar. 182 pp. Santiago
- BOX, G. & COX, D.R. 1964.** An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society* . **26**:211–52.
- BOYD, R. 2011.** Selenium stories. *Nature Chemistry*. **3**: 570

- BROOKINS, D.G. 1986.** Geochemical behavior of antimony, arsenic, cadmium and thallium: Eh pH diagrams for 25°C, 1-bar pressure. *Chemical Geology*. **54**: 271–278.
- CARITAT, P. & COOPER, M. 2015.** A continental-scale geochemical atlas for resource exploration and environmental management: the National Geochemical Survey of Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. **16**: 3-13.
- CASA, J. & SORDO, J. 2006.** Chapter 1: An overview of the historical importance, occurrence, isolation, properties and applications of lead. Lead Chemistry, Analytical Aspects, Environmental Impact and Health effects. Elsevier. 366 pp. Amsterdam.
- CASTILLO, C. 2019.** Relaciones entre variables ambientales y macroinvertebrados bentónicos en un gradiente de perturbación de hábitat en la cuenca del Río Huasco. Seminario de Título para optar al título de Biólogo con mención Medio Ambiente (Inédito). Santiago de Chile.
- CENMA, 2016.** Estudio monitoreo y actualización de antecedentes técnicos para desarrollar norma secundaria de calidad para la protección de las aguas continentales en la cuenca del Río Huasco, Región de Atacama.
- CENMA, 2017.** Evaluación y caracterización del polvo negro en la comuna de Huasco e implementación de medidas de mitigación. Santiago de Chile. 168 p.
- CHASSÉ, M.; GRIFFIN, W.; O'REILLY, S. & CALAS, G. 2019.** Australian laterites reveal mechanisms governing scandium dynamics in the critical zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **260**: 292-310.
- CHESTER, R. & STONER J. H. 1973.** Pb in particulates from the lower atmosphere of the eastern Atlantic. *Nature*. **245**:27– 8.
- CHOUBEY, P.K., CHUNG, K.S., KIM, M.S., LEE, J.C. & SRIVASTAVA, R. 2017.** Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element Lithium. Part II: From sea water and spent lithium ion batteries (LIBs). *Minerals Engineering*. **110**:104-121
- COHEN, D.R., RUTHERFORD, N.F., MORISSEAU, E. & ZISSIMOS, A.M. 2012.** Geochemical patterns in the soils of Cyprus. *Science of the Total Environment* .**420**: 250–262.
- DEDITIUS, A.P., REICH, M., SIMON, A.C., SUVOROVA, A., KNIPPING, J., ROBERTS, M.P. & SAUNDERS, M. 2018.** Nano geochemistry of hydrothermal magnetite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. **173**: 46.
- D.G.A. 2015.** Datos históricos y actuales de: reportes de pozos, reporte fluviométricos y reportes meteorológicos.
- EDMUNDS, M. & SMEDLEY, P. 2013.** Fluoride in Natural Waters. Essentials of Medical Geology, Second Edition. 805 pp. Dordrecht.
- EDZWALD, J. 2020.** Aluminium in drinking wáter: Occurrence, Effects, and Control. *Journal: American Water Works Association*. Vol. **112**: 34-41.

- EISMA, D., VAN DE GAAST, S.J., MARTIN, J.M. & THOMAS, A.J. 1978.** Suspended matter and bottom deposits of the Orinoco Delta: turbidity, mineralogy, and elementary composition. *Netherlands Journal of Sea Research*. **12**: 224–251.
- EMEIS, K. 1985.** Particulate suspended matter in major world rivers. II: Results on the rivers Indus, Waikato, Nile, St. Lawrence, Yangtze, Parana, Orinoco, Caroni, and Mackenzie. *Transport of Carbon and Minerals in Major World rivers*. **58**: 593-617.
- EXLEY, C. 1998.** Silicon in life: A bioinorganic solution to bioorganic essentiality. *Journal of Inorganic Biochemistry*. **69**: 139-144.
- FAVIER, V., FALVEY, M., RABATEL, A., PRADERIO, E. & LÓPEZ, D. 2009.** Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26-32°S). *Water resources research*. **45**:1-20
- FERGUSON, J.E. 1990.** Heavy elements in the environment. The heavy elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press. 614 pp. Oxford.
- FILZMOSER, P. & CROUX, C. 2003.** Dimension reduction of the explanatory variables in multiple linear regression. *Katholieke Universiteit Leuven Open Access Publications*. **14**: 59-70.
- FILZMOSER, P., HRON, K. & REIMANN, C. 2009.** Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data. *Science of the Total Environment*. **407**: 6100–6108.
- FILZMOSER, P., HRON, K. & REIMANN, C. 2010.** Bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data. *Science of the Total Environment*. **408**: 4230–4238.
- FOWLER, D., COYLE, M., SKIBA, U., SUTTON, M., CAPE, J.N., REIS, S., SHEPPARD, L., JENKINS, A., GRIZZETTI, B., GALLOWAY, J.N., VITOUSEC, P., LEACH, A., BOUWMAN, A.F., BUTTERBACH-BAHL, K., DENTENER, F., STEVENSON, D., AMANN, M. & VOSS, M. 2013.** The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. **368**: 20130164.
- GAILLARDET, J., VIERS, J. & DUPRÉ, B., 2003.** Trace Elements in River Waters. *Treatise on Geochemistry, volume 5*. Holland, H. & Turekian, K. (Editores). Elsevier . 9144 pp. Londres.
- GALUSZKA, A. & MIGASZEWSKI M.Z., 2011.** Geochemical background- an environmental perspective. *Mineralogia*. **42**: 7-17.
- GARCÍA, F. 1967.** Geología del Norte Grande de Chile. Symposium sobre el Geosinclinal Andino, Actas, Sociedad Geológica de Chile, Vol. **3**, 138 p.
- GARRELS, R. & MACKENZIE, F. 1971.** Evolution of sedimentary rocks. Norton: 397 pp. Nueva York
- GARRET, R.G. 1991.** The management analysis and display of exploration geochemical data. Exploration Geochemistry workshop. Geological Survey of Canada: 444p. Ottawa.

- GARRETT, R.G., REIMANN, C., SMITH, D.B. & XIE, X. 2008.** From geochemical prospecting to international geochemical mapping: a historical overview. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. **8**: 205-217.
- GIPSON, M.; TAYLOR, G.K. & GROCOTT, J. 2003.** New palaeomagnetic results and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology from the Vallenar region (29°S), N. Chile. General Assembly of the European Geophysical Society, No. 27, Actas 4, Abstract No. EGS02- A-06020. Nice, France.
- GODOY E. & LARA, L. 1998.** Cartas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas geológicos 5-6, 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- GREEN, T.H. 1980.** Island arc and continent-building magmatism- a review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*. **63**: 367–385.
- GROVES, D.I., BIERLEIN, F.P., MEINERT, L.D. & HITZMAN, M.W. 2010.** Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*. **105**: 641-654.
- GUTIÉRREZ, D. 2021.** Caracterización geoquímica: Identificación de anomalías geoquímicas de metales y metaloides en sedimentos activos del río Huasco. Unidad de Investigación. Universidad de Chile (Inédito). 57p. Santiago.
- HAWKES, H. E. & WEBB, J.S. 1962.** Geochemistry in Mineral Exploration. Harper & Row. 425 pp. Nueva York.
- HORTSMAN, E.L. 1957.** The distribution of lithium, rubidium and caesium in igneous and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **12**:1-28.
- HUANG, W.W., ZHANG, J. & ZHOU, Z.H. 1992.** Particulate element inventory of the Huanghe Yellow River: a large, high-turbidity river. *Geochimica Cosmochimica Acta*. **56**, 3669–3680.
- INDH (Chile), 2017.** Conflictos medio ambientales INDH, en: <https://mapaconFLICTOS.indh.cl/#/>
- INE (Chile) 2007.** VII Censo nacional agropecuario y forestal. Resultados preliminares 2006-2007. : Instituto Nacional de Estadísticas Santiago, Chile.
- JACQUES, D.; ŠIMŮNEK, J.; MALLANTS, D. & VAN GENUCHTEN, M. 2005.** Modelling uranium leaching from agricultural soils to groundwater as a criterion for comparison with complementary safety indicators. Symposium Proceedings. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Gent, Belgium, 12-16 September 2005.
- JARREL, W.M., PAGE, A.L. & ELSEEWI, A. 1980.** Molybdenum in the environment. Residue Reviews (Gunther, F.A & Gunther, J.D. Editores). Springer. 144 pp. Nueva York.
- JORQUERA, C.O., OATES, C.J., PLANT, J.A., KYSER, K., IHLENFELD, C. & VOULVOULIS, N. 2015.** Regional hydrogeochemical mapping in Central Chile: natural and

anthropogenic sources of elements and compounds. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. **15**: 72–96.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press. 331 pp. Boca Ratón.

KNIPPING, J.L., BILENKER, L.D., SIMON, A.C., REICH, M., BARRA, F., DEDITIUS, A.P. & MUNIZAGA, R. 2015A. Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology*. **43**: 591-594.

KNIPPING, J.L., BILENKER, L.D., SIMON, A.C., REICH, M., BARRA, F., DEDITIUS, A.P. & MUNIZAGA, R. 2015b. Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochimica Cosmochimica Acta*. **171**: 15-38.

LA CRUZ, N., SIMON, A., WOLF, A., REICH, M., BARRA, F. & GAGNON, J. 2019. The geochemistry of apatite from the Los Colorados iron oxide-apatite deposit, Chile: implication for ore genesis *Mineralium Deposita*. **54**: 1143-1153.

LACASSIE, J.P. & DÍAZ, A. 2019. Geoquímica y mineralogía de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Huasco, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. IR-19-71: 81 p. Santiago.

LANCELLOTTI, D.A. & STOTZ, W.B. 2004. Effects of shoreline discharge of iron mine tailings on a marine soft-bottom community in northern Chile. *Marine Pollution Bulletin*. **48**: 303-312.

LIEBEN, F.; MORITZ, R. & FONTBOTE, L. 2000. Mineralogy, Geochemistry and Age Constraints on the Zn-Pb Skarn Deposits of Maria Cristina, Quebrada Galena, Northern Chile. *Economic Geology*. **95**: 1185-1196.

LUQUE, R. M. & SANDOVAL, M. A. 2018. La pervivencia de la olivicultura tradicional en el valle de Huasco (Atacama, Chile). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. **77**: 335–367.

MACDONALD, D. D., INGERSOLL, C. G. & BERGER, T. A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of environmental contamination and toxicology*, **39**: 20-31.

MARTIN, J.M. & MEYBECK, M. 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*. **7**: 173-206.

MIGASZEWSKI, Z. M. & GALUSZKA, A. 2015. Characteristics, Occurrence, and Geochemical Behavior of Rare Earth Elements in the Environment: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. **45**: 429–471.

- MILLERO, F., FEISTEL, R., WRIGHT, D. & MCDUGALL, T. 2008.** The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. **55**: 50–72.
- MONTECINOS, A. & ACEITUNO, P. 2003.** Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*. **16**: 281-296.
- MONTECINOS, M., COQUERY, M., ALSINA, M.A., BRETIER, M., GAILLARD, J.F., DABRIN, A. & PASTÉN, P. 2020.** Partitioning of copper at the confluences of Andean rivers. *Chemosphere*. **259**: 127318.
- MORTIMER, C. 1973.** The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. *Journal of Geological Society of London*. **129**: 505-526.
- MOSCOSO, R. 1979.** Geología de una franja Transeversal a la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes a la Latitud de Domeyko (29°S) Región de Atacama. Memoria para optar al título de Geólogo(inédito), Universidad de Chile: 166 p. Santiago de Chile.
- MOSJOS, S. 2017.** Estudio Geoquímico Ambiental y Mapa de Riesgos de la cuenca del río Huasco, III Región de Atacama, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 133 p.
- MOURGUES, F.A., JAILLARD, E., ARÉVALO, C. & BULOT, L. 2009.** La Cuenca de Chañarcillo (Cretácico Inferior, 26-30°S): Bioestratigrafía, estratigrafía secuencial y tectónica sinsedimentaria. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago.
- NALPAS, T., DABARD, M.P., RUFFET, G., VERNON, A., MPODOZIS, C., LOI, A. & HÉRAIL, G. 2008.** Sedimentation and preservation of the Miocene Atacama Gravels in the Pedernales-Chañaral Area, Northern Chile: Climatic or tectonic control? *Tectonophysics*. **459**: 161-173.
- OGUMA, K.; SUZUKI, T. & SAITO, K. 2011.** Determination of uranium in seawater by flow-injection preconcentration on dodecylamidoximeimpregnated resin and spectrophotometric detection. *Talanta*. **84**: 1209–1214.
- OYARZÚN, J., OYARZÚN, R., LILLO, J., HIGUERAS, P., MATURANA, H. & OYARZÚN, R. 2016.** Distribution of chemical elements in calc-alkaline igneous rocks, soils, sediments and tailings in northern central Chile. *Journal of Southamerican earth Sciences*. **69**: 25-42.
- PALMA, G., BARRA F., REICH, M., SIMON, A.C. & ROMERO, R. 2020.** A review of magnetite geochemistry of Chilean Iron Oxide-Apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*. **126**: 103748.
- PARKHURST, D. 1995.** User's guide to PHREEQC- a computer program for speciation reaction path, advective-transport and inverse geochemical calculations.

- PLANT, J.A., KLAVER, G., LOCUTURA, J., SALMINEN, R., VRANA, K. & FORDYCE, F.M. 1997.** The forum of European geological surveys geochemistry task group inventory 1994-1996. *Journal of Geochemical Exploration*. **59**: 123–146. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)
- POULTON S.W. & RAISWELL, R. 2000.** Solid phase associations, oceanic fluxes and the anthropogenic perturbation of transition metals in world river particulates. *Marine Chemistry*. **72**: 17-31.
- PRESLEY, B.J., TREFREY, J.H. & SHOKES, R.F. 1980.** Heavy metal inputs to Mississippi Delta sediments. A historical view. *Water, Air, Soil Pollution*. **13**: 481–494
- READ, D., BLACK, S., TRUEMAN, E., ARNOLD, T. & BAUMANN, N. 2008.** The fate of depleted uranium in near surface environments. Loads and Fate of Fertilizer-derived Uranium. Backhuys Publishers (De Kok, L.J. & Schnug, E. (Editores). 229 pp. Leiden, The Netherlands.
- REICH, M., SIMON, A., DEDITUS, A., BARRA, F., CHYSSOULIS, S., LAGAS, G., TARDANI, D., KNIPPING, J., BILENKER, L., SÁNCHEZ, P., ROBERTS, M. & MUNIZAGA, R. 2016.** Trace element signature of pyrite from the Los Colorados iron oxide-apatite (IOA) deposit, Chile: A missing link between andean iron oxide copper-gold systems. *Economic Geology*, **111**: 743–761. doi:10.2113/econgeo.111.3.743.
- REIMANN, C. & DE CARITAT, P. 2005.** Distinguishing between natural and anthropogenic sources for element in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total environment*. **337**: 91-107.
- REIMANN, C., FILZMOSE, P., GARRETT, R. G. & DUTTER, R. 2008.** Statistical data analysis explained. Wiley and sons. 337 pp. Londres.
- REIMANN, C. & GARRETT, R. G. 2005.** Geochemical background-concept and reality. *Science of the Total Environment*. **350**: 12-27.
- REIMANN, C., SIEWERS, U., TARVAINEN, T., BITYUKOVA, L., ERIKSSON, J., GILUCIS, A., GREGORAUSKIENE, V., LUKASHEV, V., MATINIAN, N.N. & PASIECZNA, A. 2000.** Baltic soil survey: Total concentrations of major and selected trace elements in arable soils from 10 countries around the Baltic Sea. *Science of the Total Environment*. **257**: 155–170.
- RICHARDS J. P. & MUMIN A. H. 2013.** Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: iron oxide-copper-gold and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits. *Geology*. **41**: 767-770.
- ROJAS, P., BARRA, F., REICH, M., DEDITIUS, A., SIMON, A., URIBE, F., ROMERO, R. & ROJO, M. 2018.** A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*. **53**: 947-966.

- ROMERO, V., NORRIS, F., RÍOS, J., CORTÉS, I., GONZÁLEZ, A., GAETE, L. & TCHERNITCHIN, A. 2017.** Consecuencias de la fluoración del agua potable en la salud humana. *Revista Medica de Chile*. **145**: 240-249
- SAHOO, P., DALL'AGNOL R., SALOMAO, G., JUNIOR, J., SILVA, M., FILHO, P., POWELL, M., ROMULO, A., PONTES, P., COSTA, M. & SIQUEIRA, J. 2019.** High resolution hydrogeochemical survey and estimation of baseline concentrations of trace elements in surface water of the Itacaiúnas River Basin, southern Amazonia: Implication for environmental studies. *Journal of Geochemical Exploration*. **205**: 106321.
- SALAS, I., HERRERA, C., LUQUE, J.A., DELGADO, J., URRUTIA, J. & JORDAN, T. 2016.** Recent Climatic events controlling the hydrological and the aquifer dynamics at arid áreas: The case of Huasco River watershed, northern Chile. *Science of Total Environment*. **571**: 178-194.
- SALAZAR, E., BARRA, F., REICH, M., SIMON, A., LEIEN, M., PALMA, G., ROMERO, R. & ROJO, M. 2019.** Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*. **55**: 409-428.
- SALMINEN, R., BATISTA, M. J., BIDOVEC, M. DEMETRIADES, A., DE VIVO. B., DE VOS, W., DURIS, M., GILUCIS, A., GREGORAUSKIENE, V., HALAMIC, J., HEITZMANN, P. & LIMA, A. 2005.** Geochemical Atlas of Europe Part 1: Background Information, Methodology and maps. Geological Survey of Finland. 526 pp. Espoo, Finlandia.
- SCHUNG, E. & HANEKLAU, S. 2008.** Dispersion of uranium in the environment by fertilization. Uranium, Mining and Hydrogeology. Springer. 955 pp. Berlin
- SCHWERDTFEGER, W. 1976.** Climates of Central and South America. Elsevier Scientific Publishing Company. 532 pp. Amsterdam.
- SEGERSTROM, K. & RUIZ, C. 1962.** Cuadrángulo Copiapo, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile. No. 6, 115 p., 1 mapa escala 1:50.000.
- SERNAGEOMIN. 2011.** Atlas de Faenas Mineras: Regiones de Antofagasta y Atacama (Versión Actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile N°7: 153 p. Santiago.
- SERNAGEOMIN. 2020.** Geoquímica de superficie de Depósitos de Relaves. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago de Chile.
- SHACKLETTE, H. T., HAMILTON, J. C., BOERNGEN, J. G. & BOWLES, J. M. 1971.** Element composition of surficial materials of the conterminous United States. US Geological Survey Professional Paper 574-D. 70 pp. Washington.
- SILLITOE, R.H. 2003.** Iron oxide-copper-gold deposits: an andean view. *Mineralium Deposita* . **38**: 787-812.

SIMPSON, P.R., BREWARD, N., FLIGHT, D.M.A., LISTER, T.R., COOK, J.M., SMITH, B., & HALL, G.E.M. 1996. High resolution regional hydrogeochemical baseline mapping of stream water of Wales, the Welsh Borders and West Midlands region. *Applied Geochemistry*. **11**: 621–632.

SIMPSON, P.R., EDMUNDS, W.M., BREWARD, N., COOK, J.M., FLIGHT, D., HALL, G.E.M. & LISTER, T.R. 1993. Geochemical mapping of stream water for environmental studies and mineral exploration in the UK. *Journal of Geochemical Exploration*. **49**: 63–88.

Smith, D.B., Cannon, W.F., Woodruff, L.G., Moreira Rivera, F., Rencz, A.N. & Garrett, R.G. 2012. History and progress of the North American Soil Geochemical Landscapes Project, 2001–2010. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences; Peking University)*. **19**: 19–32.

SQUEO, F., HOLMGREN, M., JIMÉNEZ, M., ALBÁN, L., REYES, J. & GUTIÉRREZ, J. 2007. Tree establishment along an ENSO experimental gradient in the Atacama desert. *Journal of Vegetation Science*. **18**: 195–202.

TAPIA, J. 2011. Sources, mobility and bioavailability of trace metals and metalloids in the historically mining and smelter impacted Altiplanean city of Oruro, Bolivia. Ph.D Thesis, Universidad de Chile/Université Paul Sabatier: 270pp. Santiago de Chile.

TAPIA, J., DAVENPORT, J., TOWNLEY, B., DORADOR, C., SCHNEIDER, B., TOLORZA, V. & TUMPLING W. v. 2018. Sources, enrichment, and redistribution of As, Cd, Cu, Li, Mo, and Sb in the Northern Atacama Region: Implications for arid watersheds affected by mining. *Journal of Geochemical Exploration*. **185**: 33-51.

TAYLOR S. R. & MCLENNAN S. M. 2009. Planetary Crusts: Their Composition and Evolution. Cambridge University Press. 378 pp. Cambridge.

TOWNLEY, B., DÍAZ, A. & LUCA, R. 2017. Estado del Arte y Potenciales recurso de Co y Mn en Chile. Advanced Mining Technology Center (AMTC) Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile

TREFREY, J.H., NELSEN, T.A., TROCINE, R.P., METZ, S. & VETTER, T.W. 1986. Trace metal fluxes through the Mississippi River delta system. Rapp. P.-V. Reun.-Cons. Int. Explor. Mer. 186, 277–288.

TUKEY, J. W. 1977. Exploratory data analysis. Addison-Wesley. 688pp. Reading, Massachusetts.

VALDÉS, A., VELÁSQUEZ, J., NECULQUEO, G., DECKART, K., CÁCERES, D., NAVARRO, L., TROGER, D., CANALES, A., BUSCAGLIA, M. & ESCOBAR, M.A. 2022. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco river. *Journal of South American Earth Sciences*. **118**: 103927.

VEGA C. & TAPIA, J. 2020. Zona de Exclusión o Sacrificio Ambiental. En https://geologia-ambiental.cl/wp-content/uploads/2020/08/Zona_exclus.pdf

VEGA, A., KIZAMA, K. & PASTÉN, P. 2018. Water Quality: Trends and Challenges. Water Policy in Chile. Springer Cham (Donoso, G. Editor). 224 pp. Nueva York.

VIERS, J. CARRETIER, S., AUDA, Y., POKROVSKY, O.S., SEYLER, P., CHABAUX, F., REGARD, V., TOLORZA, V. & HERAIL, G. 2019. Geochemistry of Chilean Rivers Within the Central Zone: Distinguishing the Impact of Mining, Lithology and Physical Weathering. *Aquatic Geochemistry*. **23**: 27-48.

VILLANUEVA, J.D., GRANGER, D., BINET, G., LITRICO, X., HUNEAU, F., PEYRAUBE, N. & LE COUSTOMER, P. 2016. Labile trace metal contribution of the runoff collector to a semi-urban river. *Environmental Science and Pollution Research*. **23**:11298–11311.

VIVALLO, W., DÍAZ, A. & JORQUERA, R. 2008. Yacimientos metalíferos de la Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 27: 72 p., 1 mapa escala 1:500.000. Santiago.

WANG, L.K., CHEN, J.P., HUNG, Y.T. & SHAMMAS, N.K. 2009. Heavy Metals in the Environment. Advances in Industrial and Hazardous Wastes Treatment. CRC Press. 526 pp. Boca Raton.

WANG, Q., ZHANG, Q., WU, Y. & WANG, X.C. 2017. Physicochemical conditions and properties of particles in urban runoff and rivers: implications for runoff pollution. *Chemosphere*. **173**:318–325.

WEBB, J. S., THORNTON, I., THOMPSON, M., HOWARTH, R. J. & LOWENSTEIN, P. L. 1978. The Wolfson Geochemical Atlas of England and Wales. Oxford University Press. 69 pp. Oxford.

WEBB, J.S., FORTESCUE, J., NICHOL, I. & TOOMS, J.S. 1964. Regional geochemical Reconnaissance in the Namwala Concession area, Zambia. Technical Communication. 42pp. Lusaka, Zambia.

WEBB, J.S., NICHOL, I., FOSTER, R., LOWENSTEIN, P.L. & HOWARTH, R.J. 1973. Provisional Geochemical Atlas of Northern Ireland. Technical Communication. 60 pp. Londres

WELKNER, D. & ARÉVALO, C. 2002. The Carrizal Bajo Breccias: indications of contemporaneity between two end member magmas in a Late Triassic Extensional setting, northern Chile. In international Symposium on Andean Geodynamic, No. 5: 697-700, Paris.

WELKNER, D., ARÉVALO, C. & GODOY, E. 2006. Geología de la Carta Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 100, 50p., 1 mapa escala 1:100.000.

WICKLEDER, M., FOURES, B., DORHOUT, K. 2006. Thorium. The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements volume 1. Springer (Morss, L., Edelstein, N. & Fuger, J. Editores). 698 pp. Nueva York.

ZHANG, J. 1988. Geochemical behaviour of stable elements in major Chinese river estuaries Yangtze River and Yellow River. PhD thesis, Universite Pierre et Marie Curie. Paris

ZOLLER, W. H., GLADNEY, E. S., DUCE, R. A. 1974. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science*. **183**:199– 201.

ANEXOS

ÍNDICE TABLAS

Tabla	Página
A 1: Ubicación muestras de agua 2007-2008.....	3
A 2: Ubicación muestras de sedimentos 2007-2008.....	4
A 3: Base de datos aguas superficiales 2007.....	5
A 4: Base de datos aguas superficiales2008.....	8
A 5: Base de datos sedimentos 2007.....	14
A 6: Base de datos sedimentos 2008.....	16
A 7: Ubicación estaciones datos comparativos aguas.....	18
A 8: Ubicación muestras comparación sedimentos.....	19
A 9: Base de datos comparativa agua superficial.....	20
A 10: Base de datos comparativa sedimentos activos. (Lacassie & Díaz, 2019).....	32
A 11: Base de datos comparativa CENMA, 2017.....	33
A 12: Base de dato aguas 2007 transformada a ilr.....	36
A 13: Base de datos de aguas 2008 transformada a ilr.....	38
A 14: Base de datos sedimentos transformada a ilr.....	41
A 15: Pesos estandarizados análisis factorial aguas.....	44
A 16: Pesos estandarizados análisis factorial sedimentos.....	45

ÍNDICE FIGURAS

Figura	Página
A 1: Evaluación de calidad ambiental As en aguas superficiales.....	47
A 2: Evaluación de calidad ambiental Al en aguas superficiales.....	48
A 3: Evaluación de calidad ambiental Cu en aguas superficiales.....	49
A 4: Evaluación de calidad ambiental Fe en aguas superficiales.....	50
A 5: Evaluación de calidad ambiental Mn en aguas superficiales.....	51
A 6: Evaluación de calidad ambiental Zn en aguas superficiales.....	52
A 7: Evaluación de calidad ambiental NO ₃ en aguas superficiales.....	53
A 8: Evaluación de calidad ambiental As en sedimentos.....	54
A 9: Evaluación de calidad ambiental Cd en sedimentos.....	55
A 10: Evaluación de calidad ambiental Cr en sedimentos.....	56
A 11: Evaluación de calidad ambiental Cu en sedimentos.....	57
A 12: Evaluación de calidad ambiental Pb en sedimentos.....	58
A 13: Evaluación de calidad ambiental Ni en sedimentos.....	59
A 14: Evaluación de calidad ambiental Zn en sedimentos.....	60

ANEXO I

Bases de datos

N°	Código muestra	Fecha	Coordenada X	Coordenada Y	Matriz
1	H-1-1904-7	19-04-2007	6818831	353797	Agua superficial
2	H-2-1904-7	19-04-2007	6823568	349228	Agua superficial
3	H-3-1904-7	19-04-2007	6824909	347720	Agua superficial
4	H-4-1904-7	19-04-2007	6848687	286893	Agua superficial
5	H-5-1904-7	19-04-2007	6844490	297728	Agua superficial
6	H-1-2004-7	20-04-2007	6837592	330210	Agua superficial
7	H-2-2004-7	20-04-2007	6842951	312174	Agua superficial
8	H-3-2004-7	20-04-2007	6837155	327584	Agua superficial
9	H-1-2204-7	22-04-2007	6846755	290527	Agua superficial
10	H-2-2204-7	22-04-2007	6846289	290597	Agua superficial
11	H-1-2404-7	24-04-2007	6850615	285444	Agua superficial
12	H-2-2404-7	25-04-2007	6851570	285602	Agua superficial
13	H-1-180108	26-04-2007	6850599	285450	Agua superficial
14	H-2-180108	27-04-2007	6848727	286844	Agua superficial
15	H-3-180108	28-04-2007	6845172	295339	Agua superficial
16	H-4-190108	29-04-2007	6844440	297802	Agua superficial
17	H-5-190108	30-04-2007	6843960	303084	Agua superficial
18	H-6-190108	01-05-2007	6833577	332154	Agua superficial
19	H-7-190108	02-05-2007	6833577	332154	Agua superficial
20	H-8-190108	03-05-2007	6824951	347688	Agua superficial
21	H-9-190108	04-05-2007	6817074	355348	Agua superficial
22	H-10-190108	05-05-2007	6842928	312276	Agua superficial
23	H-11-200108	06-05-2007	6841331	317313	Agua superficial
24	H-12-200108	07-05-2007	6841069	317206	Agua superficial
25	H-13-200108	08-05-2007	6839529	323016	Agua superficial
26	H-14-200108	09-05-2007	6836865	327957	Agua superficial
27	H-15-200108	10-05-2007	6826866	338893	Agua superficial

Tabla A.1. Ubicación de muestras de aguas superficiales

N°	Código muestra	Fecha	coordenada x	coordenada Y	Matriz
1	5-1904-7	19-04-2007	6844490	297728	Sedimentos
2	2-2204-7	22-04-2007	6846289	290597	Sedimentos
3	2-1904-7	19-04-2007	6823568	349228	Sedimentos
4	4-1904-7	19-04-2007	6848687	286893	Sedimentos
5	3-1904-7	19-04-2007	6824909	347720	Sedimentos
6	2-2404-7	24-04-2007	6851570	285602	Sedimentos
7	2-2004-7	20-04-2007	6842951	312174	Sedimentos
8	3-2004-7	20-04-2007	6837155	327584	Sedimentos
9	1-2204-7	22-04-2007	6846755	290527	Sedimentos
10	3-1904-7	19-04-2007	6824909	347720	Sedimentos
11	1-1904-7	19-04-2007	6818831	353797	Sedimentos
12	5-190108S	19-01-2008	6843960	303084	Sedimentos
13	6-190108S	19-01-2008	6833577	332154	Sedimentos
14	11-200108S	20-01-2008	6841331	317313	Sedimentos
15	12-200108S	20-01-2008	6841069	317206	Sedimentos
16	13-200108S	20-01-2008	6839529	323016	Sedimentos
17	14-200108S	20-01-2008	6836865	327957	Sedimentos

Tabla A.2. Ubicación muestras de sedimentos 2007-2008.

N°	Código muestra	Ph	T°C	Conductividad μS/cm	Elem. Mayores mg/L		
					Na	Mg	Si
1	H-1-1904-7	8,31	15,3	737	26,33	15,51	7,96
2	H-2-1904-7	8,4	15,7	737	26,78	15,76	7,90
3	H-3-1904-7	8,39	16,4	730	26,61	15,81	7,92
4	H-4-1904-7	8,37	17,1	2410	293,87	43,13	6,05
5	H-5-1904-7	8,28	20,4	2200	278,94	39,25	6,15
6	H-1-2004-7	8,14	15,6	644	25,36	14,20	7,32
7	H-2-2004-7	9,02	21,4	2050	236,30	33,12	4,60
8	H-3-2004-7	8,16	19	709	37,02	15,06	8,04
9	H-1-2204-7	8,45	19,7	2480	285,82	42,33	5,73
10	H-2-2204-7	7,6	17,7	3060	331,58	51,80	10,18
11	H-1-2404-7	7,97	15,6	2680	293,05	43,72	4,97
12	H-2-2404-7	7,23	17	4460	417,74	67,83	9,77
					Elem Mayores mg/L		Elem Traza μg/L
N°	Código muestra	K	Ca	NO3	Cl	Li	B
1	H-1-1904-7	2,13	101,51	2,80	13,67	50,5	229
2	H-2-1904-7	2,11	102,05	1,97	13,24	49,8	230
3	H-3-1904-7	2,15	101,31	1,79	13,33	50,3	233
4	H-4-1904-7	6,91	172,98	0,06	327,85	141,6	1096
5	H-5-1904-7	5,57	155,98	2,53	282,73	119,5	1063
6	H-1-2004-7	2,15	83,30	1,00	14,53	45,7	232
7	H-2-2004-7	4,75	157,13	7,64	222,74	110,2	1118
8	H-3-2004-7	2,40	85,60	1,24	25,34	73,0	270
9	H-1-2204-7	5,73	168,96	<,02	354,82	123,1	1008
10	H-2-2204-7	7,72	222,59	0,61	478,35	101,7	990
11	H-1-2404-7	6,55	182,44	0,02	388,97	101,1	923
12	H-2-2404-7	13,92	221,29	<,02	1458,49	74,9	472
					Elem Traza μg/L		
N°	Código muestra	Al	Sc	Ti	V	Mn	Fe
1	H-1-1904-7	10,7	1,38	1	0,86	11,41	8,0
2	H-2-1904-7	13,0	1,34	<1	0,81	12,72	5,2
3	H-3-1904-7	7,1	1,34	1	0,77	16,70	6,0
4	H-4-1904-7	3,2	1,05	1	1,81	8,30	15,1
5	H-5-1904-7	2,9	1,03	1	2,96	18,17	6,4
6	H-1-2004-7	2,2	1,22	1	0,60	0,03	3,7
7	H-2-2004-7	3,7	0,78	1	2,69	7,87	9,2
8	H-3-2004-7	0,7	1,33	<1	0,94	1,65	2,1
9	H-1-2204-7	2,0	0,93	1	1,82	36,40	15,3
10	H-2-2204-7	1,3	1,70	1	0,86	129,26	55,0
11	H-1-2404-7	0,8	0,90	1	0,68	26,53	13,7
12	H-2-2404-7	0,6	1,72	1	0,01	15,21	143,3

Tabla A.3. Base de datos de aguas superficiales 2007

		Elem Traza $\mu\text{g/L}$					
N°	Código muestra	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
1	H-1-1904-7	0,06	1,83	0,89	3,16	<,05	<,05
2	H-2-1904-7	0,05	1,78	1,28	2,85	<,05	<,05
3	H-3-1904-7	0,05	1,78	0,70	1,36	<,05	<,05
4	H-4-1904-7	0,09	2,87	1,12	2,35	<,05	<,05
5	H-5-1904-7	0,07	2,67	0,68	2,50	<,05	<,05
6	H-1-2004-7	0,01	1,48	0,79	3,71	<,05	<,05
7	H-2-2004-7	0,07	2,67	0,91	4,17	<,05	<,05
8	H-3-2004-7	0,01	1,49	0,57	1,90	<,05	<,05
9	H-1-2204-7	0,08	2,87	0,74	2,44	<,05	<,05
10	H-2-2204-7	0,08	3,81	0,55	2,67	<,05	<,05
11	H-1-2404-7	0,05	3,39	0,44	1,07	<,05	<,05
12	H-2-2404-7	0,05	3,76	0,06	2,17	<,05	<,05
		Elem Traza $\mu\text{g/L}$					
N°	Código muestra	As	Se	Rb	Sr	Mo	Sb
1	H-1-1904-7	2,14	0,8	1,87	465	3,93	0,083
2	H-2-1904-7	2,14	1,5	1,92	484	4,03	0,095
3	H-3-1904-7	2,15	1,4	1,92	482	3,94	0,080
4	H-4-1904-7	4,58	3,5	2,86	1154	4,92	0,103
5	H-5-1904-7	4,92	3,5	2,79	981	5,05	0,120
6	H-1-2004-7	3,93	1,1	2,25	388	4,57	0,075
7	H-2-2004-7	4,52	4,3	2,64	959	4,04	0,112
8	H-3-2004-7	2,93	1,2	1,90	422	4,50	0,096
9	H-1-2204-7	4,63	3,9	2,66	1137	4,51	0,106
10	H-2-2204-7	2,66	4,6	1,38	1389	3,20	0,075
11	H-1-2404-7	2,43	2,8	2,34	1244	3,65	0,082
12	H-2-2404-7	0,25	11,9	5,97	2956	0,55	0,023
		Elem Traza $\mu\text{g/L}$					
N°	Código muestra	Ba	Pb	U	Br	Ce	Hg
1	H-1-1904-7	33,3	0,039	5,03	<5	<,01	<,01
2	H-2-1904-7	33,5	0,021	5,21	<5	<,01	<,01
3	H-3-1904-7	35,0	0,015	5,10	<5	<,01	<,01
4	H-4-1904-7	22,9	0,032	8,40	<5	<,01	<,01
5	H-5-1904-7	24,5	0,027	8,52	<5	<,01	<,01
6	H-1-2004-7	31,5	0,030	4,17	<5	<,01	<,01
7	H-2-2004-7	24,9	0,050	8,95	<5	<,01	<,01
8	H-3-2004-7	30,5	0,009	4,24	<5	<,01	<,01
9	H-1-2204-7	25,0	0,026	8,07	<5	<,01	<,01
10	H-2-2204-7	28,1	0,024	8,89	<5	<,01	<,01
11	H-1-2404-7	25,8	0,013	6,61	<5	<,01	<,01
12	H-2-2404-7	35,7	0,013	3,52	<5	<,01	<,01

Continuación tabla A.3.

N°	Código muestra	Elem Traza $\mu\text{g/L}$			
		La	Nb	Y	F
1	H-1-1904-7	<,01	<,01	<,01	482
2	H-2-1904-7	<,01	<,01	<,01	458
3	H-3-1904-7	<,01	<,01	<,01	471
4	H-4-1904-7	<,01	<,01	<,01	619
5	H-5-1904-7	<,01	<,01	<,01	561
6	H-1-2004-7	<,01	<,01	<,01	477
7	H-2-2004-7	<,01	<,01	<,01	540
8	H-3-2004-7	<,01	<,01	<,01	483
9	H-1-2204-7	<,01	<,01	<,01	700
10	H-2-2204-7	<,01	<,01	<,01	673
11	H-1-2404-7	<,01	<,01	<,01	545
12	H-2-2404-7	<,01	<,01	<,01	50

Continuación tabla A.3.

N°	Código muestra	Ph	T°C	Conductividad μ S	Elem. Mayores mg/L			
					Na	Mg	Si	K
1	H-1-180108	7,92	21,9	3600	446,031	75,782	9,177	10,712
2	H-2-180108	8,02	28,7	3344	409,663	64,842	7,783	8,763
3	H-3-180108	7,62	24,8	2940	347,744	63,954	11,964	7,195
4	H-4-190108	8,06	20,1	2984	316,844	60,234	11,716	5,867
5	H-5-190108	8,38	21,6	2788	279,247	56,289	11,74	5,479
6	H-6-190108	8,34	19,3	739	31,82	20,146	8,697	4,941
7	H-7-190108	8,28	18,5	728	29,794	19,736	8,656	3,386
8	H-8-190108	8,09	24,5	621	19,493	16,213	8,435	1,926
9	H-9-190108	8	20,6	777	23,257	22,189	9,215	2,159
10	H-10-190108	8,31	20,6	1760	221,287	41,469	9,366	5,474
11	H-11-200108	8,47	22,5	1458	149,162	32,904	7,79	4,689
12	H-12-200108	8,01	20	1856	292,921	30,007	10,278	3,733
13	H-13-200108	8,15	26,2	1060	115,214	23,021	9,222	4,981
14	H-14-200108	8,3	23,8	754	35,104	19,873	7,978	2,951
	H-15-200108	8,2	15,2	707	28,771	19,135	7,515	2,327

N°	Código muestra	Elem. Mayores mg/L			Elem. Trazas μ g/L			
		Ca	NO3	Cl	Ag	Al	As	Au
1	H-1-180108	284,7	<,05	513	<,05	13	7,5	<,05
2	H-2-180108	220,8	<,05	440	<,05	<10	8,5	<,05
3	H-3-180108	203,3	<,05	370	<,05	4	7,7	<,05
4	H-4-190108	207,2	2,37	340	<,05	12	5,7	<,05
5	H-5-190108	211,5	<,05	306	<,05	2	6,1	<,05
6	H-6-190108	104	5,51	15	<,05	6	4,1	<,05
7	H-7-190108	103,3	5,42	14	<,05	27	4,1	<,05
8	H-8-190108	91,57	1,47	8	<,05	121	2,6	<,05
9	H-9-190108	123,2	2,29	7	<,05	44	4,3	<,05
10	H-10-190108	176,5	3,45	180	<,05	13	6	<,05
11	H-11-200108	147,7	11,78	104	<,05	4	5,1	<,05
12	H-12-200108	137	4,61	72	<,05	3	7,4	<,05
13	H-13-200108	111,6	17,68	55	<,05	5	5,2	<,05
14	H-14-200108	105,2	5,49	15	<,05	41	3,7	<,05
15	H-15-200108	103,1	5,11	12	<,05	13	3,9	<,05

Tabla A.4. Base de datos agua 2008.

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		B	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce
1	H-1-180108	1855	40,67	<,05	<,05	776	<,05	0,43
2	H-2-180108	1790	38,76	<,05	<,05	690	<,05	
3	H-3-180108	1126	28,43	<,05	<,05	556	<,05	0,01
4	H-4-190108	1001	26,71	<,05	<,05	521	<,05	0,04
5	H-5-190108	991	26,57	<,05	<,05	466	<,05	0,01
6	H-6-190108	257	37,19	<,05	<,05	49	<,05	0,02
7	H-7-190108	243	36,3	<,05	<,05	42	<,05	0,05
8	H-8-190108	163	25,51	<,05	<,05	27	<,05	0,07
9	H-9-190108	210	29,3	<,05	<,05	22	<,05	0,04
10	H-10-190108	1011	26,12	<,05	<,05	304	<,05	0,02
11	H-11-200108	742	25,6	<,05	<,05	212	<,05	0,01
12	H-12-200108	982	17,84	<,05	<,05	176	<,05	0,01
13	H-13-200108	619	25,42	<,05	<,05	119	<,05	0,01
14	H-14-200108	274	259	<,05	<,05	48	<,05	0,06
15	H-15-200108	247	37,51	<,05	<,05	42	<,05	0,01

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu
1	H-1-180108	0,47	<,5	0,16	3,8	<,01	<,01	<,01
2	H-2-180108	<,02	<,5	0,16	2,9	<,01	<,01	<,01
3	H-3-180108	<,02	<,5	0,08	2,2	<,01	<,01	<,01
4	H-4-190108	0,03	<,5	0,06	2,7	0,01	<,01	<,01
5	H-5-190108	<,02	<,5	0,05	2,1	<,01	<,01	<,01
6	H-6-190108	<,02	<,5	0,09	1,7	<,01	<,01	<,01
7	H-7-190108	<,02	<,5	0,08	1,7	<,01	<,01	<,01
8	H-8-190108	0,15	<,5	0,16	1,8	0,01	0,01	0,01
9	H-9-190108	0,04	<,5	0,33	1,3	0,01	0,01	<,01
10	H-10-190108	<,02	<,5	0,06	2,2	0,01	<,01	<,01
11	H-11-200108	0,02	<,5	0,04	2,1	<,01	<,01	<,01
12	H-12-200108	<,02	<,5	0,01	1,6	<,01	<,01	<,01
13	H-13-200108	<,02	<,5	0,05	2	<,01	<,01	<,01
14	H-14-200108	<,02	<,5	0,05	1,6	0,01	<,01	0,02
15	H-15-200108	<,02	<,5	0,06	1,5	<,01	<,01	<,01

Continuación tabla A.4.

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		Fe	Ga	Gd	Ge	Hf	Hg	Ho
1	H-1-180108	<10	<,05	<,05	<,05	<,02	5,8	<,01
2	H-2-180108	<10	<,05	<,05	<,05	<,02	3,8	<,01
3	H-3-180108	<10	<,05	0,01	<,05	<,02	1,5	<,01
4	H-4-190108	<10	<,05	0,01	<,05	<,02	1,9	<,01
5	H-5-190108	<10	<,05	<,05	<,05	<,02	1,6	<,01
6	H-6-190108	18	<,05	<,05	<,05	<,02	1,3	<,01
7	H-7-190108	42	<,05	<,05	<,05	<,02	1,2	<,01
8	H-8-190108	<10	<,05	0,02	<,05	<,02	1	<,01
9	H-9-190108	11	<,05	0,01	<,05	<,02	1,4	<,01
10	H-10-190108	63	<,05	0,01	<,05	<,02	1,1	<,01
11	H-11-200108	72	<,05	<,05	<,05	<,02	1,6	<,01
12	H-12-200108	<10	<,05	<,05	<,05	<,02	0,7	<,01
13	H-13-200108	44	<,05	<,05	<,05	<,02	1,2	<,01
14	H-14-200108	16	<,05	0,01	<,05	<,02	1,2	<,01
15	H-15-200108	<10	<,05	<,05	<,05	<,02	0,6	<,01

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		In	Ir	La	Li	Lu	Mn	Mo
1	H-1-180108	<,01	<,05	<,01	237,4	<,01	100,86	3,7
2	H-2-180108	<,01	<,05	<,01	216	<,01	63,72	4
3	H-3-180108	<,01	<,05	0,01	167,1	<,01	26,25	5,7
4	H-4-190108	<,01	<,05	0,03	151,5	<,01	22,47	3,7
5	H-5-190108	<,01	<,05	0,01	148,1	<,01	9,72	4,1
6	H-6-190108	<,01	<,05	0,01	60,2	<,01	22,06	5,1
7	H-7-190108	<,01	<,05	0,03	58,4	<,01	24,01	5
8	H-8-190108	<,01	<,05	0,03	37,8	<,01	43,43	4,6
9	H-9-190108	<,01	<,05	0,02	47,6	<,01	23,4	2,8
10	H-10-190108	<,01	<,05	0,02	139,6	<,01	18,22	5
11	H-11-200108	<,01	<,05	0,01	103,6	<,01	9,56	5,8
12	H-12-200108	<,01	<,05	0,01	165,4	<,01	4,92	5,6
13	H-13-200108	<,01	<,05	0,01	84,2	<,01	3,25	7,2
14	H-14-200108	<,01	<,05	0,03	66,4	<,01	4,61	4,8
15	H-15-200108	<,01	<,05		60,1	<,01	3,5	4,7

Continuación tabla A.4.

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		Nb	Nd	Ni	Os	P	Pb	Pd
1	H-1-180108	0,18	<1	<,2	<,05	<20	<,1	<,2
2	H-2-180108	0,16	<1	<,2	<,05	<20	<,1	<,2
3	H-3-180108	0,03	0,02	0,2	<,05	47	<,1	<,2
4	H-4-190108	0,03	0,03	3,6	<,05	40	0,9	<,2
5	H-5-190108	0,03	0,02	0,2	<,05	67	<,1	<,2
6	H-6-190108	0,02	0,01	<,2	<,05	22	<,1	<,2
7	H-7-190108	0,02	0,03	<,2	<,05	29	<,1	<,2
8	H-8-190108	0,02	0,06	<,2	<,05	22	<,1	<,2
9	H-9-190108	0,02	0,02	<,2	<,05	23	<,1	<,2
10	H-10-190108	0,02	0,02	<,2	<,05	442	0,1	<,2
11	H-11-200108	0,02	0,01	<,2	<,05	654	<,1	<,2
12	H-12-200108	0,01	0,02	<,2	<,05	26	<,1	<,2
13	H-13-200108	0,02	0,01	<,2	<,05	1093	0,1	<,2
14	H-14-200108	0,02	0,03	<,2	<,05	24	0,1	<,2
15	H-15-200108	0,01	0,01	<,2	<,05	<20	<,1	<,2

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		Pr	Pt	Rb	Re	Rh	Ru	Sb
1	H-1-180108	<,01	<,01	2,87		<,01	<,05	<,05
2	H-2-180108	<,01	<,01	2,41		<,01	<,05	<,05
3	H-3-180108	<,01	<,01	3	0,06	<,01	<,05	0,17
4	H-4-190108	0,01	<,01	2,57	0,06	<,01	<,05	0,12
5	H-5-190108	<,01	<,01	2,46	0,06	<,01	<,05	0,12
6	H-6-190108	<,01	<,01	5,58	0,09	<,01	<,05	0,14
7	H-7-190108	0,01	<,01	3,81	0,08	<,01	<,05	0,15
8	H-8-190108	0,01	<,01	3,18	0,11	<,01	<,05	0,12
9	H-9-190108	0,01	<,01	3,58	0,07	<,01	<,05	0,17
10	H-10-190108	<,01	<,01	3,45	0,08	<,01	<,05	0,17
11	H-11-200108	<,01	<,01	3,09	0,09	<,01	<,05	0,18
12	H-12-200108	<,01	<,01	1,48	0,08	<,01	<,05	0,1
13	H-13-200108	<,01	<,01	4,16	0,09	<,01	<,05	0,21
14	H-14-200108	0,01	<,01	2,63	0,1	<,01	<,05	0,1
15	H-15-200108	<,01	<,01	2,12	0,09	<,01	<,05	0,09

Continuación tabla A.4.

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		Sc	Se	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb
1	H-1-180108	<1	<,5	<,02	0,6	1558,87	<,02	<,01
2	H-2-180108	<1	<,5	<,02	<,05	1260,96	<,02	<,01
3	H-3-180108	3	3,1	<,02	0,11	1022,22	<,02	<,01
4	H-4-190108	3	2,9	<,02	0,1	994,93	<,02	<,01
5	H-5-190108	3	3	<,02	0,07	1006,05	<,02	<,01
6	H-6-190108	2	0,8	<,02	<,05	405,09	<,02	<,01
7	H-7-190108	2	0,8	<,02	<,05	400,84	<,02	<,01
8	H-8-190108	2	0,8	<,02	<,05	301,83	<,02	<,01
9	H-9-190108	2	1,1	<,02	<,05	404,37	<,02	<,01
10	H-10-190108	3	3,2	<,02	<,05	866,65	<,02	<,01
11	H-11-200108	2	2,2	<,02	<,05	710,55	<,02	<,01
12	H-12-200108	3	2,9	<,02	<,05	598,68	<,02	<,01
13	H-13-200108	3	1,4	<,02	0,08	530,71	<,02	<,01
14	H-14-200108	2	0,8	<,02	<,05	449,81	<,02	<,01
15	H-15-200108	2	0,8	<,02	<,05	419,89	<,02	<,01

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$						
		Te	Th	Ti	Tl	Tm	U	V
1	H-1-180108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	7,03	4,1
2	H-2-180108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	5,32	5
3	H-3-180108	<,5	0,08	<10	<,01	<,01	7,65	5,1
4	H-4-190108	<,5	0,08	<10	<,01	<,01	5,51	2,9
5	H-5-190108	<,5	0,06	<10	<,01	<,01	6,44	3,5
6	H-6-190108	<,5	<,5	<10	0,01	<,01	4,47	1,7
7	H-7-190108	<,5	<,5	<10	0,01	<,01	4,52	1,6
8	H-8-190108	<,5	<,5	<10	0,03	<,01	3,02	0,8
9	H-9-190108	<,5	<,5	<10	0,01	<,01	2,53	0,8
10	H-10-190108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	7	3,3
11	H-11-200108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	5,97	2,6
12	H-12-200108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	6,25	3,6
13	H-13-200108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	5,9	3,4
14	H-14-200108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	4,76	1,3
15	H-15-200108	<,5	<,5	<10	<,01	<,01	4,74	1

Continuación tabla A.4.

N°	Código muestra	Elem. Trazas $\mu\text{g/L}$					
		W	Y	Yb	Zn	Zr	F
1	H-1-180108	<,02	<,01	<,01	182,6	<,02	520
2	H-2-180108	<,02	<,01	<,01	33,6	<,02	500
3	H-3-180108	0,05	0,01	<,01	27,7	<,02	450
4	H-4-190108	0,02	0,02	0,01	131,2	<,02	460
5	H-5-190108	0,03	0,01	<,01	13,6	<,02	470
6	H-6-190108	0,03	0,01	<,01	79,1	0,04	490
7	H-7-190108	0,03	0,03	<,01	286,7	0,02	547
8	H-8-190108	0,02	0,09	0,01	124,4	<,02	575
9	H-9-190108	0,02	0,08	0,01	53,5	<,02	498
10	H-10-190108	0,02	0,02	<,01	118	<,02	565
11	H-11-200108	0,03	0,02	<,01	50,2	0,02	650
12	H-12-200108	0,03	0,02	<,01	31,2	<,02	520
13	H-13-200108	0,04	0,01	<,01	51	0,03	550
14	H-14-200108	0,02	0,04	<,01	429	<,02	520
15	H-15-200108	0,02	0,02	<,01	39,4	<,02	540

Continuación tabla A.4.

Concentraciones ppm								
N°	Código muestra	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1	5-1904-7	182874,80	7,82	333,49	10,75	5,53	311,04	3476,06
2	2-2204-7	25925,85	47,10	4500,42	100,62	31,92	1046,72	32120,12
3	2-1904-7	36391,36	46,69	2111,21	45,43	25,89	669,96	17189,46
4	4-1904-7	126646,91	28,47	1489,31	45,70	18,52	975,57	19785,98
5	3-1904-7	104548,72	26,32	2117,59	53,99	34,57	773,29	21051,82
6	2-2404-7	25747,15	47,94	3399,65	71,73	23,56	475,44	23330,45
7	2-2004-7	72055,77	32,02	1465,62	40,79	38,05	446,15	15425,47
8	3-2004-7	32991,64	51,56	4310,05	108,37	42,62	782,52	36690,56
9	1-2204-7	23749,61	51,15	2187,14	45,68	17,11	399,23	19977,34
10	3-1904-7	22015,29	60,11	3477,30	70,55	31,83	488,70	27484,84
11	1-1904-7	48968,48	48,03	4583,58	88,21	55,75	538,91	28005,54

Concentraciones ppm								
N°	Código muestra	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
1	5-1904-7	1,09	9,74	3,84	24,58	1,25	0,17	3,57
2	2-2204-7	8,30	17,60	15,56	78,99	12,29	1,22	17,71
3	2-1904-7	8,63	30,67	71,25	126,35	11,39	1,15	12,52
4	4-1904-7	5,68	16,24	62,54	107,52	6,33	0,67	9,02
5	3-1904-7	20,81	37,35	96,61	565,37	8,59	0,61	25,57
6	2-2404-7	7,78	16,58	99,39	80,66	12,19	1,17	10,34
7	2-2004-7	4,67	21,65	255,54	129,36	5,16	0,73	8,63
8	3-2004-7	37,24	31,89	31,13	88,89	15,23	1,25	14,34
9	1-2204-7	53,94	21,98	35,48	64,51	13,03	1,26	9,87
10	3-1904-7	45,97	24,38	202,24	96,48	16,66	1,55	12,04
11	1-1904-7	11,89	35,35	31,47	130,75	13,38	1,20	10,11

Concentraciones ppm								
N°	Código muestra	Rb	Sr	Y	Mo	Ag	Cd	Sn
1	5-1904-7	7,27	421,43	1,99	3,48	0,26	<,1	0,21
2	2-2204-7	84,85	211,75	20,71	3,59	0,64	0,21	3,48
3	2-1904-7	89,17	188,35	17,98	2,77	0,62	0,52	4,32
4	4-1904-7	37,03	310,27	9,03	3,59	0,43	0,15	1,20
5	3-1904-7	43,77	269,94	30,69	5,99	0,47	3,27	1,86
6	2-2404-7	81,98	249,57	16,39	1,59	0,60	0,11	2,47
7	2-2004-7	27,07	219,52	8,18	4,74	1,03	0,17	3,63
8	3-2004-7	78,69	249,96	21,06	2,89	0,62	0,07	3,03
9	1-2204-7	87,40	161,48	20,01	1,96	0,57	0,08	2,57
10	3-1904-7	105,14	227,58	24,90	2,02	0,67	0,15	3,41
11	1-1904-7	73,32	232,45	21,83	3,76	0,54	0,45	2,47

Tabla A.5. Base de datos sedimentos 2007.

N°	Código muestra	Concentraciones ppm						
		Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pb	Bi
1	5-1904-7	0,30	0,40	76,46	11,04	3,83	1,15	0,14
2	2-2204-7	1,64	3,98	450,04	35,93	51,04	15,25	0,28
3	2-1904-7	2,67	4,32	442,23	454,54	37,16	11,82	1,77
4	4-1904-7	1,08	3,33	208,31	20,36	18,83	11,21	2,22
5	3-1904-7	1,43	5,91	224,97	29,36	45,01	15,54	0,38
6	2-2404-7	1,62	3,32	454,53	28,84	36,09	11,55	1,75
7	2-2004-7	1,91	2,15	169,10	22,32	15,36	12,15	0,41
8	3-2004-7	2,42	3,65	430,32	39,03	47,12	12,00	0,26
9	1-2204-7	1,73	2,29	482,02	25,16	31,48	10,81	1,55
10	3-1904-7	2,12	4,15	583,74	38,66	55,56	27,46	1,96
11	1-1904-7	4,40	4,55	355,43	32,48	45,34	11,05	0,22

N°	Código muestra	Concentraciones ppm	
		Th	U
1	5-1904-7	1,96	3,34
2	2-2204-7	22,46	3,22
3	2-1904-7	18,23	2,22
4	4-1904-7	8,90	2,80
5	3-1904-7	10,50	8,54
6	2-2404-7	16,78	1,74
7	2-2004-7	6,36	2,46
8	3-2004-7	17,47	1,90
9	1-2204-7	23,70	1,83
10	3-1904-7	25,63	2,91
11	1-1904-7	16,62	2,10

Continuación tabla A.5.

Concentraciones - ppm												
N°	Código muestra	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Mn	Fe	As	U
1	5-190108S	1.11	27.74	4.82	36.2	217	3.8	2.8	469	7620	5,6	3,36
2	6-190108S	0.9	27.41	4.23	47.8	22	5.5	3.3	882	4650	12,3	2,29
3	11-200108S	1.43	55.31	18.92	94.1	293	18.8	11.3	455	33190000	9,5	2,7
4	12-200108S	1.31	26.3	7.38	57.9	400	12.2	9.3	787	27570000	19,5	2,12
5	13-200108S	1.82	138.41	24.83	78.1	1031	15	11.4	377	29100	12,3	2,34
6	14-200108S	1.46	62.58	53.95	89.8	104	20	9.1	539	23630	11,9	1,96

Concentraciones - ppm												
N°	Código muestra	Au	Th	Sr	Cd	Sb	Bi	V	Ca	P	La	Cr
1	5-190108S	13,4	0,8	439,8	0,27	0,16	0,13	20	210260	1400	3	7,3
2	6-190108S	2,9	0,6	391,8	0,84	0,17	0,06	13	324380	260	2,2	4,8
3	11-200108S	134,8	8,2	91,1	0,21	0,59	0,41	85	32420	1480	15,3	37,2
4	12-200108S	7,4	4,1	197,3	0,16	0,32	0,16	69	94410	1050	8,9	24,2
5	13-200108S	172,3	4,4	73,6	0,22	0,72	0,74	75	33400	1570	13,2	28,2
6	14-200108S	5,8	6,3	179,2	0,4	0,93	0,24	61	146570	860	9,9	39

Concentraciones - ppm												
N°	Código muestra	Mg	Ba	Ti	B	Al	Na	K	W	Tl	Hg	Se
1	5-190108S	3100	67,7	220	28	2920	1050	400	0,14	0,05	0,325	2,9
2	6-190108S	3100	142	150	36	2610	360	370	0,09	0,03	0,027	1,7
3	11-200108S	7200	96	990	10	10600	570	920	0,58	0,06	0,316	2,3
4	12-200108S	7200	62	910	22	1E+07	760	1050	0,2	0,05	0,12	3,1
5	13-200108S	6600	71,8	720	9	9970	480	800	0,41	0,05	1,184	1,8
6	14-200108S	6400	121	880	8	9690	390	910	0,77	0,05	0,176	0,7

Concentraciones - ppm												
N°	Código muestra	Te	Ga	Cs	Ge	Hf	Nb	Rb	Sc	Sn	S	Ta
1	5-190108S	0,38	1,2	0,81	0,1	<,02	0,37	3	1	0,66	8300	<,05
2	6-190108S	0,5	0,8	0,8	0,1	<,02	0,25	2,5	0,9	0,21	5400	<,05
3	11-200108S	0,09	4,4	2,22	0,1	0,08	1,11	7,7	3,5	1,66	5100	<,05
4	12-200108S	0,16	4,4	1,69	0,1	0,07	1,23	10,7	3,2	1,33	9600	<,05
5	13-200108S	0,11	4,3	1,75	0,1	0,04	0,85	7	2,9	3,88	2100	<,05
6	14-200108S	0,2	3,7	2,18	0,1	0,07	0,88	8,1	3	2,05	3400	<,05

Tabla A.6. Base de datos sedimentos 2008.

		Concentraciones - ppm									
N°	Código muestra	Zr	Y	Ce	In	Re	Be	Li	Pd	Pt	
1	5-190108S	0,5	2,22	5,35	<,02	0,006	0,1	6,8	<,01	<,002	
2	6-190108S	0,6	3,45	4,04	<,02	0,003	0,1	5,5	<,01	<,002	
3	11-200108S	3,5	9,32	25,38	0,02	0,006	0,5	23,8	<,01	<,002	
4	12-200108S	2,5	6,71	15,37	<,02	0,005	0,3	25,2	<,01	<,002	
5	13-200108S	1,9	8,62	21,5	<,02	0,003	0,5	19	<,01	<,002	
6	14-200108S	3,2	7,04	16,23	0,02	0,001	0,2	15,2	<,01	<,002	

Tabla A. 6.

N°	identificacion	fuelle	coordenada X	coordenada Y
1	NSCA 3	CENMA, 2016	6818162	355073
2	NSCA 4	CENMA, 2016	6818562	355073
3	NSCA 8	CENMA, 2016	6830462	334252
4	NSCA 9	CENMA, 2016	6839593	322920
5	NSCA 10	CENMA, 2016	6844487	297720
6	NSCA 11	CENMA, 2016	6845339	294375
7	NSCA 14	CENMA, 2016	6823719	348619
8	Río Huasco en Huasco Bajo	DGA	6848963	286528
9	Planta Huasco alto C2	DGA	6846916	289120
10	Río Huasco en puente panamericana	DGA	6837700	324135
11	Pozo agua potable Vallenar	DGA	6836796	329666
12	Río Carmen en Ramadillas	DGA	6818385	354653
13	Río Tránsito antes junta río Carmen	DGA	6818563	355078

Tabla A.7. Ubicación estaciones datos comparativos aguas.

N°	identificacion	fuelle	coordenada X	coordenada Y
1	PTO 28	CENMA, 2015	6837772	327015
2	Sedimento 1	CENMA, 2015	6838670	325430
3	Sedimento 2	CENMA, 2015	6838690	325039
4	Sedimento 4	CENMA, 2015	6839901	322052
5	Sedimento 3	CENMA, 2015	6839972	321019
6	Sedimento 6	CENMA, 2015	6841922	315154
7	Sedimento 7	CENMA, 2015	6842317	314268
8	Sedimento 8	CENMA, 2015	6842569	313694
9	Sedimento 9	CENMA, 2015	6842834	312551
10	PTO 30	CENMA, 2015	6842655	312149
11	Sedimento 19	CENMA, 2015	6843534	307246
12	Sedimento 20	CENMA, 2015	6843544	307245
13	Sedimento 18	CENMA, 2015	6843418	306317
14	Sedimento 10	CENMA, 2015	6843988	303070
15	Sedimento 11	CENMA, 2015	6844731	299273
16	Sedimento 5	CENMA, 2015	6844541	298385
17	49-1	CENMA, 2015	6844433	297677
18	Sedimento 21	CENMA, 2015	6845271	294770
19	Sedimento 15	CENMA, 2015	6846651	290678
20	Sedimento 16	CENMA, 2015	6846841	290116
21	Sedimento 17	CENMA, 2015	6847015	289600
22	Sedimento 14	CENMA, 2015	6848711	286815
23	Sedimento 12	CENMA, 2015	6850598	285443
24	Sedimento 13	CENMA, 2015	6850598	285443
25	muestra 1	Lacassie & Díaz, 2019	6844822	297971
26	muestra 2	Lacassie & Díaz, 2019	6839241	324733
27	muestra 3	Lacassie & Díaz, 2019	6839881	323237
28	muestra 4	Lacassie & Díaz, 2019	6843651	311841
29	muestra 5	Lacassie & Díaz, 2019	6844158	303853
30	muestra 6	Lacassie & Díaz, 2019	6829206	336652
31	muestra 7	Lacassie & Díaz, 2019	6827066	339456
32	muestra 8	Lacassie & Díaz, 2019	6825465	347636
33	muestra 9	Lacassie & Díaz, 2019	6821397	352841
34	muestra 10	Lacassie & Díaz, 2019	6823282	350298
35	muestra 11	Lacassie & Díaz, 2019	6834471	332228

Tabla A.8. Ubicación de muestras comparación sedimentos.

N°	Fecha	Identificacion	pH	T° (C)	Concentraciones mg/L	
					B	Na
1	39134	Planta Huasco Alto	9,56	20,58	20,58	sin datos
2	39384	Planta Huasco Alto	9,03	17,26	17,26	sin datos
3	39255	Planta Huasco Alto	8,78	17,2	4	sin datos
4	39136	Pozo agua potable vallerar	9,42	20,36	DL	sin datos
5	39375	Pozo agua potable vallerar	8,71	19,36	DL	sin datos
6	39260	Pozo agua potable vallerar	9,5	19,2	DL	sin datos
7	39134	Rio Huasco en Huasco Bajo	8,55	25,28	1	sin datos
8	39384	Rio Huasco en Huasco Bajo	8,62	20,04	1	sin datos
9	39255	Rio Huasco en Huasco Bajo	8,21	12,27	1	sin datos
10	39136	Rio Huasco en Panamericana	8,98	26,38	1	sin datos
11	39384	Rio Huasco en Panamericana	8,86	24,81	DL	sin datos
12	39260	Rio Huasco en Panamericana	8,55	15,07	DL	sin datos
13	39505	Planta Huasco Alto	8,44	19,83	19,83	sin datos
14	39748	Planta Huasco Alto	8,47	17,64	17,64	sin datos
15	39629	Planta Huasco Alto	9,37	17,11	4	sin datos
16	39506	Pozo agua potable vallerar	9,05	18,52	DL	sin datos
17	39734	Pozo agua potable vallerar	8,56	19,18	DL	sin datos
18	39630	Pozo agua potable vallerar	9,97	18,84	DL	sin datos
19	39629	Rio Huasco en Huasco Bajo	9,2	14,81	1	sin datos
20	39505	Rio Huasco en Huasco Bajo	7,65	23,98	1	sin datos
21	39748	Rio Huasco en Huasco Bajo	8,53	21,63	1,29	sin datos
22	39505	Rio Huasco en Panamericana	8,15	24,99	DL	sin datos
23	39734	Rio Huasco en Panamericana	7,76	23,91	0,72	sin datos
24	39629	Rio Huasco en Panamericana	9,35	16,43	1	sin datos
25	42335	NSCA 3	8,2	24,9	DL	sin datos

Tabla A.9. Base de deato comparativos en aguas superficiales

N°	Fecha	Identificación	pH	T° (C)	Concentraciones mg/L	
					B	Na
26	42335	NSCA 4	8,4	21,5	0,22	sin datos
27	42336	NSCA 8	8,7	20,1	0,177	sin datos
28	42336	NSCA 9	7,9	22,1	0,74	sin datos
29	42337	NSCA 10	8,3	25,4	0,927	sin datos
30	42337	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
31	42338	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
32	42394	NSCA 3	8,5	23,37	sin datos	sin datos
33	42394	NSCA 4	8,43	22,79	sin datos	sin datos
34	42394	NSCA 8	8,75	20,8	sin datos	sin datos
35	42395	NSCA 9	8,18	30,87	sin datos	sin datos
36	42395	NSCA 10	8,28	26,19	sin datos	sin datos
37	42396	NSCA 11	8,53	24,49	sin datos	sin datos
38	42396	NSCA 14	8,41	21,76	sin datos	sin datos
39	42487	NSCA 3	8,39	18,6		sin datos
40	42487	NSCA 4	8,53	16,73		sin datos
41	42488	NSCA 8	8,29	17,4		sin datos
42	42488	NSCA 9	7,98	15,4		sin datos
43	42489	NSCA 10	8,2	16,9		sin datos
44	42489	NSCA 11	8,32	17,13		sin datos
45	42490	NSCA 14	8,51	17,8		sin datos
46	42569	NSCA 3	8,58	13	DL	sin datos
47	42569	NSCA 4	8,87	12,8	DL	sin datos
48	42570	NSCA 8	8,54	15,1	0,1	sin datos
49	42570	NSCA 9	7,9	16,8	0,538	sin datos

Continuación tabla A.9.

N°	Fecha	Identificacion	pH	T° (C)	Concentraciones mg/L	
					B	Na
50	42570	NSCA 10	8,85	17	1,233	sin datos
51	42571	NSCA 11	sin datos	15,6	1,034	sin datos
52	42571	NSCA 14	8,4	12,2	DL	sin datos
	Concentraciones mg/L					
N°	Identificacion	Mg	K	Ca	Mn	Fe
1	Planta Huasco Alto	sin datos	sin datos	sin datos	0,04	1,98
2	Planta Huasco Alto	sin datos	sin datos	sin datos	0,14	4,92
3	Planta Huasco Alto	sin datos	sin datos	sin datos	0,18	9,24
4	Pozo agua potable vallerar	sin datos	sin datos	sin datos	0,03	0,6
5	Pozo agua potable vallerar	sin datos	sin datos	sin datos	0,08	1,62
6	Pozo agua potable vallerar	sin datos	sin datos	sin datos	0,09	1,05
7	Rio Huasco en Huasco Bajo	sin datos	sin datos	sin datos	0,03	0,52
8	Rio Huasco en Huasco Bajo	sin datos	sin datos	sin datos	0,03	0,13
9	Rio Huasco en Huasco Bajo	sin datos	sin datos	sin datos	0,05	0,89
10	Rio Huasco en Panamericana	sin datos	sin datos	sin datos	0,01	0,05
11	Rio Huasco en Panamericana	sin datos	sin datos	sin datos	0,02	0,02
12	Rio Huasco en Panamericana	sin datos	sin datos	sin datos	0,01	0,03
13	Planta Huasco Alto	sin datos	sin datos	sin datos	0,28	11,5
14	Planta Huasco Alto	sin datos	sin datos	sin datos	DL	DL
15	Planta Huasco Alto	sin datos	sin datos	sin datos	0,17	8,33

Continuación tabla A.9.

N°	Identificación	Concentraciones mg/L				
		Mg	K	Ca	Mn	Fe
16	Pozo agua potable vallenar	sin datos	sin datos	sin datos	0,09	1,13
17	Pozo agua potable vallenar	sin datos	sin datos	sin datos	DL	DL
18	Pozo agua potable vallenar	sin datos	sin datos	sin datos	0,08	1,17
19	Rio Huasco en Huasco Bajo	sin datos	sin datos	sin datos	0,67	2,85
20	Rio Huasco en Huasco Bajo	sin datos	sin datos	sin datos	0,11	0,29
21	Rio Huasco en Huasco Bajo	sin datos	sin datos	sin datos	DL	0,03
22	Rio Huasco en Panamericana	sin datos	sin datos	sin datos	0,01	0,02
23	Rio Huasco en Panamericana	sin datos	sin datos	sin datos	DL	DL
24	Rio Huasco en Panamericana	sin datos	sin datos	sin datos	0,02	0,03
25	NSCA 3	sin datos	sin datos	sin datos	8,53	12,49
26	NSCA 4	sin datos	sin datos	sin datos	0,381	3,011
27	NSCA 8	sin datos	sin datos	sin datos	0,04	0,182
28	NSCA 9	sin datos	sin datos	sin datos	0,062	0,493
29	NSCA 10	sin datos	sin datos	sin datos	0,017	DL
30	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
31	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
32	NSCA 3	sin datos	sin datos	sin datos	0,291	1,617
33	NSCA 4	sin datos	sin datos	sin datos	0,512	2,727
34	NSCA 8	sin datos	sin datos	sin datos	0,03	0,062
35	NSCA 9	sin datos	sin datos	sin datos	0,032	0,094
36	NSCA 10	sin datos	sin datos	sin datos	0,003	0

Continuación tabla A.9.

		Concentraciones mg/L				
N°	Identificacion	Mg	K	Ca	Mn	Fe
37	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	0,045	0,134
38	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	0,516	2,943
39	NSCA 3	sin datos	sin datos	sin datos	0,0703	2,741
40	NSCA 4	sin datos	sin datos	sin datos	0,2	0,633
41	NSCA 8	sin datos	sin datos	sin datos	0,031	0,024
42	NSCA 9	sin datos	sin datos	sin datos	0,042	0,065
43	NSCA 10	sin datos	sin datos	sin datos	0,005	0,013
44	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	0,011	0,027
45	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	0,498	2,072
46	NSCA 3	sin datos	sin datos	sin datos	0,225	0,711
47	NSCA 4	sin datos	sin datos	sin datos	0,133	0,455
48	NSCA 8	sin datos	sin datos	sin datos	0,054	0,194
49	NSCA 9	sin datos	sin datos	sin datos	0,048	DL
50	NSCA 10	sin datos	sin datos	sin datos	0,005	DL
51	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	0,12	DL
52	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	0,258	1,17
		Concentraciones mg/L				
N°	Identificacion	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
1	Planta Huasco Alto	1,98	0,01	sin datos	0,01	0,02
2	Planta Huasco Alto	4,92	DL	sin datos	0,02	0,03
3	Planta Huasco Alto	9,24	DL	0,02	0,01	0,1
4	Pozo agua potable vallenar	0,6	DL	sin datos	0,01	0,01
5	Pozo agua potable vallenar	1,62	DL	sin datos	0,01	0,03
6	Pozo agua potable vallenar	1,05	DL	DL	0,01	0,02
7	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,52	DL	DL	DL	DL
8	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,13	DL	DL	0,01	0,03

Continuación tabla A.9.

N°	Identificación	Concentraciones mg/L				
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn
9	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,89	DL	0,02	0,03	0,05
10	Rio Huasco en Panamericana	0,05	0,01	sin datos	DL	DL
11	Rio Huasco en Panamericana	0,02	DL	sin datos	0,01	0,01
12	Rio Huasco en Panamericana	0,03	DL	DL	0,01	0,11
13	Planta Huasco Alto	11,5	DL	sin datos	0,02	0,04
14	Planta Huasco Alto	DL	DL	sin datos	DL	DL
15	Planta Huasco Alto	8,33	0,01	DL	0,01	0,03
16	Pozo agua potable vallerar	1,13	DL	sin datos	0,02	0,04
17	Pozo agua potable vallerar	DL	DL	sin datos	DL	DL
18	Pozo agua potable vallerar	1,17	DL	DL	0,01	0,01
19	Rio Huasco en Huasco Bajo	2,85	DL	DL	0,02	0,01
20	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,29	DL	DL	0,01	0,02
21	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,03	DL	DL	DL	DL
22	Rio Huasco en Panamericana	0,02	DL	sin datos	0,02	0,02
23	Rio Huasco en Panamericana	DL	DL	sin datos	DL	DL
24	Rio Huasco en Panamericana	0,03	DL	DL	DL	0,01
25	NSCA 3	12,49	0,013	DL	DL	0,218
26	NSCA 4	3,011	0,03	DL	DL	0,018
27	NSCA 8	0,182	DL	DL	DL	DL
28	NSCA 9	0,493	DL	DL	DL	0,03
29	NSCA 10	DL	DL	DL	DL	DL
30	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
31	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
32	NSCA 3	1,617	sin datos	sin datos	0,018	0,065
33	NSCA 4	2,727	sin datos	sin datos	0,006	0,059
34	NSCA 8	0,062	sin datos	sin datos	0,005	DL

Continuación tabla A.9.

N°	Identificación	Concentraciones mg/L				
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn
35	NSCA 9	0,094	sin datos	sin datos	DL	DL
36	NSCA 10	0	sin datos	sin datos	0,006	DL
37	NSCA 11	0,134	sin datos	sin datos	DL	DL
38	NSCA 14	2,943	sin datos	sin datos	0,017	0,086
39	NSCA 3	2,741			0,043	0,1226
40	NSCA 4	0,633			0,0081	0,0239
41	NSCA 8	0,024			0,005	DL
42	NSCA 9	0,065			0,012	0,012
43	NSCA 10	0,013			0,006	DL
44	NSCA 11	0,027			DL	DL
45	NSCA 14	2,072			0,02	0,091
46	NSCA 3	0,711	DL	0,063	0,034	0,141
47	NSCA 4	0,455	DL	0,036	0,034	0,093
48	NSCA 8	0,194	DL	DL	0,018	0,069
49	NSCA 9	DL	DL	0,055	0,021	0,085

Continuación tabla A.9.

		Concentraciones mg/L				
N°	Identificacion	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
50	NSCA 10	DL	DL	DL	DL	0,095
51	NSCA 11	DL	DL	0,074	0,021	0,087
52	NSCA 14	1,17	0,001	0,06	0,031	0,146
		Concentraciones mg/L				
N°	Identificacion	As	Se	Mo	Pb	SO4
1	Planta Huasco Alto	DL	DL	DL	DL	1800
2	Planta Huasco Alto	0,001	DL	DL	DL	1300
3	Planta Huasco Alto	DL	DL	0,05	DL	1500
4	Pozo agua potable vallenar	0,001	DL	DL	DL	75
5	Pozo agua potable vallenar	0,001	DL	DL	DL	60
6	Pozo agua potable vallenar	DL	DL	DL	DL	50
7	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,005	DL	DL	DL	1000
8	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,005	DL	DL	DL	750
9	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,004	DL	DL	DL	862,5
10	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL	438
11	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL	362,5
12	Rio Huasco en Panamericana	0,003	DL	DL	DL	400
13	Planta Huasco Alto	0,002	DL	DL	DL	1700
14	Planta Huasco Alto	DL	DL	DL	DL	1300
15	Planta Huasco Alto	DL	DL	DL	DL	1800
16	Pozo agua potable vallenar	0,001	DL	DL	DL	70
17	Pozo agua potable vallenar	DL	DL	DL	DL	44,2
18	Pozo agua potable vallenar	DL	DL	DL	DL	75
19	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,007	DL	DL	DL	800
20	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,006	DL	0,005	DL	950

Continuación tabla A.9.

N°	Identificación	Concentraciones mg/L				
		As	Se	Mo	Pb	SO4
21	Rio Huasco en Huasco Bajo	DL	DL	DL	DL	712
22	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL	375
23	Rio Huasco en Panamericana	0,002	DL	DL	DL	354
24	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL	475
25	NSCA 3	0,0113	0,024	0,004	0,009	sin datos
26	NSCA 4	0,0124	0,0027	0,001	DL	sin datos
27	NSCA 8	0,0068	0,0031	0,004	DL	sin datos
28	NSCA 9	0,0076	0,0122	0,05	DL	sin datos
29	NSCA 10	0,0046	0,016	DL	DL	sin datos
30	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
31	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
32	NSCA 3	0,0022	sin datos	0,004	sin datos	sin datos
33	NSCA 4	0,0097	sin datos	0,003	sin datos	sin datos
34	NSCA 8	0,0043	sin datos	0,004	sin datos	sin datos
35	NSCA 9	0,0045	sin datos	0,005	sin datos	sin datos
36	NSCA 10	0,0023	sin datos	0,002	sin datos	sin datos
37	NSCA 11	0,0031	sin datos	0,001	sin datos	sin datos
38	NSCA 14	0,0063	sin datos	0,003	sin datos	sin datos
39	NSCA 3	0,0063		DL		sin datos
40	NSCA 4	0,0062		DL		sin datos
41	NSCA 8	0,0036		DL		sin datos
42	NSCA 9	0,0033		DL		sin datos
43	NSCA 10	0,0046		DL		sin datos
44	NSCA 11	0,0031		0,004		sin datos
45	NSCA 14	0,0078		0,005		sin datos

Continuación tabla A.9.

Concentraciones mg/L						
N°	Identificación	As	Se	Mo	Pb	SO4
46	NSCA 3	0,0086	DL	DL	DL	sin datos
47	NSCA 4	0,0059	DL	DL	DL	sin datos
48	NSCA 8	0,0034	DL	DL		sin datos
49	NSCA 9	0,006	DL	0,01	0,13	sin datos
50	NSCA 10	0,0043	DL	DL	0,026	sin datos
51	NSCA 11	0,0053	DL	DL	DL	sin datos
52	NSCA 14	0,0048	DL	DL	0,08	sin datos

Concentraciones mg/L						
N°	Identificación	As	Se	Mo	Pb	
1	Planta Huasco Alto	DL	DL	DL	DL	
2	Planta Huasco Alto	0,001	DL	DL	DL	
3	Planta Huasco Alto	DL	DL	0,05	DL	
4	Pozo agua potable vallerar	0,001	DL	DL	DL	
5	Pozo agua potable vallerar	0,001	DL	DL	DL	
6	Pozo agua potable vallerar	DL	DL	DL	DL	
7	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,005	DL	DL	DL	
8	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,005	DL	DL	DL	
9	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,004	DL	DL	DL	
10	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL	
11	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL	
12	Rio Huasco en Panamericana	0,003	DL	DL	DL	
13	Planta Huasco Alto	0,002	DL	DL	DL	
14	Planta Huasco Alto	DL	DL	DL	DL	
15	Planta Huasco Alto	DL	DL	DL	DL	
16	Pozo agua potable vallerar	0,001	DL	DL	DL	

Continuación tabla A.9.

N°	Identificación	Concentraciones mg/L			
		As	Se	Mo	Pb
17	Pozo agua potable vallenar	DL	DL	DL	DL
18	Pozo agua potable vallenar	DL	DL	DL	DL
19	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,007	DL	DL	DL
20	Rio Huasco en Huasco Bajo	0,006	DL	0,005	DL
21	Rio Huasco en Huasco Bajo	DL	DL	DL	DL
22	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL
23	Rio Huasco en Panamericana	0,002	DL	DL	DL
24	Rio Huasco en Panamericana	0,004	DL	DL	DL
25	NSCA 3	0,0113	0,024	0,004	0,009
26	NSCA 4	0,0124	0,0027	0,001	DL
27	NSCA 8	0,0068	0,0031	0,004	DL
28	NSCA 9	0,0076	0,,0122	0,05	DL
29	NSCA 10	0,0046	0,016	DL	DL
30	NSCA 11	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
31	NSCA 14	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
32	NSCA 3	0,0022	sin datos	0,004	sin datos
33	NSCA 4	0,0097	sin datos	0,003	sin datos
34	NSCA 8	0,0043	sin datos	0,004	sin datos
35	NSCA 9	0,0045	sin datos	0,005	sin datos
36	NSCA 10	0,0023	sin datos	0,002	sin datos
37	NSCA 11	0,0031	sin datos	0,001	sin datos
38	NSCA 14	0,0063	sin datos	0,003	sin datos
39	NSCA 3	0,0063		DL	
40	NSCA 4	0,0062		DL	
41	NSCA 8	0,0036		DL	
42	NSCA 9	0,0033		DL	

Continuación tabla A.9.

		Concentraciones mg/L			
N°	Identificacion	As	Se	Mo	Pb
43	NSCA 10	0,0046		DL	
44	NSCA 11	0,0031		0,004	
45	NSCA 14	0,0078		0,005	
46	NSCA 3	0,0086	DL	DL	DL
47	NSCA 4	0,0059	DL	DL	DL
48	NSCA 8	0,0034	DL	DL	
49	NSCA 9	0,006	DL	0,01	0,13
50	NSCA 10	0,0043	DL	DL	0,026
51	NSCA 11	0,0053	DL	DL	DL
52	NSCA 14	0,0048	DL	DL	0,08

Continuación tabla A.9.

Concentraciones en ppm							
Muestra	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb	V
1	<1	<5	12,94	5,92	47,37	<10	5
2	<1	67,82	103,59	16,32	61,17	<10	188,94
3	<1	209,7	72,23	87,74	63,22	<10	101,8
4	<1	181	25,68	30,16	13	17	31
5	<1	<5	14,17	10,86	48,13	<10	5
6	<1	205,61	89,33	55,32	64,62	<10	122,43
7	1	263,33	85,5	82,27	70,57	<10	86,12
8	<1	251,09	95,43	34,87	66,04	<10	162,54
9	<1	1680	56,83	915,24	66	30	30
10	<1	398,03	72,56	46,78	73,97	10,21	109,88
11	<1	118,34	46,04	95,66	58,7	<10	66,8

Muestra	Concentraciones en ppm		Concentraciones en wt%	
	Ba	Co	MnO	Fe2O3
1	368,52	<5	0,1	0,91
2	25,67	19,71	0,13	6,5
3	256,08	16,03	0,11	5,35
4	235,4	39,49	0,08	2,89
5	365,32	<5	0,1	1,27
6	193,79	22,4	0,25	8,64
7	304,87	15,16	0,37	5,66
8	131,36	18,99	0,16	7,22
9	307,2	14	0,15	4,71
10	266,65	16,22	0,22	5,79
11	227,53	15,07	0,35	7,31

Tabla A.10. Base de datos comparativa sedimentos activos. (Lacassie & Díaz, 2019).

Nombre muestra	Concentraciones en mg/kg							
	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb	Mn	V
PTO 28	6,34	40,88	22,81	26,66	10,33	5,127	374,12	106,47
Sedimento 1	4,88	60,87	13,11	38,41	10,67	6,8	340,6	72,05
Sedimento 2	6,41	107,4	12,55	103,93	12,6	15,8	832,11	72,68
Sedimento 4	4,5	43,69	12,96	16,45	6,19	<2,09	244,81	76,92
Sedimento 3	8,72	65,53	23,13	43,09	9,05	4,91	673,23	171,94
Sedimento 6	4,72	55,99	9,84	29,56	9,69	5,29	394,42	58,55
Sedimento 7	3,4	49,45	6,81	26,4	7,55	<2,09	327,98	34,57
Sedimento 8	2,35	38,95	3,99	23,06	<LD	<2,09	269,7	24,63
Sedimento 9	3,46	49	7,6	26,2	6,98	<2,09	464,57	39,8
PTO 30	3,58	48,43	10,59	34,96	13,4	<2,09	430,6	50,38
Sedimento 19	4,28	41,23	15,12	11,41	9,96	4,37	461,74	58,48
Sedimento 20	4,59	44,88	17,33	12,35	9,01	<2,09	477,21	62,73
Sedimento 18	4,06	47,35	18,79	16,06	8,86	4,6	393,3	53,06
Sedimento 10	3,43	40,25	10,37	13,18	8,42	<2,09	361,6	39,11
Sedimento 11	2,65	37,04	11,06	9	5,62	<2,09	421,53	30,19
Sedimento 5	2,97	36,88	12,5	15,86	11,99	<2,09	543,34	31,6
49-1	<1,02	30,33	5,48	22,36	8,09	<2,09	1241	21,59
Sedimento 21	2,96	41,01	9,4	12,89	5,5	<2,09	355,66	30,37
Sedimento 15	2,81	33,1	8,75	9,78	6,02	<2,09	2479,34	28,47
Sedimento 16	3,12	36,16	11,27	7,17	7,49	4,25	1013,2	35,45
Sedimento 17	3,85	39,81	12,99	21,44	7,12	<2,09	694,77	47,53
Sedimento 14	2,75	31,6	9,37	7,14	5,12	<2,09	13971,7	32,36
Sedimento 12	4,01	38,4	17,9	5,75	7,68	<2,09	432,86	56,82
Sedimento 13	3,88	37,5	13,65	6,81	6,67	<2,09	359,05	51,47

Tabla A.11. Base de datos comparativa CENMA, 2017.

Nombre muestra	Concentraciones mg/kg		
	Ba	Co	Fe
PTO 28	21,13	10,01	30833,33
Sedimento 1	34,35	10,22	18079,15
Sedimento 2	63,97	14,74	28619,6
Sedimento 4	15,49	9,09	15921,79
Sedimento 3	30,99	14,1	42258,26
Sedimento 6	37,28	10,17	17231,08
Sedimento 7	36,93	8,18	13911,05
Sedimento 8	40,54	5,11	8510,872
Sedimento 9	70,59	8,15	8815,867
PTO 30	42,83	8,81	23190
Sedimento 19	29,32	9,34	22992,85
Sedimento 20	30,89	9,26	16257,18
Sedimento 18	56,66	8,78	19590,29
Sedimento 10	38,09	6,99	14330
Sedimento 11	26,08	5,09	9164,68
Sedimento 5	34,52	6,63	6688,583
49-1	54,26	4,22	11790
Sedimento 21	31,18	5,77	12420,26
Sedimento 15	40,42	5,77	14364,42
Sedimento 16	32,06	6,73	12392,48
Sedimento 17	41,02	7,66	12689,09
Sedimento 14	47,52	5,16	9070,21
Sedimento 12	27,06	8,06	21036,4
Sedimento 13	32,42	8	13986,57

Continuación tabla A.11.

ANEXO II

Resultados estadística multivariable

	Li	B	Sc	V	Mn	Co
H-1-1904-7	-11,9	-10,8	-14,4	-14,8	-12,9	-16,7
H-2-1904-7	-11,9	-10,8	-14,4	-14,8	-12,9	-16,8
H-3-1904-7	-11,9	-10,8	-14,4	-14,8	-12,7	-16,8
H-4-1904-7	-11,2	-9,7	-14,6	-14,2	-13,2	-16,4
H-5-1904-7	-11,3	-9,7	-14,6	-13,9	-12,6	-16,6
H-1-2004-7	-12,0	-10,8	-14,5	-15,0	-17,3	-17,9
H-2-2004-7	-11,3	-9,7	-14,8	-14,0	-13,2	-16,6
H-3-2004-7	-11,6	-10,7	-14,4	-14,7	-14,3	-17,6
H-1-2204-7	-11,3	-9,8	-14,7	-14,2	-12,1	-16,5
H-2-2204-7	-11,4	-9,8	-14,3	-14,8	-11,2	-16,5
H-1-2404-7	-11,4	-9,8	-14,7	-14,9	-12,3	-16,8
H-2-2404-7	-11,6	-10,3	-14,3	-17,9	-12,7	-16,8

	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb
H-1-1904-7	-14,2	-14,7	-13,8	-14,1	-14,9	-14,2
H-2-1904-7	-14,2	-14,5	-13,9	-14,1	-14,4	-14,2
H-3-1904-7	-14,2	-14,9	-14,4	-14,1	-14,4	-14,2
H-4-1904-7	-13,9	-14,6	-14,1	-13,6	-13,8	-13,9
H-5-1904-7	-14,0	-14,9	-14,0	-13,5	-13,8	-13,9
H-1-2004-7	-14,4	-14,8	-13,7	-13,7	-14,6	-14,1
H-2-2004-7	-14,0	-14,7	-13,6	-13,6	-13,6	-14,0
H-3-2004-7	-14,4	-15,1	-14,2	-13,9	-14,5	-14,2
H-1-2204-7	-13,9	-14,9	-14,0	-13,6	-13,7	-14,0
H-2-2204-7	-13,7	-15,1	-14,0	-14,0	-13,6	-14,4
H-1-2404-7	-13,8	-15,2	-14,6	-14,0	-13,9	-14,1
H-2-2404-7	-13,7	-16,7	-14,1	-15,6	-12,9	-13,4

	Sr	Mo	Sb	Ba	Pb	U
H-1-1904-7	-10,3	-13,7	-16,4	-12,2	-16,9	-13,5
H-2-1904-7	-10,3	-13,7	-16,3	-12,2	-17,4	-13,5
H-3-1904-7	-10,3	-13,7	-16,4	-12,1	-17,6	-13,5
H-4-1904-7	-9,7	-13,5	-16,3	-12,4	-17,1	-13,1
H-5-1904-7	-9,8	-13,5	-16,2	-12,4	-17,2	-13,1
H-1-2004-7	-10,4	-13,6	-16,5	-12,2	-17,1	-13,6
H-2-2004-7	-9,8	-13,7	-16,2	-12,4	-16,8	-13,1
H-3-2004-7	-10,4	-13,6	-16,3	-12,2	-18,0	-13,6
H-1-2204-7	-9,7	-13,6	-16,2	-12,4	-17,2	-13,2
H-2-2204-7	-9,5	-13,8	-16,5	-12,3	-17,3	-13,1
H-1-2404-7	-9,6	-13,7	-16,4	-12,4	-17,8	-13,3
H-2-2404-7	-9,0	-15,1	-17,3	-12,1	-17,8	-13,8

Tabla A.12. Base de datos 2007 transformada a ilr.

	Na	Mg	Al	Si	K	Ca
H-1-1904-7	-7,456	-7,830	-12,978	-8,302	-9,235	-6,502
H-2-1904-7	-7,444	-7,819	-12,840	-8,308	-9,241	-6,498
H-3-1904-7	-7,449	-7,817	-13,268	-8,306	-9,228	-6,503
H-4-1904-7	-5,750	-7,107	-13,839	-8,496	-8,403	-6,125
H-5-1904-7	-5,787	-7,174	-13,909	-8,484	-8,555	-6,198
H-1-2004-7	-7,483	-7,893	-14,090	-8,361	-9,229	-6,642
H-2-2004-7	-5,904	-7,294	-13,726	-8,689	-8,667	-6,193
H-3-2004-7	-7,215	-7,851	-14,921	-8,295	-9,151	-6,623
H-1-2204-7	-5,770	-7,121	-14,146	-8,534	-8,534	-6,142
H-2-2204-7	-5,665	-6,978	-14,452	-8,128	-8,324	-5,947
H-1-2404-7	-5,752	-7,098	-14,832	-8,635	-8,440	-6,087
H-2-2404-7	-5,501	-6,787	-15,045	-8,158	-7,907	-5,951

	Fe	NO3	F	Cl
H-1-1904-7	-13,180	-9,041	-10,285	-7,920
H-2-1904-7	-13,485	-9,289	-10,322	-7,943
H-3-1904-7	-13,386	-9,356	-10,302	-7,938
H-4-1904-7	-12,732	-11,768	-10,108	-5,673
H-5-1904-7	-13,339	-9,112	-10,177	-5,778
H-1-2004-7	-13,733	-9,767	-10,292	-7,877
H-2-2004-7	-13,084	-8,331	-10,205	-5,946
H-3-2004-7	-14,144	-9,619	-10,284	-7,483
H-1-2204-7	-12,727	-13,025	-10,022	-5,617
H-2-2204-7	-11,820	-10,121	-10,049	-5,406
H-1-2404-7	-12,803	-12,555	-10,199	-5,552
H-2-2404-7	-11,143	-13,025	-11,887	-4,617

Continuación tabla A.12.

	Li	B	Al	Sc	V	Mn
H-1-180108	-10,786	-9,332	-12,840	-15,144	-13,656	-11,391
H-2-180108	-10,853	-9,357	-15,144	-15,144	-13,516	-11,716
H-3-180108	-11,034	-9,685	-13,673	-13,877	-13,502	-12,343
H-4-190108	-11,103	-9,768	-12,896	-13,877	-13,901	-12,453
H-5-190108	-11,120	-9,775	-14,163	-13,877	-13,768	-13,045
H-6-190108	-11,756	-10,730	-13,387	-14,163	-14,278	-12,466
H-7-190108	-11,778	-10,769	-12,323	-14,163	-14,321	-12,406
H-8-190108	-12,085	-11,052	-11,262	-14,163	-14,811	-11,987
H-9-190108	-11,922	-10,873	-11,978	-14,163	-14,811	-12,424
H-10-190108	-11,161	-9,761	-12,840	-13,877	-13,809	-12,601
H-11-200108	-11,372	-9,980	-13,673	-14,163	-13,978	-13,057
H-12-200108	-11,041	-9,782	-13,877	-13,877	-13,748	-13,527
H-13-200108	-11,519	-10,108	-13,516	-13,877	-13,788	-13,820
H-14-200108	-11,687	-10,684	-12,028	-14,163	-14,468	-13,573
H-15-200108	-11,757	-10,758	-12,840	-14,163	-14,654	-13,768

	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As
H-1-180108	-13,516	-15,187	-16,282	-13,710	-10,971	-13,229
H-2-180108	-13,516	-17,910	-16,282	-13,901	-12,168	-13,140
H-3-180108	-13,516	-17,910	-15,792	-14,096	-12,305	-13,210
H-4-190108	-13,516	-17,133	-13,748	-13,951	-11,205	-13,423
H-5-190108	-13,516	-17,910	-15,792	-14,129	-12,808	-13,375
H-6-190108	-12,610	-17,910	-16,282	-14,278	-11,563	-13,656
H-7-190108	-12,011	-17,910	-16,282	-14,278	-10,652	-13,656
H-8-190108	-13,516	-15,995	-16,282	-14,238	-11,243	-13,978
H-9-190108	-12,958	-16,930	-16,282	-14,468	-11,840	-13,622
H-10-190108	-11,724	-17,910	-16,282	-14,096	-11,280	-13,387
H-11-200108	-11,630	-17,420	-16,282	-14,129	-11,885	-13,502
H-12-200108	-13,516	-17,910	-16,282	-14,321	-12,221	-13,238
H-13-200108	-11,978	-17,910	-16,282	-14,163	-11,873	-13,488
H-14-200108	-12,693	-17,910	-16,282	-14,321	-10,367	-13,728
H-15-200108	-13,516	-17,910	-16,282	-14,367	-12,056	-13,691

Tabla A.13. Base de datos de aguas 2008 transformada a ilr.

	Se	Rb	Sr	Mo	Sb	Ba
H-1-180108	-15,634	-13,908	-9,455	-13,728	-15,634	-12,033
H-2-180108	-15,634	-14,032	-9,605	-13,673	-15,634	-12,067
H-3-180108	-13,854	-13,877	-9,754	-13,423	-15,907	-12,287
H-4-190108	-13,901	-13,986	-9,773	-13,728	-16,153	-12,331
H-5-190108	-13,877	-14,017	-9,765	-13,656	-16,153	-12,334
H-6-190108	-14,811	-13,438	-10,408	-13,502	-16,044	-12,097
H-7-190108	-14,811	-13,708	-10,415	-13,516	-15,995	-12,114
H-8-190108	-14,811	-13,836	-10,616	-13,574	-16,153	-12,363
H-9-190108	-14,586	-13,752	-10,409	-13,926	-15,907	-12,265
H-10-190108	-13,831	-13,778	-9,870	-13,516	-15,907	-12,346
H-11-200108	-14,096	-13,856	-10,011	-13,411	-15,866	-12,361
H-12-200108	-13,901	-14,376	-10,132	-13,435	-16,282	-12,616
H-13-200108	-14,416	-13,646	-10,217	-13,258	-15,757	-12,366
H-14-200108	-14,811	-13,970	-10,334	-13,544	-16,282	-10,724
H-15-200108	-14,811	-14,122	-10,383	-13,559	-16,356	-12,091

	Pb	U	F	Na	Mg	Al
H-1-180108	-16,772	-13,275	-10,231	-5,455	-6,709	-12,840
H-2-180108	-16,772	-13,472	-10,259	-5,515	-6,819	-15,144
H-3-180108	-16,772	-13,215	-10,334	-5,631	-6,829	-13,673
H-4-190108	-14,728	-13,447	-10,318	-5,697	-6,871	-12,896
H-5-190108	-16,772	-13,337	-10,303	-5,786	-6,919	-14,163
H-6-190108	-16,772	-13,595	-10,273	-7,322	-7,646	-13,387
H-7-190108	-16,772	-13,587	-10,196	-7,369	-7,660	-12,323
H-8-190108	-16,772	-13,872	-10,160	-7,669	-7,799	-11,262
H-9-190108	-16,772	-13,997	-10,262	-7,544	-7,577	-11,978
H-10-190108	-16,282	-13,278	-10,173	-5,951	-7,135	-12,840
H-11-200108	-16,772	-13,390	-10,074	-6,230	-7,299	-13,673
H-12-200108	-16,772	-13,358	-10,231	-5,753	-7,364	-13,877
H-13-200108	-16,282	-13,398	-10,192	-6,412	-7,551	-13,516
H-14-200108	-16,282	-13,550	-10,231	-7,253	-7,655	-12,028
H-15-200108	-16,772	-13,553	-10,205	-7,394	-7,682	-12,840

Continuación tabla A.13.

	Si	K	Ca	NO3	F
H-1-180108	-8,202	-8,092	-5,773	-12,377	-10,231
H-2-180108	-8,318	-8,234	-5,952	-12,377	-10,259
H-3-180108	-8,014	-8,374	-6,011	-12,377	-10,334
H-4-190108	-8,029	-8,518	-5,997	-9,159	-10,318
H-5-190108	-8,027	-8,566	-5,983	-12,377	-10,303
H-6-190108	-8,240	-8,639	-6,485	-8,562	-10,273
H-7-190108	-8,243	-8,907	-6,490	-8,574	-10,196
H-8-190108	-8,261	-9,306	-6,575	-9,497	-10,160
H-9-190108	-8,199	-9,225	-6,365	-9,183	-10,262
H-10-190108	-8,187	-8,567	-6,111	-8,893	-10,173
H-11-200108	-8,317	-8,676	-6,237	-8,025	-10,074
H-12-200108	-8,121	-8,838	-6,290	-8,688	-10,231
H-13-200108	-8,198	-8,634	-6,435	-7,738	-10,192
H-14-200108	-8,301	-9,004	-6,477	-8,565	-10,231
H-15-200108	-8,343	-9,172	-6,491	-8,616	-10,205

Continuación tabla A.13.

Muestra	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn
5-1904-7	-0,748	-5,880	-4,003	-5,720	-6,053	-4,038
2-2204-7	-1,813	-4,982	-2,700	-4,602	-5,176	-3,431
2-1904-7	-1,638	-4,986	-3,079	-5,000	-5,281	-3,654
4-1904-7	-0,965	-5,233	-3,254	-4,997	-5,448	-3,466
3-1904-7	-1,074	-5,273	-3,078	-4,913	-5,136	-3,582
2-2403-7	-1,817	-4,973	-2,840	-4,771	-5,328	-3,825
2-2004-7	-1,278	-5,175	-3,262	-5,053	-5,088	-3,857
3-2004-7	-1,689	-4,936	-2,721	-4,565	-5,032	-3,576
1-2204-7	-1,858	-4,940	-3,061	-4,997	-5,488	-3,913
3-1904-7	-1,897	-4,860	-2,829	-4,780	-5,178	-3,812
1-1904-7	-1,483	-4,972	-2,690	-4,668	-4,897	-3,763
5-190108S	-0,662	-6,908	-4,211	-5,410	-5,914	-3,832
6-190108S	-0,367	-6,960	-4,402	-5,625	-6,123	-3,516
11-200108S	-1,698	-6,281	-3,458	-4,686	-5,100	-3,847
12-200108S	-1,130	-6,326	-3,501	-4,791	-5,315	-3,573
13-200108S	-1,683	-6,375	-3,618	-4,749	-5,238	-3,941
14-200108S	-0,881	-6,358	-3,517	-4,852	-5,076	-3,763

Muestra	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga
5-1904-7	-2,829	-6,863	-5,769	-6,235	-5,307	-6,797
2-2204-7	-1,703	-5,850	-5,474	-5,535	-4,723	-5,653
2-1904-7	-2,023	-5,830	-5,196	-4,775	-4,488	-5,691
4-1904-7	-1,951	-6,039	-5,514	-4,840	-4,569	-5,985
3-1904-7	-1,920	-5,390	-5,098	-4,622	-3,739	-5,832
2-2403-7	-1,867	-5,882	-5,504	-4,608	-4,713	-5,658
2-2004-7	-2,078	-6,137	-5,370	-4,136	-4,476	-6,087
3-2004-7	-1,634	-5,099	-5,177	-5,189	-4,664	-5,546
1-2204-7	-1,946	-4,914	-5,363	-5,123	-4,824	-5,624
3-1904-7	-1,783	-4,994	-5,311	-4,253	-4,623	-5,501
1-1904-7	-1,773	-5,670	-5,125	-5,183	-4,471	-5,611
5-190108S	-2,435	-6,393	-6,240	-5,246	-5,113	-6,817
6-190108S	-2,683	-6,311	-6,055	-5,252	-4,974	-7,019
11-200108S	-1,686	-5,695	-5,441	-4,901	-4,636	-6,167
12-200108S	-1,782	-5,793	-5,657	-5,273	-4,878	-6,167
13-200108S	-1,754	-5,691	-5,554	-4,443	-4,729	-6,178
14-200108S	-1,861	-5,804	-5,410	-4,840	-4,659	-6,254

Tabla A.14. Base de datos sedimentos transformada ilr.

Muestra	Ge	As	Rb	Sr	Y	Mo
5-1904-7	-7,807	-6,271	-5,916	-3,886	-6,564	-6,284
2-2204-7	-6,809	-5,471	-4,687	-4,230	-5,392	-6,269
2-1904-7	-6,837	-5,644	-4,662	-4,289	-5,463	-6,397
4-1904-7	-7,110	-5,808	-5,102	-4,039	-5,807	-6,268
3-1904-7	-7,153	-5,287	-5,018	-4,109	-5,196	-6,013
2-2403-7	-6,828	-5,740	-4,704	-4,148	-5,510	-6,676
2-2004-7	-7,062	-5,830	-5,258	-4,212	-5,857	-6,129
3-2004-7	-6,798	-5,576	-4,725	-4,147	-5,384	-6,377
1-2204-7	-6,792	-5,763	-4,672	-4,365	-5,410	-6,571
3-1904-7	-6,689	-5,664	-4,580	-4,194	-5,300	-6,557
1-1904-7	-6,818	-5,751	-4,760	-4,183	-5,366	-6,245
5-190108S	-8,059	-6,046	-6,358	-3,864	-6,509	-6,856
6-190108S	-8,059	-5,653	-6,450	-3,922	-6,289	-6,960
11-200108S	-8,059	-5,782	-5,887	-4,652	-5,792	-6,729
12-200108S	-8,059	-5,423	-5,723	-4,265	-5,956	-6,773
13-200108S	-8,059	-5,653	-5,935	-4,758	-5,831	-6,608
14-200108S	-8,059	-5,669	-5,862	-4,313	-5,932	-6,719

Muestra	Ag	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba
5-1904-7	-7,587	-8,406	-7,679	-7,516	-7,364	-4,739
2-2204-7	-7,134	-7,684	-6,284	-6,659	-6,217	-3,853
2-1904-7	-7,151	-7,238	-6,176	-6,417	-6,176	-3,862
4-1904-7	-7,332	-7,869	-6,815	-6,869	-6,306	-4,238
3-1904-7	-7,285	-6,315	-6,598	-6,730	-6,020	-4,200
2-2403-7	-7,164	-8,003	-6,457	-6,668	-6,308	-3,848
2-2004-7	-6,893	-7,797	-6,263	-6,583	-6,524	-4,342
3-2004-7	-7,144	-8,218	-6,353	-6,466	-6,261	-3,875
1-2204-7	-7,192	-8,166	-6,436	-6,634	-6,493	-3,819
3-1904-7	-7,110	-7,845	-6,294	-6,531	-6,197	-3,723
1-1904-7	-7,220	-7,308	-6,455	-6,166	-6,150	-3,971
5-190108S	-7,672	-7,562	-7,116	-7,824	-7,013	-4,800
6-190108S	-8,816	-6,995	-7,688	-7,794	-7,019	-4,430
11-200108S	-7,522	-7,688	-6,654	-7,172	-6,509	-4,626
12-200108S	-7,366	-7,824	-6,765	-7,477	-6,645	-4,844
13-200108S	-6,892	-7,665	-6,230	-7,072	-6,628	-4,771
14-200108S	-8,039	-7,366	-6,549	-6,944	-6,518	-4,508

Continuación tabla A.14.

Muestra	La	Ce	Pb	Bi	Th	U
5-1904-7	-5,707	-6,236	-6,839	-7,892	-6,570	-6,305
2-2204-7	-5,117	-4,941	-5,545	-7,538	-5,352	-6,323
2-1904-7	-3,848	-5,100	-5,673	-6,622	-5,456	-6,508
4-1904-7	-5,401	-5,440	-5,699	-6,510	-5,815	-6,393
3-1904-7	-5,218	-5,004	-5,536	-7,388	-5,732	-5,835
2-2403-7	-5,227	-5,115	-5,684	-6,629	-5,498	-6,632
2-2004-7	-5,355	-5,542	-5,659	-7,353	-5,983	-6,457
3-2004-7	-5,076	-4,981	-5,665	-7,573	-5,477	-6,587
1-2204-7	-5,295	-5,183	-5,717	-6,688	-5,325	-6,606
3-1904-7	-5,080	-4,899	-5,251	-6,572	-5,286	-6,373
1-1904-7	-5,167	-5,001	-5,706	-7,655	-5,502	-6,536
5-190108S	-6,358	-6,069	-6,121	-7,928	-7,019	-6,302
6-190108S	-6,514	-6,210	-6,187	-8,314	-7,163	-6,493
11-200108S	-5,544	-5,291	-5,438	-7,354	-5,856	-6,411
12-200108S	-5,815	-5,542	-5,908	-7,824	-6,202	-6,532
13-200108S	-5,618	-5,374	-5,302	-7,058	-6,167	-6,483
14-200108S	-5,761	-5,514	-4,914	-7,621	-5,987	-6,571

Continuación tabla A.14.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Mg	0,96	-0,03	0,15	0,05	0,16
Na	0,96	0,04	0	0,25	0
Cl	0,96	-0,13	-0,06	0,22	0,05
Ca	0,94	-0,02	0,09	0,03	0,27
K	0,94	-0,16	0,1	0,03	0,03
Sr	0,92	-0,31	-0,1	0,12	0,16
B	0,92	0,31	-0,06	0,19	0,02
Li	0,9	0,38	0,04	0,07	-0,04
NO3	-0,67	0,26	0,26	0,21	-0,1
U	0,59	0,39	-0,29	0,49	0,07
Al	-0,57	0,25	0,46	-0,16	0,44
V	0,17	0,96	0,08	0,06	-0,04
As	0,17	0,95	0,12	-0,03	-0,09
Mo	-0,26	0,89	-0,02	0,16	-0,18
Cu	-0,02	0,87	0,36	-0,22	0,09
F	-0,21	0,87	0,17	0,15	0,11
Sb	0,12	0,84	0,22	-0,28	0,04
Fe	0,2	-0,42	0,34	0,19	0,07
Zn	-0,07	0,39	0,77	-0,35	0,05
Sc	-0,28	-0,03	0,73	0,35	-0,2
Si	0,07	-0,03	0,68	-0,12	-0,03
Pb	0,08	0,43	0,67	0,07	0,13
Ni	0,14	-0,43	-0,58	0,47	0,16
Rb	0,11	-0,31	0,48	-0,23	-0,08
Se	0,31	-0,44	0,02	0,73	-0,06
Ba	-0,2	-0,1	0,14	-0,4	0,08
Co	0,17	-0,15	-0,36	0,01	0,66
Mn	0,41	-0,05	0,15	-0,11	0,59

Tabla A.15. Pesos estandarizados análisis factorial aguas.

	C1	C2	C3
Sc	1	0,11	0,01
Ge	0,97	0,05	0,06
Rb	0,97	0,24	0,04
Ti	0,85	0,47	0,06
Sb	0,85	0,42	0,08
Ba	0,84	0,15	0,09
Th	0,83	0,52	-0,04
Ga	0,83	0,55	0,02
La	0,78	0,28	0,04
Y	0,74	0,57	0,29
Ni	0,71	0,51	0,22
Ce	0,71	0,67	0,16
Cs	0,66	0,61	0,41
Mo	0,65	-0,08	0,31
Ag	0,63	0,39	-0,21
Bi	0,58	0,36	-0,19
Fe	0,35	0,89	0,03
Pb	0,11	0,88	0,17
V	0,39	0,85	0,23
Sr	0,06	-0,82	0,24
Cr	0,44	0,79	0,15
Sn	0,54	0,78	-0,04
Co	0,45	0,65	0,07
Ca	-0,62	-0,62	0,34
Cu	0,15	0,58	0,15
Cd	-0,2	0,12	0,87
Zn	0,4	0,46	0,72
As	0,14	0,58	0,59
U	-0,01	-0,2	0,58
Mn	0,11	0,05	0,55

Tabla A.16. Pesos estandarizados análisis factorial sedimentos.

ANEXO III

Gráficos para la evaluación ambiental

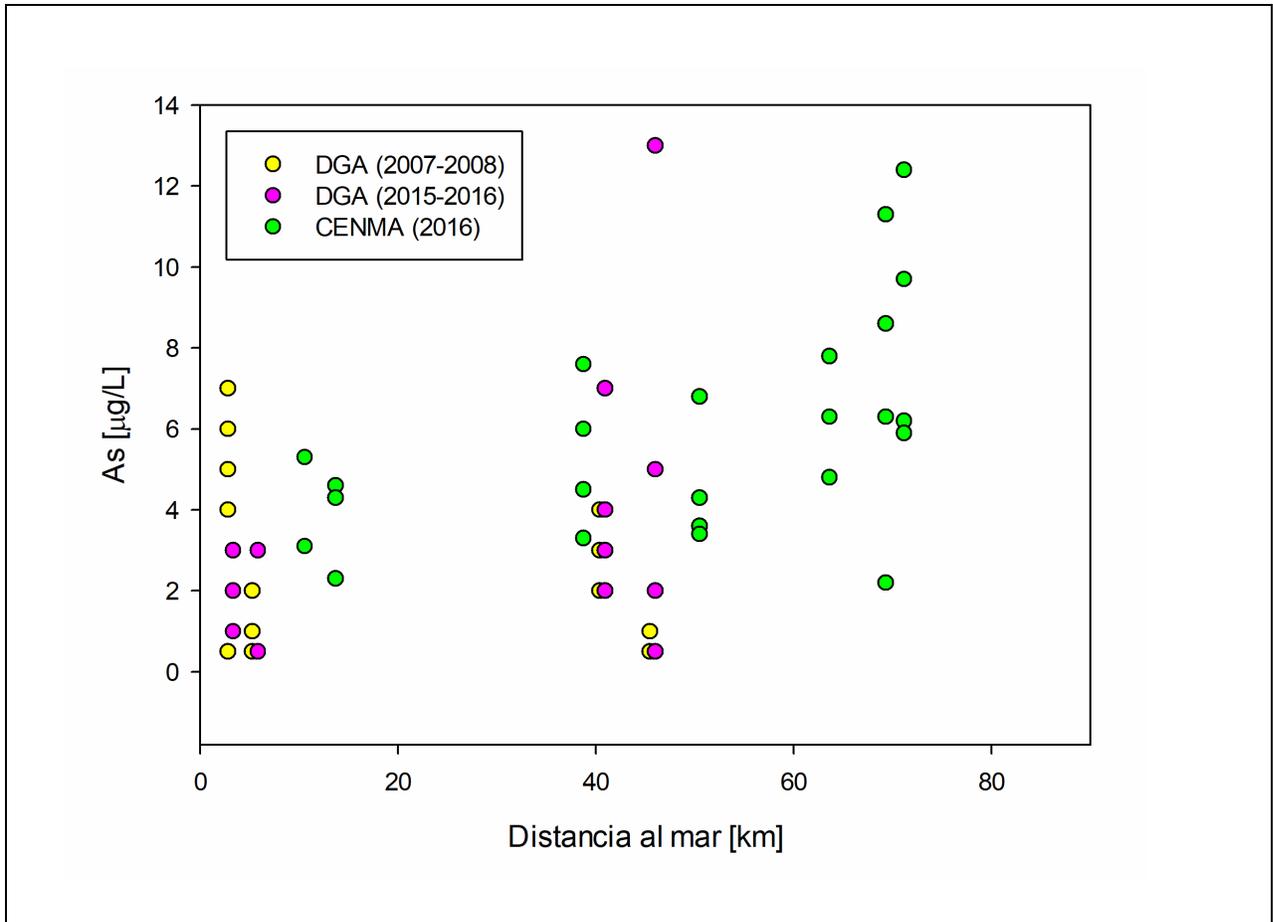


Figura A.1. Gráfico de calidad ambiental en As. El valor establecido por la normativa es de $100\mu\text{g/L}$, y dada la escala del gráfico no fue posible representarlo en el gráfico sin perder la buena visibilidad de las muestras.

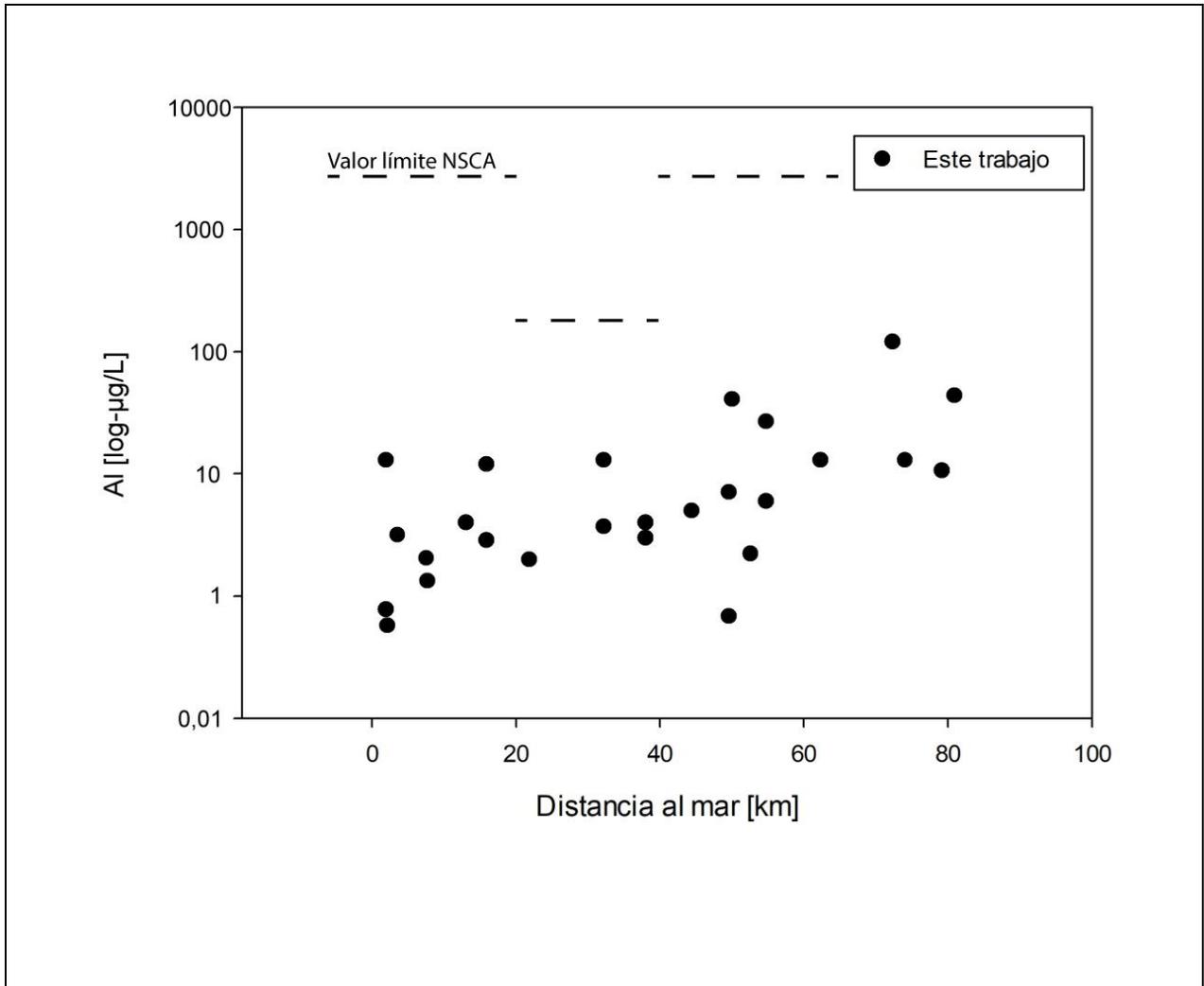


Figura A.2. Evaluación de calidad ambiental de Al en aguas superficiales. Recordar que según lo mencionado en el capítulo 4, la norma cuenta con zonas de vigilancias, con valores límites establecidos que varían según el área de vigilancia, lo que se ve en el gráfico como cambios en la línea punteada.

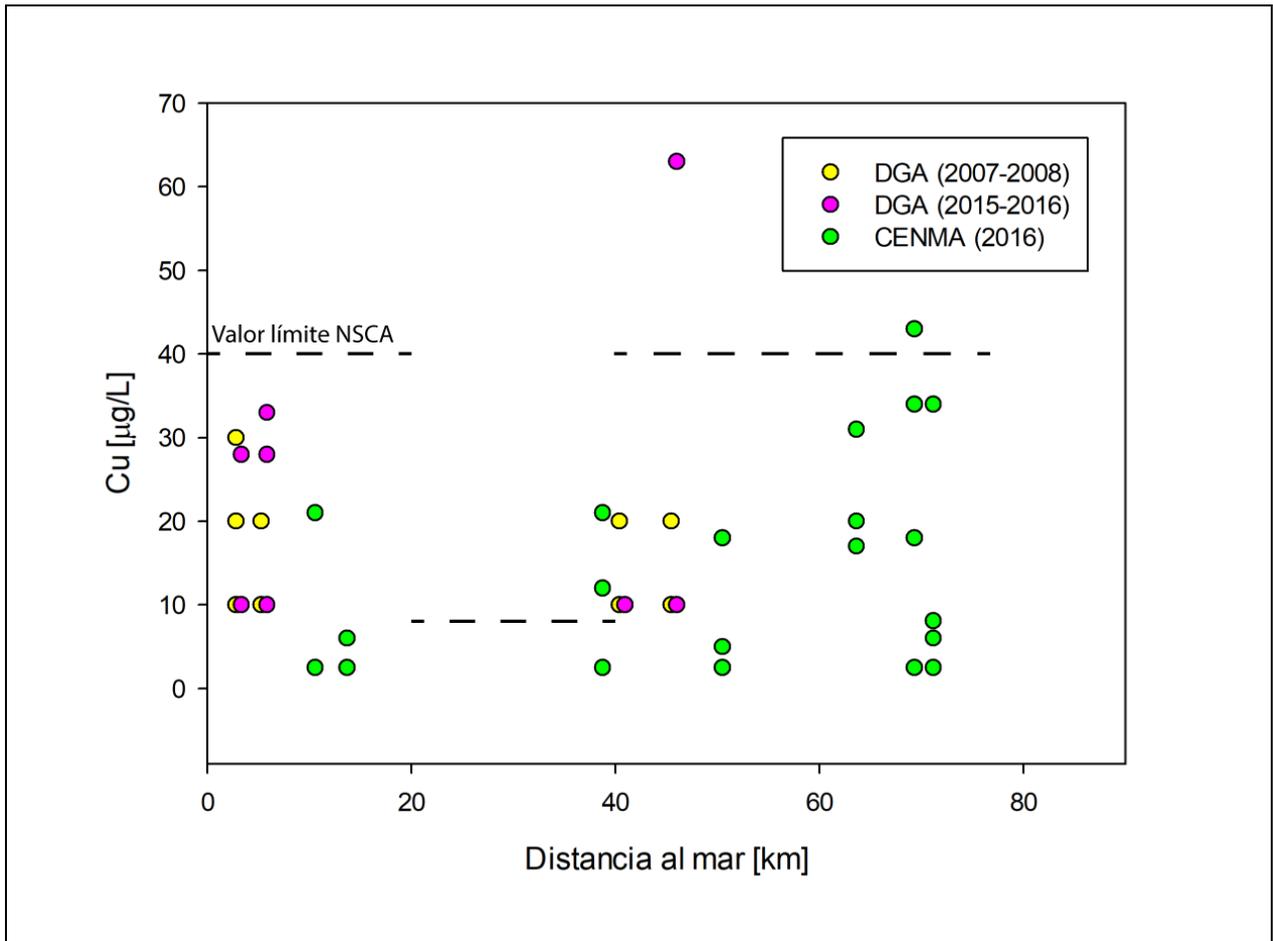


Figura A.3. Evaluación de calidad ambiental Cu en aguas superficiales.

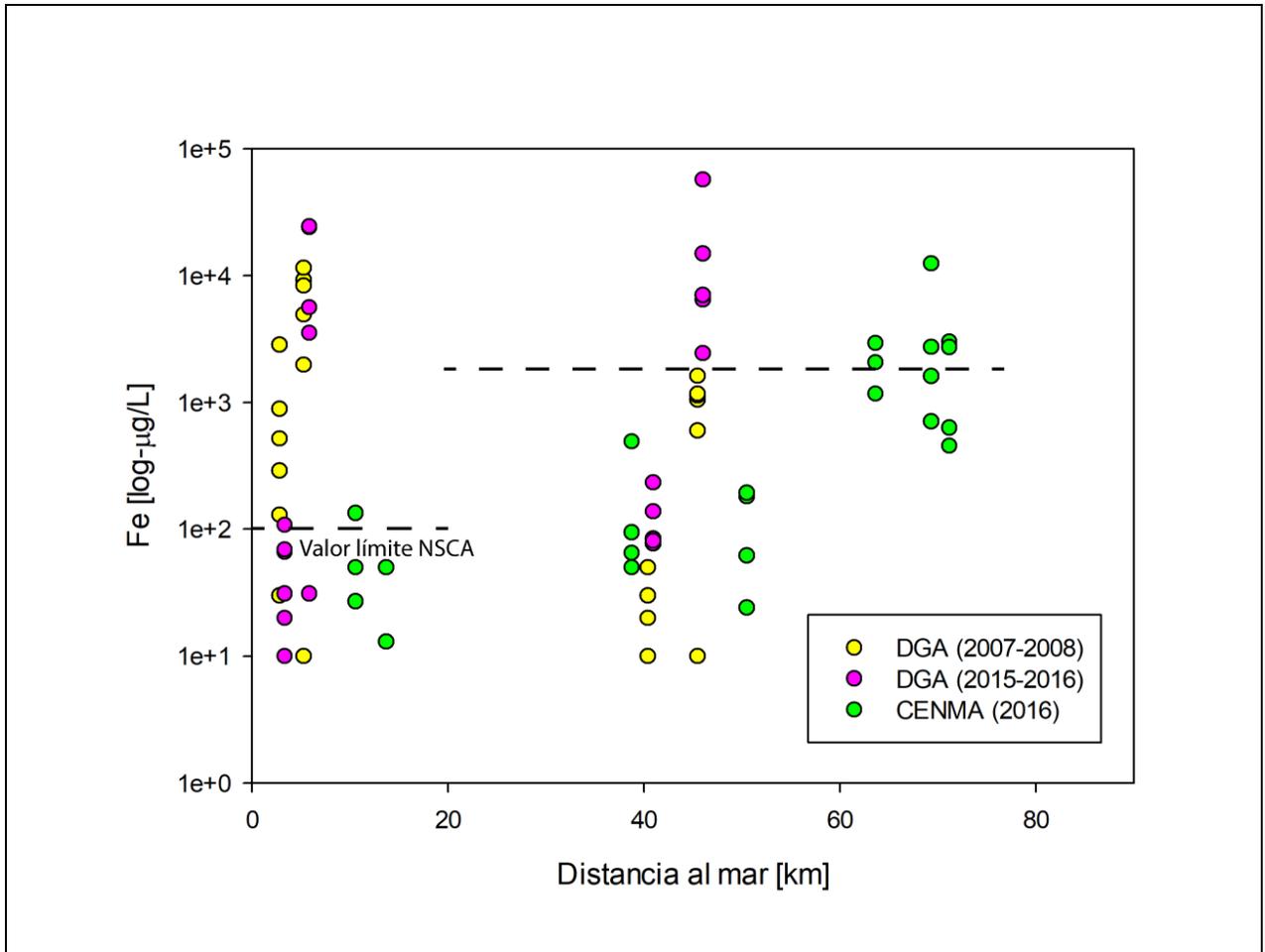


Figura A.4. Evaluación de calidad ambiental de Fe en aguas superficiales.

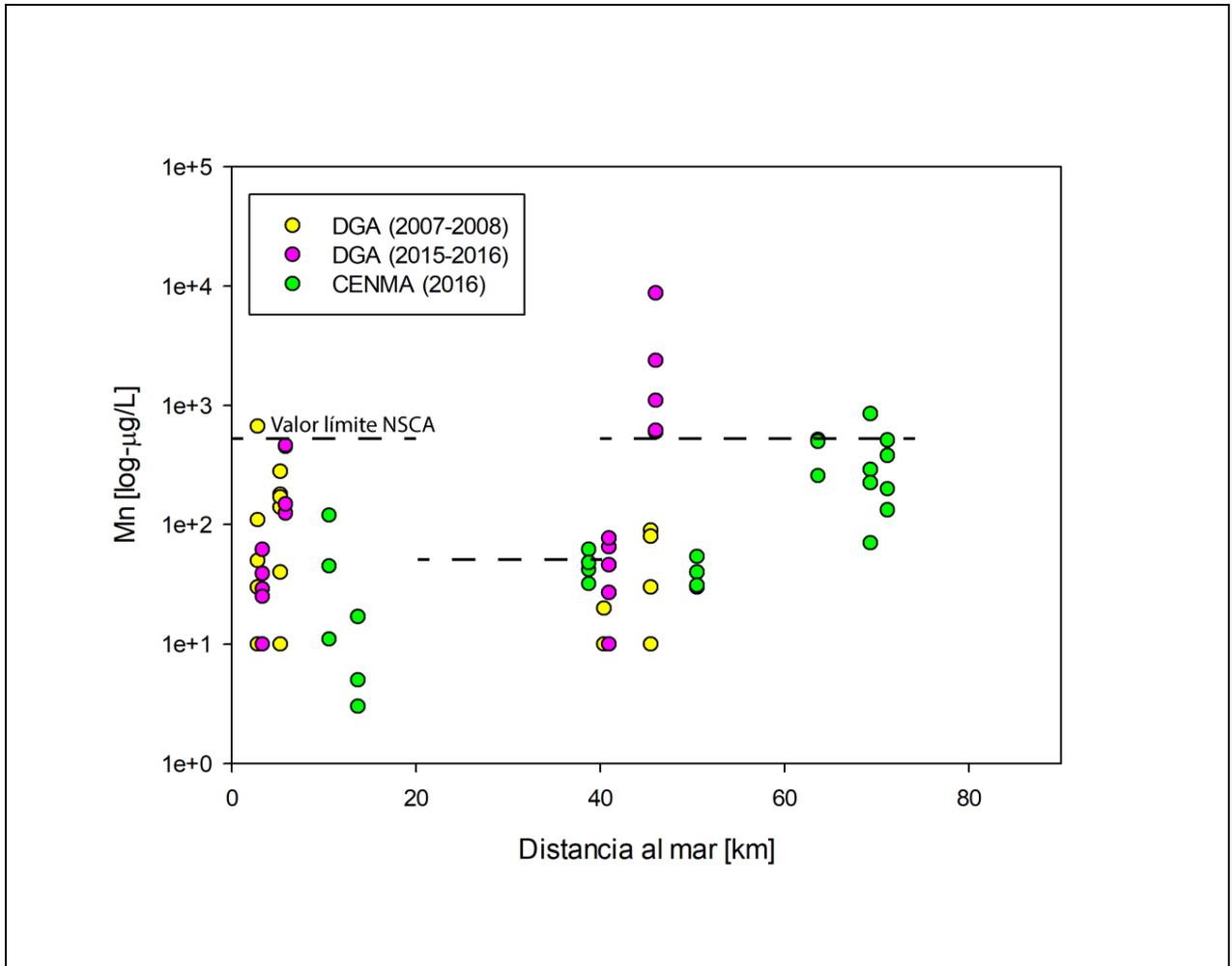


Figura A.5. Evaluación de calidad ambiental de Mn en aguas superficiales.

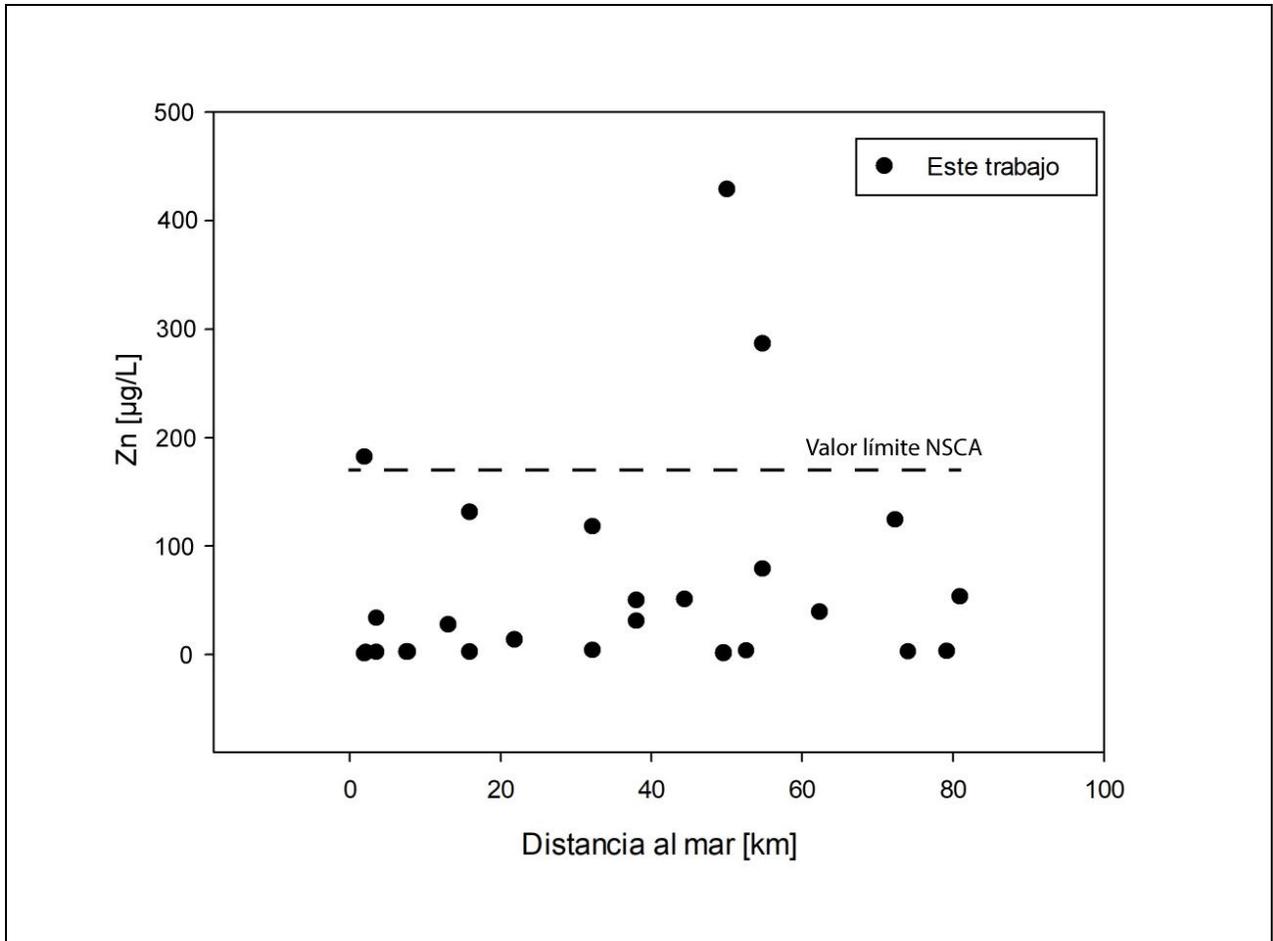


Figura A.6. Evaluación de calidad ambiental Zn en aguas superficiales

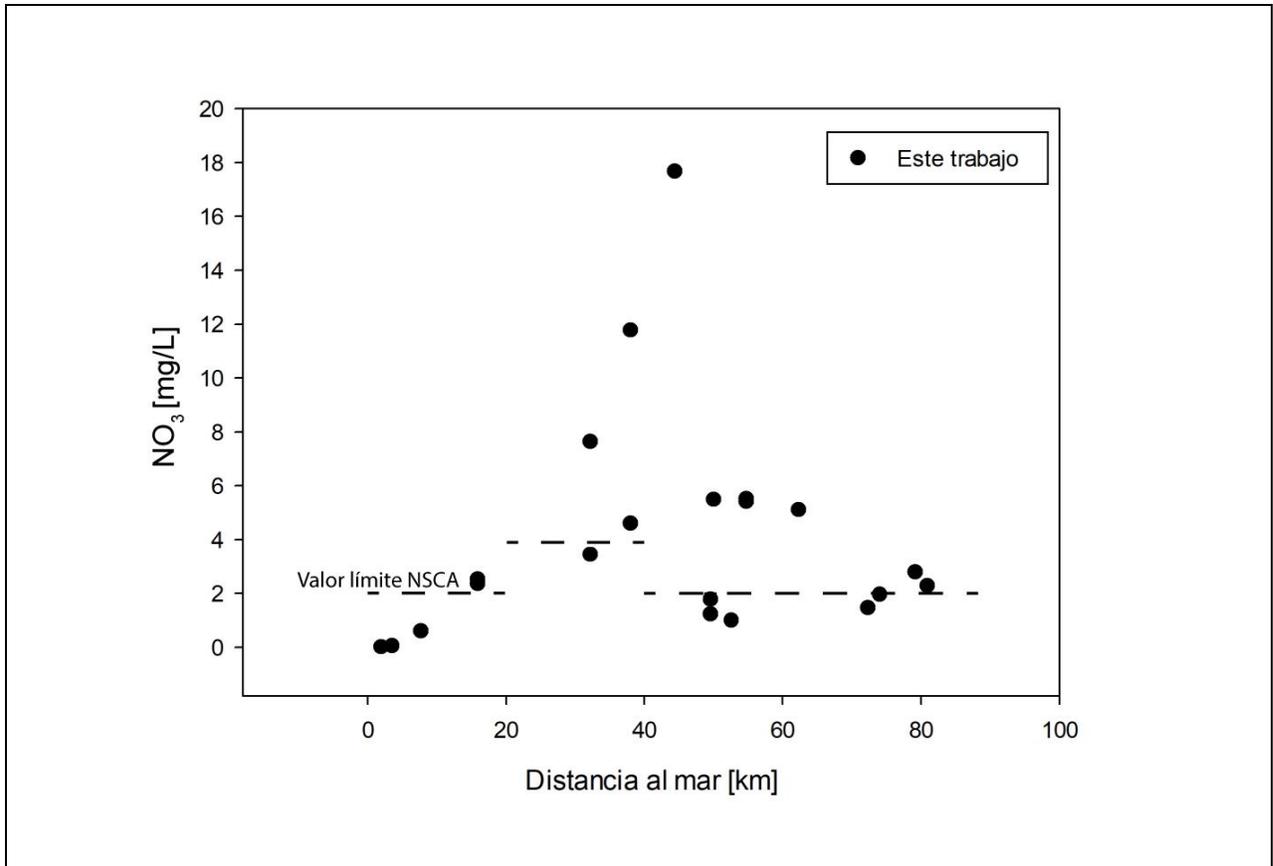


Figura A.7. Evaluación de calidad ambiental NO_3 en aguas superficiales.

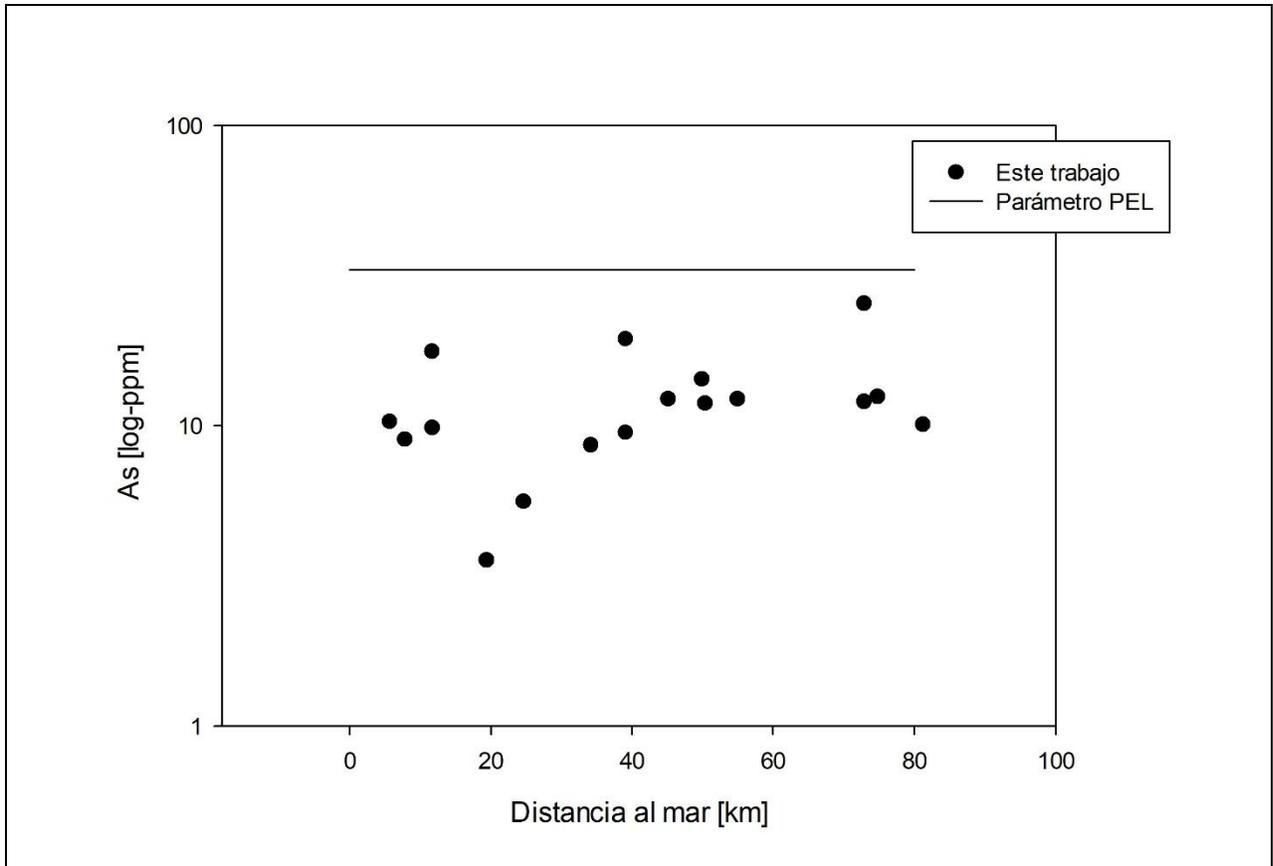


Figura A.8. Evaluación de calidad ambiental de As en sedimentos activos.

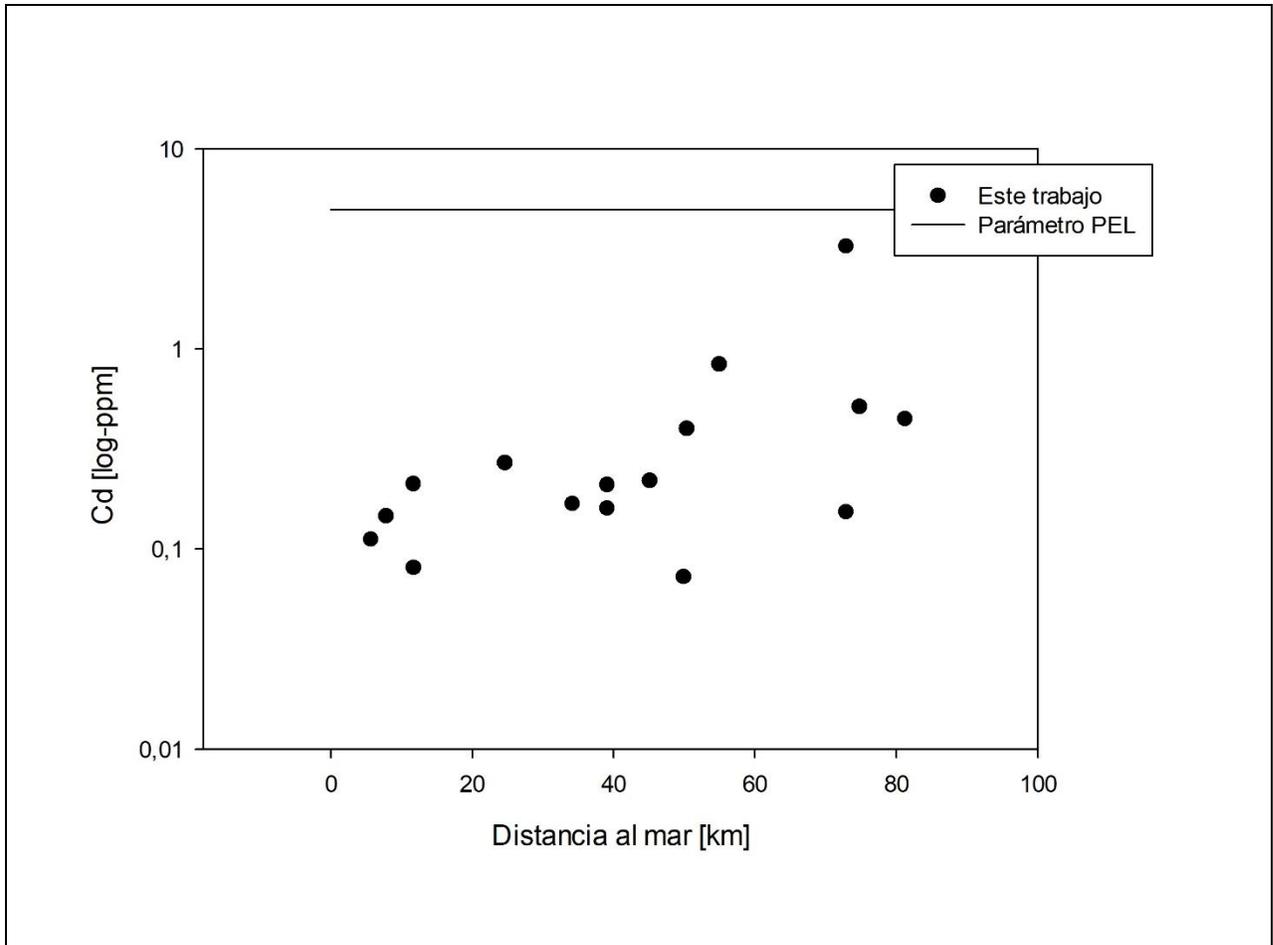


Figura A.9. Evaluación de calidad ambiental de Cd en sedimentos activos.

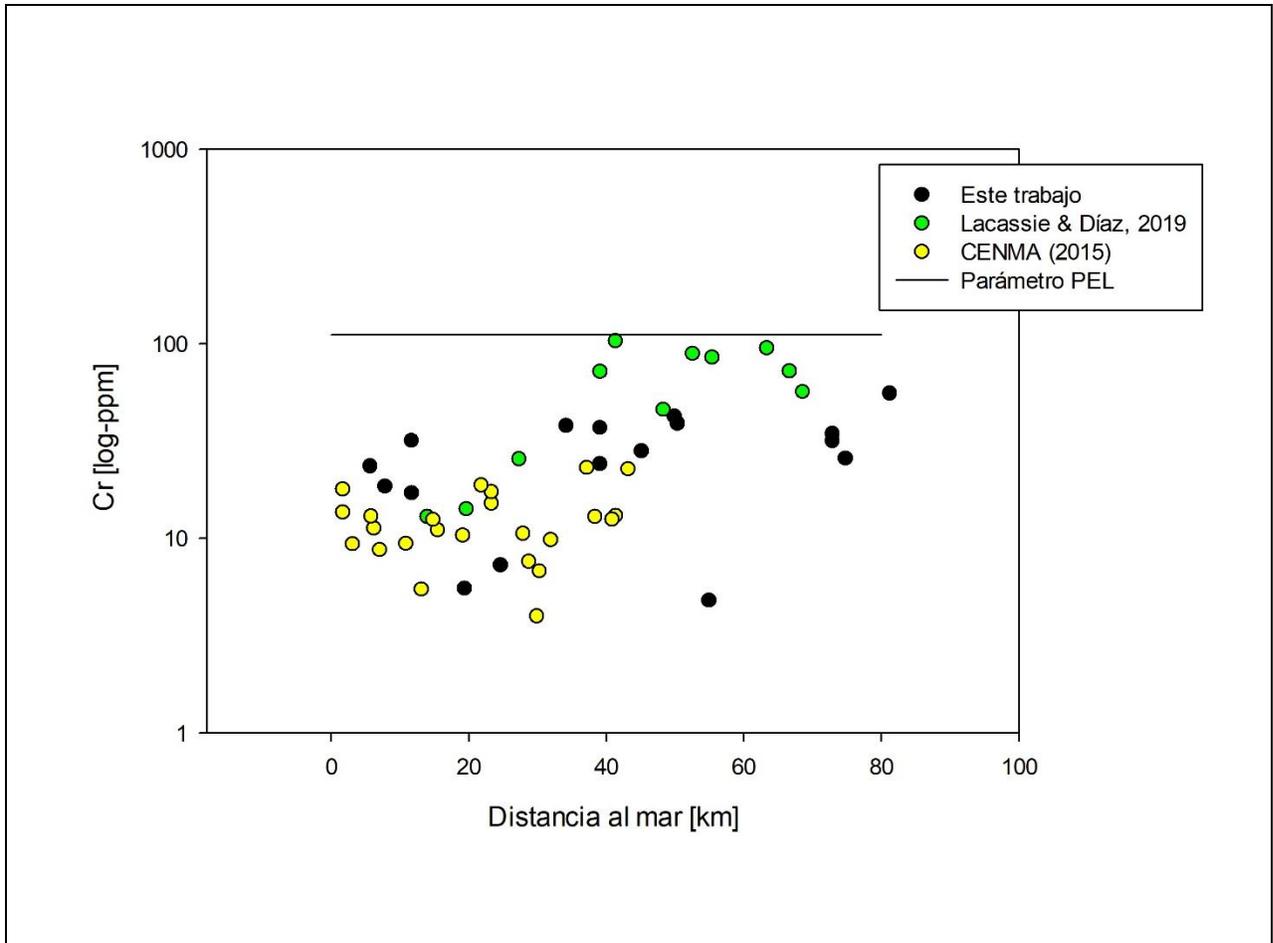


Figura A.10. Evaluación de calidad ambiental Cr en sedimentos activos.

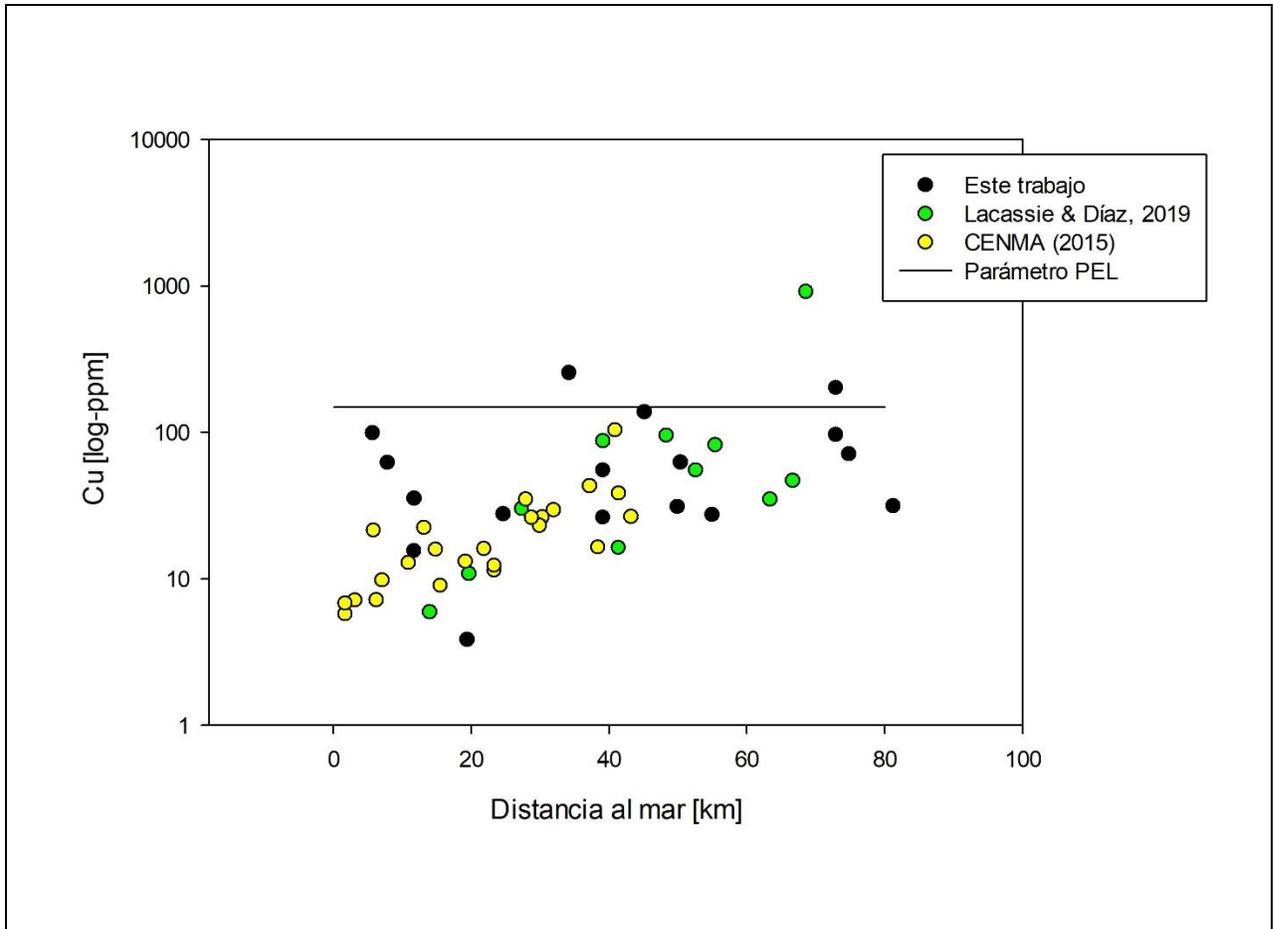


Figura 11. Evaluación de la calidad ambiental de Cu en sedimentos activos.

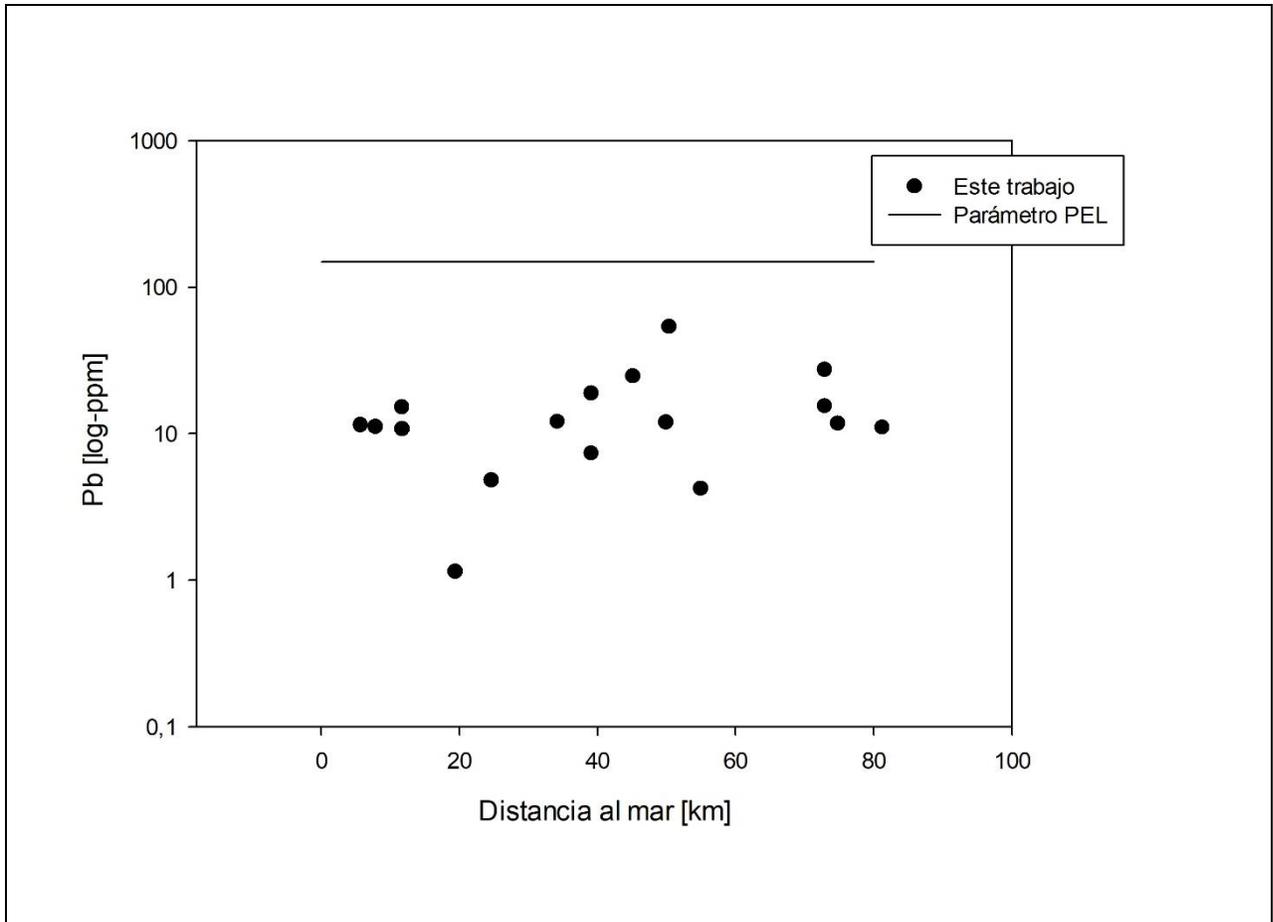


Figura A.12. Evaluación de calidad ambiental Pb en sedimentos

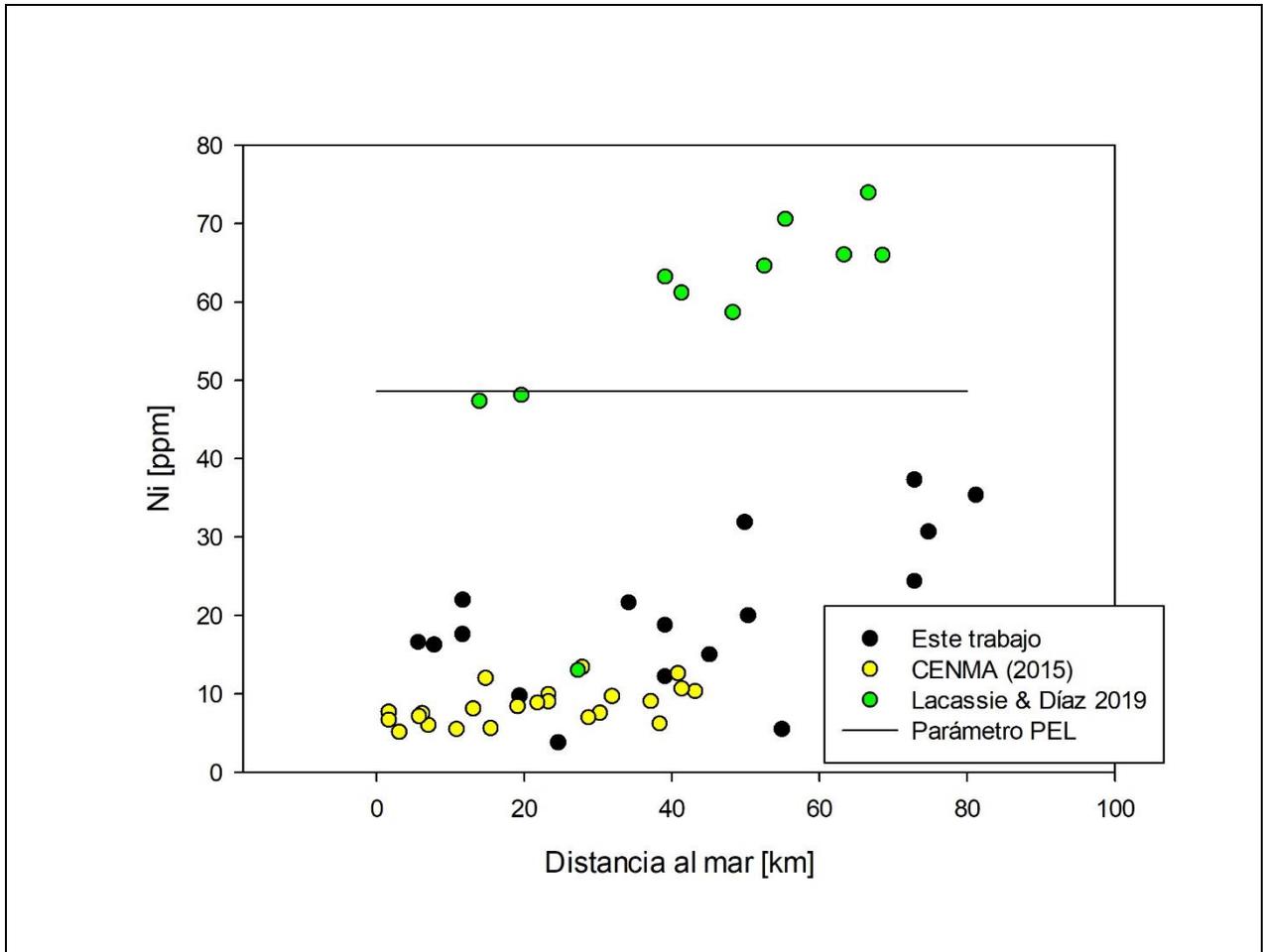


Figura A.13. Evaluación de calidad ambiental de Ni en sedimentos activos.

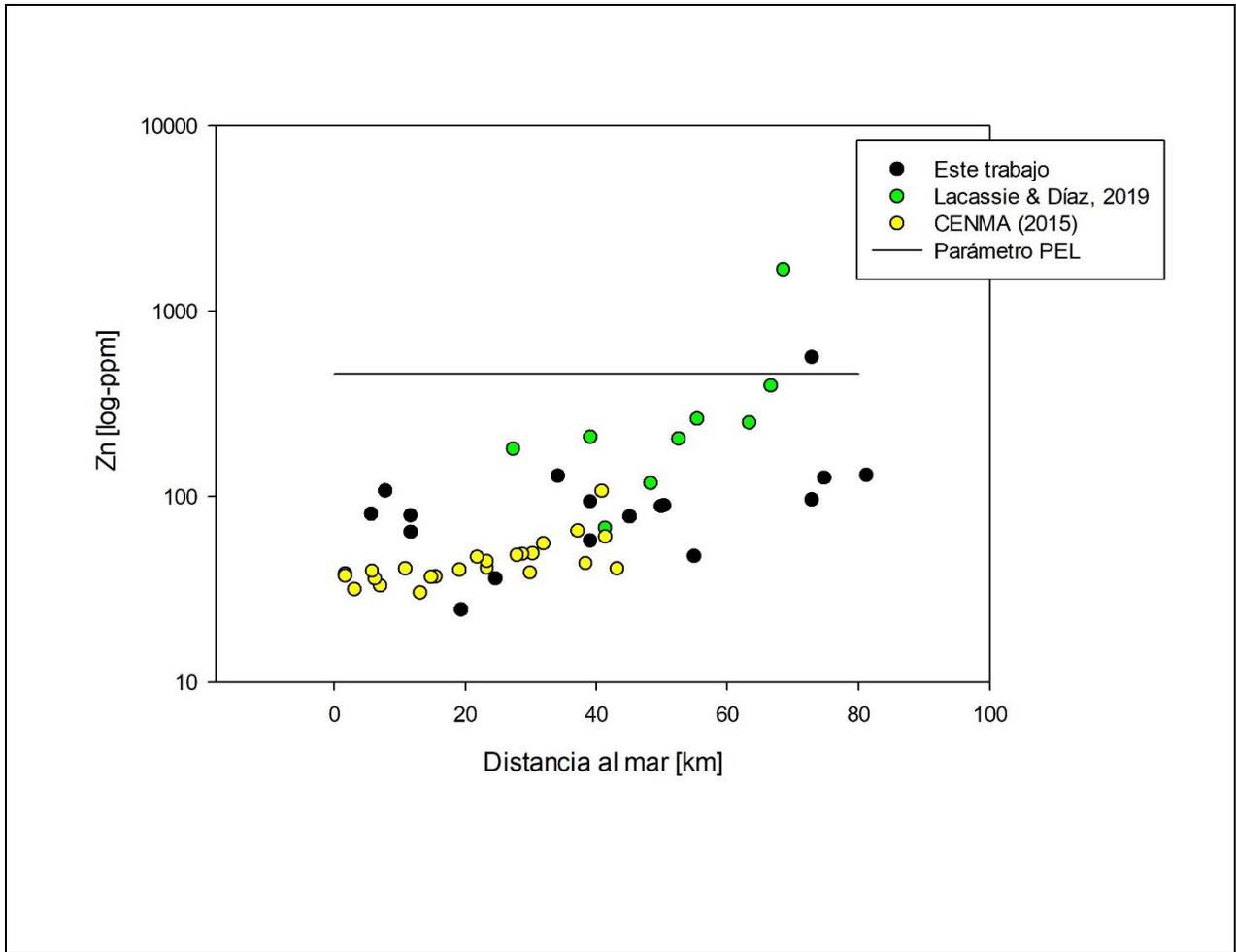


Figura A.14. Evaluación de calidad ambiental de Zn en sedimentos