

## TABLA DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Exposición del problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivo específicos .....	2
<b>1.3 Hipótesis de trabajo .....</b>	<b>3</b>
<b>II ANTECEDENTES GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Descripción de la cuenca del río Valdivia .....</b>	<b>4</b>
2.1.1 Ubicación de la zona de estudio.....	4
2.1.2 Hidrografía e hidrogeología .....	6
2.1.3 Antecedentes hidrológicos.....	8
2.1.4 Geomorfología .....	10
2.1.5 Asentamientos humanos .....	12
2.1.6 Actividad económica y observaciones antrópicas .....	13
<b>III MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Aspectos geológicos generales .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Unidades litoestratigráficas .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 Geología estructural.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Recursos minerales.....</b>	<b>29</b>
<b>IV METODOLOGÍA DE TRABAJO.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Recolección de muestras .....</b>	<b>31</b>
4.1.1 Trabajo de gabinete .....	31
4.1.2 Acceso .....	32
4.1.3 Trabajo en terreno .....	33
<b>4.2 Laboratorio .....</b>	<b>35</b>
4.2.1 Geoquímica .....	35
4.2.2 Mineralogía .....	37
<b>4.3 Procesamiento de datos .....</b>	<b>38</b>
4.3.1 Datos geoquímicos .....	39
4.3.2 Datos mineralógicos.....	49
<b>V RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Obtención y preparación de muestras.....</b>	<b>50</b>
<b>5.2 Datos Geoquímicos.....</b>	<b>52</b>
5.2.1 Control de calidad de datos .....	52
5.2.2 Mapas geoquímicos univariables .....	56
5.2.3 Mapas geoquímicos multivariables.....	62
5.2.4 Mapas PEC.....	68
5.2.5 Gráficos de variación geográfica .....	75

5.2.6 Datos mineralógicos .....	75
<b>VI DISCUSIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>6.1 Control de calidad de datos .....</b>	<b>78</b>
6.1.1 Muestreo .....	78
6.1.2 Laboratorio .....	78
<b>6.2 Características geoquímicas generales de la cuenca .....</b>	<b>79</b>
6.2.1 Índice de alteración química .....	79
6.2.2 Índice de basicidad .....	83
6.2.3 Mapas geoquímicos multivariantes .....	86
<b>6.3 Patrones geoquímicos de cada subcuenca y de los ríos principales .....</b>	<b>90</b>
6.3.1 Subcuenca Río Liquiñe .....	90
6.3.2 Subcuenca río San Pedro .....	105
6.3.3 Subcuenca río Quinchilca .....	114
6.3.4 Subcuenca río Callecalle .....	119
6.3.5 Subcuenca río Pichoy .....	126
6.3.6 Subcuenca río Valdivia .....	133
6.3.7 Subcuenca río Cruces .....	139
<b>6.4 Condiciones medioambientales de la cuenca del río Valdivia .....</b>	<b>145</b>
<b>6.5 Comparación con trabajos anteriores .....</b>	<b>148</b>
<b>VII CONCLUSIONES .....</b>	<b>151</b>
<b>VIII BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>155</b>
<b>IX ANEXOS .....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXO A: Mapas .....</b>	<b>160</b>
(A.1) Mapa ubicación de muestras .....	160
(A.2) Mapas univariantes .....	161
<b>ANEXO B: Datos geoquímicos .....</b>	<b>177</b>
(B.1) Control de calidad de datos .....	177
(B.2) Resultados obtenidos análisis parámetro PEC (muestras con concentración superior a parámetro PEC) y PEC-Qmetales .....	192
(B.3) Resultados obtenidos del análisis mineralógico de las 20 muestras de sedimento seleccionadas de la cuenca del río Valdivia .....	202
(B.4) Diagramas de clasificación TAS .....	206
(B.5) Gráficos de variación geográfica .....	213

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO II: Antecedentes generales de la cuenca del río Valdivia

Figura 2.1: Posición geográfica de la cuenca del río Valdivia y de las cuencas adyacentes en territorio chileno. ....	5
Figura 2.2: Subcuencas de la cuenca del río Valdivia .....	6

Figura 2.3: Red hidrográfica de la cuenca del río Valdivia..	8
Figura 2.4: Mapa geomorfológico de la cuenca del río Valdivia.	12
Figura 2.5: Ubicación de las posibles fuentes de contaminación antrópica en la cuenca del río Valdivia.....	15
Figura 2.6: Desagüe de la planta de celulosa CELCO en el curso del río Cruces.	16
<b>CAPÍTULO III: Marco Geológico</b>	
Figura 3.1: Mapa geológico de la cuenca del río Valdivia.	20
<b>CAPÍTULO IV: Metodología de Trabajo</b>	
Figura 4.1: Rutas y acceso de la cuenca del río Valdivia.	32
Figura 4.2: 1. Muestra recolectada en terreno en bolsa transparente. 2. Muestreo en pala de PVC.	33
Figura 4.3: Preparación de muestras en laboratorio del Sernageomin.	36
Figura 4.4: Ejemplo de gráfico de control para muestras estándares.	43
Figura 4.5: “Clustering”	44
<b>CAPÍTULO V: Resultados</b>	
Figura 5.1: Distribución geográfica de los 262 puntos de muestreo en la cuenca del río Valdivia proyectado sobre el mapa geológico.	51
Figura 5.2: Gráfico de control elemento oro (Au) para muestras gemelas.	52
Figura 5.3: Gráfico de control elemento oro (Au) para duplicados finos.	55
Figura 5.4: Gráfico de control de calidad de estándares donde se utiliza el elemento cobre (Cu) como referencia.	56
Figura 5.5: Mapa geoquímico univariable de MgO-CaO-Sr-Na <sub>2</sub> O.	57
Figura 5.6: Mapa geoquímico univariable de MgO-CaO-Sr-Na <sub>2</sub> O.	58
Figura 5.7: Mapa geoquímico univariable de SiO <sub>2</sub>	59
Figura 5.8: Mapa geoquímico univariable de SiO <sub>2</sub> .	60
Figura 5.9: Concentraciones normalizadas de cada elemento o grupo de elementos analizados en este estudio.....	65
Figura 5.10: Mapa geoquímico multivariable de la cuenca del río Valdivia.	66
Figura 5.11: Mapa geoquímico multivariable de la cuenca del río Valdivia.	67

Figura 5.12: Mapa geoquímico del parámetro PEC..	70
Figura 5.13: Mapa geoquímico del parámetro PEC para la cuenca del río Valdivia.	71
Figura 5.14: Mapa PEC-Qmetales obtenido para la cuenca del río Valdivia.	74
Figura 5.15: Mapa mineralógico de la cuenca del río Valdivia.	76
<b>CAPÍTULO VI: Discusiones</b>	
Figura 6.1: 1. Perfil de elevación de transecta realizada en río San Pedro a través de Google Earth. 2. Perfil de elevación de transecta realizada en río Calle calle a través de Google Earth.	80
Figura 6.2: 1. Perfil de elevación de transecta realizada en el río Pichoy a través de Google Earth. 2. Perfil de elevación de transecta realizada en río Cruces a través de Google Earth.	81
Figura 6.3: Mapa CIA de la cuenca del río Valdivia.	83
Figura 6.4: Mapa BI de la cuenca del río Valdivia.	85
Figura 6.5: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Sr}+\text{Na}_2\text{O}$ y Ga para las muestras del río Los Nadis.	92
Figura 6.6: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos As, $\text{P}_2\text{O}_5$ y MnO para las muestras del río Los Nadis.	93
Figura 6.7: Central hidroeléctrica ubicada en el centro poblado de Pullinque.	93
Figura 6.8: Gráfico de variación geográfica estandarizado para los elementos $\text{SiO}_2$ , $\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Sr}+\text{Na}_2\text{O}$ , Co y Ni para las muestras del río Los Nadis.	94
Figura 6.9: Gráfico de variación geográfica estandarizado para los elementos Zn, Cu, Pb y $\text{C}_{\text{total}}$ para las muestras del río Los Nadis.	94
Figura 6.10: Diagrama de clasificación TAS para rocas volcánicas para las muestras del río El Venado.	95
Figura 6.11: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $\text{Al}_2\text{O}_3$ y Ga para las muestras del río El Venado.	96
Figura 6.12 Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $\text{Fe}_2\text{O}_2+\text{V}$ , Co, MnO, $\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Sr}+\text{Na}_2\text{O}$ , Ni y $\text{Cr}_2\text{O}_3$ para las muestras del río El Venado.	96
Figura 6.13: Ubicación de las fuentes termales y de los volcanes Villarrica y Quetrupillán en la subcuenca del río Liquiñe.	97
Figura 6.14: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Co, Ni y $\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Sr}+\text{Na}_2\text{O}$ para las muestras del río Llancahue.	98

Figura 6.15: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $P_2O_5$ , Ba, U, Th, Pb, HREE, MnO, Zn, Cu, $S_{total}$ y Cd para las muestras del río Llancahue. ....	99
Figura 6.16: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $C_{total}$ , Zn, Cd, Pb y Cu para las muestras de los ríos Ranintulefú, Liquiñe, Cuacua y Neltume. ....	100
Figura 6.17: Clusterización obtenida en los cursos de los ríos Ranintulefú, Liquiñe, Cuacua y Neltume. ....	101
Figura 6.18 : Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $SiO_2$ , Ba y $MgO+CaO+Sr+Na_2O$ para las muestras de los ríos Ranintulefú, Liquiñe, Cuacua y Neltume. ....	102
Figura 6.19: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos Co, MnO, $TiO_2$ y $Fe_2O_3+V$ para las muestras de los ríos Ranintulefú, Liquiñe, Cuacua y Neltume. ....	102
Figura 6.20: Volcán Choshuenco y cursos que drenan desde la base de este volcán.. ....	105
Figura 6.21: Clusterización obtenida en la subcuenca del río San Pedro.. ....	107
Figura 6.22: Diagrama de clasificación TAS para rocas volcánicas para las muestras de los ríos Enco y San Pedro. ....	108
Figura 6.23: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $SiO_2$ , $Al_2O_3$ , $Fe_2O_3+V$ y $MgO+CaO+Sr+Na_2O$ para las muestras de los ríos Enco y San Pedro. ....	109
Figura 6.24: Gráfico de variación geográfica estandarizado del elemento Th para las muestras de los ríos Enco y San Pedro. ....	109
Figura 6.25: Plano de ubicación de los deslizamientos ocurridos en el curso del río San Pedro. ....	110
Figura 6.26: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos Bi, MnO, $Fe_3O_3+V$ , Ni, Zn, Cu y $TiO_2$ para las muestras de los ríos Enco y San Pedro. ....	111
Figura 6.27: Clusterización obtenida en la subcuenca del río San Pedro. ....	112
Figura 6.28: Clusterización obtenida en las muestras de la subcuenca del río Quinchilca. ....	115
Figura 6.29: Tipo de sedimento encontrado en el curso del río Remehue. ....	116
Figura 6.30: Diagramas de clasificación TAS para rocas volcánicas y plutónicas para las muestras de los ríos Remehue y Quinchilca. ....	117
Figura 6.31: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos HREE, MREE, LREE, U, Th, Zr+Hf, Nb y $TiO_2$ para las muestras de los ríos Remehue y Quinchilca. ....	118
Figura 6.32: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos $SiO_2$ , Nb, Ga, Co, HREE, Ba, $TiO_2$ y Zr+Hf para las muestras del río Collileufú. ....	120

Figura 6.33: Gráfico de variación geográfica del elemento Cu para las muestras del río Collileufú. .....	121
Figura 6.34: Diagrama de clasificación TAS para las muestras del estero Huinohuino. ....	123
Figura 6.35: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O+Rb y Fe <sub>s</sub> O <sub>3</sub> +V para las muestras del estero Huinohuino. ....	123
Figura 6.36: Clusterización de las muestras de sedimento en la subcuenca del río Callecalle.	124
Figura 6.37: Clusterización de las muestras que pertenecen a la Subcuenca del río Pichoy... ..	128
Figura 6.38: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +V, Ni y Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para las muestras de los ríos Lñaque y Pichoy. ....	129
Figura 6.39: Concentraciones de carbón obtenidas en las muestras de sedimentos recolectadas en la subcuenca del río Pichoy. ....	131
Figura 6.40: Concentración de Au en las muestras del río Pichoy y Putregal dentro de la subcuenca del río Pichoy. ....	132
Figura 6.41: Estuario del río Valdivia. ....	134
Figura 6.42: Clusterización de las muestras obtenidas en el curso del río Valdivia y Cutipai. ....	135
Figura 6.43: Clusterización obtenida para las muestras del río Futa.....	137
Figura 6.44: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos Zn, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +V, Co y Nb para las muestras del río Futa. ....	138
Figura 6.45: Gráfico de variación geográfica estandarizado de los elementos U, Th, S <sub>total</sub> y P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> para las muestras del río Futa. ....	139
Figura 6.46: Clusterización obtenida para el primer tramo de las muestras tomadas en el curso del río Cruces.....	140
Figura 6.47: Clusterización obtenida para las muestras del segundo tramo del río Cruces. ....	142
Figura 6.48: Clusterización obtenida en el río Leufucade.....	144

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO II: Antecedentes generales de la cuenca del río Valdivia

Tabla 2.1: Población total de la cuenca del río Valdivia al año 2002 (DGA,2004). ....	13
Tabla 2.2: Detalle faenas mineras(Sernageomin, 2016).....	14

## **CAPÍTULO IV: Metodología de Trabajo**

Tabla 4.1: 8 metales evaluados con el parámetro PEC y su respectivo límite de consenso. ....46

## **CAPÍTULO V: Resultados**

Tabla 5.1: Pares de muestras gemelas, pares de muestras gemelas fallidas y porcentaje total de muestras que dieron fallidas para cada elemento. ....53

Tabla 5.2: Pares de muestras de duplicados finos, pares de muestras de duplicados finos fallidas y porcentaje del total de muestras que dieron fallidas para cada elemento .....54

Tabla 5.3: Tabla resumen de los valores utilizados para evaluar la exactitud del análisis .....55

Tabla 5.4: Número de clústers obtenidos a partir de la agrupación o clustering realizado por el software K-means. ....63

Tabla 5.5: Caracterización química de cada uno de los clúster .....63

Tabla 5.6: 8 metales evaluados con el parámetro PEC .....68

Tabla 5.7: Resultados obtenidos en el trabajo de Ingersoll (2001) para determinar la capacidad de los PEC-Qs para predecir la toxicidad.....72

Tabla 5.8: Resultados obtenidos para el parámetro PEC-Qmetales para las muestras del río Valdivia.....73

Tabla 5.9: Criterios para la selección de muestras analizadas con difracción de rayos X (DRX) 77

## **CAPÍTULO VI: Discusiones**

Tabla 6.1: Caudal del río San Pedro en desagüe Lago Riñihue ( $m^3/s$ ). .....81

Tabla 6.2: Caudal del río Ñaqué en Mafil ( $m^3/s$ ). .....82

Tabla 6.3: Caudal del río Cruces en Rucaco ( $m^3/s$ ). .....82

Tabla 6.4: Comparación de los resultados obtenidos entre los trabajos de Lillo (1973) y este estudio en la zona oriental de la cuenca del río Valdivia para el elemento Cu. ....149

Tabla 6.5: Comparación de los resultados obtenidos entre los trabajos de Lillo (1973) y este estudio en la zona occidental de la cuenca del río Valdivia para el elemento Cu. ....149

Tabla 6.6: Comparación de los resultados obtenidos entre los trabajos de Lillo (1973) y este estudio en la zona oriental de la cuenca del río Valdivia para el elemento Zn.....150

Tabla 6.7: Comparación de los resultados obtenidos entre los trabajos de Lillo (1973) y este estudio en la zona occidental de la cuenca del río Valdivia para el element Zn. ....150

Tabla 6.8: Número de muestras sobre el umbral, obtenido en los trabajos de Lillo (1973) y este estudio para cada una de las zonas de la cuenca del río Valdivia evaluado para los elementos Cu y Zn.....	150
--	-----