



UNIVERSIDAD MAYOR

INFORME FINAL
TOMO I: METODOLOGÍA

PROYECTO FONDO SAG

***“Desarrollo de una metodología para la
evaluación y mitigación de la contaminación
de aguas y suelo: Aplicación a la cuenca del
río Aconcagua”***

SANTIAGO, MAYO 2005

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	13
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	14
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	19
1.2.1 Objetivos generales	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 METODOLOGÍA	20
1.3.1 Fases críticas	20
1.4 CONCLUSIONES.....	11
1.5 REFERENCIAS	12
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL USO DEL SUELO	13
2.1 INTRODUCCIÓN.....	13
2.2 METODOLOGÍA	14
CAPÍTULO 3: ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE USO DE PLAGUICIDAS Y FERTILIZANTES EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA	23
3.1 METODOLOGÍA	23
3.2 REFERENCIAS	26
CAPÍTULO 4: USO DEL SUELO URBANO E INDUSTRIAL: IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES PUNTUALES DE CONTAMINACIÓN QUE AFECTAN DIRECTA O INDIRECTAMENTE AL RÍO ACONCAGUA O ALGUNO DE SUS AFLUENTES	27
4.1 INTRODUCCIÓN.....	27
4.2 METODOLOGÍA	28
4.2.1 Recopilación de antecedentes.....	28
4.2.2 Análisis y evaluación de la información	29
4.2.3 Levantamiento de información en terreno.....	29
CAPÍTULO 5: CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES	32
5.1. INTRODUCCIÓN.....	32
5.1.1 Objetivo general.....	33

5.1.2 Objetivos específicos	33
5.2 METODOLOGÍA	33
5.2.1 Estaciones de toma de muestras	33
5.2.2 Monitoreo	36
5.2.3 Evaluación de la calidad del agua	37
5.2.4 Monitoreos específicos	39
5.2.5 Ecotoxicología	44
5.3 REFERENCIAS	51
CAPÍTULO 6: CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	53
6.1 OBJETIVO	53
6.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS	53
6.2.1 Nuevo diseño de monitoreo de aguas subterráneas	55
CAPÍTULO 7: DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS DEL RÍO ACONCAGUA Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES	58
7.1 MUESTREO DE SEDIMENTOS	58
CAPÍTULO 8: DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO POR CONTAMINACIÓN DIFUSA	59
8.1 INTRODUCCIÓN	59
8.2 METODOLOGÍA	59
8.2.1. Fase I	59
8.2.2 Fase II	68
8.2.3 Fase III. Análisis Espacial	69
8.3 CONCLUSIONES	86
8.4 REFERENCIAS	87
CAPÍTULO 9: CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ÁREA PILOTO	89
9.1 INTRODUCCIÓN	89
9.2 METODOLOGÍA	89
CAPÍTULO 10: CALIDAD DE SUELOS EN ZONAS DE USO AGROPECUARIO	96
10.1 INTRODUCCIÓN	96
10.1.1 Suelos de la cuenca del río Aconcagua	97

10.1.2 Macronutrientes y Materia Orgánica.....	97
10.1.3 Metales pesados	102
10.1.4 Plaguicidas	106
10.2 OBJETIVOS.....	108
10.3 METODOLOGÍA	108
10.3.1 Fuente de información.....	108
10.3.2 Digitalización de la Información Cartográfica	108
10.3.3 Criterios, diseño y selección de los suelos de muestreo	108
10.3.4 Suelos muestreados	109
10.3.5 Parámetros muestreados.....	117
10.3.6 Metodología Analítica y Laboratorio	119
10.4 REFERENCIAS	120
CAPÍTULO 11: ESTUDIO DE BIOMARCADORES EN FAUNA SILVESTRE EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA.....	122
11.1 INTRODUCCIÓN.....	122
11.2 OBJETIVO	123
11.3 MUESTREO	123
11.3.1 Optimización del diseño de muestreo original	130
11.3.2 Tamaños muestrales.	131
11.4 MEDICIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA COLINESTERASA	131
11.4.1 Método Ellman.....	131
11.4.2 Método Augustinsson.....	134
11.5 DISEÑO ESTADÍSTICO.....	136
11.5.1 Análisis estadístico.....	136
11.6 REFERENCIAS	137
CAPÍTULO 12: IMPLEMENTACIÓN DEL SIG AMBIENTAL PARA LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA.....	139
12.1 INTRODUCCIÓN.....	139
12.2 INTEGRACIÓN DE DATOS EN EL SIG	140
12.2.1 Metodología	140
12.3 REFERENCIAS	144

CAPÍTULO 13: MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS	145
13.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	145
13.1.1 Factores que determinan un Modelo de Calidad de Aguas	146
13.1.2 Escala Temporal.....	147
13.1.3 Tipos de Modelos.....	147
13.1.4 Procesos Físicos a Simular.....	148
13.1.5 Ecuación básica.....	148
13.2 MODELO DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES.....	152
13.2.1 Elección del Modelo de calidad a utilizar	152
13.2.2 Descripción general del modelo Qual2E.....	155
13.2.3 Descripción general del modelo Qual2kw	164
13.3 MODELO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, MT3D	167
13.3.1 Introducción	167
13.3.2 Antecedentes Generales	167
13.3.3 Características del Modelo de Calidad Subterránea	169
13.3.4 Hipótesis de la modelación de calidad subterránea	171
13.4 OBJETIVOS.....	172
13.4.1 Objetivo General	172
13.4.2 Objetivos específicos	172
13.5 REFERENCIAS TÉCNICAS.....	173
13.6 METODOLOGÍA	173
13.6.1 Modelos de flujo utilizados en la cuenca	174
13.6.2 Caracterización hidrogeológica.....	184
13.6.3 Implementación Modelos de Flujo.....	201
13.6.4 Implementación Modelos de Calidad Subterránea.....	223
13.7 REFERENCIAS	242

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudio	15
Figura 2: Río Aconcagua y sus principales tributarios.....	16
Figura 3: Esquema de la metodología del proyecto	10
Figura 4: Área de uso agrícola	13
Figura 5: Fotointerpretación de la imagen de un sector de la cuenca.....	15
Figura 6: Planos a escala 1:20.000 para el trabajo de terreno.	16
Figura 7: Observación directa en terreno para validar sectores fotointerpretados	17
Figura 8: Zona rotulada	17
Figura 9: Ingreso al sistema.....	18
Figura 10: Ejemplo de una zona rotulada más de una ocasión.....	19
Figura 11: Muestra de parte de la tabla (ubicación de los campos).	20
Figura 12: Generación de tabla final.	21
Figura 13: Metodología para la Clasificación del Uso del Suelo.	22
Figura 14: Área seleccionada para efectuar la 1ª encuesta.	25
Figura 15: Diagrama conceptual de la caracterización de las fuentes puntuales.....	31
Figura 16: Diagrama conceptual de la matriz aguas superficiales	43
Figura 17: <i>Daphnia pulex</i>	47
Figura 18: Preparación del bioensayo de toxicidad aguda con el crustáceo <i>Daphnia pulex</i>	48
Figura 19: Microalgas <i>Selenastrum capricornutum</i>	49
Figura 20: Diseño conceptual del estudio ecotoxicológico	50
Figura 21: Diagrama conceptual del estudio de la calidad de aguas subterráneas.	57
Figura 22: Matriz de cruce del FIP con el riesgo del valor carga modificado (VCM).....	65
Figura 23. Gráfico que muestra la distribución, de forma exponencial, de las hectáreas utilizadas para definir su importancia en la contaminación difusa.....	68
Figura 24: Se realiza un <i>join</i> con el <i>shape</i> agrícola100205 por el campo Grupo creando 4 campos; C_mjj, C_aso, C_nde y C_fma.	69

Figura 25: Caracterización de vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación, en la cuenca del río Aconcagua (Fuente: Von Igel, 1999).....	72
Figura 26: Matriz de decisión del cruce de los campos Vulnerabilidad del Acuífero (cod_vulne) vs. Riesgo Carga Total (Rct).	72
Figura 27: Riesgo Carga Total por contaminación difusa en la temporada mayo, junio y julio.	73
Figura 28: Vulnerabilidad de la cuenca frente a contaminación difusa en la temporada agosto, septiembre y octubre.....	73
Figura 29: Vulnerabilidad de la cuenca frente a contaminación difusa en la temporada noviembre, diciembre y enero.....	74
Figura 30: Vulnerabilidad de la cuenca frente a contaminación difusa en la temporada febrero, marzo y abril.	74
Figura 31: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad vs. riesgo de carga total de cultivos en la temporada mayo, junio y julio.	75
Figura 32: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad vs riesgo de carga total de cultivos en la temporada agosto, septiembre y octubre.....	75
Figura 33: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad vs. riesgo de carga total de cultivos en la temporada noviembre, diciembre y enero.....	76
Figura 34: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad v/s riesgo de carga total de cultivos en la temporada febrero, marzo y abril.....	76
Figura 35: Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del río Aconcagua.....	77
Figura 36: Variación de la Zonificación del Riesgo por pendiente del terreno (efecto sobre aguas subterráneas).	78
Figura 37: Cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad (Rvc) con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas (Pend_subte).....	79
Figura 38: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de mayo, junio y julio.	79
Figura 39: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de agosto, septiembre y octubre.	80
Figura 40: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de noviembre, diciembre y enero.....	80
Figura 41: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de febrero, marzo y abril.....	81
Figura 42: Variación de la Zonificación del Riesgo por pendiente del terreno (efecto sobre aguas superficiales).	82

Figura 43: Cruce de Riesgo Carga Total (Rct) con pendientes (Pend_super) para aguas superficiales (Riesgo 3).....	82
Figura 44: Campos que participan en la confección del análisis de riesgo para contaminación difusa en ArcView.....	83
Figura 45: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de mayo, junio y julio.....	84
Figura 46: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de agosto, septiembre y octubre.	85
Figura 47: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de noviembre, diciembre y enero.	85
Figura 48: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de febrero, marzo y abril.	86
Figura 49: Diagrama conceptual para la selección del área piloto	89
Figura 51: Capas de información utilizadas para el análisis.	91
Figura 52: Resultado del análisis de riesgo.	92
Figura 53: Áreas pilotos propuestas.	93
Figura 54: Planilla Excel para ingreso de los datos generados en los monitoreos.	94
Figura 55: Puntos de muestreo de suelos en área piloto entre San Felipe y Catemu	110
Figura 56: Puntos de muestreo de suelos en área piloto entre La Calera y Nehuenco y San Isidro.....	110
Figura 57: Captura de aves silvestres	128
Figura 58: Captura de <i>Pleurodema thaul</i> en la cuenca del río Aconcagua	129
Figura 59: Trampa Sherman para captura de roedores.....	130
Figura 60: Extracción de cerebro de ave passeriforme	132
Figura 61: Almacenamiento de las muestras en tanque de nitrógeno a -120°C	132
Figura 62: Numeración de tramos	142
Figura 63: Esquema del transporte por advección	149
Figura 64: Ejemplo de un sistema real	157
Figura 65: Discretización computacional del sistema real y balance de masa en un elemento computacional.	157
Figura 66: Representación computacional del sistema real.....	158
Figura 67: Topología Modelo MOS ACN, DOH 1998. Modificado por DGA 2004.	175

Figura 68: Sectores de riego del Modelo de flujo del río Aconcagua.	176
Figura 69: Nodos y Delimitación del relleno acuífero del modelo de flujo del río Aconcagua.....	177
Figura 70: Sectorización Cuencas y Subcuencas del modelo de flujo del Aconcagua	178
Figura 71: Submodelos Hidrogeológicos, ambiente Vmodflow, para el acuífero del valle del Aconcagua	182
Figura 72: Esquema General de Modelación Hidrogeológica del Aconcagua. Fuente: REF 4.....	183
Figura 73: Geología General Cuenca del Aconcagua	186
Figura 74: Submodelos Hidrogeológicos implementados y existentes en la cuenca del Aconcagua. Inf. Base: DGA 2004.	191
Figura 75: Ubicación de Perfiles Estratigráficos Valle del río Aconcagua. Fuente: Informe DOH-AC 1998	192
Figura 76: Perfil Estratigráfico en el sector de Aconcagua – Las Vegas	194
Figura 77: Perfil Estratigráfico Longitudinal en el sector de Nogales	196
Figura 78: Perfil Estratigráfico en el sector Nogales.....	196
Figura 79: Perfil Estratigráfico en el sector Aconcagua Quillota.....	198
Figura 81: Área que comprende el Modelo Hidrogeológico 2 del valle del Aconcagua. Sector Aconcagua- Las Vegas.	202
Figura 82: Visión en planta grillas Modelo 2.....	203
Figura 83: Corte vertical A-A' - ACN Romeral.....	204
Figura 84: Corte vertical B-B' - ACN Catemu	206
Figura 85: Distribución Inicial de Permeabilidades, estrato superior	209
Figura 86: Distribución Inicial de Permeabilidades, estrato inferior.....	210
Figura 87: Distribución de los coeficientes de almacenamiento	211
Figura 88: Zonas de Recarga en Modelo Subterráneo	212
Figura 89: Ubicación de Pozos y Norias	215
Figura 90: Nivel piezométrico inicial considerado.	217
Figura 91: Esquema de las condiciones de borde del Modelo de Flujo	218
Figura 92: Ubicación Espacial de los Pozos de Observación de Niveles incluidos en la modelación.....	219
Figura 93: Gráficos de los pozos con registros de niveles de agua subterránea en el modelo sector 2, ACN- Las Vegas.	220

Figura 94: Zonas de Balance (ZB) utilizadas en el modelo de Flujo.	222
Figura 95: Pozos de Calidad muestreados en Sector ACN-Las Vegas	224
Figura 96: Pozos de Calidad ingresados en el modelo	225
Figura 97: Isoconcentraciones iniciales de Cobre -Cu. (mg/L).....	227
Figura 98: Isoconcentraciones iniciales de Nitrato-NO ₃ . (mg/L).....	228
Figura 99: Dispersividades adoptadas en la calibración.....	229
Figura 100: Condiciones de Borde de Concentración.	231
Figura 101: Pozos de Calidad muestreados en Sector ACN-Quillota	233
Figura 102: Pozos de Calidad ingresados en el modelo	235
Figura 103: Isoconcentracion Inicial de Cloruro (mg/L).....	237
Figura 104: Isoconcentraciones iniciales de Cobre (mg/L).....	238
Figura 105: Condiciones de Borde de Concentración.....	240
Figura 106: Distribución de Recarga de Concentraciones en el Modelo 3	241

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones de muestreo para aguas superficiales.	34
Tabla 2a: Parámetros analizados (unidades, expresión y límite de detección).....	35
Tabla 2b: Parámetros analizados (unidades, expresión y límite de detección).	36
Tabla 3: Tramos determinados por la DGA para la definición de las clases de calidad objetivo en la cuenca del río Aconcagua	38
Tabla 4: Estaciones de toma de muestra para detección de plaguicidas en canales de riego.	41
Tabla 5: Parámetros, unidad, expresión y límite de detección utilizados para plaguicidas en muestras de aguas subterráneas.....	53
Tabla 6: Parámetros, unidad, expresión y límite de detección utilizados en las muestras analizadas.....	54
Tabla 7: Pozos muestreados durante la ejecución del proyecto	56
Tabla 8: Ponderaciones de riesgo considerando LD ₅₀ oral en mg kg ⁻¹	61
Tabla 9: Ponderaciones de riesgo considerando LD ₅₀ dermal en mg kg ⁻¹	61
Tabla 10: Ponderaciones de riesgo considerando LC ₅₀ inhalatoria en mg L ⁻¹	61
Tabla 11: Ponderaciones de riesgo considerando K _H en Pam ³ mol ⁻¹	62
Tabla 12: Ponderaciones de riesgo considerando GUS.....	62
Tabla 13: Ponderaciones de riesgo considerando LC ₅₀ en <i>Daphnias</i> en mg L ⁻¹	62
Tabla 14: Ponderaciones de riesgo considerando EC ₅₀ algal en mg L ⁻¹	63
Tabla 15: Ponderaciones de riesgo considerando LC ₅₀ en aves (codorniz) en mg kg ⁻¹	63
Tabla 16: Ponderaciones de riesgo considerando LC ₅₀ en gusanos de tierra en mg kg ⁻¹	63
Tabla 17: Valoración del riesgo FIP.....	63
Tabla 18: Datos a utilizar para el cálculo de la carga de los plaguicidas aplicados por cultivo.....	64
Tabla 19: Obtención del Valor Carga Modificado por plaguicida aplicado, respecto de la frecuencia de aplicación.	64
Tabla 20: Valoración de riesgo del Valor Carga Modificado en g ha ⁻¹	65
Tabla 21: Clasificación del Impacto Carga Equivalente por cultivo y temporada de aplicación.	66
Tabla 22: Clases del Valor Carga Modificado.	66
Tabla 23: Cálculo del FIP normalizado.....	67

Tabla 24: Ejemplo de los resultados más altos del VCM2 obtenidos al multiplicar el FIPNor por la clase VCM y ordenados por quintiles.	67
Tabla 25: Los VCM2 son ingresados en la tabla, dependiendo de su valor impacto.	67
Tabla 26: Valoración de riesgo por Carga Total.	69
Tabla 27: Obtención de la valoración para Carga Total de plaguicidas en el período.	70
Tabla 28: Factores de riesgo de pendientes para aguas subterráneas (CIAT, 2001)	78
Tabla 29: Factores de riesgo de pendientes para aguas superficiales.	81
Tabla 30: Superficie de las áreas resultantes.	93
Tabla 31: Unidades Taxonómicas presentes en la cuenca del río Aconcagua	98
Tabla 32: Niveles de referencia del fósforo aprovechable en los suelos (mg/k).....	99
Tabla 33: Índices de disponibilidad de fósforo en el suelo	99
Tabla 34: Niveles de referencia del nitrógeno aprovechable en los suelos (mg/k)	100
Tabla 35: Índices de disponibilidad de nitrógeno en el suelo.....	101
Tabla 36: Calificación de la materia orgánica de acuerdo a su concentración según Peralta.....	102
Tabla 37: Abundancia de los elementos micronutrientes y rango de concentración habitual en los suelos (mg/k).....	103
Tabla 38: Identificación de las ortofotos utilizadas en el muestreo de suelos y en su descripción	108
Tabla 39: Localización de los puntos de muestreo de suelos sector San Felipe.....	114
Tabla 40: Localización de los puntos de muestreo de suelos sector Quillota	115
Tabla 41: Uso del suelo en los puntos donde se recogieron las muestras	116
Tabla 42: Técnicas analíticas empleadas en la determinación de los parámetros de interés.....	120
Tabla 43 a: Listado de plaguicidas utilizados en las áreas de muestreo de fauna silvestre, con sus respectivos grupos químicos.	124
Tabla 43 b: Listado de plaguicidas utilizados en las áreas de muestreo de fauna silvestre, con sus respectivos grupos químicos	125
Tabla 44: Especímenes capturados por especie. Quillota y San Felipe. 2001 – 2004.....	126
Tabla 45: Lugares de muestreo y número de especímenes capturados. Quillota y San Felipe. 2001 - 2005.	127
Tabla 46: Referencias al uso del modelo QUAL2K en diversos países.	153
Tabla 47: Períodos de Stress-(SP)- Modelo ACN Modflow SAG	208

Tabla 48: Valores de Recarga impuestos en el Modelo 2	214
Tabla 49: Nómina de Estaciones de Observación de Niveles-DGA	219
Tabla 50: Valores de niveles ingresados al modelo de flujo, MOD2	221
Tabla 51: Descripción de los pozos de muestreo de calidad subterránea.....	224
Tabla 52a: Concentraciones obtenidas en las campañas para cada uno de los parámetros a modelar.	225
Tabla 53b: Concentraciones obtenidas en las campañas para cada uno de los parámetros a modelar. Continuación.	226
Tabla 54: Condiciones de Concentración Constante.	230
Tabla 55: Condiciones de Recarga Constante.	231
Tabla 56: Descripción de los pozos de muestreo de calidad subterránea.....	234
Tabla 57: Concentraciones muestreadas de cada parámetro a modelar	236

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS Y SUELO: APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo expone el producto de una metodología aplicada a la cuenca del río Aconcagua, con el objeto de evaluar la contaminación que afecta a dicha cuenca, considerando los efectos de la producción agropecuaria, minería, industrias y de la población humana que habita en dicha cuenca. El estudio se sustentó en el monitoreo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, mediante análisis químicos y bioensayos de toxicidad. Además se efectuaron mediciones de la inhibición de la enzima colinesterasa en animales silvestres, con el fin de detectar efectos de la aplicación de plaguicidas organofosforados y carbamatos. Se realizó un análisis de riesgo relacionado con el uso de plaguicidas, considerando la intensa actividad agrícola de la cuenca, delimitándose zonas de riesgo durante cuatro temporadas de aplicación. Se delimitaron dos áreas piloto, a fin de perfeccionar la metodología utilizada con monitoreos específicos de diferentes matrices y finalizar el estudio con la modelación de contaminantes en aguas superficiales, con los softwares Qual2E y Qual2Kw y subterráneas con el software Visual Modflow, en el área de la cuenca de mayor impacto de origen antrópico. Considerando los diferentes biomas que se encuentran en el país, la metodología es factible de utilizar en prácticamente todas las cuencas hidrográficas del territorio nacional, efectuándose los ajustes necesarios en la evaluación ecotoxicológica, sobre todo en cauces con alta salinidad.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Una de las políticas relevantes del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) se relaciona con la protección de los recursos hídricos de la contaminación de origen antrópico, de esta forma la División de Protección de los Recursos Naturales Renovables DIPROREN dependiente de dicho Servicio, ha estado monitoreando los efectos de las descargas de los residuos industriales líquidos en ríos, esteros y canales, cuyas aguas se utilizan para el riego de cultivos agrícolas (SAG, 2001). Dicho monitoreo se ha efectuado en cuencas hidrográficas de uso agropecuario a lo largo del país obteniendo información que pueda servir para controlar y mitigar los efectos nocivos que dichos efluentes puedan generar sobre los cuerpos de agua receptores.

Dentro de este marco, DEPROREN se interesó en definir una metodología tipo para abordar los estudios de contaminación de forma más holística considerando los problemas de contaminación integrando el agua, el suelo y la fauna silvestre y la fugacidad de los agentes xenobióticos a través de las aguas superficiales y subterráneas, con el objetivo de aplicar dicha metodología a las cuencas hidrográficas del país, que están siendo afectadas por el desarrollo productivo. De esta forma el Fondo de Mejoramiento del Patrimonio Sanitario del SAG financió primero un proyecto a cargo del Centro EULA-Chile, a fin de desarrollar una metodología aplicada a una cuenca típica para la zona centro-sur, considerando la cuenca del río Chillán, el cual finalizó el año 2002 (Centro EULA-Chile, 2002). Posteriormente, dicho Fondo financió el presente proyecto, a fin de elaborar una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelos aplicada a la cuenca del río Aconcagua.

La cuenca del río Aconcagua se desarrolla en el extremo sur de los valles transversales, en la V Región (Región de Valparaíso) (figura 1). Su extensión alcanza a aproximadamente 7.200 km² y su rumbo general es de Este a Oeste. Sus más caudalosos afluentes los recibe por su ribera norte y todos sus tributarios formativos asientan sus cabeceras en el interior de la cordillera andina en un sector donde ésta alcanza elevaciones excepcionales, como son los cerros Juncal (6.110 m); Alto de Los Leones o Cabeza de León (5.400 m) y el macizo del Aconcagua (7.021 m). El río Aconcagua se forma de la unión, en la Cordillera de Los Andes, a 1.430 m. de altitud, de los ríos Juncal, que proviene del oriente y el Blanco, que viene del sureste. Desde la junta con el río Blanco, el río Aconcagua recorre 142 Km. hasta su desembocadura en la bahía de Concón en el Mar Chileno. Sin embargo, si se considera el desarrollo del río Juncal desde su nacimiento, el recorrido alcanza a 177 Km. (Figuras 1 y 2) (CADE IDEPE, 2003).

El río Juncal se origina en la cordillera de igual nombre, que divide las aguas con la cuenca del Maipo, en una gran lengua de ventisqueros llamado glaciar Juncal Norte. En su desarrollo de 35 Km. recibe por ambas riberas numerosos arroyos torrentes, la mayoría originados también en glaciares colgados. Entre estos tributarios está el río Juncalillo, al cual se le reúne el emisario de la laguna del Inca. Este es un cuerpo de agua elevado a 3.200 m.s.n.m., de forma elíptica elongada con un eje mayor de 4 Km y un ancho medio de 600 - 700 metros (CADE IDEPE, 2003).

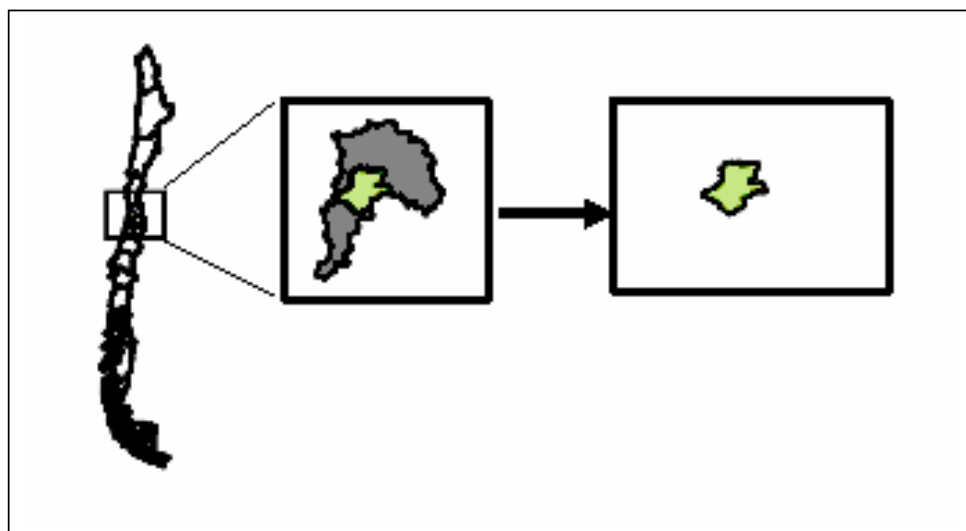


Figura 1: Área de estudio

El río Blanco se genera al pie norte de los cerros La Copa y El Altar, en el cordón de la divisoria de aguas con la cuenca alta del río Mapocho; se dirige al Noroeste con una gran pendiente cumpliendo una longitud de 15 Km. Su tributario más importante es el río de Los Leones, que se genera en áreas englaciadas alrededor del cerro Alto de Los Leones (5.400 m) (CADE IDEPE, 2003).

En el tramo río Blanco - Los Andes, sin duda que el tributario más grande es el río Colorado, que cae por el norte a 15 km de su origen. Debe su nombre al limo y otros sedimentos rojizos que enturbian sus aguas en las crecidas. El río Colorado al pie del paso del Rubio, de los esteros del Portillo Hondo y de los Azules. En su recorrido de 58 Km drena una amplia porción del cordón limítrofe y recibe, por lo tanto, numerosos tributarios, entre los cuales se cuentan el estero de las Piedras y la Quebrada el Tordillo. Por la derecha recibe los esteros del Bolsillo, los Columpios del Diablo, Lagunillas y el Maitén. Otros afluentes menores hacen sus aportes al Aconcagua en este tramo. Quizás los más importantes son el estero Riecillo, que con su afluente de las Gualtatas desaguan las llamadas lagunas Collaradas y el estero Vilcuya. (CADE IDEPE, 2003).

Recién en los alrededores de San Felipe vuelve el Aconcagua a recibir tributarios de importancia, donde llega el estero Pocuro que recoge aguas de precordillera, de la vertiente norte del cordón de Chacabuco. Cuatro kilómetros aguas abajo de San Felipe, el Aconcagua recibe uno de sus más importantes tributarios, el río Putaendo, el cual se origina en la localidad de Los Patos a 1.188 m.s.n.m. de la reunión del río Rocín, que viene del oriente y del estero Chalaco que proviene del norte. Desarrolla un curso dirigido al SSO de 34 km y desemboca en el Aconcagua en una caja muy ancha y pedregosa. La subcuenca del río Putaendo tiene una extensión aproximada de 1.200 km², y una longitud de 85 km (CADE IDEPE, 2003).

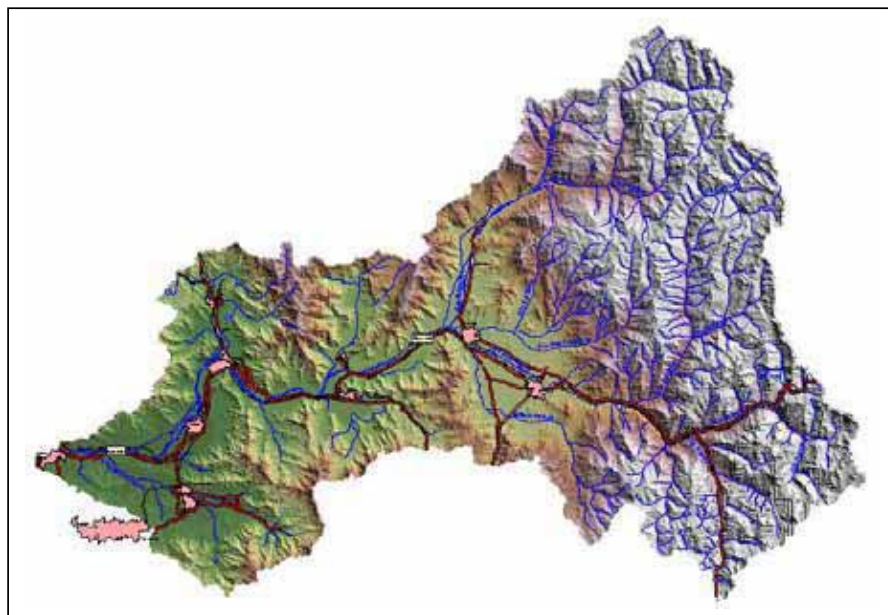


Figura 2: Río Aconcagua y sus principales tributarios

El tramo ubicado entre Los Andes y San Felipe, recibe por su vertiente norte al estero Quilpué, que drena un amplio sector cordillerano con una nutrida red de esteros, de los cuales, el San Regis es el más importante; se forma de la unión de los esteros San Francisco con el Barro. El estero Quilpué se extiende a través de 52 Km. (CADE IDEPE, 2003).

En el sector comprendido entre San Felipe y La Calera, el principal tributario es el estero Catemu, el cual riega el valle agrícola de ese nombre; tiene un desarrollo de 14 km en dirección al sur. También este tramo recibe el estero Los Loros que cae desde el sur y que drena el valle de Llay Llay (CADE IDEPE, 2003).

En el curso inferior, entre La Calera y el mar, los únicos afluentes importantes son los esteros El Cobre, San Isidro y Limache. El primero drena la falda sur de la cordillera de El Melón y tras un recorrido N-S de 26 km y fluye aguas abajo de La Calera; corre por la vaguada de un ancho valle agrícola donde se emplazan los centros poblados de El Melón y Nogales (CADE IDEPE, 2003).

El estero Limache que se une al río Aconcagua por la izquierda a sólo 8 km del mar, en Concón Alto. Tiene cabeceras en la vertiente poniente de los cerros La Campana y el Roble y del cordón de La Dormida, donde se juntan los esteros Las Palmas, Quebrada Alvarado y Cajón de La Dormida con el nombre de estero Pelumpén. Más abajo bisecta la ciudad de Limache y sigue al oeste casi paralelo al curso del río Aconcagua. Conforman una típica cuenca de régimen pluvial, con una superficie de 573 km². Una pequeña obra de regulación está emplazada en uno de sus

principales afluentes, cual es el estero Lliulliu. Sobre el estero Limache se ubica el embalse Los Aromos (CADE IDEPE, 2003).

El régimen del río Aconcagua es mixto; presenta crecidas importantes con las lluvias en invierno, y en primavera y principios de verano, con el deshielo. Los ríos tributarios de alta cordillera, Juncal, Blanco y Putaendo, obedecen a un régimen preponderantemente nival; en cambio, los de la cuenca baja son nivo-pluviales. Así se explica que las mayores crecidas de la cuenca alta y media sean de tipo nivoso y en el curso inferior, de La Calera al mar, comienza a tomar importancia la influencia pluvial con las lluvias del invierno (CADE IDEPE, 2003)..

Como en toda la zona Central de Chile, el clima del área de estudio se encuentra controlado por la extensión y posición del anticiclón del pacífico sudoriental. Durante los meses de estío se desplaza hacia el sur y se aprecia un aumento de su gradiente bórico, generando frecuentes estados de tiempo anticiclónico entre octubre y marzo con alta frecuencia de días despejados y viento sur (Parraguez, 1985).

El anticiclón tiene asociado una gran estabilidad térmica que limita la propagación vertical de la influencia marina a una capa de alrededor de 800 m, al mismo tiempo que frena los movimientos de ascenso capaces de generar precipitación. Sólo en la estación fría, cuando el anticiclón del Pacífico Sudoriental se retira hacia el norte, las perturbaciones ciclónicas más enérgicas logran interrumpir esta situación, generando lluvias invernales de 2 a 3 días de duración. A la latitud de zona comprendida en el estudio, como consecuencia de la presencia del anticiclón, la influencia marina se ve limitada por el relieve y sólo puede penetrar por el fondo de los valles.

La cuenca del río Aconcagua se divide en cuatro zonas climáticas (CICA, 1982):

a) Templado-cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada.

Comprende las planicies litorales y la mitad occidental de la cordillera de la Costa, las precipitaciones anuales promedio son de 350 mm., la atmósfera se presenta normalmente nublada en la mañana durante la estación seca.

b) Estepa templada con precipitaciones invernales

Abarca desde la mitad oriental de la cordillera de la Costa hasta aproximadamente el límite entre la mediana montaña y la cordillera de los Andes, su característica principal es la presencia de al menos tres o cuatro meses húmedos, con una precipitación anual media de 300 mm, la atmósfera se presenta normalmente libre de nubosidad desde noviembre a marzo, excepto en los valles en donde la nubosidad baja persiste normalmente hasta el mediodía.

c) Estepa fría de montaña

Comprende todo el ámbito de la cordillera de los Andes, desarrollándose incluso en algunas zonas altas de la mediana montaña. Se caracteriza por una fuerte sequedad del aire, una oscilación diaria muy amplia de la temperatura y precipitaciones níveas en invierno, son normales las tormentas de lluvia y nevadas en verano.

d) Tundra de alta montaña

Abarca las zonas altas de la cordillera de los Andes próximas a la frontera con Argentina, debido a la altitud, se caracteriza por presentar bajas temperaturas durante todo el año, con variaciones por debajo y por sobre 0 °C, pero que ni en el verano alcanzan temperaturas mayores que 10 °C.

La humedad relativa, en el mes de enero, varía desde algo más de un 80% en el sector litoral hasta alrededor de un 55% en la zona cordillerana. Para el mes de julio estos valores extremos aumentan sólo un 5%, de modo que en la costa alcanzan un 85% y en el interior un 60%.

Con respecto a las actividades económicas en esta cuenca, las principales se relacionan con agricultura, minería e industria (CADE IDEPE, 2003).

Respecto a la minería, el sector minero metálico más importante de la región es la explotación del cobre fino, en los sectores de Los Andes y Catemu. La explotación de estos minerales, se lleva a cabo por la División Andina de Codelco Chile (cobre y molibdeno) y Angloamerican Chile. División Andina de Codelco, cuenta con el mayor yacimiento de la región, ubicado en la provincia de Los Andes, donde se ubican las minas Saladillo y Sur – Sur. La producción de estas mineras se procesa en Ventanas y se exporta en forma de concentrado de cobre. Con respecto a la minería no metálica, destaca la explotación de caliza, que se destina principalmente a la producción de Cemento Melón, en la comuna de La Calera (CADE IDEPE, 2003).

La actividad industrial sobresale por su diversidad, ya que cuenta con actividades tan diversas como industrias de alimentos, conserveras, cemento y minería. La industria está representada también, por la fabricación de productos químicos industriales y frigoríficos relacionados con la conservación de todo tipo de carnes (CADE IDEPE, 2003). Los rubros comercio, restaurantes, hoteles y servicios financieros han aumentado notablemente en la última década, así como también, transportes y telecomunicaciones (CONAMA, 2004).

Según CADE IDEPE (2003), de las 733.872 Ha que conforman la cuenca del río Aconcagua, 86.237,3 Ha (11,8%), están destinadas para uso agrícola, 3.394,1 Ha (0,5%), tienen uso forestal, 6.000,7 Ha (0,8%) tienen uso urbano (ciudades, pueblos y zonas industriales), 1.037,23 Ha (0,14%), se destinan a la minería industrial y 636.616,6 Ha (86,7%) tienen otros usos (áreas desprovistas de vegetación, bosque nativo y otros).

El uso forestal no es muy relevante en la cuenca, se desarrolla en algunas zonas. Las plantaciones de bosque, principalmente de eucaliptos, alcanzan a 3.394,1 Ha (0,5%). La superficie correspondiente a bosque nativo es de 29.226,9 Ha. A su vez, las provincias con mayor importancia según superficie destinada a la actividad forestal son: Quillota (2.181,1 Ha) y Valparaíso (1.191,5 Ha), ya que ambas concentran el 64% y 35% respectivamente de la superficie destinada a este tipo de uso (CADE IDEPE, 2003).

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivos generales

Evaluar los niveles de contaminación del agua, los suelos y la fauna silvestre asociada a éstos en la cuenca del río Aconcagua y posteriormente proponer medidas de prevención, control y mitigación, las cuales permitirán disminuir los niveles de contaminación de los recursos hídricos y del suelo utilizados en la producción agropecuaria de dicha cuenca.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar una carta de usos del suelo de la cuenca del río Aconcagua.
- Recopilar (actualizar) información de uso de plaguicidas y fertilizantes en la cuenca del río Aconcagua.
- Realizar un catastro de las industrias que captan agua de proceso y descargan sus efluentes directa o indirectamente al río Aconcagua o alguno de sus afluentes.
- Determinar las características físicas, químicas, microbiológicas y ecotoxicológicas de las aguas superficiales del río Aconcagua y sus principales afluentes en áreas de uso agropecuario y descarga de efluentes industriales y domésticos.
- Determinar las características físicas, químicas, microbiológicas y ecotoxicológicas de las aguas subterráneas en áreas de actividad agropecuaria en la cuenca del río Aconcagua.
- Determinar las características sedimentológicas del río Aconcagua y sus principales afluentes.
- Determinar las características de los suelos de uso agropecuario en la cuenca del río Aconcagua.
- Implementar una base de datos a través del Sistema de Información Geográfica (SIG), que permitirá integrar la información para una mejor interpretación y comprensión de los resultados.
- Aplicar modelos de evaluación de la calidad ambiental de las aguas del río Aconcagua, bajo diferentes condiciones.
- Elaborar una carta de calidad ambiental de suelos, aguas superficiales y subterráneas, en función de los parámetros ambientales medidos y considerando los criterios de calidad de usos definidos por la CONAMA, que sirva como modelo para ser aplicados a otras cuencas de similares características.

- Diseñar un programa de monitoreo y vigilancia ambiental para fines de fiscalización, que permita el seguimiento de la calidad ambiental de la cuenca y que sea aplicable a otras cuencas hidrográficas de la zona central de Chile.
- Elaborar un plan de vigilancia ambiental de las medidas tomadas, basado en las variables ambientales que mejor evidencien los impactos antrópicos sobre los compartimentos ambientales considerados en el presente estudio.
- Informar a la comunidad acerca de los alcances del estudio y su aplicación.
- Proponer medidas jerarquizadas de mitigación, con relación a usos actuales y potenciales de la actividad agropecuaria.
- Evaluación económica de las medidas propuestas

1.3 METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología utilizada en la ejecución del presente proyecto, la cual fue elaborada con la participación directa de la supervisión técnica del SAG, constituida por profesionales del Nivel Central y de la V Región. La estrecha coordinación establecida durante el último año de trabajo, facilitó el trabajo de terreno y generó modificaciones sustanciales en la metodología que inicialmente propuso el equipo ejecutor, enriqueciendo el análisis de riesgo de plaguicidas y la zonificación final de riesgo consecuente mediante la utilización del Sistema de Información Geográfica.

1.3.1 Fases críticas

Considerando los objetivos planteados, se establecieron tres fases críticas en la ejecución del proyecto:

a) Primera fase

- Recopilación de la información relativa a la cuenca
- Análisis de la información desde el punto de vista ambiental
- Diseño y construcción de una base de datos ambientales.
- Generación de información a través de la ejecución del proyecto.
- Ingreso de la información a la base de datos.

b) Segunda fase:

- Integración de la información obtenida a través del análisis espacial y temporal, mediante el uso del SIG.
- Generación de información más específica.
- Redefinición de la estructura de la base de datos.
- Ingreso de nueva información
- Modelación de calidad en aguas superficiales y subterráneas.
- Carta temática de la contaminación ambiental de la cuenca por las diferentes actividades humanas desarrolladas.

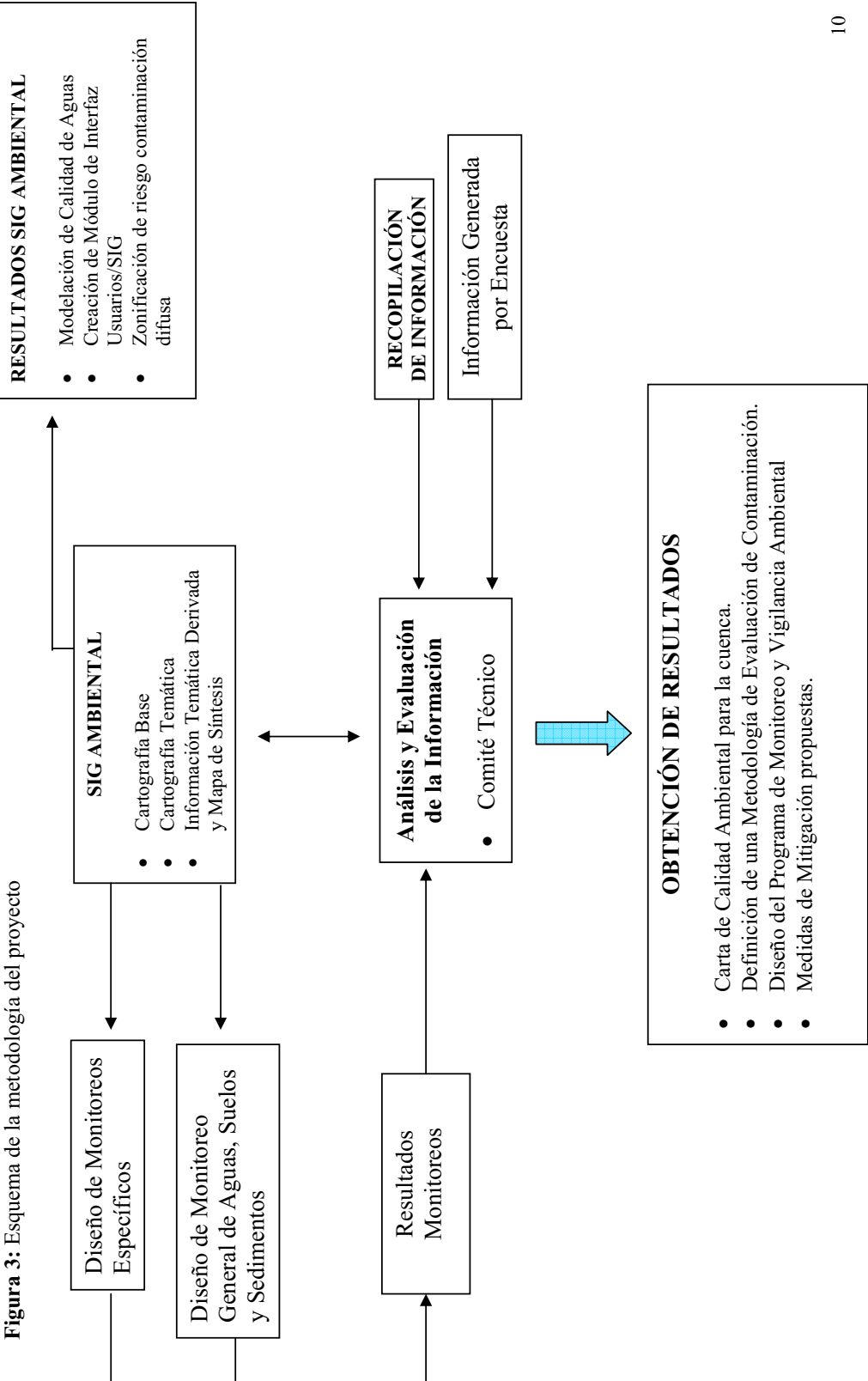
c) Tercera fase:

- Evaluación global del estado de la contaminación en la cuenca.
- Determinación de clases de calidad objetivo de aguas superficiales de la cuenca
- Propuesta de un programa de monitoreo o de vigilancia ambiental, que a lo menos considere parámetros físico-químicos, plaguicidas, bacteriológicos, bioensayos y análisis de sedimentos.
- Propuesta de estrategias para disminuir la contaminación de suelos y aguas en la cuenca del río Aconcagua.

La base de datos ocupa un lugar relevante en el desarrollo del proyecto, debido a que la **integración de datos en el SIG**, permite que la información recolectada pueda ser espacializada de alguna forma lógica e integrada con otras fuentes de información complementarias que permiten dar coherencia a dicha espacialización. Es decir, la base de datos permite y permitirá el análisis y estudio de la información, sobre la base de criterios espaciales, temporales y temáticos.

En la figura 3 se expone el esquema operacional de la metodología del proyecto.

Figura 3: Esquema de la metodología del proyecto



1.4 CONCLUSIONES

- La metodología diseñada para evaluar la contaminación de aguas y suelos en la cuenca del río Aconcagua, puede replicarse a las cuencas con uso agropecuario de todo el país.
- Los bioensayos de toxicidad, utilizados durante la ejecución del proyecto, demostraron ser herramientas eficaces para detectar la presencia de contaminantes en las aguas superficiales, complementando a los análisis químicos e incluso superando a éstos debido a la alta sensibilidad de los organismos tests.
- A pesar de la gran cantidad de estudios que existen sobre la cuenca del río Aconcagua, hay falencias importantes respecto de la riqueza, abundancia y distribución relativa a la fauna silvestre, en particular a las aves passeriformes, anuros y roedores. Se requiere por tanto, efectuar en el futuro estudios de caracterización en forma periódica, utilizando estimadores confiables, que entreguen información sobre la dinámica poblacional de la fauna silvestre, la cual puede variar por causas naturales o antrópicas.
- El monitoreo de calidad de las aguas superficiales, realizado durante todo el período de a la ejecución del proyecto, entregó valiosa información para proponer las clases de calidad objetivo para las aguas superficiales continentales, establecidas en la Guía CONAMA, para la Protección de la Calidad de las aguas continentales superficiales, considerando los tramos determinados por la DGA para la cuenca.
- Se desarrolló un análisis de riesgo asociado a la aplicación de plaguicidas de uso agrícola, por tipo de cultivo, temporada de aplicación, carga estimada, superficie de aplicación, considerando diferentes compartimentos ambientales, la vulnerabilidad del acuífero y la pendiente. Dicho análisis de riesgo constituye una innovación que permite generar cartografías de riesgo, a través del SIG y puede ser perfeccionado en el tiempo.
- El uso de una base de datos ambiental asociada al SIG, es un apoyo sustancial para interactuar con equipos multidisciplinarios de trabajo y orientar la investigación hacia el cumplimiento de los objetivos, ya que el exceso de información generada por un proyecto de tal envergadura, suele complicar el desarrollo del trabajo y su consecuente culminación. El análisis espacial y temporal permite ahorrar tiempo y recursos, facilita la discusión y ayuda a solucionar problemas complejos. Finalmente, la vinculación del SIG a modelos matemáticos, permite predecir el destino ambiental de los contaminantes en forma individual.
- Con respecto a la modelación de calidad de aguas superficiales y subterráneas de la cuenca, fue uno de los trabajos de mayor grado de dificultad, debido a los requerimientos de datos para aplicar los modelos, a pesar de que se contó con el aporte de estudios previos efectuados por la Dirección General de Aguas (DGA). En cuanto a la modelación superficial realizada en septiembre, noviembre y diciembre de 2004 con el modelo Qual2Kw, éste no se pudo utilizar para simular contaminantes conservativos, por lo tanto, fue necesario recurrir al apoyo del modelo, Qual2E para modelar los contaminantes Cu y Mn, concluyendo dicho trabajo en forma satisfactoria.

- No obstante, para que los modelos continúen operando, más allá de la Academia, será necesario que el SAG reúna o prepare un equipo de profesionales con conocimiento y práctica en el uso de modelos de simulación, debido a que la utilización de un modelo de calidad adecuado, permite dar una sólida explicación a variaciones bruscas en las concentraciones de una sustancia determinada, pues aporta una visión holística de los distintos procesos físicos que ocurren en el sistema dentro del período de tiempo simulado.
- El equipo ejecutor tiene la convicción de que debe existir una voluntad política de parte del estado, a través de sus Ministerios sectoriales, de establecer una política de manejo de cuencas hidrográficas y la propuesta de una legislación para tal efecto. El SAG, a su vez, puede ser un articulador importante, para ir generando conciencia en los usuarios de la cuenca del Aconcagua, a fin de convocar la creación de un grupo de trabajo representativo, con una agenda factible de cumplir y con plazos definidos. Las diferentes instancias que funcionan en la V Región, relacionadas con el riego, los Comités Operativos de CONAMA, los acuerdos de Producción Limpia y otros, pueden facilitar una tarea de esta naturaleza.

1.5 REFERENCIAS

CADE IDEPE, 2003. Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.

CENTRO EULA-CHILE, 2002. Desarrollo de una Metodología para la Evaluación y Mitigación de la Contaminación de aguas y suelos: Aplicación a la cuenca del río Chillán. Informe Final. Parte I: Aspectos Metodológicos.

CICA, 1982. Estudio Integral de Riego de los Valles Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca. Tomo 1: Informe General Resumen y Conclusiones. Autor, Comisión Nacional de Riego.

COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE, 2004. Política ambiental de la Región de Valparaíso. Disponible en: http://www.conama.cl/portal/1255/article-26207.html#h2_4

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN Y COOPERACIÓN (MIDEPLAN), 1998. Cuencas hidrográficas de Chile: Diagnósticos y proyectos. Santiago, Chile. 207 pp.

PARRAGUEZ C. 1985. Definición de acuíferos y calidad química de las aguas subterráneas de los valles Aconcagua, La Ligua y Petorca (V Región). Tesis Geólogo, Departamento de Geología Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO, 2001. Consolidación del Programa de Prevención y Contaminación de los Recursos Hídricos Año 1999. Subdepto. Gestión Ambiental. Depto. Protección de Recursos Naturales Renovables.

CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL USO DEL SUELO

2.1 INTRODUCCIÓN

La generación de la carta de uso de suelos, es imprescindible para la evaluación del impacto que las actividades silvoagropecuarias tienen sobre el medio ambiente, esto debido principalmente a la gran actividad agrícola que presenta parte de la cuenca del río Aconcagua, con cerca de 95.000 ha de superficie en este uso (12.9% del total de la cuenca).

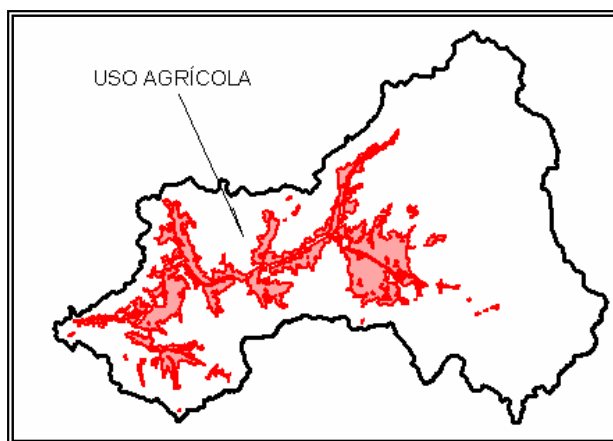


Figura 4: Área de uso agrícola

El objetivo principal de la carta de uso del suelo contempló una clasificación del sector agrícola que se aprecia en la cuenca, diferenciando los distintos usos actuales, ya sea hortalizas, cultivos anuales, vides, frutales, invernaderos y otros.

La forma de operar para la caracterización del Uso del Suelo consistió en la realización de una serie de visitas a terreno y mediante la observación directa determinar él o los cultivos, efectuando un barrido completo de la zona agrícola.

Se contó con una fotointerpretación basada en la imagen Landsat (año 2002) y por medio de ésta, se procedió en cada campaña a identificar cada sector rodalizado (sector homogéneo que cuenta con características similares tanto de color como de textura), el cual se clasificó en el plano entregado para su posterior ingreso al sistema.

Para la confección de la Carta de Uso de Suelos, se dispuso del siguiente material:

- Fotos Color Rectificadas Escala 1: 115.000 del año 1998
- Imagen Landsat7 año 2002, resolución 15 metros.
- “Catastro y Evaluación del Recurso Vegetacional Nativo del País” años 1994-1997. CONAF.
- Ortofotos CIREN Escala 1: 20.000 (Quebrada Herrera, Los Andes, San Rafael, Catemu, Punta de Barrancas, Panquehue, El Escorial, Llaillay, San Felipe).
- Clasificación de las Explotaciones Agrícolas del VI Censo Nacional Agropecuario según Tipo de Productor y Localización Geográfica. Documento de Trabajo N°5. ODEPA. Santiago de Chile, abril de 2000 (Información en forma de tablas EXCEL).
- Agricultura Chilena. Rubros según tipo de productor y localización geográfica. Documento de trabajo N°8. ODEPA-INDAP. Diciembre 2002 (Información en forma de tablas EXCEL).
- Catastro frutícola V Región (CIREN-CORFO).

2.2 METODOLOGÍA

- **Confección Mosaico para la Cuenca:** Con las fotos color rectificadas, se confeccionó un mosaico, es decir, una nueva imagen espacial orientando imágenes traslapadas, para ello se seleccionaron las fotos necesarias que cubrían la cuenca a excepción del sector cordillerano, donde no se cuenta con material fotográfico. La resolución de salida del mosaico fue de 10 metros, una vez seleccionadas las fotografías, se capturaron las áreas de traslape las cuales fueron procesadas con Software Ermapper6.1 e Idrisi32, obteniendo así la imagen resultante.
- **Fotointerpretación de sectores homogéneos:** Se cuenta con la imagen Landsat, año 2002, ésta se fotointerpretó digitalizándose en pantalla con el software ArcView3x las distintas asociaciones presentes en la zona agrícola de la cuenca, sin clasificar el uso actual al cual corresponde cada polígono ingresado (llenar las tablas con esta información será el objetivo de las campañas de terreno). La rodalización o delimitación de los diferentes patrones existentes, se realizó sobre la base de unidades homogéneas, tomando en consideración color, textura y formas entre otros incorporándose como información preliminar al Sistema de Información Geográfica. Se consideró en 0.5 ha la unidad mínima a fotointerpretar (fig. 5).

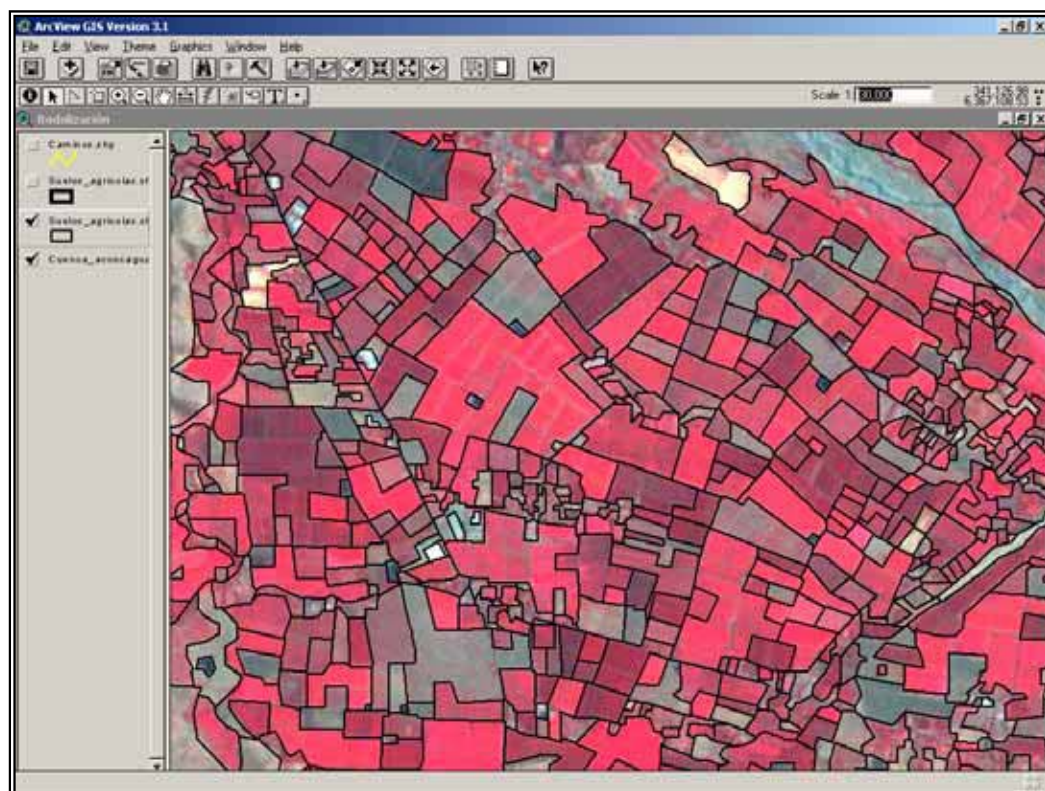


Figura 5: Fotointerpretación de la imagen de un sector de la cuenca.

- Organización de los Terrenos:** Se confeccionaron 25 planos Escala 1:20.000, éstos en su conjunto abarcaron toda el área a reconocer. Cada plano contenía la imagen Landsat, la rodalización preliminar, caminos existentes, ciudades y una cuadrícula que incluía las coordenadas UTM cada 1 Km para una correcta ubicación en terreno por medio de GPS. En cada salida, por vehículo, se contó con un par de personas, un aparato GPS, escalímetro y el respectivo plano (s) con la indicación previa de la ubicación del sector, más un listado numerado de los posibles cultivos con los que las personas se podrían encontrar. El objetivo consistió en que las personas en terreno reconocieran el cultivo de cada sector delimitado (rodalizado) y una vez reconocido, observaran si éste se encontraba en el listado entregado para así enumerar el rodal (o polígono) en el plano. En caso de no encontrar en la lista algún uso presente, éste se incorporó al final del listado siguiendo la numeración correlativa. Como ejemplo de la forma de operar tenemos que si Viña/Parronal corresponde al número 1, cada vez que se observó la presencia de este cultivo en terreno, en el plano se rotuló con el número 1 (fig. 6).

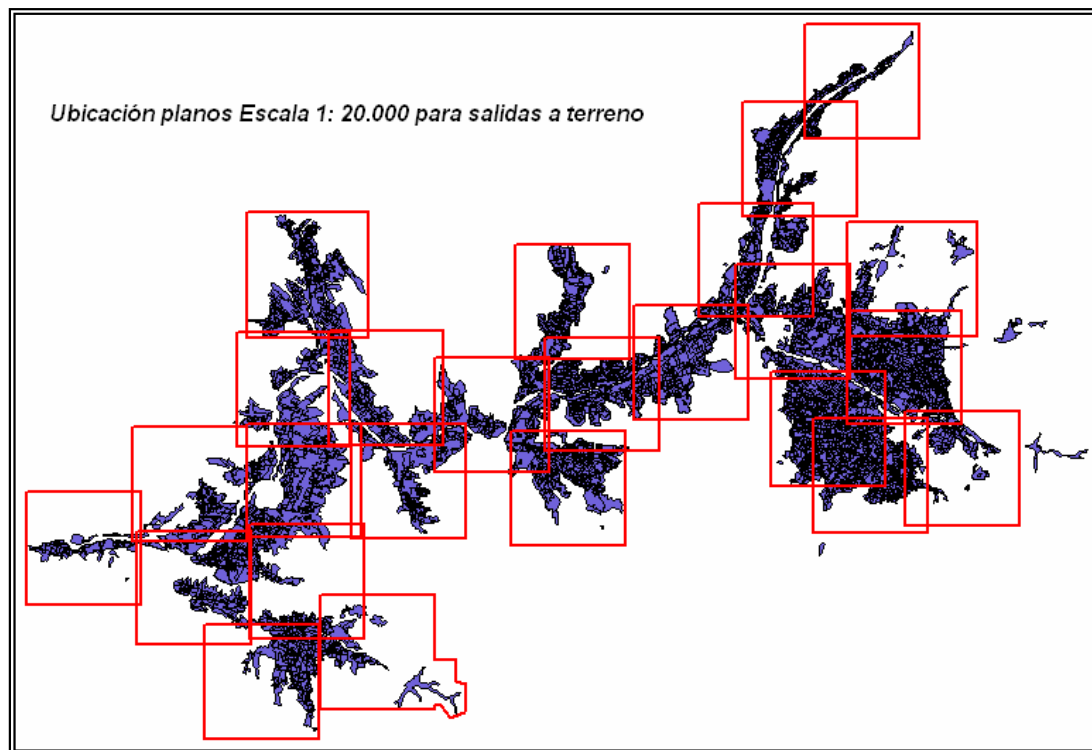


Figura 6: Planos a escala 1:20.000 para el trabajo de terreno.

- **Actividad de Terreno:** Las campañas de terreno fueron enfocadas a comprobar y validar los sectores foto interpretados e ingresados al sistema previamente (digitalizados), sobre la base de tonalidades y texturas, junto con corroborar límites y usos poco claros que tienden a la confusión. Lo anterior se logró con *observación directa en el campo* y consultas a personas del sector para facilitar el reconocimiento de algún uso específico no identificado. En el caso de la observación directa de campo, ésta se hizo desde el mismo recorrido, junto con llegar a los sectores más altos del lugar (cerros y laderas principalmente), de manera de lograr una visión panorámica e ir chequeando con binoculares la fotointerpretación.

La actividad de terreno se prolongó por más de dos meses, incluyendo una salida de tres días pernoctando en el lugar, de tal manera de aprovechar por completo la luz natural. Las salidas fueron diarias (lunes a viernes), con un máximo de tres vehículos (figura 7).

Una vez completado el plano (fig. 8), se entregó para ser ingresado al sistema mediante el software ArcView3x.



Figura 7: Observación directa en terreno para validar sectores fotointerpretados

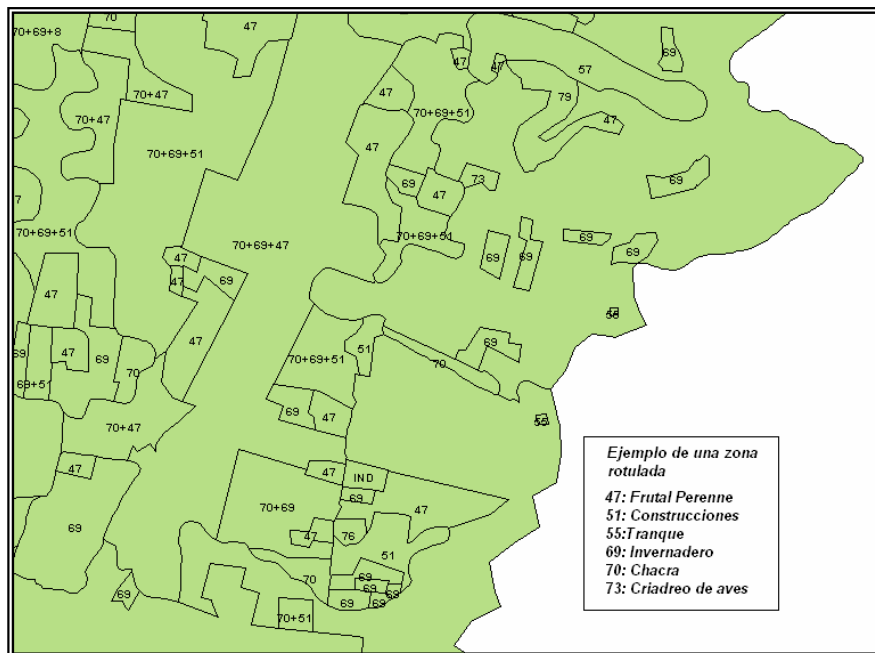


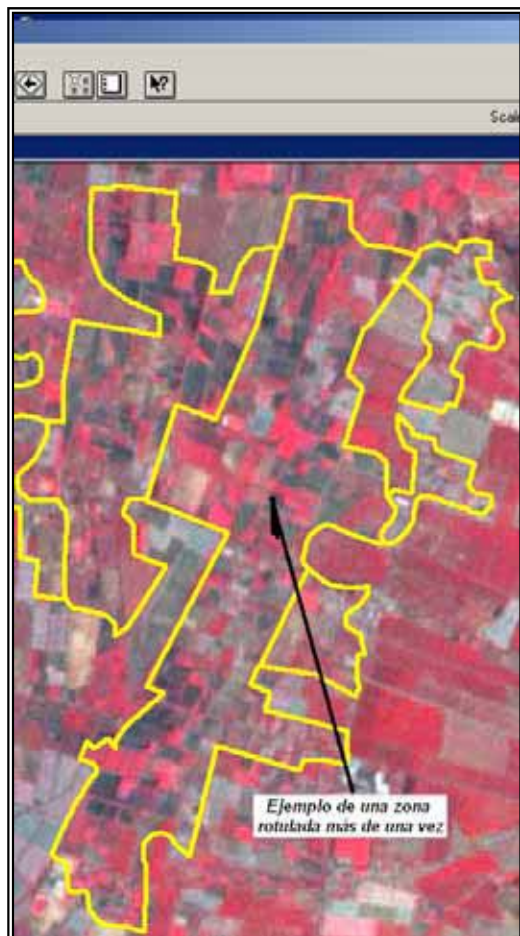
Figura 8: Zona rotulada

Owner	Area (ha)	Crop	Description
Poligon	12.142068	8	Maiz
Poligon	37.212701	1	Vivero Platanos
Poligon	6.485813	51	Caraboscones
Poligon	6.485813	1	Vivero Platanos
Poligon	6.386150	70	Chusque
Poligon	7.261112	8	Maiz
Poligon	3.124141	1	Vivero Platanos
Poligon	8.878178	1	Vivero Platanos
Poligon	5.302066	47	Frutal tipo persea y naja (palo)
Poligon	7.141742	1	Vivero Platanos
Poligon	7.418176	1	Vivero Platanos
Poligon	3.878176	10	Intercambio
Poligon	1.517080	49	Intercambio
Poligon	1.488772	70	Chusque
Poligon	34.813026	101-70	Planta tipo chusque
Poligon	8.725745	51	Caraboscones
Poligon	7.454742	1	Vivero Platanos
Poligon	3.122297	1	Vivero Platanos
Poligon	10.238210	47	Frutal tipo persea y naja (palo)
Poligon	7.213108	70	Chusque
Poligon	10.548794	1	Vivero Platanos
Poligon	6.348794	51	Caraboscones
Poligon	6.378794	1	Vivero Platanos
Poligon	6.374121	49	Frutal tipo persea
Poligon	20.811825	49	Frutal tipo persea
Poligon	6.482749	1	Vivero Platanos
Poligon	6.482749	49	Frutal tipo persea
Poligon	6.264447	1	Vivero Platanos
Poligon	1.211015	47	Frutal tipo persea y naja (palo)
Poligon	6.378176	70	Chusque
Poligon	1.488772	57	Cano
Poligon	3.878176	8	Maiz
Poligon	6.413087	70	Chusque
Poligon	4.714707	57	Cano
Poligon	1.111114	54	Chusque
Poligon	6.386150	70	Chusque
Poligon	13.122295	8	Maiz
Poligon	6.386176	11	Cano

Figura 9: Ingreso al sistema.

- **Actividad de Gabinete:** Se creó un campo *uso_suelo* en la tabla de la cobertura que contiene la información del uso del suelo agrícola, en el cual se incorporó el rótulo para cada rodal. Una vez clasificados todos los rodales, se creó un segundo campo en la tabla – *Descripción*– el cual describió el tipo de cultivo que representaba el número indicado en el campo *uso_suelo* (fig.9).
- **Clasificación de sectores no visitados en terreno:** Una vez finalizada la actividad de terreno y el ingreso al sistema del rótulo más su descripción, se encontraron algunos pequeños sectores no clasificados, producto de que no fueron visitados por su lejanía, por tiempo o por problemas de acceso, parte de éstos fueron rotulados sobre la base de lo hecho en terreno, siguiendo patrones y lugar geográfico. El resto se clasificó según catastro.
- **Apoyo con el Catastro Frutícola:** El Catastro Frutícola de CIREN, permitió identificar todos aquellos huertos con más de 0.5 ha y/o 50 árboles de una o más especies frutales. Éste dispone de un archivo digital basado en ortofotos 1:20.000, que incluye la localización geográfica de cada uno de los huertos más datos adicionales del propietario y de la especie propiamente tal. Esta información, fue de gran apoyo para la clasificación de sectores no visitados, como para chequear el trabajo de terreno.

- **Tabla no oficial:** Una vez completada toda la información en la tabla y debido a que varios rodales fueron rotulados con más de un cultivo, producto de la complejidad de delimitar zonas tan pequeñas y a su vez tan dispersas, debido a lo poco homogéneo de los cultivos, se procedió a crear en la tabla campos para indicar por separado los diferentes cultivos presentes. A su vez, cada cultivo cuenta con un campo porcentual que indica cuanto del 100% le corresponde y su respectivo campo área (fig. 10). A modo de ejemplo:



Uso_suelo: 102+49+48+47+8

Descripción: Tunas, alfalfa, frutal hoja caduca, perenne y maíz

Cultivo1: Maíz %Uso1: 10

Área_1: 18.79

Cultivo2: Caduco %Uso2: 30

Área_2: 56.36

Cultivo3: Tunas %Uso3: 10

Área_3: 18.79

Cultivo4: Alfalfa %Uso4: 30

Área_4: 56.36

Cultivo5: Perenne %Uso5: 20

Área_5: 37.57

Figura 10: Ejemplo de una zona rotulada más de una ocasión.

Polygon	Cultivo	Area	Area	Area	Cultivo	Area	Area	Cultivo	Area	Area	Cultivo	Area	Area	Cultivo	Area	Area
Polygon 103+61+48	Ribera río, pradera	Caduco	30.00	2.01	Pradera	30.00	2.01	Ribera	40	2.69		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	5.40		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Alfalfa	Alfalfa	100.00	8.26		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	14.22		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 11	Tiño	Tiño	100.00	4.91		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Alfalfa	Alfalfa	100.00	11.83		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 95	Ortiguero	Ortiguero	100.00	0.60		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61	Pradera	Pradera	100.00	2.19		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 54	Suelo arado	Suelo arado	100.00	10.04		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	4.62		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	4.82		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 1	Vivero / Pastoral	Uva	100.00	4.13		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61	Pradera	Pradera	100.00	0.89		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61+48	Pradera y alfalfa	Alfalfa	50.00	1.50	Pradera	50.00	1.50		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Alfalfa	Alfalfa	100.00	5.54		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61+48	Pradera y alfalfa	Alfalfa	50.00	1.25	Pradera	50.00	1.25		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61	Pradera	Pradera	100.00	2.68		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	1.85		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 51	Construcciones	Construcciones	100.00	3.31		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61	Pradera	Pradera	100.00	0.65		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61	Pradera	Pradera	100.00	1.61		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 51	Cancha de fútbol	Construcciones	100.00	0.30		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Alfalfa	Alfalfa	100.00	1.59		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	1.11		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	12.66		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	1.61		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 61+48	Pradera y alfalfa	Alfalfa	50.00	4.75	Pradera	50.00	4.75		0	0.00		0	0.00			
Polygon 103+70+48	Ribera río, chacra	Caduco	20.00	7.72	Hostaleros	40.00	15.45	Resto	40	15.45		0	0.00			
Polygon 48	Frutal hoya caduco	Caduco	100.00	4.15		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Alfalfa	Alfalfa	100.00	1.79		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 6	Maíz	Maíz	100.00	2.21		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			
Polygon 48	Alfalfa	Alfalfa	100.00	34.54		0.00	0.00		0	0.00		0	0.00			

Figura 11: Muestra de parte de la tabla (ubicación de los campos).

- **Cobertura Final:** Debido a la gran cantidad de polígonos que contaban con más de un tipo de cultivo, lo cual pese a contar con los porcentajes designados, complicaba al momento de analizar los datos, y frente a la necesidad de incorporar parte de las especies de frutales –tanto caducos como perennes- en la tabla, es que se procedió a aislar todos los cultivos y frutales relevantes para su posterior análisis. Con ayuda de la información del catastro frutícola, superponiendo la información sobre la carta de suelos, se comenzó a indicar la especie del frutal contenida y corregir si era necesario la delimitación del rodal. De esta manera se chequearon cerca de 40.000 ha de la zona agrícola, que se traducen en los más de 5 mil polígonos contenidos en el catastro. La tabla contiene un campo adicional llamado Especie, el cual indica el nombre del frutal que contenía el catastro. Todos los cultivos de interés finalmente quedaron aislados y las únicas agrupaciones que se conservaron, son aquellas que no tienen mayor relevancia para las posteriores manipulaciones de datos (figura 12).

Shape	Comentario	Describe	Uso actual	Especie	M/L	A/L	N/L	E/L	Area
Polygon 40		Frutal hoja caduca	Caduco	Marzano	0	0	0	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 70		Ortiga	Ortiga		4	4	4	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 40		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nogal	0	0	0	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 48		Alfalfa	Alfalfa		0	4	0	0	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Petal	0	0	0	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 48		Alfalfa	Alfalfa		0	4	0	0	
Polygon 51		Construcciones	Construcciones		0	0	0	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Cerezo	0	5	4	4	
Polygon 51		Construcciones	Construcciones		0	0	0	0	
Polygon 0		Maiz	Maiz		0	4	4	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Domestico	0	5	4	4	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco		0	0	0	0	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Duramo	0	5	4	4	
Polygon 48		Frutal hoja caduca	Caduco	Nectario	0	5	4	4	
Polygon 1		Vitla/parón	Uva		0	5	5	5	

Figura 12: Generación de tabla final.

En la **figura 13** se expone un diagrama que indica la metodología para la Clasificación del Uso del Suelo.

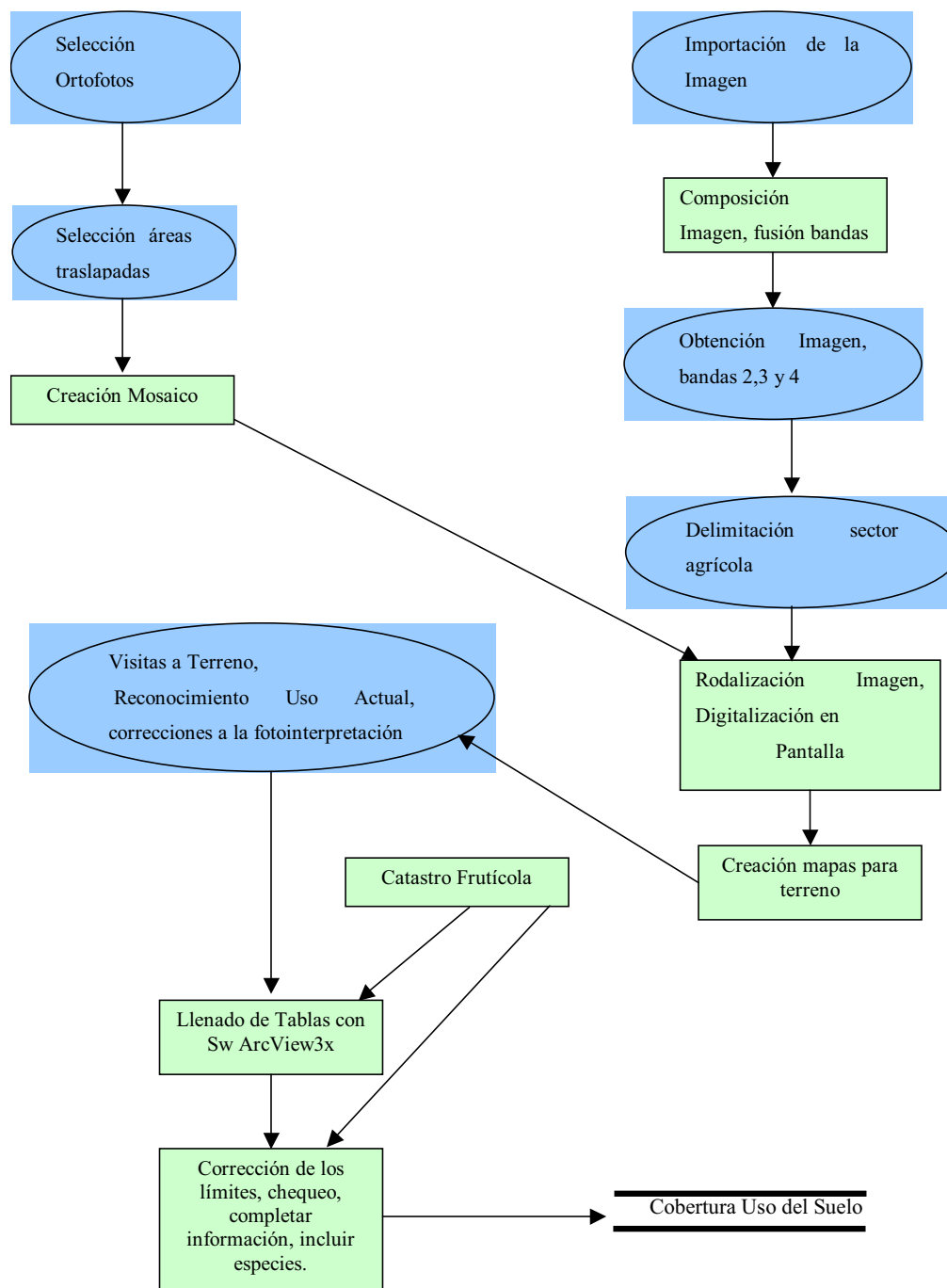


Figura 13: Metodología para la Clasificación del Uso del Suelo.

CAPÍTULO 3: ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE USO DE PLAGUICIDAS Y FERTILIZANTES EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

3.1 METODOLOGÍA

La actualización del uso de los plaguicidas y fertilizantes se realizó a través de la aplicación de una encuesta a los agricultores de un área de 28.000 ha (**ver fig. 14**). Dicha área fue seleccionada por las siguientes características:

- Existe una intensa actividad agrícola en la zona aledaña al río
- La napa freática en dicha área se encuentra muy cercana a la superficie, menos de 10 m entre San Felipe y Llay Llay.
- Este sector comprende suelo de tipo relleno aluvial y coluvial, lo cual le entrega características de alta permeabilidad.
- Existe una alta tasa de recarga del acuífero.
- Según Von Igel (1999), la cercanía del acuífero con la superficie, hace que el riesgo de contaminación difusa comprendida entre San Felipe y Llay Llay sea alto a extremo.
- Si bien la vulnerabilidad de la zona entre Los Andes y San Felipe es baja (Von Igel, 1999), existe una importante actividad antropogénica (población e industrias).
- Entre Los Andes y San Felipe existe un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por la recarga que aporta el río Aconcagua en este tramo.
- Se contó con la información de roles de propietarios.

La cartografía generada de roles, junto con aportar la información del número de rol propiamente tal, fue dividida en tres tipos de propietarios de acuerdo a la metodología desarrollada por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), considerando la superficie de la propiedad para la definición de un pequeño, mediano o gran propietario según los siguientes estratos (Centro EULA-Chile, 2002):

Pequeño Propietario (Tamaño 1)	Mediano Propietario (Tamaño 2)	Gran Propietario (Tamaño 3)
0 – 12 ha	12 – 60 ha	> a 60 ha

Sobre estos tres estratos, se aplicó un muestreo aleatorio de tipo estratificado (MAE), el cual se basa en que a cada subpoblación a muestrear (o subgrupo de productores), se le da el nombre de estrato, cada uno de los cuales conforma una población completa, de manera que se muestrea independientemente en forma aleatoria, determinando así el N° de productores a encuestar (Lohr, 2000).

Considerando a Lohr (2000), el MAE se implementó en este caso porque:

- Presenta un menor costo de aplicación.
- Se obtienen estimaciones más precisas para una población muy grande, ya que la varianza obtenida mediante este método es menor.
- Permite alcanzar una mayor exactitud en los datos obtenidos en cada estrato.
- Se evita la posibilidad de obtener una muestra errada, en que alguno de los estratos (de productores, en este caso) no resulte representado a través de la selección aleatoria sobre la población total.
- Permite comparar los resultados y conclusiones, tanto entre como intra estratos, lo que pudiese no conseguirse si, respetando las proporciones de toda la población, alguna de éstas no tuviese el tamaño adecuado como para conformar una muestra representativa de alguno de los estratos a encuestar.

El siguiente paso fue determinar el tamaño de muestra para aplicar la encuesta se definió sobre la base de la fórmula de Tamaño muestral para realizar prueba de Hipótesis de proporciones (Pagano y Gaubreau, 2001), la cual considera la corrección por continuidad.

$$n_1 = \left(\frac{\sqrt{p_0(1-p_0)}z_{\alpha/2} + \sqrt{p_1(1-p_1)}z_{\beta}}{p_1 - p_0} \right)^2$$

$$n = n_1 + \frac{2}{|p_1 - p_0|}$$

Donde:

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95%)

$\beta = 0,16$ (potencia de 80%)

$p_0 = 0,5$

$p_1 = 0,7$

En que la hipótesis nula $H_0 = p = 0,5$ y la hipótesis alternativa $H_1 = p = 0,7$

$N = 93$

De acuerdo al cálculo, se debió efectuar un muestreo de 31 propietarios por estrato, a fin de completar un total de 93 encuestas. La distribución se realizó homogéneamente con el objeto de permitir la comparación entre ellos. Debido a que este esquema de muestreo puede causar algún sesgo en la estimación de la proporción poblacional, se utilizaron factores de expansión basándose en la proporción de muestreo.

Es así como se encuestaron finalmente 31 predios pequeños (de menos de 1 ha a 12 ha), 31 predios medianos de (más de 12 a 60 ha) y 31 predios grandes (más de 60 ha).

La encuesta (ver ANEXO C) consta de tres partes principales:

- Catastro de plaguicidas agrícolas por sistema productivo
- Utilización, manejo y fiscalización de plaguicidas
- Información comercial.

La encuesta fue realizada entre enero y abril del año 2004, coincidiendo los primeros meses con la elaboración de la carta de uso del suelo, posteriormente, el trabajo de la encuesta se hizo más lento por las dificultades encontradas por el recelo de algunos agricultores o administradores para responder el cuestionario e incluso total rechazo, a pesar de que se presentó una carta suscrita por el Director Regional del SAG.

No obstante, debido a la definición de dos áreas pilotos (metodología se explica más adelante) para aplicar la modelación de calidad de aguas superficiales y subterráneas, una 2ª encuesta fue realizada en sectores cercanos a las ciudades de Quillota y La Calera, durante los días 3 y 31 de agosto y 1º de septiembre, considerando 4 predios con cultivos de cítricos, 2 con paltos, 4 con invernaderos de tomates y 2 destinados a chacras. Esta fue una encuesta más dirigida y apoyada directamente por funcionarios del SAG y permitió identificar los principios activos utilizados y las formas de aplicación de plaguicidas en esta área



Figura 14: Área seleccionada para efectuar la 1ª encuesta.

La información recopilada a través de la encuesta, fue fundamental para efectuar el análisis de riesgo de la contaminación difusa generada por la aplicación de plaguicidas de uso agrícola.

3.2 REFERENCIAS

CENTRO EULA-CHILE, 2002. Desarrollo de una Metodología para la Evaluación y Mitigación de la Contaminación de aguas y suelos: Aplicación a la cuenca del río Chillán. Informe Final. Parte I: Aspectos Metodológicos.

LOHR, S.L., 2000. Muestreo: Diseño y Análisis. International Thomson Ediciones, México.

PAGANO, M. & GAUBREAU, K. 2001. Fundamentos de Bioestadística. Thomson Learning, México.

VON IGEL GRISAR W., 1999. Redefinición de la Red de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea en el Valle del Aconcagua. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

CAPÍTULO 4: USO DEL SUELO URBANO E INDUSTRIAL: IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES PUNTUALES DE CONTAMINACIÓN QUE AFECTAN DIRECTA O INDIRECTAMENTE AL RÍO ACONCAGUA O ALGUNO DE SUS AFLUENTES

4.1 INTRODUCCIÓN

La V Región de Valparaíso tiene una superficie de 16.396,1 Km² y una población de 1.539.852 habitantes (censo del año 2002). El 56,8% de la población (874.636 personas) vive en la provincia de Valparaíso, el 5,95% (91.621 personas) en la Provincia de Los Andes, el 4,58% (70.525 personas) en la Provincia de Petorca, el 14,8% (227.898 personas) vive en la provincia de Quillota, el 18,56% (285.796 personas) en la Provincia de San Felipe, presentando la mayor concentración de habitantes de la cuenca y la provincia de Isla de Pascua que tiene sólo el 0,2% (30.797). Del total de la población de la Región, 1.248.671 personas (90,2%) habitan en el sector urbano y sólo 135.664 (9,8%) habitan en el sector rural (INE, 2004). Considerando el censo realizado en el 2002, el 29,8% (460.000 personas) del total de la población de la Región de Valparaíso, habita en la cuenca del río Aconcagua.

En dicha cuenca la distribución espacial de los asentamientos humanos, en general, se emplazan próximos al cauce principal y a los esteros Limache, Catemu y El Litre (CADE IDEPE, 2003)

Los consumos de agua para uso industrial se concentran alrededor de las 3^a y 4^a secciones del río Aconcagua con 1.681 Ls⁻¹, coincidiendo con los centros urbanos más importantes y en la 1^a sección, con 402 Ls⁻¹, coincidiendo con las ciudades de San Felipe y Los Andes. La 2^a sección cuenta con una demanda menor, igual a 32 Ls⁻¹. (CADE IDEPE, 2003).

La actividad industrial sobresale por su diversidad, ya que cuenta con actividades tan diversas como industrias de alimentos, conserveras, cemento y minería. La industria está representada también, por la fabricación de productos químicos industriales y frigoríficos relacionados con la conservación de todo tipo de carnes (CADE IDEPE, 2003). Los rubros comercio, restaurantes, hoteles y servicios financieros han aumentado notablemente en la última década, así como también, transportes y telecomunicaciones.(CONAMA,2003).

Respecto a la minería, el sector minero metálico más importante de la región es la explotación del cobre fino, en los sectores de Los Andes y Catemu. La explotación de estos minerales, se lleva a cabo por la División Andina de Codelco Chile (cobre y molibdeno) y Angloamerican Chile. La División Andina de Codelco, cuenta con el mayor yacimiento de la región, ubicado en la provincia de Los Andes, donde se ubican las minas Saladillo y Sur – Sur. La producción de estas mineras se procesa en Ventanas y se exporta en forma de concentrado de cobre. Con respecto a la minería no metálica, destaca la explotación de caliza, que se destina principalmente a la producción de Cemento Melón, en la comuna de La Calera (CADE IDEPE, 2003).

Con el objeto de conocer los eventuales efectos de las descargas puntuales sobre la calidad del agua, se procedió a identificar los efluentes urbanos y aquellos derivados de la actividad productiva.

4.2 METODOLOGÍA

A continuación se presenta una pauta metodológica utilizada durante la ejecución del presente trabajo, para lo cual se diseñó un diagrama conceptual, el cual se expone en la **figura 15**.

4.2.1 Recopilación de antecedentes

Debido a la existencia de una apreciable cantidad de estudios relativos a la identificación de las fuentes contaminantes puntuales presentes en la cuenca y sus efectos sobre la calidad del río Aconcagua, no fue difícil obtener información respecto del universo de las industrias que descargan directamente (e indirectamente) al río y sus esteros afluentes. Además se identificó a aquellas industrias que descargan al alcantarillado, al suelo, canales de riego y el mar. De esta forma se efectuaron visitas y consultas a las siguientes reparticiones:

- Dirección General de Aguas (Depto. Protección del Recurso Hídrico)
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (Nivel Central y V Región)
- Comisión Nacional de Riego (CNR)
- Empresa de Servicios Sanitarios de Valparaíso (ESVAL S.A.)
- Servicio Agrícola y Ganadero (DEPROREN y V Región)
- Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)
- Subsecretaría de Minería

Además se obtuvo información relevante de los siguientes documentos:

- **Catastro georreferenciado de eventuales fuentes contaminantes de acuíferos en las cuencas de Aconcagua y Marga Marga.** Autor: Felipe Riquelme. Servicio Nacional de Geología y Minería. Subdirección Nacional de Geología. 2003
- **Consolidado del Programa de Prevención y Contaminación de los Recursos Hídricos Año 1999.** Autor: Depto. Protección de Recursos Naturales Renovables. Subdepto. Gestión Ambiental. Servicio Agrícola y Ganadero 2001.
- **Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.** Informe Etapa II (Revisión C). Autor: CADE IDEPE Consultores en Ingeniería. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile, 2003.
- **Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.** Cuenca del río Aconcagua. Autor: CADE IDEPE Consultores en Ingeniería. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile, 2003.
- **Estudio de Impacto Ambiental de las Descargas de Aguas Servidas Industriales, Domésticas y Otras en la Cuenca del Río Aconcagua.** Informe Final y Resumen Ejecutivo. Autor, EMPRESA KRISTAL, HOMSI Y ASOCIADOS LTDA. Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA. 1996.

- **Modelo de Simulación Hidrogeológico Valle del Río Aconcagua.** Autores: Ingendesa y AC Ingenieros Consultores Ltda. Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas, 1998.
- **Redefinición de la Red de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea en el Valle del Aconcagua.** Autor, Wolf Von Igel Grisar. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, Universidad de Chile. 1999.

4.2.2 Análisis y evaluación de la información

Toda la información recopilada fue analizada en cuanto a calidad y rigurosidad del trabajo realizado, determinándose la información faltante, para luego continuar con la búsqueda de dicha información, la cual se genera constantemente a través de otros estudios y/o monitoreos, tales como los RILes de las Centrales Termoeléctricas Nehuenco y San Isidro, ESVAL, servicios públicos y otros.

4.2.3 Levantamiento de información en terreno

Una primera planificación de trabajo de levantamiento de información de terreno fue efectuada, con el apoyo del SAG. Dicha actividad permitió facilitar la ubicación de las estaciones de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas. Posteriormente, a medida de que el proyecto fue desarrollándose, fue necesario efectuar otras salidas a terreno para complementar la información obtenida y en la búsqueda de nuevas descargas o de reubicación de fuentes antiguas.

a) Georreferenciación de industrias y descargas

Para esta actividad se utilizó un equipo GPS, marca Magellan, modelo 330. Los datos fueron obtenidos con un DATUM WGS84 y pasados a PSAD 56 (acorde al DATUM de las cartas IGM 1:50.000), para luego ser llevados al software ArcView 3.x.

Al analizar la información en la base de datos y al estudiar el mapa temático respectivo, se continuó georreferenciando otras industrias o actividades industriales potencialmente contaminantes, tales como las empresas de extracción de áridos, ubicadas en la ribera del río Aconcagua en la 4ª sección de la cuenca, las cuales no habían sido incluidas en estudios previos.

b) Caracterización de las descargas

A pesar de que se contó con una nutrida información respecto de los procesos industriales, fue necesario definir que industrias específicamente iban a ser estudiadas con más profundidad, para efecto de la modelación de calidad de aguas, para ello fue necesario analizar los monitoreos de las empresas y servicios públicos, lo cual fue realizado en función de los siguientes criterios:

- **Tabla N°1 del Decreto 90/2000**, la cual fija los **límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales**, en la cual se indica un listado de 35 parámetros, por tanto, un primer criterio consiste en considerar aquellas

descargas que generen excedencias en el cuerpo receptor, de aquellos parámetros incluidos en la NCh 1333 y la Guía CONAMA (Normas secundarias de protección de la calidad de aguas continentales superficiales).

- Como los coliformes fecales, representan un parámetro fundamental para prevenir efectos nocivos sobre la salud humana, deben considerarse las **nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas**.
- Área seleccionada para realizar la modelación.
- Finalmente, se consideró la **accesibilidad** a los ductos de las descargas seleccionadas.

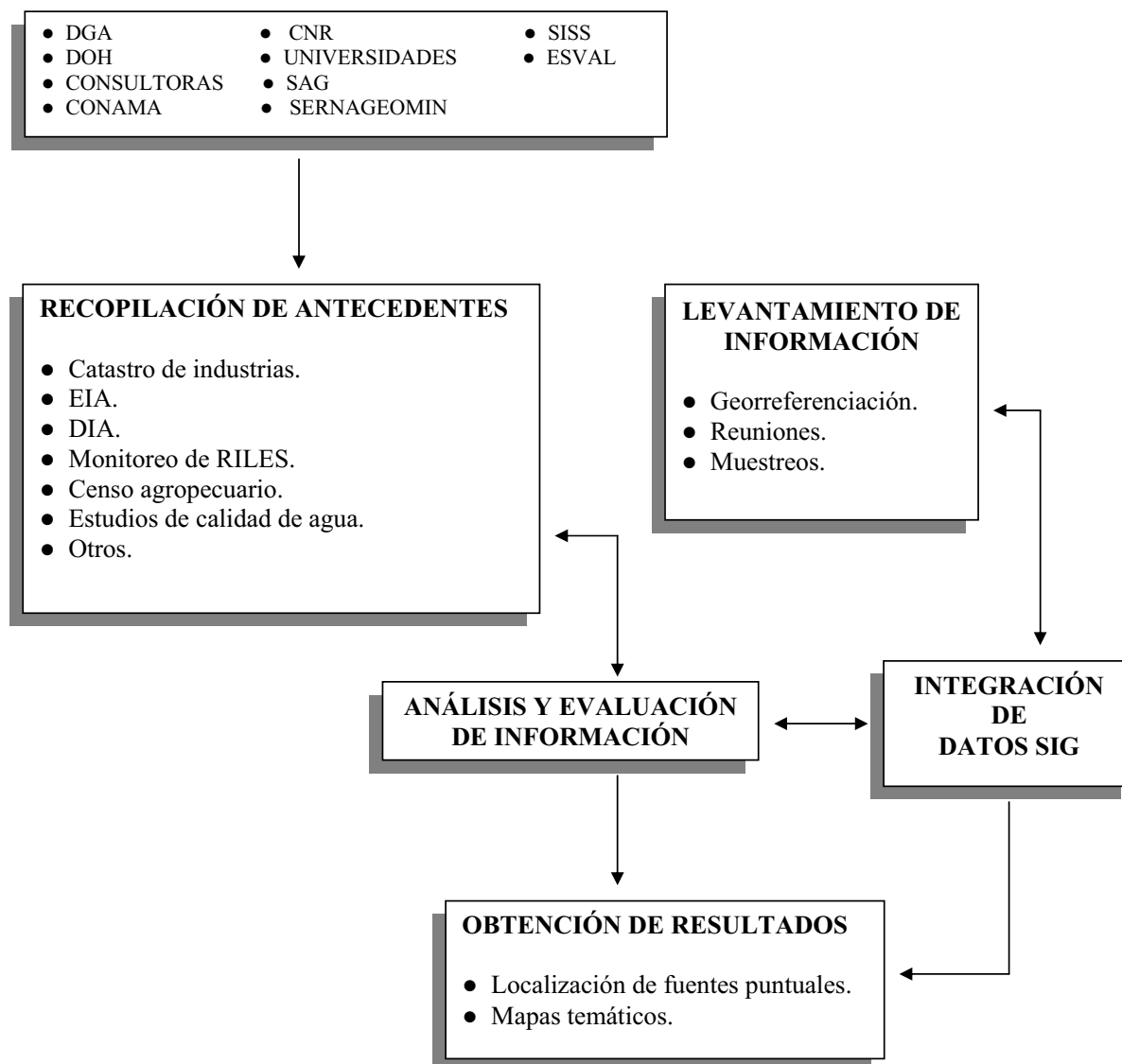


Figura 15: Diagrama conceptual de la caracterización de las fuentes puntuales

CAPÍTULO 5: CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

5.1. INTRODUCCIÓN

Todos los organismos vivos dependen de forma absoluta del agua. Las reacciones bioquímicas producidas en cada célula tienen lugar en medio acuoso, el agua constituye el medio de transporte de los nutrientes requeridos por la célula y de los desechos excretados por la misma. A pesar de que el agua es el componente más abundante de la superficie terrestre, las principales reservas, 97%, se concentran en los océanos, sin embargo, esta agua resulta demasiado salina para su empleo por los seres humanos y otras criaturas terrestres. La radiación solar condensa diariamente cantidades enormes de agua, que cae a la superficie en forma de agua de lluvia. En proporción, la cantidad de lluvia depositada en la superficie es mayor que en los océanos, lo que proporciona un suministro continuo de agua natural. Tratamos el agua como si fuera libre, y en sentido estricto lo es, es un subproducto originado por la enorme radiación solar que incide sobre la Tierra. El ciclo hidrológico consume la mitad de la radiación solar absorbida por la superficie terrestre (Spiro y Stigliani, 2004).

La calidad de las aguas es objeto de constante preocupación desde dos puntos de vista a) salud pública y calidad de vida y b) salud de los ecosistemas acuáticos. Ambos aspectos se pueden mejorar controlando el impacto de las actividades humanas, pero su problemática y medidas de control son diferentes. La calidad del agua es tan importante como su cantidad. Aunque una vez utilizada, la mayoría del agua retorna a sus cauces originales, inevitablemente, su calidad se degrada. El vertido de residuos domésticos y comerciales disminuye la cantidad de oxígeno disponible y altera el equilibrio biológico de las aguas superficiales. Las actividades industriales y mineras contaminan el agua con gran variedad de sustancias tóxicas. Las prácticas agrícolas pueden originar una sobrecarga de nutrientes en las aguas superficiales y subterráneas y provocar una salinización del suelo al evaporarse el agua de irrigación (Spiro y Stigliani, 2004).

Según CONAMA (2004), uno de los problemas ambientales de la región es la contaminación del río Aconcagua, dado que éste constituye la principal fuente de recurso hídrico en la Región. Esta situación se torna más compleja, teniendo en cuenta las actividades económicas y la población que depende de este curso de agua, además del riesgo para la salud humana. Los contaminantes provienen de la actividad doméstica, agrícola e industrial que se desarrolla en el entorno. La descarga de riles, incrementa la contaminación industrial y minera que afecta directamente al río Aconcagua.

5.1.1 Objetivo general

Evaluación de la calidad de las aguas superficiales de la cuenca del río.

5.1.2 Objetivos específicos

- Determinar las características físicas, químicas y microbiológicas del río Aconcagua y sus afluentes.
- Evaluar la toxicidad sobre el ecosistema acuático, presente en el río Aconcagua y sus afluentes, mediante el uso de bioensayos de toxicidad.

5.2 METODOLOGÍA

5.2.1 Estaciones de toma de muestras

La ubicación de las estaciones de toma de muestras, se realizó considerando el uso del suelo, las descargas urbanas e industriales, la red hídrica, la solicitud directa de los funcionarios del SAG y la facilidad en los accesos. Durante la ejecución del proyecto se efectuaron ajustes en la ubicación de las estaciones, en relación con la ubicación de los ductos de descargas de las nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas, así como de descargas ubicadas en la zona de modelación. En este último caso se estableció un monitoreo específico, durante el último año de ejecución del proyecto.

Tal como se observa en la **tabla 1**, se establecieron 41 estaciones, de las cuales 29 están ubicadas en el río y las 12 restantes en ríos o esteros tributarios. Respecto de la estación **A11**, correspondiente al río Putaendo, en períodos de riego no presentó caudal. A su vez, a la estación **A24**, correspondiente al RIL de Coca Cola no se tomó muestras durante el año 2004, debido a que los resultados de los monitoreos dieron parámetros dentro de norma y se prefirió derivar dichos recursos a otras estaciones.

Los parámetros analizados en unidades, expresión y límites de detección, se señalan en las **tablas 2a y 2b**.

Tabla 1. Estaciones de muestreo para aguas superficiales.

NAME	X	Y	DESCRIPCIÓN
A1	382115,00	6351149,00	Río Blanco después del tranque de relave de la mina Saladillo
A1b	380272,40	6355963,92	Río Blanco sector planta de concentrado (bajo el puente ferroviario)
A2	378853,00	6357696,00	Río Blanco, puente carretero
A3	384373,00	6359455,00	Río Juncal antes de extracción de áridos, posterior cuesta de Caracoles
A4	378350,00	6358409,00	Río Aconcagua después de unión del Juncal con el río Blanco
A5	367784,00	6363239,00	Río Colorado antes de la desembocadura en el río Aconcagua
A6	366162,00	6363633,00	Río Aconcagua después de desembocadura del río Colorado
A7	349234,00	6368088,00	Río Aconcagua sector Las Juntas poniente-campamento
A8	348612,00	6369130,00	Río Aconcagua, Sector El Laberinto (Jardines Familiares).Los Andes
A9	338619,00	6373240,00	Estero Pocuro bajo el puente Pocuro
A9b	337502,05	6374670,67	Río Aconcagua, aguas abajo puente El Rey, post. RIL Pentzke. San Felipe.
A9c	336642,73	6375632,55	Posterior a segunda descarga ESVAL
A10	337030,00	6374148,00	Río Aconcagua debajo del puente de San Felipe
A11	336824,30	6379883,41	Río Putaendo
A11b	344109,56	6376619,76	Después de la planta de tratamiento de la localidad de Sta. María
A11c	338598,17	6387768,42	Después de ESVAL Putaendo
A12	332354,00	6376668,00	Después de la confluencia del río Putaendo con el río Aconcagua
A13	327793,00	6373538,00	Sector Manantiales en Panquehue, río Aconcagua
A13b	325335,85	6371457,72	Sector Panquehue, descarga planta de tratamiento
A14	316714,00	6369438,00	Río Aconcagua después de Chagres
A14b	314732,10	6371627,24	Estero Catemu después de planta de tratamiento de Santa Rosa
A14c	313296,00	6368196,63	Río Aconcagua sector Romeral
A14e	313328,82	6364972,94	Posterior a planta de tratamiento de Llay-Llay
A14d	315025,75	6364533,43	Antes de planta tratamiento Llay-Llay
A19	303412,52	6364922,87	Río Aconcagua Punta Torrejón, sector Ocoa
A19b	292572,00	6383617,00	Estero El Cobre
A19c	293227,00	6380988,00	Estero El Melón
A19d	294192,00	6372792,00	Estero El Litre
A15	293729,00	6370901,00	Río Aconcagua descarga La Calera (pobl. San Miguel)
A16	292386,00	6370893,00	Después de la descarga de Sn Diego, mínimo 100 mts. La Calera
A17	290255,00	6367139,00	La Cruz, Poza Cristalina
A22	288129,08	6360344,53	Después de puente Boco-Quillota, orilla norte del río
A22b	285167,00	6356306,00	Después descarga ESVAL-Quillota
A23	284325,00	6355259,00	Antes de Nehuenco y San Isidro
A23b	282187,00	6353564,00	Después de Nehuenco y Sn Isidro
A18	271806,00	6354907,00	Río Aconcagua bajo el puente Colmo
A20	272046,00	6353850,00	Estero Limache bajo puente Limache (Parque La Victoria)
A24	269504,00	6354164,00	RILES Coca-Cola
A20b	270022,67	6355130,41	Después de desembocadura estero Limache-río Aconcagua (500m.)
A21	266111,00	6354829,00	Río Aconcagua después de la descarga de RPC
A21b	266550,89	6355638,68	Río Aconcagua bajo el puente Gaviota frente BASF

Tabla 2a: Parámetros analizados (unidades, expresión y límite de detección).

PARÁMETROS			
PARÁMETROS FÍSICOS	UNIDAD	EXPRESIÓN	LÍMITE DE DETECCIÓN
Sólidos disueltos totales (105 °C)	mg/ L	S.D.	1
Conductividad Eléctrica	Micromhos	µS	1
pH Laboratorio			0.1

PARÁMETROS QUÍMICOS :ANIONES			
Bicarbonatos	mg/ L	HCO3	0.1
Carbonatos	mg/ L	CO3	0.1
Cloruros	mg/ L	Cl	0.01
Fosfatos	mg/ L	PO4	0.01
N- Amoniaco	mg/ L	N-NH4	0.01
Nitrato	mg/ L	N-NO3	0.01
Nitrito	mg/ L	N-NO2	0.01
Sulfatos	mg/ L	SO4	5

METALES TOTALES			
Calcio	mg/ L	Ca	0.1
Magnesio	mg/ L	Mg	0.1
Potasio	mg/ L	K	0.1
Sodio	mg/ L	Na	0.1
RAS	%		0.1
Dureza cálcica	mg/ L	CaCO3	1
Arsénico	mg/ L	As	0.001
Cadmio	mg/ L	Cd	0.002
Cobre	mg/ L	Cu	0.01
Cromo total	mg/ L	Cr	0.05
Hierro	mg/ L	Fe	0.01
Manganeso	mg/ L	Mn	0.01
Molibdeno	mg/ L	Mo	0.01
Niquel	mg/ L	Ni	0.01
Plomo	mg/ L	Pb	0.01
Zinc	mg/ L	Zn	0.01

METALES DISUELTOS			
Cobre	mg/l	Cu	0.01
Hierro	mg/l	Fe	0.01
Manganeso	mg/l	Mn	0.01
Plomo	mg/l	Pb	0.01

ANIONES	meq		
CATIONES	meq		
BALANCE IONICO	c/a		

Tabla 2b: Parámetros analizados (unidades, expresión y límite de detección).

MATERIA ORGÁNICA	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE DETECCION
DQO	mg/ L	DQO	
Aceites y grasas	mg/ L		5
Detergentes SAAM	mg/ L	SAAM	0.1
DBO5	mg/ L	O2	0.5

PLAGUICIDAS	UNIDAD	EXPRESIÓN µg/mL/cuentas	LIMITE DETECCION
2,4-D	µg/L		1
Atrazina	µg/L		1
Cianazina	µg/L		0.5
Simazina	µg/L		5
Dimetoato	µg/L		5
Lindano	µg/L		0.1
Captan	µg/L		2

OTROS ORGANICOS			
Bifenilos policlorados (PCB's)	µg/L		0.1
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	µg/L		0.2
Tetracloroeteno	mg/L		0.01
Tolueno	mg/L		0.01

FRACCIÓN ELEMENTOS DISUELTOS			
Cobre	%		
Hierro	%		
Manganeso	%		
Plomo	%		

Con respecto a los **análisis microbiológicos**, los resultados son expresados como número más probable (NMP) para Coliformes totales, Coliformes fecales y Enterococos fecales. Se entrega además un Índice Coliformes fecales y Enterococos fecales (CF/EF).

Los análisis ecotoxicológicos consisten en bioensayos de toxicidad que se aplicaron a la totalidad de las muestras, actividad que se explica más adelante.

5.2.2 Monitoreo

Los muestreos se realizaron tres veces al año, de acuerdo a las variaciones del caudal del río (alto, medio y bajo).

Las muestras fueron tomadas con envases de vidrio ámbar de boca ancha de 2,5 L para análisis de plaguicidas y otros orgánicos, envases de plástico de 2 L para análisis de metales, envases de plástico de 5 L para análisis de nutrientes, sólidos disueltos totales DBO₅ y DQO, envases de vidrio estériles de 250 ml para análisis microbiológicos y 2 envases de vidrio ámbar de boca angosta de 1 L c/u para bioensayos de toxicidad.

5.2.3 Evaluación de la calidad del agua

Los parámetros medidos son comparados con la **Norma Chilena Oficial Nch 1333** y la **Guía CONAMA para el establecimiento de “Normas de Calidad para la Protección de Aguas Continentales Superficiales”**.

Análisis y evaluación de la información

Una vez determinadas las excedencias y las variaciones de éstas en el tiempo, se relacionaron los datos con la toxicidad detectada y los caudales, integrándose los datos en el SIG, efectuándose un análisis espacial. Los resultados permitieron determinar las clases de calidad objetivo, señaladas en la Guía de CONAMA (calidad secundaria). Dicha guía establece las normas secundarias de calidad ambiental de las aguas continentales superficiales, para la captación de agua para potabilizarla, para el riego, para el desarrollo de la acuicultura, para la pesca deportiva y recreativa, para mantener y recuperar el estado trófico de los cuerpos lacustres, para bebida de animales, para la conservación de las comunidades acuáticas y para la protección de los cuerpos y cursos de agua de calidad excepcional.

En el artículo 8°, la Guía define las siguientes clases de calidad asociadas a la protección de las aguas continentales superficiales, de la comunidad acuática y sus usos prioritarios:

- **Excepcional:** Indica un agua de mejor calidad que la clase 1, que por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte del patrimonio ambiental de la República. Es adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas.
- **Clase 1:** Muy buena calidad. Indica un agua apta para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para riego irrestricto y para los usos comprendidos por las clases 2 y 3.
- **Clase 2:** Buena calidad. Indica un agua apta para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa y para los usos comprendidos en la clase 3.
- **Clase 3:** Regular calidad. Indica un agua adecuada para la bebida de animales y para riesgo restringido.

Por lo tanto, se utilizaron los valores máximos y mínimos expresados como concentraciones o unidades totales en los compuestos o elementos señalados en la tabla N°2 del artículo 6°, en los tramos determinados por la DGA (CADE IDEPE, 2003), aplicándose el percentil 66.

Dichos tramos, los cuales se señalan en la tabla 3 y se grafican en la figura 16, fueron determinados por la consultora y ratificados por la DGA, sobre la base de los usos prioritarios actuales, potenciales o futuros, la existencia de comunidades acuáticas y la calidad existente.

Tabla 3: Tramos determinados por la DGA para la definición de las clases de calidad objetivo en la cuenca del río Aconcagua

Cauce	Límites Segmentos	
	Inicia en:	Termina en:
Río Colorado	Límite Cuenca	Río Riecillos
	Río Riecillos	Río Aconcagua
Río Juncal	Límite Cuenca	Estero Ojos de Agua
	Estero Ojos de Agua	Río Blanco
	Río Blanco	Estero Morado
Río Blanco	Estero Morado	Río Barriga
	Río Barriga	2/3 Río Blanco
	2/3 Río Blanco	Conf. Río Juncal
Río Aconcagua	Conf. Río Aconcagua	Límite Subsubcuenca
	Límite Subsubcuenca	Estero Pocuro
	Estero Pocuro	Río Putaendo
	Río Putaendo	Estero Catemu
	Estero Catemu	Estero Los Loros
	Estero Los Loros	Estero Los Litres
	Estero Los Litres	Quillota
	Quillota	Estero Limache
Río Putaendo		Rocin
	1/3 Río Putaendo	2/3 Río Putaendo
	2/3 Río Putaendo	Río Aconcagua
Estero Quilpué	Estero El Cobre	Río Aconcagua
Estero Pocuro	Qda.El Blanqueto	Qda.Las Mananas
	Qda.Las Mananas	Estero La Cuesta
	Estero La Cuesta	Río Aconcagua
Estero Catemu	Estero Gómez	Río Aconcagua
Estero Los Loros	Estero Las Chilcas	Río Aconcagua
Estero Los Litres	Estero El Melón	Río Aconcagua
Estero Limache	Laguna Sin Nombre	Embalse
	Embalse	Embalse
	Desague Embalse	Río Aconcagua

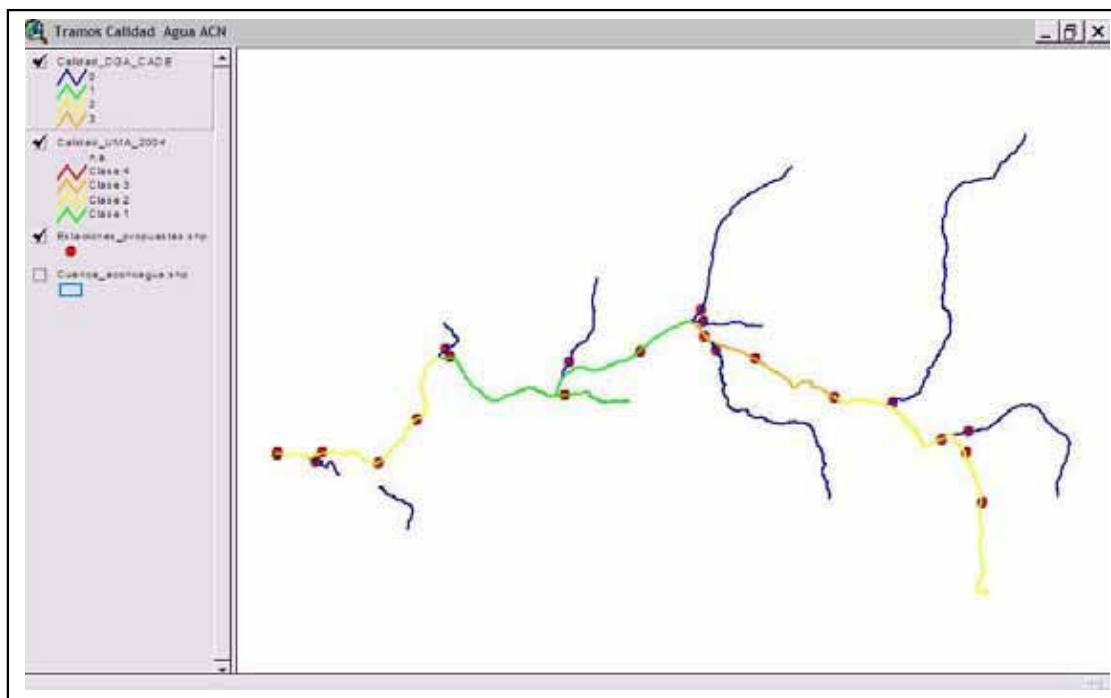


Figura 16: Mapa temático de los tramos determinados por la DGA, con sus respectivas clases de calidad según CADE IDEPE, 2003.

A su vez, se obtuvo valiosa información para efectos de la modelación de calidad en aguas superficiales, para lo cual se diseñó un monitoreo específico durante el último año de ejecución. Se realizó un análisis con los resultados de toxicidad obtenidos con los bioensayos, los cuales demostraron mayor sensibilidad que la analítica tradicional, sobre todo con respecto a las excedencias de cobre.

Finalmente, la integración de la información obtenida y el análisis espacial, ambos efectuados a través del SIG, permitieron diseñar una carta de calidad ambiental para la cuenca (**Figura 17**).

5.2.4 Monitoreos específicos

A partir de la delimitación de las áreas pilotos (Universidad Mayor, 2004), se efectuó un monitoreo de dos campañas en canales de riego con el objeto de detectar la presencia de plaguicidas, considerando la encuesta realizada a los tres estratos de agricultores.

Los plaguicidas seleccionados fueron los siguientes:

Acefato, benomyl, dicamba, captan, clorpirifos, deltametrina, diazinon, dimetoato, endosulfan, imidacloprid, metil azinfos, metalaxil, metamidofos y trifluralin.

La 1ª campaña se realizó los días 12 (área piloto sector Quillota) y 18 de octubre (área piloto sector San Felipe) y la 2ª el 29 de diciembre de 2004 (área piloto sector Quillota) y el 4 de enero de 2005 (área piloto sector San Felipe).

Con respecto a las industrias seleccionadas para ser monitoreadas, éstas fueron las siguientes:

- Algas Marinas Algamar (La Calera)
- Planta de tratamiento de aguas servidas El Molino Esval S.A. (Quillota)
- Central Termoeléctrica Nehuenco (Quillota)
- Central Termoeléctrica San Isidro (Quillota)

Los parámetros seleccionados fueron pH, OD, temperatura, conductividad eléctrica, bicarbonato, carbonatos, cloruros, nitrato, sulfatos, calcio, cobre, magnesio, manganeso, sodio, RAS, DBO₅ y Coliformes fecales.

El monitoreo consistió en cuatro campañas, las cuales se efectuaron en septiembre, octubre, noviembre y diciembre de 2004.

La descripción de las estaciones de toma de muestra, con sus coordenadas UTM, se expone en la tabla 4.

En las figuras 17 y 18 se muestran los mapas con las estaciones de toma de muestra de los canales de las áreas pilotos seleccionadas.

Los resultados de este monitoreo se explican en detalle en el capítulo 9 del tomo IIB del presente informe.

Tabla 4: Estaciones de toma de muestra para detección de plaguicidas en canales de riego.

Código	X	Y	DESCRIPCIÓN
C1	291948	6365415	La Cruz. Calle Larga
C2	290988	6364683	Waddington. La Cruz
C3	289110	6357376	Agroservicios. Packing. Antes YPF. Limache
C4	287460	6356153	Después YPF. (camino San Pedro. Calle de tierra)
C5	286851	6355754	Troncal Paradero 8. San Pedro.
C6	286704	6355833	Troncal Norte Paradero 8. San Pedro.
C7	285674	6355133	Cruce Valparaíso/San Pedro.
C7b	285535	6355213	Cruce Limache con Valparaíso.
C8	284637	6354237	Las Garzas. I
C8b	284969	6354216	La Cabaña. Carretera internacional antes de Las Garzas.
C9	284635	6354271	Las Garzas II
C10	283523	6352925	Frente fundo Calafate.
C11	285635	6353181	Frente a Lechería. Sector Las Cruzadas
C12	287542	6353928	Estero San Pedro. Al lado línea del tren.
C13	286193	6354453	Puente San Pedro. Carretera Internacional.
A23	283948	6354900	Río Aconcagua. Las Garzas.
A23c	282925	6353473	Estero San Isidro.
C14	332855	6376384	El Escorial. Callejón del río.
C15	331040	6374351	Camino Caja de Compensación.Sector Palomar.
C16	328176	6372949	Calle Antofagasta. Bombero. Panquehue.
C17	328078	6373178	Calle Antofagasta. Lado medialuna. A 100 m del anterior.
C18	328568	6371614	Calle Antofagasta.Camino a Viña Errázuriz. Lado paradero naranjo.
C19	329343	6369141	Viña Errázuriz.
C20	324872	6369578	Sector Lo Flanco. Cam. Interior, lado cancha fútbol. I
C21	324873	6369087	Sector Lo Flanco. Cam. Interior, lado cancha fútbol.II. A 100 m del ant.
C22	324967	6368828	Sector Lo Flanco. Cam. Interior, lado cancha fútbol.III.
C23	323400	6369743	Ruta 60. Sector El Mirador. Álamos cortados.
C24	316726	6370878	Camino Chagres. Catemu. Sector Arrayán lado casa roja.
C25	318039	6374333	Camino La Colonia. Frente escuela agrícola. Antes puente. Canal que sube
C26	316348	6375304	Final camino la colonia. Frente a gruta.
C27	318590	6377340	Camino las compuertas, estero.
C28	315017	6371871	Camino a Romeral, puente Sta.Rosa. Estero Catemu.

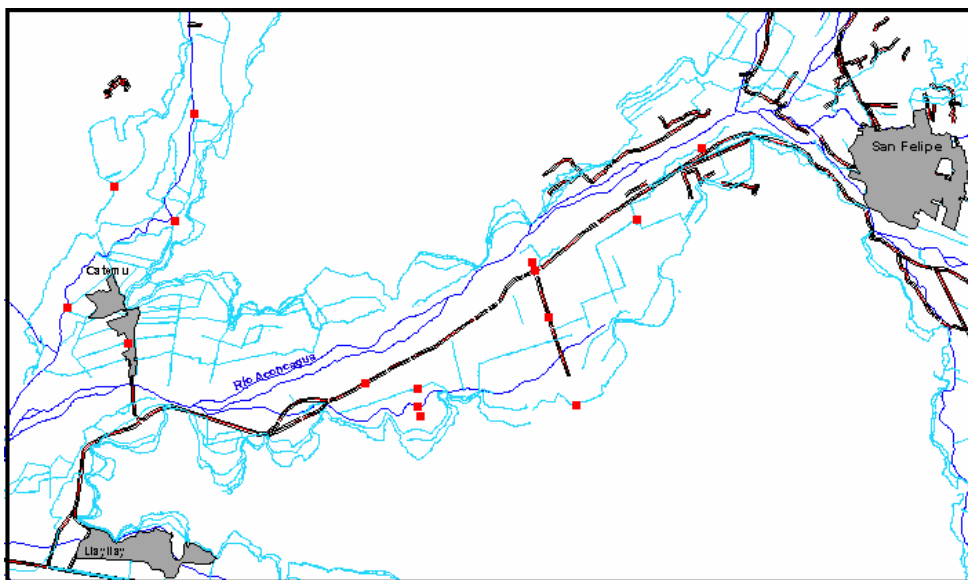


Figura 17: Mapa que indica las estaciones de toma de muestra en los canales del área piloto sector San Felipe

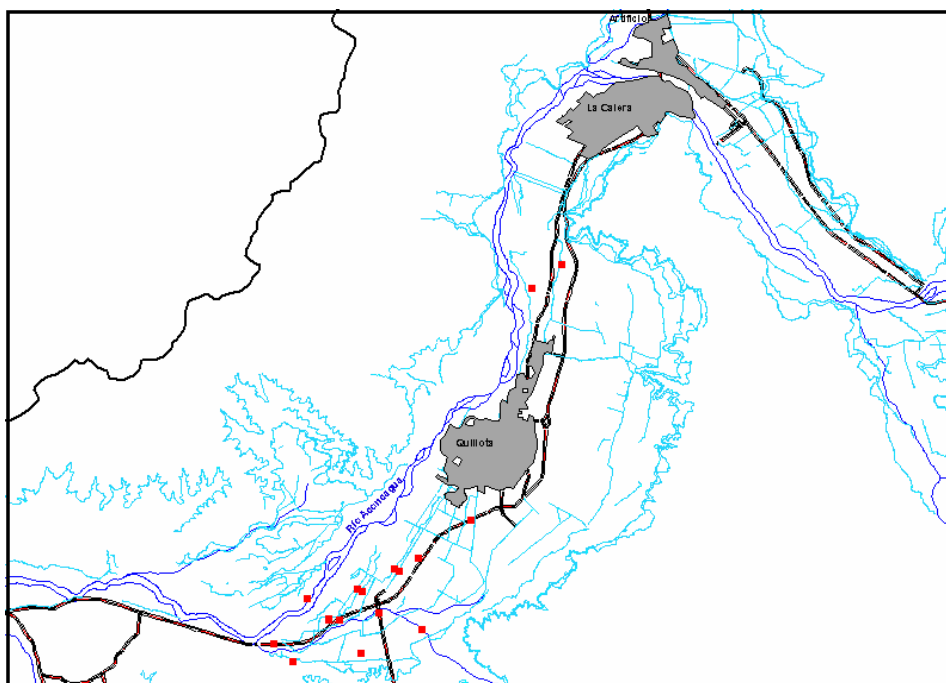


Figura 18: Mapa que indica las estaciones de toma de muestra en los canales del área piloto sector San Felipe.

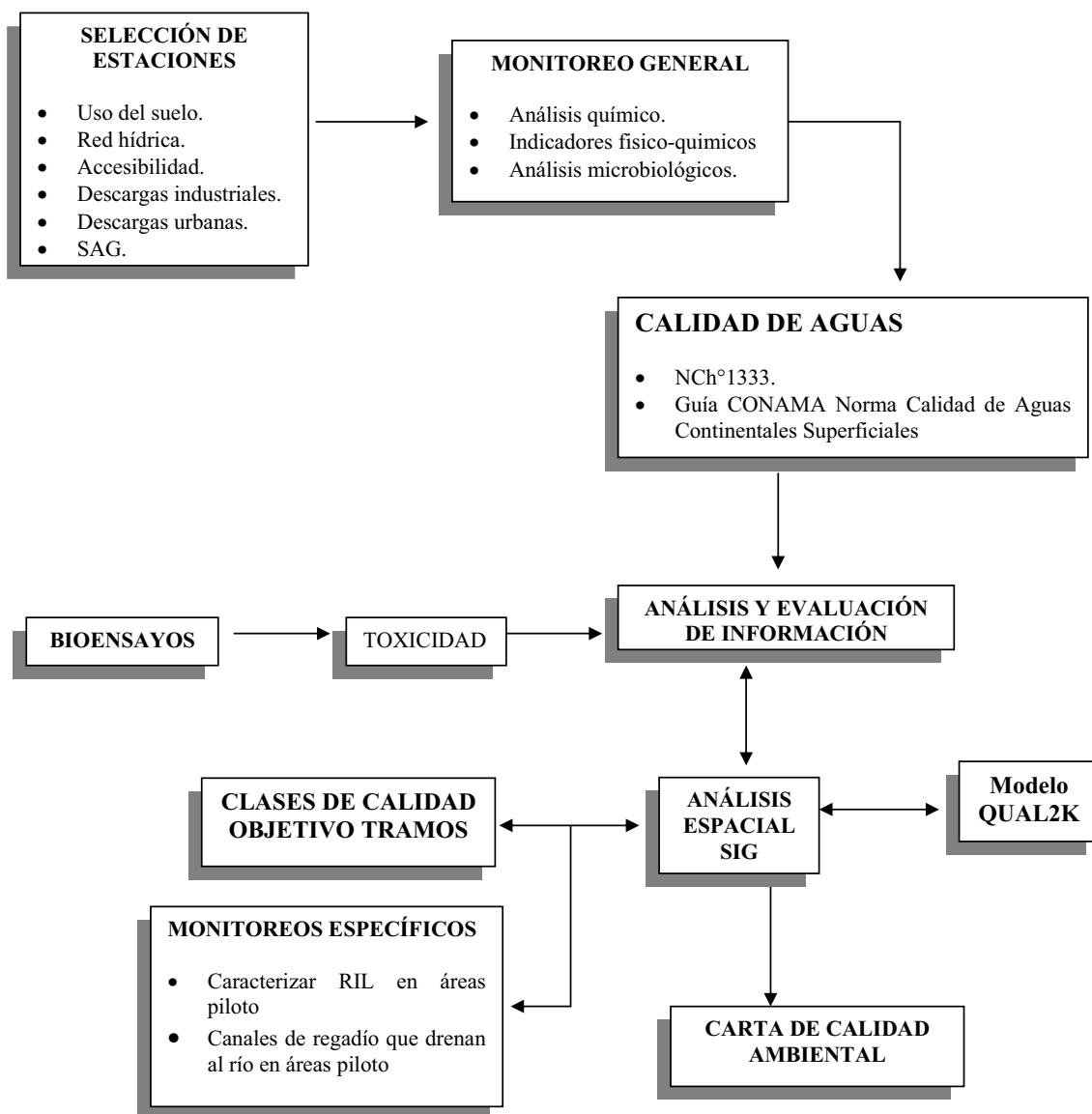


Figura 19: Diagrama conceptual de la matriz aguas superficiales

5.2.5 Ecotoxicología

a) Introducción

La toxicología acuática surgió a partir de dos disciplinas: biología de la contaminación del agua y limnología. El desarrollo de dichas disciplinas se extendió por unos 120 años en Europa y Estados Unidos y fueron incluyendo investigaciones básicas para definir e identificar la biología y morfología de lagos, canales y ríos, así como la interacción de las plantas, animales y microorganismos con ellos, de manera de reducir la contaminación orgánica (Newman, 1979).

Grandes esfuerzos se extendieron a través de los años en busca de organismos que fueran sensibles a los cambios ambientales. Este esfuerzo fue igualado paralelamente por intentos similares para cultivar y hacer pruebas en organismos sensibles en condiciones de laboratorio. La creencia era que los organismos probados en el laboratorio, proveían un medio para evaluar efectos observados en ecosistemas naturales y así se podía determinar efectos futuros de perturbaciones antrópicas y naturales (Forbes y Sanderson, 1978).

Algunas de las primeras pruebas de toxicidad aguda fueron realizadas por Penny y Adams (1863) y Weigelt, Saare y Schwab (1885) quienes enfocaron su atención en los químicos tóxicos de aguas de desechos industriales. En 1924, Carpenter publicó el primero de muchos reportes sobre la toxicidad de iones de metales pesados de minas de plomo y zinc para peces (Handbook of Ecotoxicology, 1995).

Posteriormente, las investigaciones de la toxicidad de varios metales sobre una amplia variedad de organismos, fueron profundizadas y extendidas por miles de publicaciones a través de los años, obteniendo en 1930 y 1940 una base para interpretar pruebas químicas con una visión para incorporar pruebas de efectos biológicos al proceso de tratamiento de las aguas de desecho y expandir información básica disponible sobre la tolerancia de especies, metabolismo y energética. La publicación de 1951 de Doudoroff's presentó los primeros estándares de procedimientos, los cuales eventualmente fueron incluidos en los **“Métodos estándares para el examen de aguas y aguas de desecho”**. Los métodos de pruebas acuáticas fueron estandarizados y auspiciados por la EPA, quien también publicó un reporte clásico titulado **“Métodos estándares para pruebas de toxicidad aguda en peces invertebrados”**, quien fue el inicio de múltiples desarrollos de estándares acuáticos y fue usado a nivel mundial (Adams *et al*, 1992)

El concepto de criterio de calidad de agua (WQC) fue formulado poco después de la segunda guerra mundial y le siguieron diversas publicaciones quienes se centraban en las concentraciones químicas que no debían ser excedidas, de manera de proteger la vida acuática. De manera que WQC, se define entonces, como los datos científicos utilizados para juzgar que límites de variación o alteración del agua no van a causar un efecto adverso en la utilización del agua por parte del hombre u organismos acuáticos (Adams *et al*, 1992).

En 1976, la EPA publicó una guía de estándares para establecer el criterio de calidad de agua para la vida acuática, basándose previamente en los mejores datos de toxicidad aguda y crónica, seleccionando niveles de protección de la vida acuática (Adams *et al*, 1992).

El Acta Federal de Insecticidas, Fungicidas y Rodenticidas (FIFRA, 1972), el Acta de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA, 1976), entre otras, sumado a la introducción de las pruebas de toxicidad, forman parte del **Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes** (NPDES, 1989) y tienen considerado dentro de sus requerimientos información de toxicología acuática. Actualmente existen conocidos métodos estándares para numerosas especies de agua dulce y especies marinas, entre ellas peces, invertebrados y algas que utilizan agua y sedimento ambiental (Adams *et al*, 1992).

Se define como bioensayo al método utilizado para evaluar la potencia relativa de un agente químico sobre organismos vivos a través de la comparación de ese agente con el efecto de una solución patrón o estándar. Por otra parte, es posible definir a un ensayo de toxicidad como el método necesario para detectar y evaluar la capacidad inherente a un dado agente en producir efectos tóxicos sobre los organismos vivos. Su objetivo primario, además de la obtención de datos para determinar los efectos sobre los sistemas biológicos, es la caracterización de la relación dosis-respuesta para el agente (Larrai, 1995).

A lo largo del tiempo, se han desarrollado distintos tipos de ensayos de toxicidad. Las principales diferencias entre ellos están centradas en las concentraciones de tóxicos empleadas y en la longitud de la exposición al mismo. Sin embargo, todos los bioensayos tienen algunas características que les son comunes (Moriarty, 1984):

- Exposición al tóxico de grupos de organismos, pertenecientes a la misma población, en buenas condiciones de salud, aclimatados previamente a las condiciones del ensayo.
- Organismos mantenidos en condiciones ambientales constantes y estandarizadas (calidad de agua, temperatura, oxígeno disuelto, iluminación, fotoperíodo, pH, salinidad) antes y durante el ensayo.
- Exposición a concentraciones graduadas del agente tóxico, seleccionadas apropiadamente;
- Disposición de grupos de control adecuados;
- Al final o durante la exposición, observación minuciosa de los signos de toxicidad presentes;
- Medición y registro detallado de los efectos biológicos observados en cada uno de los grupos control y tratados;
- Observación patológica de los grupos control y tratados, al finalizar el ensayo, en caso de ser posible.
- Apropiado análisis estadístico de los datos obtenidos.

Los bioensayos han sido desarrollados por agencias internacionales de normalización y protección ambiental, se caracterizan por ser reproducibles, rápidos y fácilmente interpretables (EPA, 1991a; CEE, 1984; ISO, 1989, citados por Centro EULA-Chile, 2002).

Las actividades antropogénicas que modifican una cuenca pueden provocar efectos adversos sobre los cuerpos de agua receptores, no sólo del punto de vista de la exposición a contaminantes, sino también, de los efectos que ellos puedan provocar en la biota acuática desde la perspectiva ecotoxicológica. Los ecosistemas acuáticos son receptáculo de una gran cantidad de contaminantes químicos, provenientes tanto de fuentes industriales (efluentes industriales y domésticos), como difusas (agrícolas, forestales). En la evaluación del riesgo ecológico de estos

contaminantes, se debe considerar tanto la exposición como sus efectos sobre los organismos que habitan estos ecosistemas (Van Leeuwen, 1990).

Existe interés en el uso de pruebas de toxicidad para determinar la calidad de efluentes y cursos de aguas. Los resultados de las pruebas de toxicidad para efluentes se utilizan para determinar o establecer las tasas de descarga de los efluentes que puedan minimizar los efectos tóxicos sobre la biota en los cuerpos receptores (USEPA, 1993)

b) Uso de bioensayos en la evaluación de contaminación acuática

Este trabajo se realizó sobre la base de la aplicación de bioensayos de toxicidad para determinar los posibles efectos generados por las fuentes puntuales y difusas sobre la biota acuática, efectuándose bioensayos de toxicidad a todas las estaciones de toma de muestras de aguas superficiales de la cuenca.

Durante la primera campaña, se realizó el bioensayo de toxicidad crónica con *Ceriodaphnia dubia* (USEPA, 1993) y el de inhibición de crecimiento con la microalga *Selenastrum capricornutum* (*Raphidocelis subcapitata*) bioensayo oficializado en la **Norma Chilena Oficial NCh 2706.c Of 2001**.

En las campañas posteriores, la *Ceriodaphnia dubia* fue reemplazada por *Daphnia pulex*, por ser una especie más manejable en laboratorio, menos compleja su mantención y existir un protocolo oficializado en Chile, bajo la **Norma Chilena Oficial NCh2083-1999**. Una característica relevante de esta especie, es que es autóctona de Chile, se ha encontrado en los lagos Chungará, Negra, Pirihueico, Ranco, Rupanco, Todos los Santos, Pólux y Lynch (Boletín Informativo Limnológico, 1985 citado por Universidad de Concepción, 2002)

c) Bioensayo de toxicidad aguda con *Daphnia pulex*

Este método permitió medir el efecto inhibitorio de la muestra obtenida, sobre la movilidad de neonatos de *Daphnia*, en condiciones de laboratorio controladas. Se determinó la concentración de la muestra que en 24 ó 48 horas inmoviliza el 50% de los organismos expuestos, asumiendo dicha respuesta fisiológica, como equivalente a mortalidad de los ejemplares

- Se colocaron las muestras, en matraces Enlarmeyer de 250 ml, donde fueron oxigenadas a saturación, ambientadas a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y ajustados sus pH. Luego se prepararon con agua de dilución necesaria, a lo menos 5 rangos de concentraciones deseadas, según la muestra problema.
- Fueron dispuestos 5 frascos de vidrio transparente por cada concentración ensayada, de ellos, 1 frasco fue considerado como pre-cámara y los 4 restantes, como las réplicas. A cada uno de estos 5 frascos se les distribuyó 10 ml de la solución preparada.
- Se colocaron 20 neonatos de menos de 24 horas de edad de *Daphnias* en cada pre-cámara por dilución y a partir de ésta fueron redistribuidos en forma tal, que la densidad alcanzada fue de 5 organismos por cada 10 ml de la misma solución (réplica).

- Se dispuso también un grupo control (1 pre-cámara y 4 réplicas), para cada serie de pruebas, bajo el mismo sistema, sólo que utilizando agua de dilución en igual volumen que el de las soluciones y adicionando el mismo número de organismos por réplica.
- Durante el ensayo todos los organismos fueron mantenidos en oscuridad, en una atmósfera libre de polvo y vapores, a una temperatura de $22^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$, sin recibir alimento ni aireación.
- Al cabo de 24 y 48 hrs., en una planilla, se registraron los porcentajes de las mortalidades observadas en cada concentración, considerando como vivos a aquellos individuos que logran desplazarse por si mismos luego de una leve agitación y aquellos que son incapaces de desplazarse, aún cuando muevan sus antenas, luego de 15 segundos de observación, como inmóviles o muertos.
- Los resultados se consideraron como válidos siempre cuando la mortalidad observada en el grupo control fue menor o igual al 10% del total de la población.
- En aquellos casos en que la menor concentración ensayada presentó un porcentaje de mortalidad superior al 50% de la población, la prueba fue repetida, estableciendo un nuevo set de 5 concentraciones (inferiores), con el fin de obtener un intervalo de concentraciones, en donde se presentara la mortalidad del 50% de la población CL_{50} . El cálculo fue efectuado utilizando los métodos Probit o Spearman Karber, ambos métodos aprobados por la USEPA. (USEPA, 1993).



Figura 17: *Daphnia pulex*



Figura 18: Preparación del bioensayo de toxicidad aguda con el crustáceo *Daphnia pulex*

d) Bioensayo de inhibición de crecimiento con *Selenastrum capricornutum* (*Raphidocelis subcapitata*).

Con respecto al ensayo con microalgas, éstas fueron expuestas a un rango de concentraciones de una muestra de agua superficial, durante un período de incubación bajo condiciones controladas, en el cual se midió la variación de la densidad celular respectiva. El rango de concentraciones que se ensayaron, se obtuvieron preparando mezclas de concentraciones apropiadas de solución de nutrientes, agua, solución stock de sustancia problema y un inóculo en crecimiento exponencial de la microalga. Las soluciones obtenidas fueron incubadas por un período de 96 horas, durante el cual se midió la densidad celular respectiva cada 24 horas. Finalmente la inhibición fue medida como una inhibición en la tasa de crecimiento en relación con cultivos de control realizados en idénticas condiciones al ensayo.

- La cantidad de inóculo, del cultivo stock de alga agregada, se calculó considerando una densidad celular inicial de 20.000 células por 100 ml. y el cultivo debió agitarse bien, previo a la extracción del inóculo.
- Las unidades experimentales de cultivo stock de alga fueron incubadas durante 7 días, para obtener un crecimiento adecuado, a su vez éstas fueron cambiadas diariamente de ubicación en la cámara de cultivo, para minimizar efectos por diferencias de iluminación y temperatura.
- De las muestras analizadas, se registraron los valores de la densidad celular a las 0, 24, 48, 72 y 96 hrs. Estas mediciones se realizaron con un volumen pequeño (medidas de fluorescencia o absorbancia) y sin reemplazar el volumen retirado. Las mediciones de densidad celular se realizaron mediante un espectrofotómetro con absorbancia de 750 nm.

- Una vez finalizado el período de duración del bioensayo, se la tasa de crecimiento (μ) y se calculó la tasa de inhibición del crecimiento del alga ($I_{\mu i}$), mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \frac{\ln N_n - \ln N_0}{t_n} \times 100$$

En que:

t_n : Tiempo transcurrido entre el inicio y fin del bioensayo.

N_0 : Densidad celular inicial nominal.

N_n : Densidad celular al final del bioensayo.

$$I_{\mu i} = \frac{\mu_c - \mu_i}{\mu_c} \times 100$$

En que:

$I_{\mu i}$: Porcentaje de inhibición de la tasa de crecimiento para la concentración i

μ_i : Tasa de crecimiento promedio para la concentración i

μ_c : Tasa de crecimiento promedio para el control

N_n : densidad celular medida al tiempo t_n .



Figura 19: Microalgas *Selenastrum capricornutum*

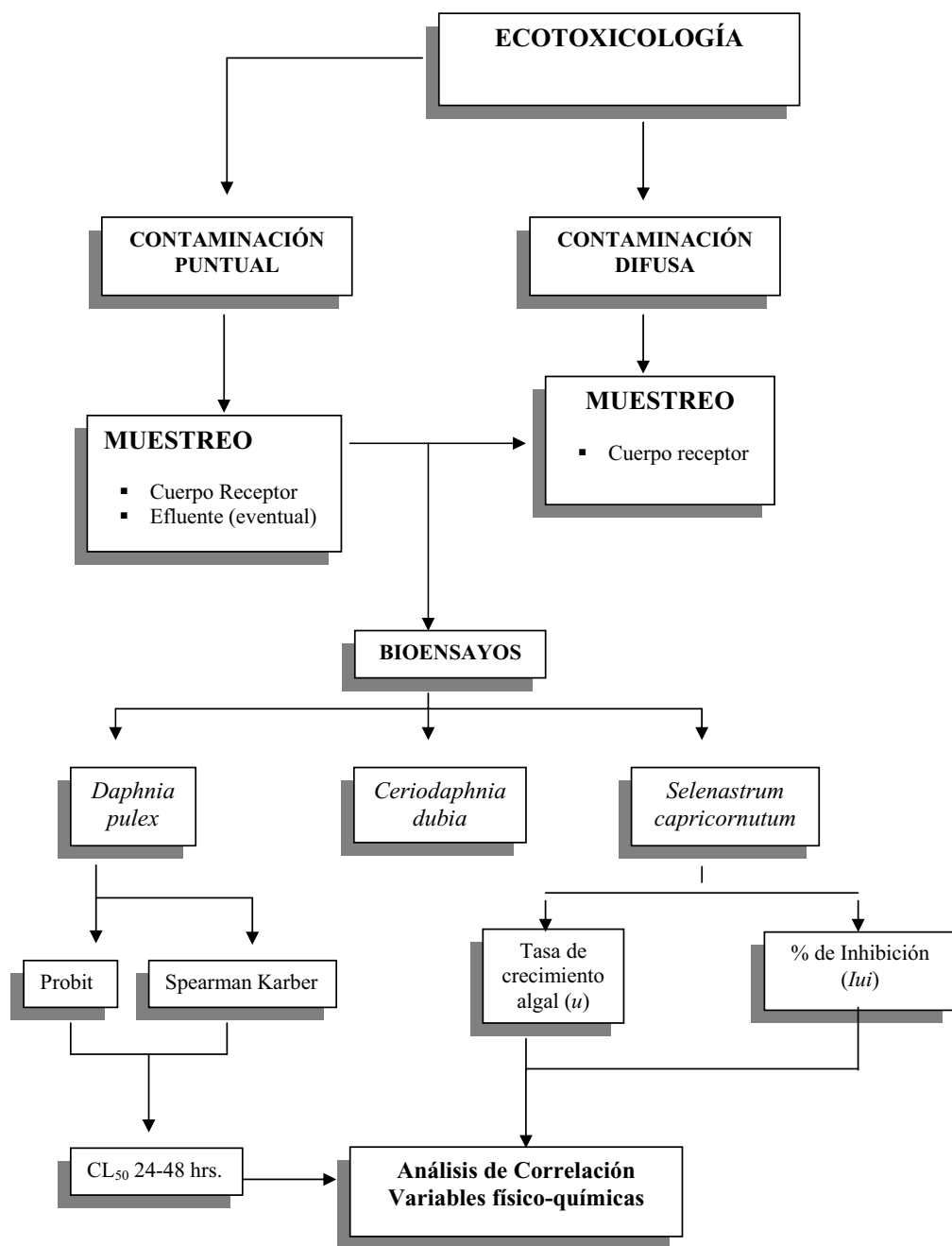


Figura 20: Diseño conceptual del estudio ecotoxicológico

5.3 REFERENCIAS

ADAMS, W.J. KIMERLE, R.A. & BARNETT, J.W. JR, 1992. Sediment quality and aquatic life assessment, *Environ. Sci. Technol.*,25.

CENTRO EULA-CHILE, 2002. Desarrollo de una Metodología para la Evaluación y Mitigación de la Contaminación de aguas y suelos: Aplicación a la cuenca del río Chillán. Informe Final. Parte I: Aspectos Metodológicos.

COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE, 2004. Política ambiental de la Región de Valparaíso. Disponible en: http://www.conama.cl/portal/1255/article-26207.html#h2_4

FORBES, R. M. & SANDERSON, G.C. 1978. Lead Toxicity in domestic animals and wildlife, in "The Biogeochemistry of lead in the environmental", Parte B, Nriagu, J.O.Ed. Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam, Capítulo 16.

LARRAÍN, A. 1995. Criterios Ecotoxicológicos para evaluar alteraciones ambientales y establecer parámetros de control: importancia de los bioensayos de toxicidad. *Cienc. Tec. Mar, CONA* (Nº especial) : 39-47.

MORIARTY, F. 1984. Ecotoxicología. El estudio de los contaminantes en ecosistemas. Ed. Academia, León, España: 248 p.

NEWMAN, J. R. 1979. Effects of Industrial air pollution on wildlife, *Biol. Conserv*,15, 181

PENNY, C. &ADAMS, C. 1863. Fourth report royal commission on pollution in Scotland, *London*, 2, 377,.

SPIRO T. G. & STIGLIANI W. M. 2004. Química Medioambiental. 2ª Edición. Pearson Educación S. A. Madrid, 2004.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, 2002. Curso teórico-práctico de Ecotoxicología: Aplicación de la Ecotoxicología en la gestión ambiental de residuos industriales líquidos. Universidad de Concepción, Laboratorio de bioensayos.

USEPA, 1993. Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluents en Receiving Water to Freshwater and marine organisms. Fourth Edition (United States Environmental Protection Agency. Office of Research and Development Washington DC 20460 EPA/600/4-90/027F August 1993). Edited by Cornelius I. Weber. Environmental monitoring systems laboratory-Cincinnati. Office of Research and Development US. EPA Cincinnati, OHIO 45268. EPA/600/4-90/027F.

UNIVERSIDAD MAYOR, 2004. Informe de avance Proyecto Fondo SAG. Criterios de Selección del área piloto. Desarrollo de una metodología para la evaluación de la contaminación de aguas y suelo: Aplicación a la cuenca del río Aconcagua. Julio 2004.

VAN LEEUWEN. 1990. Ecotoxicological effects assessment in the Netherlands: Recent Developments. *Environmental Management*. Vol. 14. No 6 : 779-792.

WEIGELT, C., SAARE O. & SCHWAB, L., 1885. Die Schädigung van fischerei und fischzucht durch industrie und haus abwasser, *Archiv für Hygiene*, 3, 39.

CAPÍTULO 6: CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

6.1 OBJETIVO

Determinar las características físicas, químicas, microbiológicas y ecotoxicológicas de las aguas subterráneas en áreas de actividad agropecuaria en la cuenca del río Aconcagua.

6.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Una gran dificultad que se presentó para llevar a cabo este trabajo, fue la existencia de fondos limitados para financiar un monitoreo de una gran cantidad de pozos, producto de que se privilegió el monitoreo de las aguas superficiales, a solicitud del SAG, en que se debió incrementar el N° de estaciones de toma de muestras. Por tanto, los dos primeros años de ejecución del proyecto se circunscribieron al monitoreo de 10 pozos seleccionados en áreas de agricultura intensiva y de altos niveles de aplicación de plaguicidas (2ª sección), de buena accesibilidad, considerando la red hídrica (red de canales, cercanía al río Aconcagua y otros) y la sugerencia directa del SAG.

Los parámetros analizados se señalan en las tablas 5 y 6.

A su vez, a las muestras se les realizaron bioensayos de toxicidad con *Daphnia pulex* y *Selenastrum capricornutum*.

Los resultados de los análisis físico – químicos y microbiológicos, fueron comparados con los límites máximos permitidos en la **NCh 409**, sólo como referencia, ya que no existe una norma de calidad de aguas subterráneas.

Tabla 5: Parámetros, unidad, expresión y límite de detección utilizados para plaguicidas en muestras de aguas subterráneas.

PLAGUICIDAS	UNIDAD	µg/mL/cuentas	LIMITE
2,4-D	µg/L		1
Atrazina	µg/L		1
Cianazina	µg/L		0.5
Simazina	µg/L		5
Dimetoato	µg/L		5
Lindano	µg/L		0.1
Captan	µg/L		2

Tabla 6: Parámetros, unidad, expresión y límite de detección utilizados en las muestras analizadas.

PARÁMETROS			
PARÁMETROS FÍSICOS	UNIDAD	EXPRESIÓN	LÍMITE DE DETECCIÓN
Sólidos disueltos totales (105 °C)	mg/ L	S.D.	1
Conductividad Eléctrica	Micromhos	μS	1
pH Laboratorio			0.1

PARÁMETROS QUÍMICOS:			
ANIONES			
Bicarbonatos	mg/ L	HCO ₃	
Carbonatos	mg/ L	CO ₃	
Cloruros	mg/ L	Cl	0.01
Fosfatos	mg/ L	PO ₄	0.01
N- Amoniacal	mg/ L	N-NH ₄	0.01
Nitrato	mg/ L	N-NO ₃	0.01
Nitrito	mg/ L	N-NO ₂	0.001
Sulfatos	mg/ L	SO ₄	5

METALES TOTALES			
Calcio	mg/ L	Ca	0.1
Magnesio	mg/ L	Mg	0.1
Potasio	mg/ L	K	0.1
Sodio	mg/ L	Na	0.1
RAS	%		
Dureza cálcica	mg/ L	CaCO ₃	0.1
Arsénico	mg/ L	As	0.001
Cadmio	mg/ L	Cd	0.002
Cobre	mg/ L	Cu	0.01
Cromo total	mg/ L	Cr	0.05
Hierro	mg/ L	Fe	0.01
Manganeso	mg/ L	Mn	0.01
Molibdeno	mg/ L	Mo	0.01
Níquel	mg/ L	Ni	0.01
Plomo	mg/ L	Pb	0.01
Zinc	mg/ L	Zn	0.01
ANIONES	meq		
CATIONES	meq		
BALANCE IONICO			

6.2.1 Nuevo diseño de monitoreo de aguas subterráneas

Una vez seleccionada el área de modelación, el año 2004, considerando las áreas de mayor riesgo ambiental, se diseñó un monitoreo específico de pozos en dicho sector, en estrecha coordinación con el equipo encargado de la modelación. Las muestras fueron sometidas a análisis de indicadores físico – químicos, análisis químicos y microbiológicos, en directa relación con los requerimientos del modelo Visual Modflow, para determinar la dispersión de contaminantes en aguas subterráneas. Este monitoreo fue efectuado en abril, septiembre-octubre, noviembre y diciembre de 2004.

En la tabla 7 se expone el listado total de pozos muestreados durante la ejecución del proyecto.

Todos los datos obtenidos fueron integrados en el SIG, según se indica en el diagrama conceptual de la **figura 21**.

Tabla 7: Pozos muestreados durante la ejecución del proyecto

Código	X	Y	Descripción del lugar
P1	333625	6376293	Las Tinajas. Panquehue.San Felipe
P-01	346887	6373141	El Alamo. San Felipe
P-02	346884	6373143	El Chepical. Sta. María.San Felipe
P-03	314737	6363943	La Palmas. Llay-Llay.San Felipe
PO4	334777	6376474	ISAF
PO10	331926	6375352	Predio Rafael Hernández
PO12	287294	6355408	Parcela La Hera.Quillota
PO13	286317	6355379	Alimentos Grotte, paradero 8. Quillota
PO14	287557	6354055	Fundo Sta. Rosa.San Pedro
PO15	284035	6353329	Predio Lo Venezia.Quillota
PO16	282666	6353206	Parcela 7. Ex Fundo El Palomar.San Isidro
PO17	287071	6357293	Fundo Esmeralda. Quillota
PO18	290628	6366881	Parcela 244. Quillota
PO19	356139	6366923	Agrofutura Chile S.A. San Miguel. Los Andes
PO20	352812	6372954	Plantel de cerdos. Aguas Claras. Los Andes
PO21	348880	6359700	El Pedrero. Calle Larga. Los Andes
PO22	339935	6363257	Las Bandurrias de Rinconada. Los Andes.
P-20	292745	6384234	Agrícola Blumen. Los Claveles
P-21	293475	6384206	Huaironco
P-22	291300	6385733	Parcela 21. El Melón
P-23	291816	6382517	El Rungue. El Melón.
P-24	298910	6370142	Jardín Las Palmeras. Hijuelas
P-25	297905	6371845	Predio El Caqui. Parcela 10. La Calera
P-26	294466	6377197	Fundo La Viña. Nogales
P-27	292638	6378619	Fruticola Nogales Ltda.
P-28	292554	6357490	Pozo Cárdenas
P_57	292180	6357183	Pozo Soya
P-33	293753	6359710	Inversiones Quintil S.A.
P-34	294980	6363006	Pocochay
P-35	293521	6365292	Parcela "A" La Verbena
P-36	292220	6366104	Fundo la Cruz
P-37	300804	6363008	Fundo La Leona. Rabuco.Ocoa
P-38	306758	6363982	Agrícola Doña Laura. Vista Hermosa
P-42	333003	6376198	Comité de agua potable. El Escorial. Panquehue
P-44	314260	6371073	Sociedad Agrícola San Antonio. Sta. Rosa
P-45	316849	6368874	Fundición Chagres pozo I
P-46	316765	6369052	Fundición Chagres pozo II
P-47	320949	6367142	Fundo Sta. Adela. Lo Campo
P-48	316772	6368620	Chile tabaco. Chagres.
P-49	316555	6368484	Población Chagres.
P-50	316969	6371693	Fundo San Carlos.
P-51	319131	6377729	Parcela 5. Lo Salas
P-52	317485	6373161	Parcela El Pimiento. Las Varillas.
P-53	316472	6374254	Parcela 53. La Calera. Catemu
P-54	321669	6369411	Población 9 de octubre.Lo Campo.
P-55	317109	6368479	Lechería Santelices. Frente Fundición Chagres.
P_56	282809	6353009	Hernán Muñoz Cavallera
P_57	293142	6362207	Fundo Lo Castaño. Carlos Soya
P_58	331926	6375352	Frente a Rafael Hernández

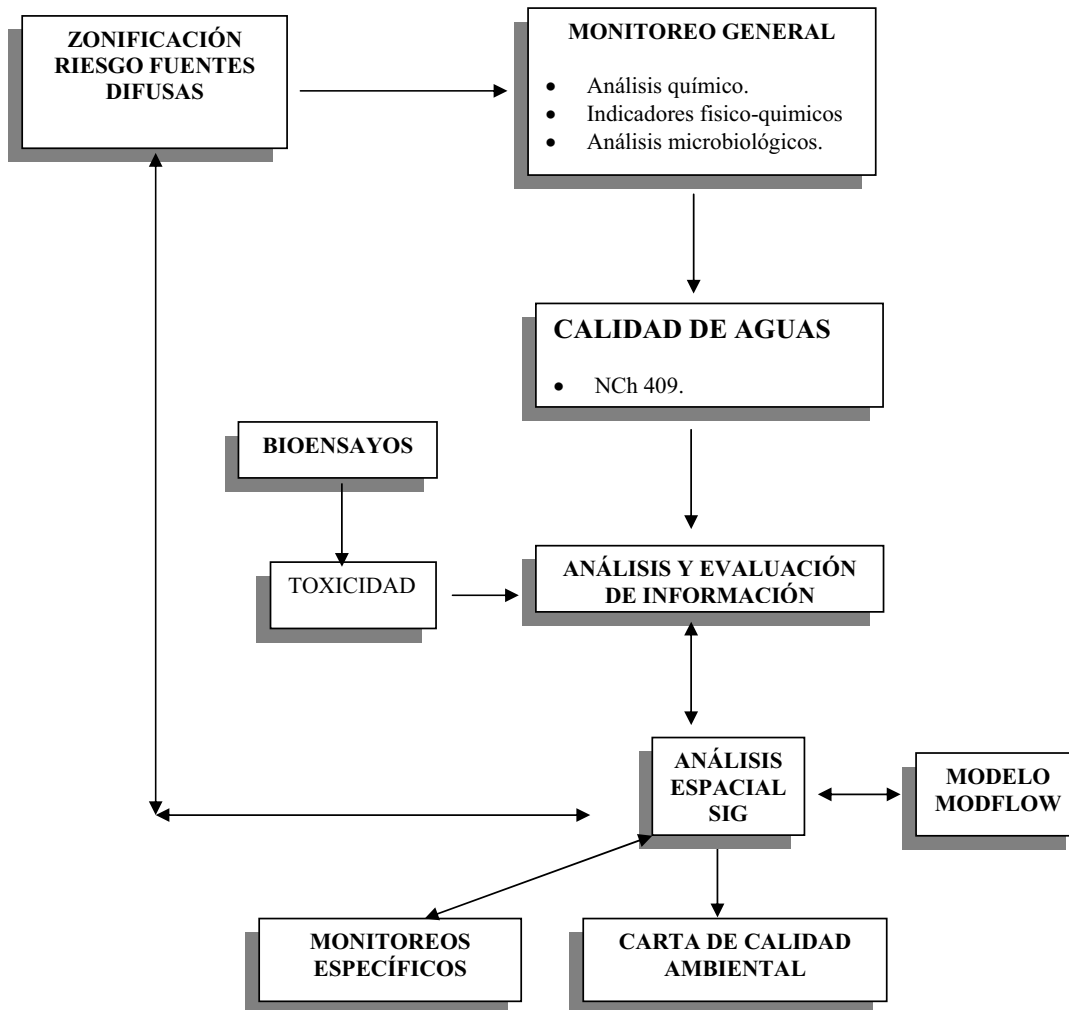


Figura 21: Diagrama conceptual del estudio de la calidad de aguas subterráneas.

CAPÍTULO 7: DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS DEL RÍO ACONCAGUA Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES

7.1 MUESTREO DE SEDIMENTOS

Este trabajo se relaciona con el objetivo de determinar las características sedimentológicas del río Aconcagua y sus principales afluentes, por tanto, durante la 1ª campaña realizada en diciembre de 2001, se tomaron muestras de sedimentos en la totalidad de las estaciones de aguas superficiales, a las cuales se les realizaron análisis de arsénico, cadmio, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, plomo, zinc y materia orgánica. No fue necesario analizar la granulometría de las muestras, ya que la DGA entrega información periódica sobre esta materia en diferentes tramos de la cuenca, la cual fue utilizada en el trabajo de modelación y por tanto, será descrita en el capítulo correspondiente.

Se debe reiterar que las Oficinas Sectoriales del SAG, solicitaron aumentar las estaciones de monitoreo de aguas superficiales, atendiendo necesidades inmediatas, tales como, la evaluación de plantas de tratamiento de aguas servidas nuevas y antiguas y la sospecha de contaminación hídrica de tipo puntual y/o difusa, por tanto, se llegó al acuerdo de priorizar de trabajar principalmente en aguas superficiales, en desmedro del resto de las matrices por el alto costo de los análisis químicos. Por tanto, en las campañas posteriores, se efectuaron muestreos para el análisis de bifenilos policlorinados (PCBs) e hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), para lo cual se seleccionaron siete estaciones durante la 2ª campaña y cinco en las tres campañas siguientes, considerando eventuales hallazgos producto de la actividad industrial río Blanco, luego en el río Aconcagua en Los Andes, a nivel de la descarga ESVAL, después de Chagres, en La Calera y en la desembocadura del río frente a RPC y después de la descarga de Basf.

Posteriormente, en enero de 2004 se efectuó la última campaña de muestreo de sedimentos en 25 estaciones correspondientes a aguas superficiales, efectuándose análisis químicos para la detección de arsénico, cadmio, cobre, manganeso, selenio, vanadio y zinc.

CAPÍTULO 8: DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO POR CONTAMINACIÓN DIFUSA.

8.1 INTRODUCCIÓN

Cuando una sustancia es liberada en el ambiente, las posibilidades de movimiento dentro de éste pueden ser muy amplias, existiendo una compleja interrelación entre los compartimentos ambientales (agua, aire y suelo). Si esta compleja red de interrelaciones fuese considerada como un todo, sería prácticamente inmanejable el estudio del comportamiento de una sustancia en el ambiente. Por lo tanto, para poder realizar estas evaluaciones se ha considerado útil tratar cada compartimiento ambiental como un sistema separado y, a partir de los resultados obtenidos individualmente, generalizar a un todo. (Martínez, 2003).

El estudio de la contaminación difusa se abocó a la aplicación de plaguicidas agrícolas, por ser ésta una cuenca de alta productividad hortofrutícola. Dicho estudio se llevó a cabo sobre la base de un análisis de riesgo del uso de dichos plaguicidas, durante cuatro temporadas. La metodología fue modificándose, durante la ejecución del proyecto, con el fin de obtener valoraciones de riesgo más objetivas, con rangos claramente cuantificables. Dentro de las variables más relevantes se consideraron las siguientes:

- a) **Uso actual del suelo**, separando grupos de cultivos, de acuerdo a la dosis de plaguicidas y sus respectivos **Factores Integrados de Peligrosidad (FIP)**, la frecuencia de aplicación y la carga total por ha.
- b) **Modelo de Vulnerabilidad del acuífero**, determinado en el estudio de Von Igel (1999). Este modelo de vulnerabilidad considera la textura de los suelos, su permeabilidad y la distancia a la napa freática. Por lo tanto, es un excelente punto de partida para determinar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.
- c) **Pendientes del terreno**, separadas en categorías adecuadas para relacionarlas con su capacidad de facilitar el escurrimiento o penetración al subsuelo.

8.2 METODOLOGÍA

A continuación se describen los aspectos metodológicos para llevar a cabo el análisis de riesgo por aplicación de plaguicidas, el cual se compone de tres fases.

8.2.1. Fase I

a) Determinación del Factor Integrado de Peligrosidad

A partir de la encuesta descrita en el Capítulo 3, se obtuvo la información relativa a los plaguicidas utilizados en los distintos cultivos, la dosis aplicada (g ha^{-1}) y la frecuencia de aplicación durante cuatro temporadas.

Con los datos señalados se procedió a determinar el riesgo de contaminación difusa por uso agrícola del suelo, calculando el Factor Integrado de Peligrosidad (FIP), para cada principio activo de los plaguicidas aplicados en la cuenca, mediante una fórmula, modificada de Martínez (2003), la cual utiliza ponderaciones o valores de riesgo, considerando el efecto de los principios activos sobre diferentes compartimentos ambientales, de la forma que se indica a continuación:

- Efectos toxicológicos sobre los mamíferos considerando ponderaciones para **LD₅₀ oral**, **LD₅₀ dermal** y **LC₅₀ inhalatoria** en ratas. La suma de los valores resultantes se multiplica por 5.
- Evaluación de los efectos sobre el ambiente ponderando valores para la Constante de la Ley de Henry (**K_H**) y el Indicador de lixiviación de Gustafson. Dichos valores se multiplican por 3.
- Evaluación de los efectos sobre algas y un crustáceo, los cuales representan un productor primario y un consumidor primario respectivamente, dentro del ecosistema acuático de agua dulce. Finalmente, aves (se utiliza la especie codorniz) y gusanos de tierra.

Por lo tanto, la fórmula queda establecida como sigue:

$$5(\text{VaLD}_{50 \text{ oral}} + \text{VaLD}_{50 \text{ dermal}} + \text{VaLC}_{50 \text{ inhalatoria}}) + 3(\text{VaK}_H + \text{VaGus}) + (\text{VaLC}_{50 \text{ D.pulex}} + \text{VaEC}_{50 \text{ algal}} + \text{VaLC}_{50 \text{ aves}} + \text{VaLC}_{50 \text{ gusanos de tierra}})$$

Donde:

Va: Valoración

K_H: Constante de la Ley de Henry, que mide la volatilidad o dispersión en el aire de un compuesto orgánico a partir del agua o suelo húmedo. Un valor alto de la Ley de Henry, indica que un plaguicida tiene un potencial elevado para volatilizarse del suelo húmedo; un valor bajo predice un mayor potencial de lixiviación del plaguicida. (Jenkins y Thomson, 1999).

Gus: Indicador de lixiviación de Gustafson (Gustafson, 1989).

Donde el cálculo de la Constante de la Ley de Henry (en Pam³mol⁻¹):

$$K_H = \frac{0.12 * K_{vp} * PM}{T^{\circ} (K) * \text{Solubilidad en agua}}$$

Factor: 0,12

K_{vp} : Constante de presión vapor en mPa

PM : Peso Molecular

K : Temperatura en Kelvin

Solubilidad en agua en mg L⁻¹ (pH 7, 22 °C).

Donde el cálculo del Índice de Gustafson:

$$\text{Gus} = \text{Log}_{\text{vida } \frac{1}{2} \text{ suelo}} * (4 - \log_{\text{Koc}})$$

Log_{vida ½ suelo}: Tiempo de residencia o vida media aeróbica del plaguicida en el suelo

Koc: Coeficiente de adsorción de componentes a la fase orgánica del suelo y consecuentemente de su movilidad. Es una medida de la tendencia de un compuesto orgánico a ser adsorbido por los suelos y sedimentos. Un Koc elevado indica que el plaguicida se puede fijar en suelo, sedimento, biota y materia orgánica, puede movilizarse en las aguas superficiales y la vía de exposición puede ser a través de la trama trófica.

Los parámetros empleados en la ecuación se obtuvieron del e-Pesticide Manual 2002-2003, XII Edición, versión 2,2 del British Crop Protection Council, de la base de datos del PAN Pesticides Database, 2004 y de los Manuales Fitosanitarios 1998-1999 y 2002-2003, editados por AFIPA AG.

El siguiente paso consiste en valorar cada uno de los componentes de la fórmula sobre la base de la revisión bibliográfica y del apoyo de expertos, los cuales se indican en las tablas 1-9.

El FIP utiliza valoraciones de riesgo (8 a 16) relacionadas con la clasificación toxicológica que el SAG establece para plaguicidas de uso agrícola en la **Res Ex. N° 2196/2000**, jerarquizando los plaguicidas seleccionados de acuerdo a su peligrosidad.

Tabla 8: Ponderaciones de riesgo considerando LD₅₀ oral en mg kg⁻¹

Impacto Oral (mg/kg)	
LD50 Oral	Riesgo
< 5	5
5-50	4
50-500	3
500-2000	2
>2000	1

Fuente: Servicio Agrícola y Ganadero, 2000.

Tabla 9: Ponderaciones de riesgo considerando LD₅₀ dermal en mg kg⁻¹

Impacto Dermal (mg/kg)	
LD50 Dermal	Riesgo
<10	5
10-100	4
100-1000	3
1000-10000	2
>10000	1

Fuente: Servicio Agrícola y Ganadero, 2000.

Tabla 10: Ponderaciones de riesgo considerando LC₅₀ inhalatoria en mg L⁻¹

Impacto Inhalatorio (mg/L)	
LD50 Inhalatorio	Riesgo
<10	5
10-50	4
50-100	3
100-200	2
>200	1

Fuente: Servicio Agrícola y Ganadero, 2000.

Tabla 11: Ponderaciones de riesgo considerando K_H en $\text{Pam}^3\text{mol}^{-1}$

Impacto K_H	
Pam ³ mol ⁻¹	
K_H	Riesgo
$<3 \times 10^{-7}$	5
$3 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$	4
$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$	3
$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	2
$>1 \times 10^{-1}$	1

Fuente: Jenkins y Thompson, 1999.

Tabla 12: Ponderaciones de riesgo considerando GUS

Impacto GUS	
GUS	Riesgo
>4	5
3.0-4.0	4
2.0-3.0	3
1.0-2.0	2
<1	1

Fuente: Kerle *et al*, 1996.

Tabla 13: Ponderaciones de riesgo considerando LC_{50} en *Daphnias* en mg L^{-1}

Impacto Daphnia (mg/L)	
LC50 D.pulex	Riesgo
<10	5
10-100	4
100-1000	3
1000-2000	2
>2000	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Ponderaciones de riesgo considerando EC_{50} algal en $mg\ L^{-1}$

Impacto Algas (mg/L)	
LC50 Algas	Riesgo
<6	5
6-60	4
60-600	3
600-1200	2
>1200	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Ponderaciones de riesgo considerando LC_{50} en aves (codorniz) en $mg\ kg^{-1}$

Impacto Aves (mg/kg)	
LC50 Aves	Riesgo
<30	5
30-300	4
300-3000	3
3000-30000	2
>30000	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Ponderaciones de riesgo considerando LC_{50} en gusanos de tierra en $mg\ kg^{-1}$

Impacto gusanos (mg/kg)	
LC50 Gusanos	Riesgo
>1200	5
900-1200	4
600-900	3
300-600	2
<300	1

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo descrito, el valor FIP más inocuo (principio activo ideal) corresponde a 25, en cambio el más tóxico corresponde a 125.

El FIP, a su vez, es clasificado según su peligrosidad, considerándose como un plaguicida inocuo (1) aquel que posea un FIP menor o igual a 45; levemente peligroso (2) mayor a 45 e igual a 65; peligroso (3), aquel que posea un valor mayor a 65 e igual a 85, muy peligroso mayor a 85 e igual a 105 y extremadamente peligroso si es superior a 105 (tabla 17).

Tabla 17: Valoración del riesgo FIP

Valor riesgo FIP	
>105	5
85-105	4
65-85	3
45-65	2
<45	1

Fuente: Elaboración propia

b) Análisis Valor Carga Modificado (VCM)

Luego, la valoración del FIP se relacionó con las temporadas de aplicación (**noviembre-diciembre-enero; febrero-marzo-abril; mayo-junio-julio; agosto-septiembre-octubre**), para lo cual se consideró la dosis del plaguicida por ha y se asoció a la frecuencia para calcular la carga. Sin embargo, es preciso tomar en cuenta el **tiempo de residencia o vida media aeróbica (TRS)** del plaguicida en el suelo (en días).

La vida media se define como el tiempo requerido para que la mitad del plaguicida presente después de una aplicación se descomponga en productos de degradación. La vida media en el suelo está determinada por el tipo de organismos del suelo, el tipo de suelo, pH y temperatura, entre otros (California Department of Pesticide Regulation, 2003).

En la **tabla 18** se observa cada plaguicida con su respectiva dosis de aplicación y el TRS. Como ejemplo, el Azynphos methyl, cuya dosis es 1750 g/ha y su TRS es de 44 días, al ser aplicado como Cotnion® a los carozos, en dos ocasiones (con 30 días de diferencia) en la temporada agosto-septiembre-octubre, de la misma forma durante la temporada noviembre-diciembre-enero y una sola vez durante febrero-marzo-abril, las cargas se determinan como 2.625, 2.625 y 1.750 g/ha respectivamente (**tabla 19**) y recibirán el nombre de **Valor Carga Modificado (VCM)**.

Tabla 18: Datos a utilizar para el cálculo de la carga de los plaguicidas aplicados por cultivo.

NOM_COM	PRI_ACT	FUNCION	Dosis g_ha	ESPECIES	TR_SUELO
Orthene	Acephato	Insecticida	750	Uva	3,00
Inia 82-4	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Uva	44,00
Gusation	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Uva	44,00
Cotnion	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Carozos	44,00
Gusation	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Carozos	44,00
Cotnion	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Uva	44,00
Cotnion	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Perales	44,00
Cotnion	Azinphos methyl	Insecticida	1750	Nogales	44,00
Benlate	Benomyl	Fungicida	200	Pl. Om.	0,80
Benlate	Benomyl	Fungicida	1300	Carozos	0,80

Tabla 19: Obtención del Valor Carga Modificado por plaguicida aplicado, respecto de la frecuencia de aplicación.

Carga_mij	Carga_aso	Carga_nde	Carga_ma	Frec_M_J_J	Frec_A_S_O	Frec_N_D_E	Frec_F_M_A
	750			0	1	0	0
	2625			0	2	0	0
	2625			0	2	0	0
	2625	2625	1750	0	2	2	1
	2625	2625	1750	0	2	2	1
		1750		0	0	1	0
		2625		0	0	2	0
	1750	2625		0	1	2	0

El siguiente paso consiste en determinar el riesgo del Valor Carga Modificado obtenido, considerándose como inocuo aquellos valores inferiores o iguales a 750 g/ha, levemente peligroso a valores mayores a 750 e iguales a 1.500 g/ha, peligroso con valores mayores a 1.500 e iguales a 2.250, muy peligroso mayores a 2.250 e iguales a 3.000 y extremadamente peligroso con valores superiores a 3.000 g/ha., según se indica en la **tabla 20**.

Tabla 20: Valoración de riesgo del Valor Carga Modificado en g ha⁻¹.

Rangos de VCM	Valoración Riesgo
> 3000	5
2250 - 3000	4
1500 - 2250	3
750 - 1500	2
< 750	1

Fuente: Elaboración propia

c) **Determinación del Impacto Carga Equivalente por cultivo y temporada de aplicación**

Posteriormente, se utiliza una matriz en que relaciona el FIP con su riesgo ponderado por el Riesgo del Valor de Carga Modificado (VCM) (**figura 22**).

FIP \ VCM	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	2	2	3	3
3	2	3	3	4	4
4	3	3	4	4	5
5	3	4	4	5	5

Figura 22: Matriz de cruce del FIP con el riesgo del valor carga modificado (VCM).

El problema que se suscitó a continuación, es que los cultivos tienen aplicaciones de diferentes plaguicidas, de acuerdo al tipo de plagas, por consiguiente, se individualizaron los siguientes cultivos: alfalfa, carozos, cítricos, chacra (incluyó hortalizas), invernadero de tomates, maíz, membrillos, nogales, paltos, plantas ornamentales, pomáceas, trigo, tunas y uva, así como los caducos y perennes restantes. Esta valoración final del plaguicida fue analizada por cultivo, para lo cual se calcularon los percentiles 50, 75 y 90 del riesgo para cada uno, promediándose dichos resultados¹.

La clasificación del **Impacto Carga Equivalente** se observa en la **tabla 21**.

¹ Dr. José Vicente Tarazona, comunicación personal.

Tabla 21: Clasificación del Impacto Carga Equivalente por cultivo y temporada de aplicación.

Grupo	r_mjj	r_aso	r_nde	r_fma
Alfalfa	1	3	1	1
Caducos	1	4	4	2
Carozos	1	3	4	3
Cereales	1	2	1	1
Cítricos	1	3	3	2
Chacra	2	3	3	2
I Tomates	2	2	3	3
Maíz	1	3	2	1
Membrillos	1	2	1	1
Nogales	1	3	3	1
Paltos	2	3	2	1
Perennes	3	3	3	2
Ptas_Ornm	1	1	1	1
Pomáceas	1	2	2	1
Tuna	1	4	4	1
Uva	1	3	3	1

c) Determinación del Impacto Carga Equivalente por polígono de la carta de uso de suelo

Para cuantificar la carga del plaguicida en cada polígono de la carta de uso de suelo, se realizó, en planilla Excel, un análisis con la media de los rangos del **Valor Carga Modificado** (las clases del VCM), las clases del FIP, la clase mínima del FIP y posteriormente, con las clases de las superficies de los polígonos (**Tablas 22 a 26**).

Tabla 22: Clases del Valor Carga Modificado.

Clase VCM	Rangos de VCM
4000	> 3000
2626	2250 - 3000
1875	1500 - 2250
1125	750 - 1500
375	< 750

Fuente: Elaboración propia

A partir de la clase mínima del FIP (**35**) se calculó el FIP Normalizado (FIPNor, **tabla 23**), dividiendo los valores de todas las clases del FIP por 35, es decir:

- $35/35 = 1$
- $55/35 = 1.6$
- $75/35 = 2.1$
- $95/35 = 2.7$
- $115/35 = 3.3$

Tabla 23: Cálculo del FIP normalizado.

Clase FIP	FipNor
35	1
55	1.6
75	2.1
95	2.7
115	3.3

Los valores FIPNor se multiplicaron por las clases del VCM obteniéndose el **Valor Carga Modificado 2** (VCM2). Dichos resultados fueron ordenados y valorados de 1 a 5 mediante quintiles (**tabla 24**). Si el menor VCM2 con riesgo 2 obtiene el mismo valor que el mayor VCM2 con riesgo 1, el riesgo que se incorpora al análisis para ese valor es 1.

Tabla 24: Ejemplo de los resultados más altos del VCM2 obtenidos al multiplicar el FIPNor por la clase VCM y ordenados por quintiles.

Clase VCM	Clase Fip	FipNor	VCM2	Valor Matriz
1125	35	1.0	1125	1
2626	35	1.0	2626	2
2626	55	1.6	4127	3
4000	75	2.1	8571	4
4000	115	3.3	13143	5

Fuente: Elaboración propia

Los **VCM2** obtenidos son traspasados, de acuerdo a su riesgo, a la tabla 25. El resultado de esta operación se observa en la **tabla 25**.

Tabla 25: Los VCM2 son ingresados en la tabla, dependiendo de su valor impacto.

Grupo	r_mjj	r_aso	r_nde	r_fma
Alfalfa	1125	4127	1125	1125
Caducos	1125	8571	8571	2626
Carozos	1125	4127	8571	4127
Cereales	1125	2626	1125	1125
Cítricos	1125	4127	4127	2626
Chacra	2626	4127	4127	2626
I Tomates	2626	2626	4127	4127
Maíz	1125	4127	2626	1125
Membrillos	1125	2626	1125	1125
Nogales	1125	4127	4127	1125
Paltos	2626	4127	2626	1125
Perennes	4127	4127	4127	2626
Ptas_Ornm	1125	1125	1125	1125
Pomáceas	1125	2626	2626	1125
Tuna	1125	8571	8571	1125
Uva	1125	4127	4127	1125

8.2.2 Fase II

a) Delimitación de rangos de superficies

Para impedir que las grandes superficies exageren el riesgo evaluado, se consideró la distribución de sus valores en forma exponencial, confeccionándose un gráfico (**figura 23**) con la siguiente función, donde:

$$y = 1,8535e^{0,0019x}$$

Obteniéndose un $R^2 = 0.5623$.

Los valores definidos en distribución exponencial de las superficies de los polígonos son 7, 20, 60, 200 y 600 hectáreas. La última superficie fue definida con el objeto de aminorar la influencia de una gran superficie sobre el análisis global, la que podría generar una seria distorsión en la valoración final de riesgo, ya que representa un peso excesivo por sobre el resto de las variables.

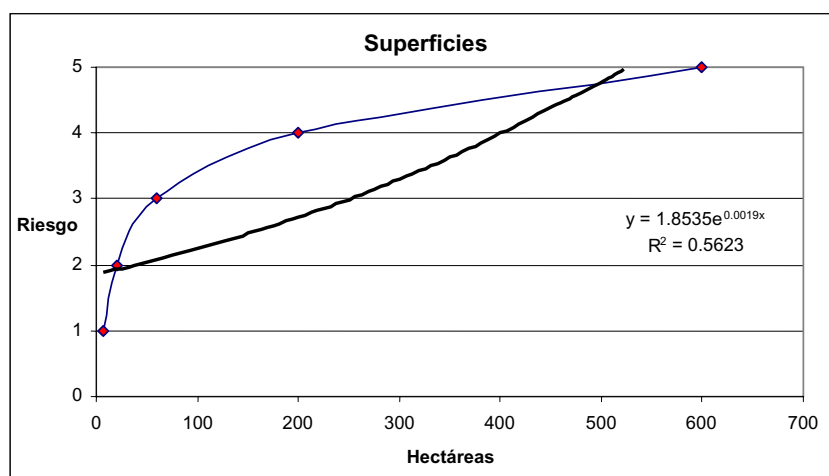


Figura 23. Gráfico que muestra la distribución, de forma exponencial, de las hectáreas utilizadas para definir su importancia en la contaminación difusa.

b) Determinación de Riesgo por Carga Total

Los valores indicados en la tabla 25, en la columna VCM2, fueron multiplicados por los tamaños (ha) definidos para los polígonos (**tabla 26**).

El valor matriz para estos resultados, **Carga Total**, se ordenó y valoró de 1 a 5 mediante la aplicación de quintiles, donde los valores más altos del quintil definieron la matriz.

Tabla 26: Valoración de riesgo por Carga Total.

VCM2	Tamaño (ha)	Carga Total	Valor Matriz
375	60	22500	1
5089	20	101786	2
589	600	353571	3
2626	60	1575600	4
13143	600	7885714	5

8.2.3 Fase III. Análisis Espacial.

a) Valoración de Riesgo Carga Total para el Análisis Espacial

El siguiente paso fue vincular la tabla VCM2 con ArcView. Primero se debió confeccionar la tabla 27 en *dbase* y luego se cargó en ArcView. Posteriormente, se realizó un *join* con el *shape agrícola100205* por el campo **Grupo** y luego, se crearon 4 campos: **C_mjj**, **C_aso**, **C_nde** y **C_fma** (figura 24). De esta forma los datos de los campos **r_mjj**, **r_aso**, **r_nde** y **r_fma**, de la tabla 19, fueron copiados en los nuevos campos.

Shape	Uso actual	Especie	Area_ha	Grupo	C_mjj	C_aso	C_nde	C_fma	r_mjj	r_aso	r_nde	r_fma
Polygon	Caduco	Durazno	2.21	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Durazno	2.21	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Alhala		1.18	Alhala					1125	8571	2626	2626
Polygon	Suelo desnudo		1.41									
Polygon	Suelo desnudo		1.41									
Polygon	Caduco		17.10	Caducos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco		17.10	Caducos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco		17.10	Caducos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Peral	5.13	Perales					2626	4127	4127	1125
Polygon	Caduco	Peral	5.13	Perales					2626	4127	4127	1125
Polygon	Caduco	Durazno	4.76	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Durazno	4.76	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Durazno	36.32	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Durazno	36.32	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Durazno	36.32	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Uva		6.77	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon	Uva		6.77	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon	Caduco	Durazno	13.92	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Uva		125.88	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon	Uva		125.88	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon	Uva		125.88	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon	Uva		125.88	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon			0.00									
Polygon			0.00									
Polygon			0.00									
Polygon			0.00									
Polygon			0.00									
Polygon			0.00									
Polygon	Ribesario		3.10									
Polygon	Chacra		10.14	Chacra					1125	2626	1125	1125
Polygon	Total		72.72									
Polygon	Caduco	Durazno	15.77	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Caduco	Cerezo	19.94	Carozos					1125	8571	8571	2626
Polygon	Uva		7.68	Uva					1125	4127	8571	1125
Polygon	Uva		7.68	Uva					1125	4127	8571	1125

Figura 24: Se realiza un *join* con el *shape agrícola100205* por el campo **Grupo** creando 4 campos: **C_mjj**, **C_aso**, **C_nde** y **C_fma**.

Los campos con los que se trabajará a continuación son **Area_ha**, **Grupo**, **C_mjj**, **C_aso**, **C_nde** y **C_fma**.

El siguiente paso fue crear los campos **Ct_mjj**, **Ct_aso**, **Ct_nde** y **Ct_fma**. En estos campos se incluyó el resultado de la multiplicación del campo **Area_ha** por los campos **C_mjj**, **C_aso**, **C_nde** y **C_fma** respectivos.

Posteriormente, se crearon los campos **rct_mjj**, **rct_aso**, **rct_nde** y **rct_fma**, los que definieron el riesgo por carga total y se completaron, estos campos, con los valores presentes en la **tabla 26**. Con la herramienta *Query builder* (martillo) se seleccionaron los valores menores o iguales a 22500, esos cultivos seleccionados recibieron el valor 1. Con la orden “([Ct_mjj] >22500 and ([Ct_mjj] <= 101786)” se seleccionaron los polígonos que en la temporada mayo-junio-julio poseían un valor entre 22500 y 101786, asignándoles el valor 2 a dichos polígonos y así sucesivamente (ver **tabla 27**).

Tabla 27: Obtención de la valoración para Carga Total de plaguicidas en el período.

Ct_ "periodo"	Valoración
> 1575600	5
1575600 – 353571	4
353571 - 101786	3
101786 - 22500	2
< 22500	1

Fuente: Elaboración propia

b) Valoración de Riesgo para Aguas Subterráneas

El proceso para generar esta zonificación consistió en recodificar las capas de información sobre Vulnerabilidad de acuífero y Riesgo de cultivos, para lo cual se asignaron los siguientes valores de riesgo, considerando la categorización de vulnerabilidad del acuífero propuesta por Von Igel (1999):

- 1, que corresponde a sectores en los cuales la variable tiene un efecto muy bajo o despreciable
- 2, con efecto bajo
- 3, con efecto moderado
- 4, con efecto alto y
- 5, con efecto extremo.

El mismo autor describió la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, empezando por el valle principal, desde la cota hacia la cordillera, de la siguiente forma (**fig. 25**):

- Desde la desembocadura hasta unos 3 Km. aguas abajo del estero Rabuco, el acuífero libre del valle principal presenta extensas zonas de vulnerabilidad extrema, con la excepción de los pequeños tributarios que presentan vulnerabilidades bajas a moderadas, un sector al noreste de Quillota con vulnerabilidad alta y los alrededores de La Cruz que tienen vulnerabilidades moderadas e incluso altas hacia el norte.
- Desde 3 Km aguas abajo del estero de Rabuco y hasta San Felipe, el valle principal presenta mayoritariamente zonas con altas vulnerabilidad de agua subterránea, con la excepción de sectores aledaños a Rabuco, Purehue y Chagres que presentan vulnerabilidades extremas y los valles tributarios menores que presentan vulnerabilidades bajas en las cabeceras y moderadas en las partes bajas.
- San Felipe se ubica en una zona de transición entre sectores con vulnerabilidad del agua subterránea alta y baja. Inmediatamente al este de San Felipe y hasta Los Andes. El agua subterránea del amplio valle presenta una vulnerabilidad baja e incluso despreciable hacia las cabeceras de los pequeños valles tributarios, incluyendo grandes extensiones al norte de Los Andes en las inmediaciones del estero San Francisco.
- En el valle del río Putaendo, la vulnerabilidad del agua subterránea es baja e incluso despreciable hacia las cabeceras de los pequeños valles tributarios.

A partir de la información precedente, se generaron matrices de decisión, cuyos valores resultantes se visualizaron espacialmente para toda el área de estudio. El procesamiento de dichas matrices se efectuó por pares de variables, hasta converger a la solución final. Los planos de información, se cruzaron matricialmente con el plano de información sobre vulnerabilidad del acuífero, generándose cuatro nuevos planos, uno para cada período analizado.

La matriz utilizada funcionó como una regla de decisión, permitiendo asignar un nuevo valor al cruce de dos variables (riesgo carga total de agroquímicos y vulnerabilidad). Los valores utilizados se muestran en la **figura 26**.

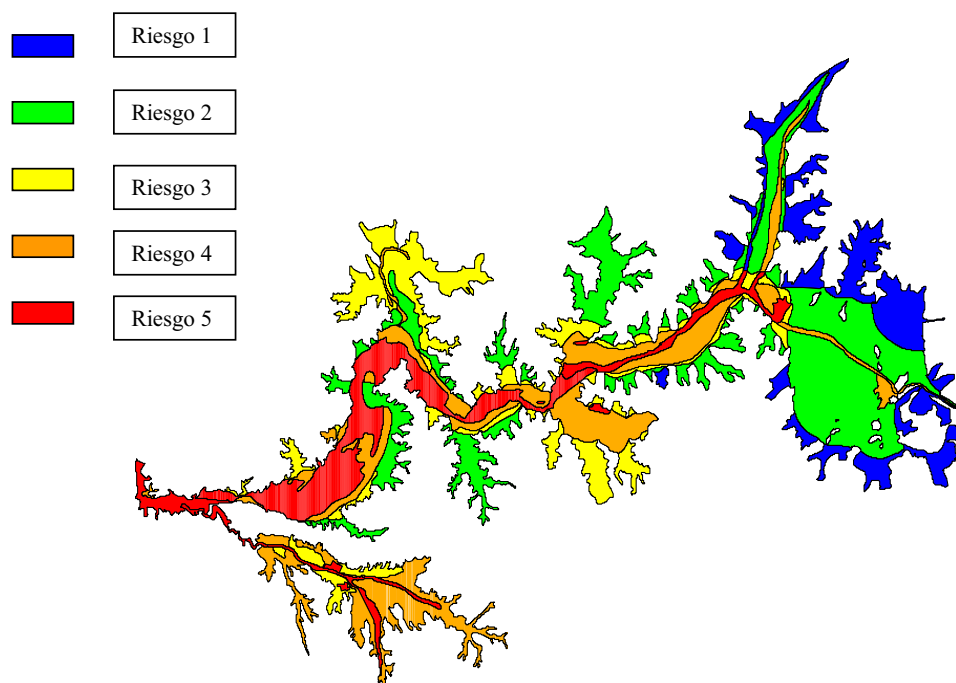


Figura 25: Caracterización de vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación, en la cuenca del río Aconcagua (Fuente: Von Igel, 1999).

Cod_vulne\ Rct	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	2	3
3	1	1	3	3	4
4	1	2	4	4	5
5	2	3	4	5	5

Figura 26: Matriz de decisión del cruce de los campos Vulnerabilidad del Acuífero (cod_vulne) vs. Riesgo Carga Total (Rct).

El sistema carga automáticamente el resultado de esta matriz, mediante el *script* “cpr_uso_vulne.ave” en los campos: **Rvc_mjj**, **Rvc_aso**, **Rvc_nde** y **Rvc_fma**.

Las **figuras 27, 28, 29 y 30**, muestran los mapas temáticos de riesgo de cultivos por temporadas de aplicación, previo al cruce de vulnerabilidad del acuífero.

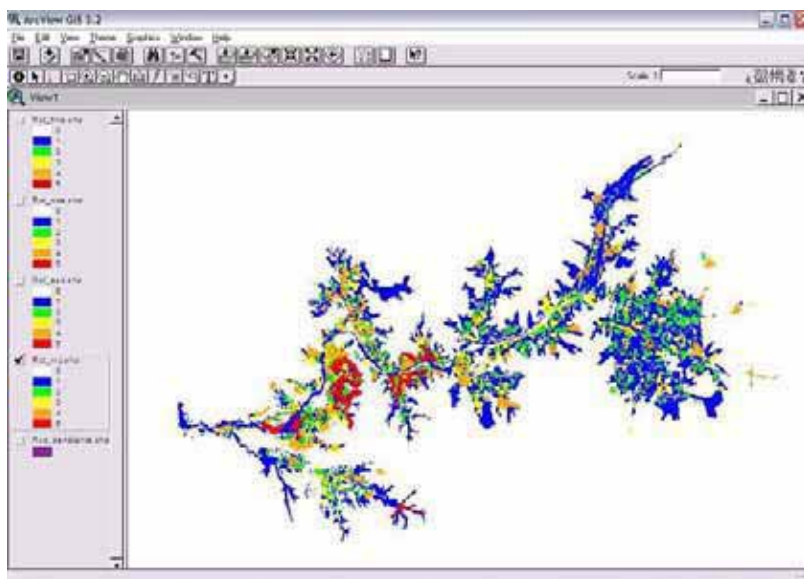


Figura 27: Riesgo Carga Total por contaminación difusa en la temporada mayo, junio y julio.

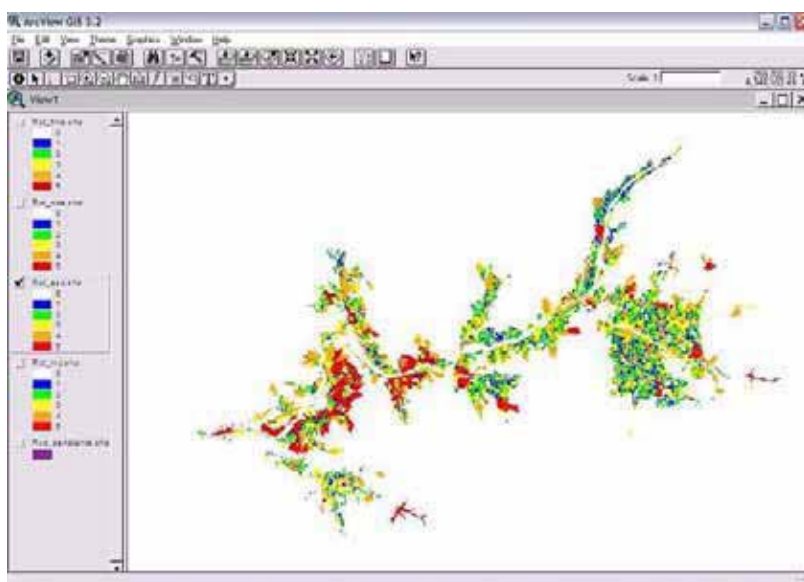


Figura 28: Vulnerabilidad de la cuenca frente a contaminación difusa en la temporada agosto, septiembre y octubre.

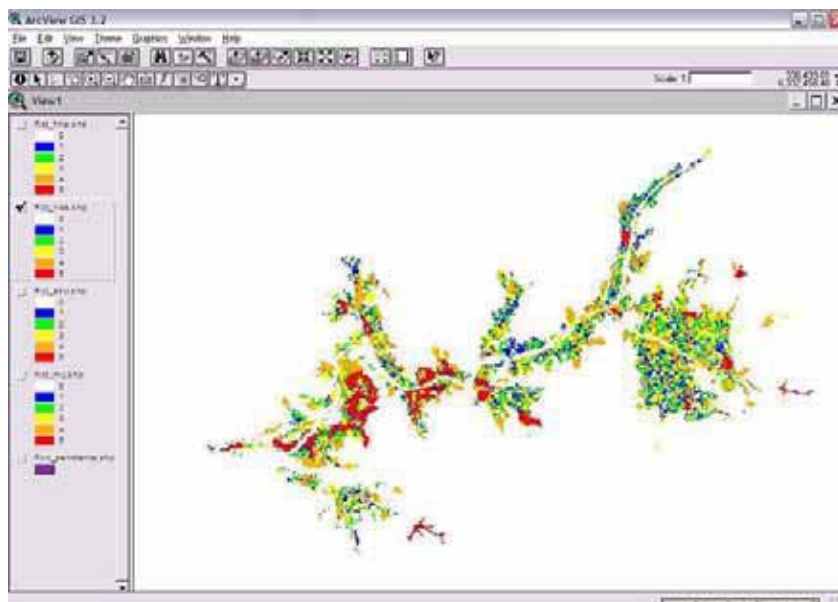


Figura 29: Vulnerabilidad de la cuenca frente a contaminación difusa en la temporada noviembre, diciembre y enero.

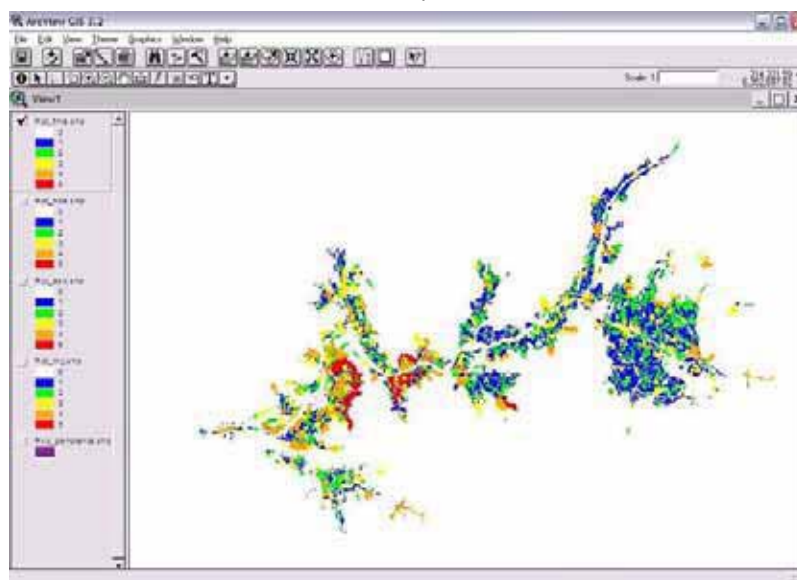


Figura 30: Vulnerabilidad de la cuenca frente a contaminación difusa en la temporada febrero, marzo y abril.

Como resultado de este cruce (**Cod_vulne\ Rct**) se obtuvieron nuevos mapas temáticos de riesgo por temporada, los cuales se exponen en las **figuras 31, 32, 33 y 34**.

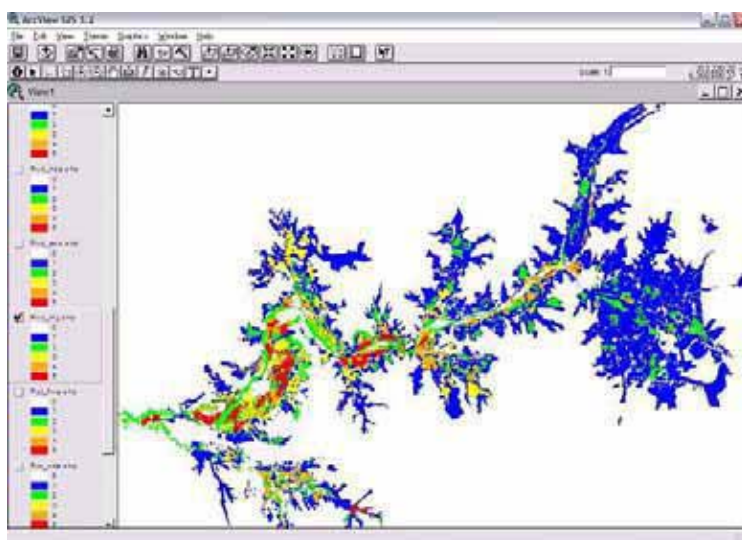


Figura 31: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad vs. riesgo de carga total de cultivos en la temporada mayo, junio y julio.

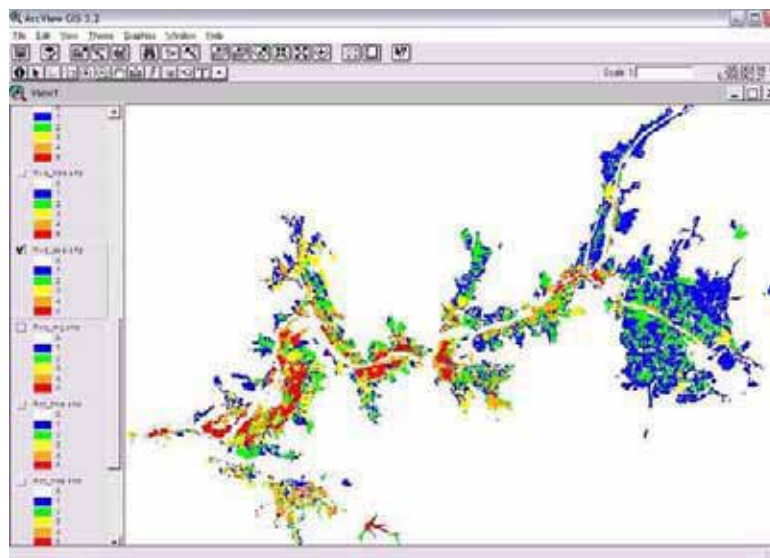


Figura 32: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad vs riesgo de carga total de cultivos en la temporada agosto, septiembre y octubre.

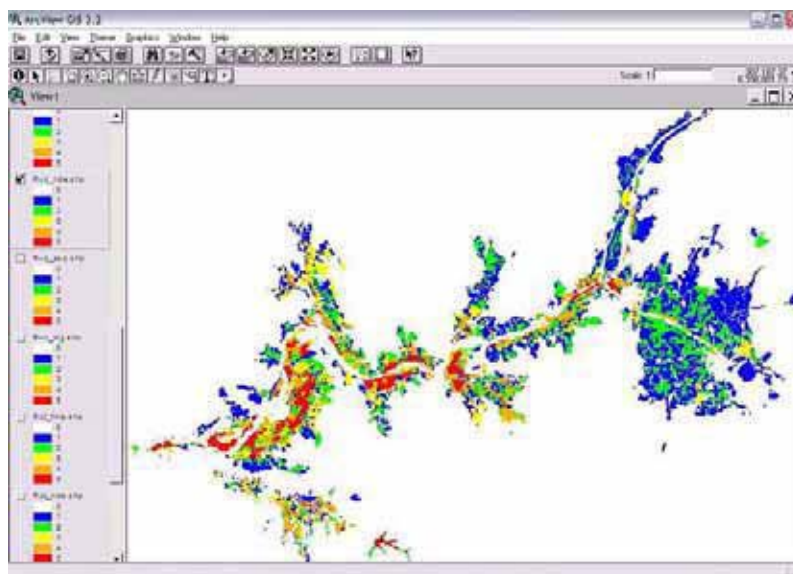


Figura 33: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad vs. riesgo de carga total de cultivos en la temporada noviembre, diciembre y enero.

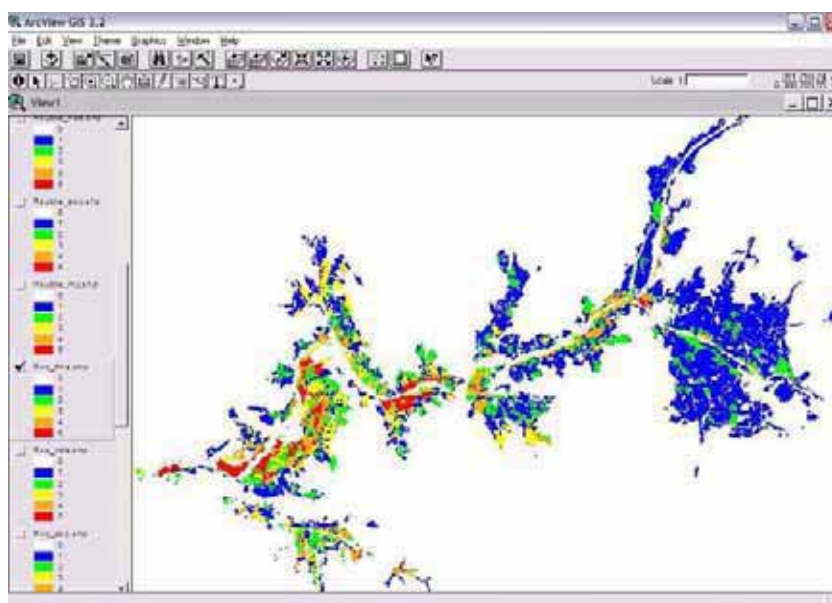


Figura 34: Mapa temático de riesgo producto del cruce de vulnerabilidad v/s riesgo de carga total de cultivos en la temporada febrero, marzo y abril.

Se observa, finalmente, que el período comprendido entre agosto y enero, presenta un mayor riesgo que en el resto de las temporadas. A su vez, el menor riesgo se presenta durante la temporada de mayo, junio y julio.

El paso siguiente consistió en incluir la variable “**Pendiente del Terreno**” en la evaluación del riesgo por contaminación difusa. Con este fin, se procesó la información de curvas de nivel obtenidas de una restitución fotogramétrica a escala 1:5.000, encargada por la Comisión Nacional de Riego (CNR) y facilitada al SAG para este proyecto.

La **figura 35** muestra una vista general del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca, diseñado a partir de las curvas de nivel.

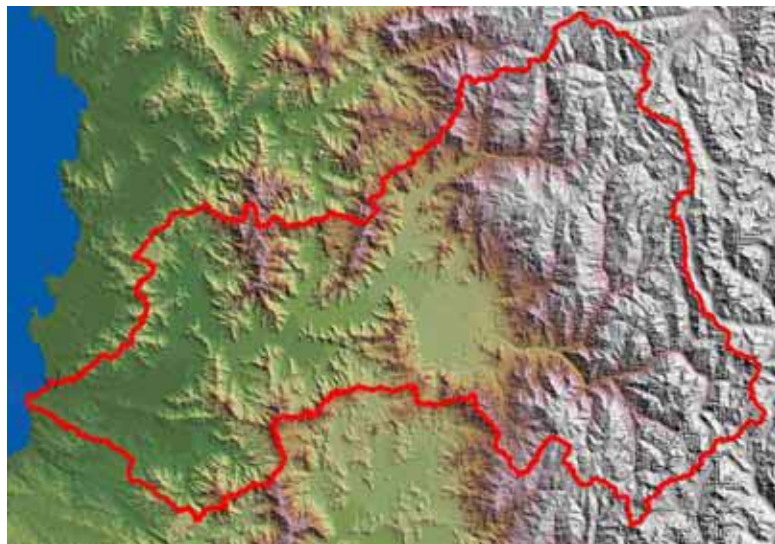


Figura 35: Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del río Aconcagua.

A partir del MDE de la cuenca, se derivó el mapa de pendientes en grados o en porcentajes y se recodificó en rangos de acuerdo a dos criterios:

- a) Se consideraron rangos de pendientes desde muy pequeños, es decir, la contaminación tiene una baja probabilidad de escurrir y puede eventualmente permanecer en el suelo y/o lixiviar al subsuelo por efecto de la precipitación o también, por el tipo de tecnología de riego utilizada.
- b) Rangos de pendientes grandes donde el escurrimiento es el factor principal y por consiguiente, tiene un efecto mínimo sobre la napa freática en dicho lugar.

Por lo tanto, el efecto de las pendientes sobre el riesgo de la contaminación difusa, se procesó de dos formas, una para los efectos sobre la **napa freática** y otro para los efectos sobre las **aguas superficiales**. La diferencia entre ambos esquemas se genera en las matrices respectivas. La

figura 36 señala esquemáticamente el proceso, orientado a la modificación del riesgo de contaminación difusa sobre la napa freática, considerando los factores de riesgo de pendientes (en grados y porcentajes) para aguas subterráneas señalados en la **tabla 28**. Dichos factores fueron obtenidos y modificados del Índice de Vulnerabilidad Ambiental diseñado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) el año 2001. Se observa en la tabla que los factores de riesgo disminuyen con el incremento de la pendiente, debido a la eventualidad de generarse un escurrimiento de los contaminantes y por tanto, disminuye la posibilidad de que éstos puedan lixiviar.

Tabla 28: Factores de riesgo de pendientes para aguas subterráneas (CIAT, 2001)

Pendiente °	Pendiente %	Rangos de pendiente	
>16,7	> 30	1	Muy baja
8,5 - 16,7	15 - 30	2	Baja
4 - 8,5	7,0 - 15	3	Media
1,7 - 4	3 - 7,0	4	Alta
<1,7	<3	5	Muy alta

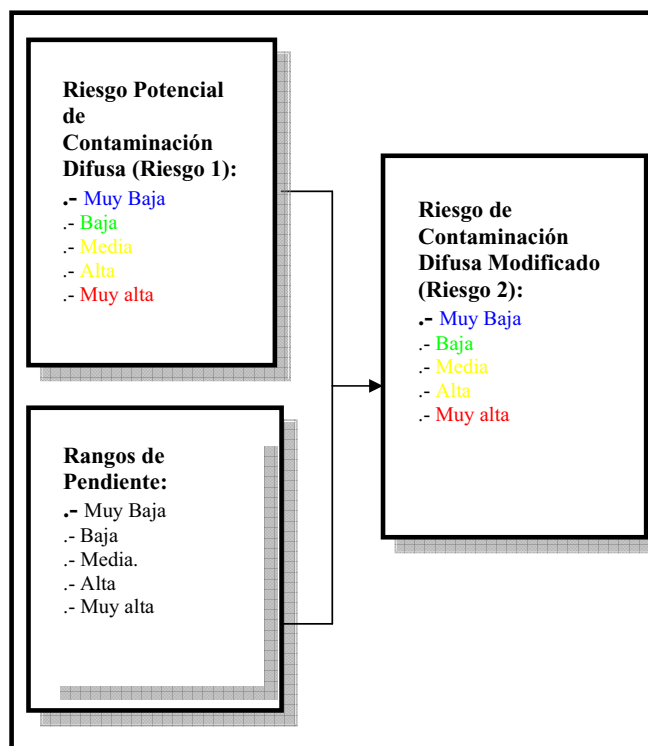


Figura 36: Variación de la Zonificación del Riesgo por pendiente del terreno (efecto sobre aguas subterráneas).

Para el proceso esquematizado en la **figura 36**, se aplicó ahora una matriz de cruce del **Riesgo con Pendientes para Aguas Subterráneas (Riesgo 2)**, con la cual se modificó la zonificación

general de riesgo frente a la contaminación difusa, considerando el efecto que tienen las pendientes del terreno (**figura 37**).

Pend_subte \ Rvc	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	2	2
3	2	2	3	3	4
4	2	3	3	4	5
5	3	4	4	5	5

Figura 37: Cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad (Rvc) con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas (Pend_subte).

El sistema carga automáticamente el resultado de esta matriz, mediante el *script* “cpr_matriz_rvc_psub.ave” en los campos: **Rsubte_mjj**, **Rsubte_aso**, **Rsubte_nde** y **Rsubte_fma**, obteniéndose el resultado final de valoración del riesgo de contaminación difusa para aguas subterráneas. Como resultado de este cruce se obtuvieron mapas temáticos de riesgo por temporada, los cuales se exponen en las **figuras 38, 39, 40 y 41**.

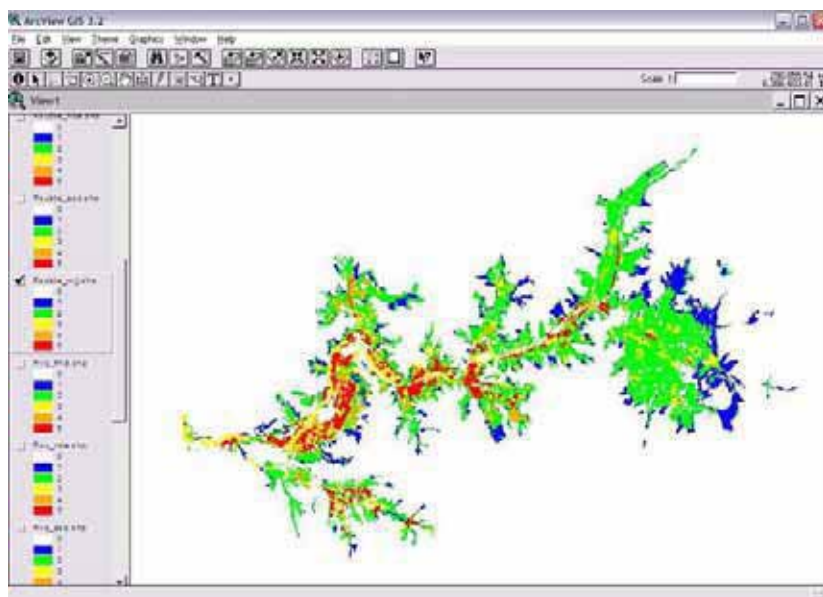


Figura 38: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de mayo, junio y julio.

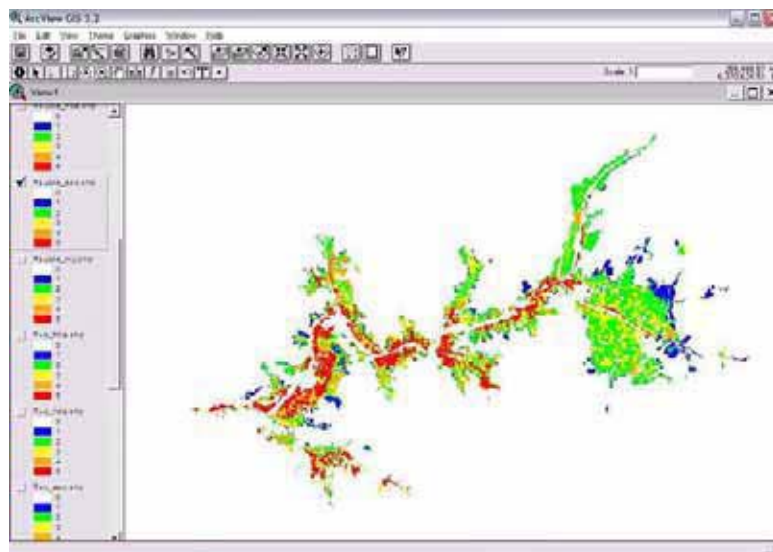


Figura 39: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de agosto, septiembre y octubre.

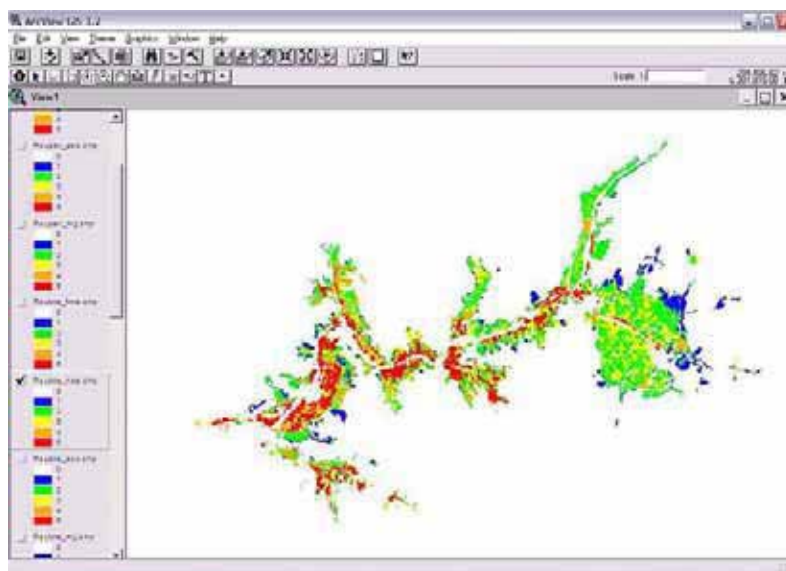


Figura 40: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de noviembre, diciembre y enero.

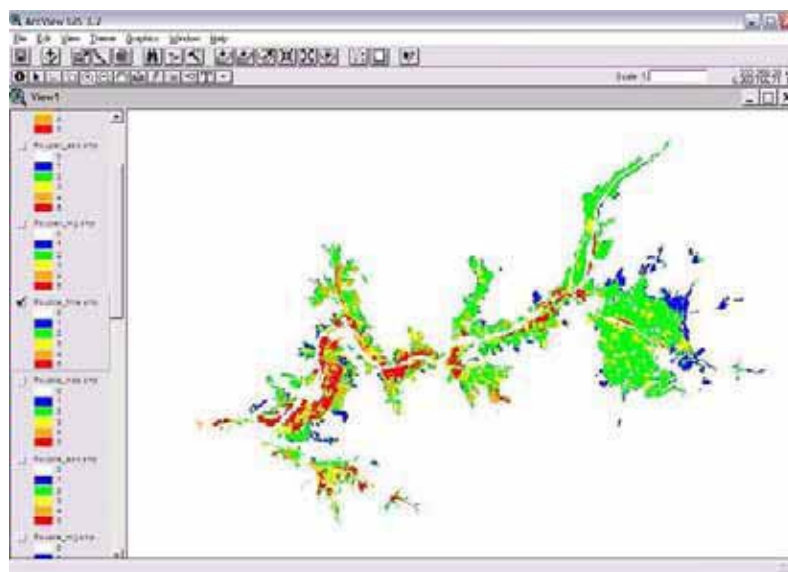


Figura 41: Mapa temático producto del cruce del Riesgo carga-vulnerabilidad con el efecto de las pendientes para aguas subterráneas, para la temporada de aplicación de febrero, marzo y abril.

Se concluye al aplicar el riesgo 2, que en la temporada de agosto, septiembre y octubre se presenta una mayor valoración de riesgo que en el resto de las temporadas. A su vez, el menor riesgo se presenta durante la temporada de mayo, junio y julio.

c) Análisis de riesgo para Aguas Superficiales

Para el siguiente análisis se deben considerar los factores de riesgo de pendientes para aguas superficiales, los cuales se indican en la **tabla 29**, en que dichos factores de riesgo aumentan con el incremento de la pendiente, en la eventualidad de un escurrimiento de los contaminantes. En la **figura 42**, se puede observar el resultado de este procedimiento.

Tabla 29: Factores de riesgo de pendientes para aguas superficiales

Pendiente °	Pendiente %	Rangos de pendiente	
<1,7	<3	1	Muy baja
1,7 - 4	3 - 7,0	2	Baja
4 - 8,5	7,0 - 15	3	Media
8,5 - 16,7	15 - 30	4	Alta
>16,7	> 30	5	Muy alta

La **figura 42** muestra esquemáticamente el proceso, orientado a la modificación del riesgo de la contaminación difusa sobre las aguas superficiales.

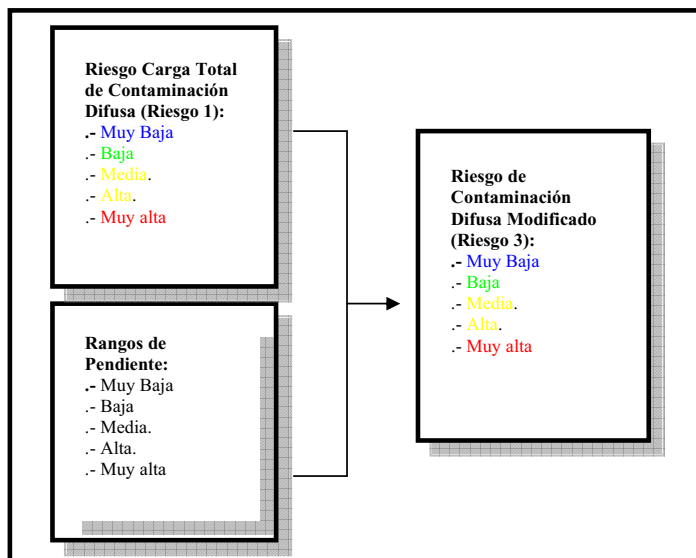


Figura 42: Variación de la Zonificación del Riesgo por pendiente del terreno (efecto sobre aguas superficiales).

Para el presente análisis, se aplicó la matriz de análisis cruce **Riesgo Carga Total con pendientes para aguas superficiales (Riesgo 3)**, con la cual se modificó la zonificación general de riesgo frente a la contaminación difusa, considerando ahora el efecto que tienen las pendientes del terreno en el arrastre de contaminantes hacia la red de canales, esteros y ríos (**figura 43**).

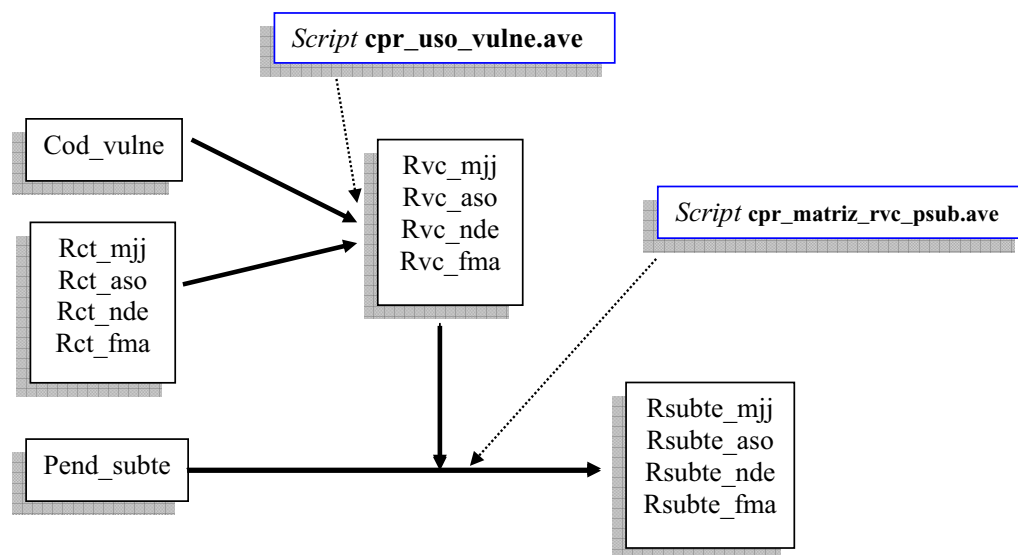
Pend_super\Rct	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	2	3
3	1	2	2	3	4
4	2	2	3	4	5
5	2	3	4	5	5

Figura 43: Cruce de Riesgo Carga Total (Rct) con pendientes (Pend_super) para aguas superficiales (Riesgo 3).

Para obtener la valoración de riesgo de aguas superficiales se cruza la información de la valoración de la carga total (Rct), de cada polígono por periodo (tabla 30), con la matriz de pendientes, también con su respectiva valoración, mediante el *script* “cpr_matriz_rct_psup.ave”, que carga automáticamente los campos **Rsuper_mjj**, **Rsuper_aso**, **Rsuper_nde** y **Rsuper_fma**.

En los siguientes diagrama de flujo (**figura 44**), se exponen los campos que intervienen en ArcView para confeccionar el análisis espacial.

Aguas Subterráneas:



Aguas Superficiales:

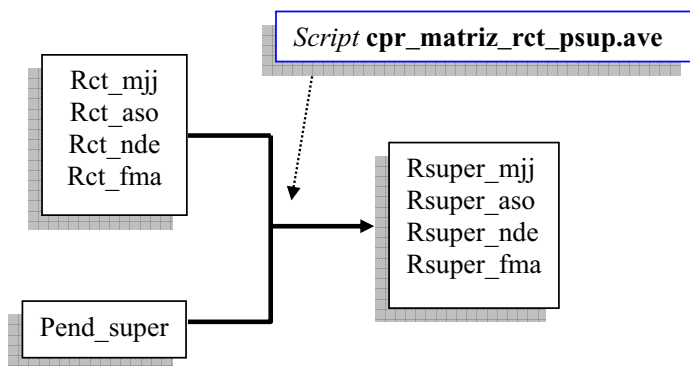


Figura 44: Campos que participan en la confección del análisis de riesgo para contaminación difusa en ArcView.

Los resultados de la modificación de la zonificación del riesgo por contaminación difusa para aguas subterráneas y superficiales respectivamente, podrán ser alterados en magnitud por la variable precipitación, que se supone de comportamiento homogéneo para grandes sectores de la cuenca. Finalmente, como resultado de la fase III, se exponen en las **figuras 45 46, 47 y 48**, los mapas temáticos de riesgo para las cuatro temporadas de aplicación de plaguicidas.

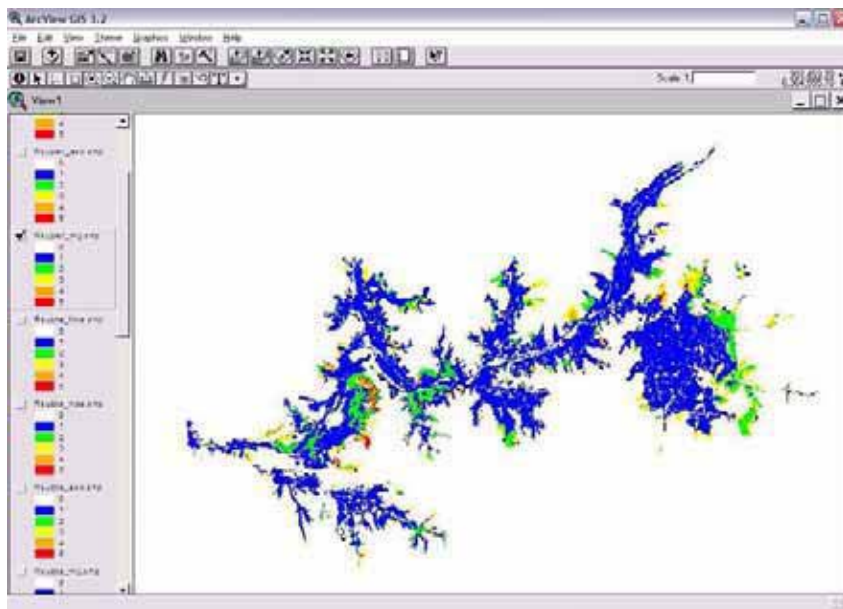


Figura 45: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de mayo, junio y julio.

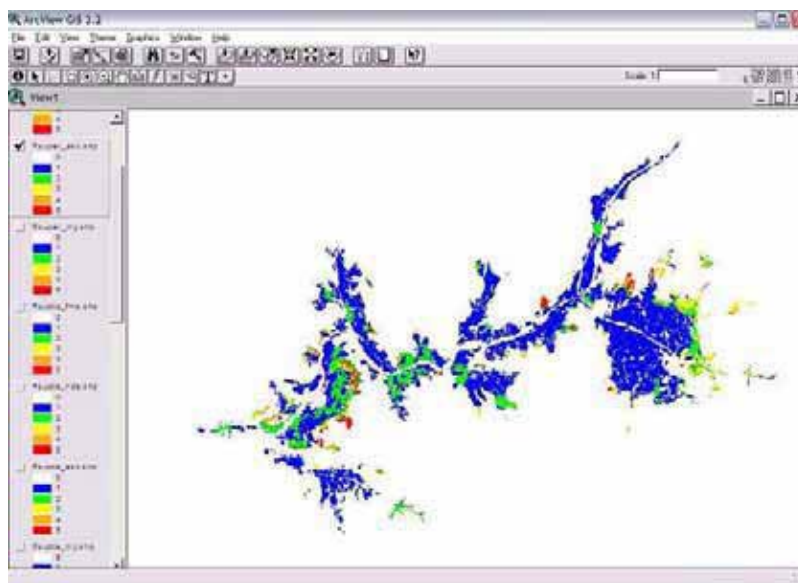


Figura 46: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de agosto, septiembre y octubre.

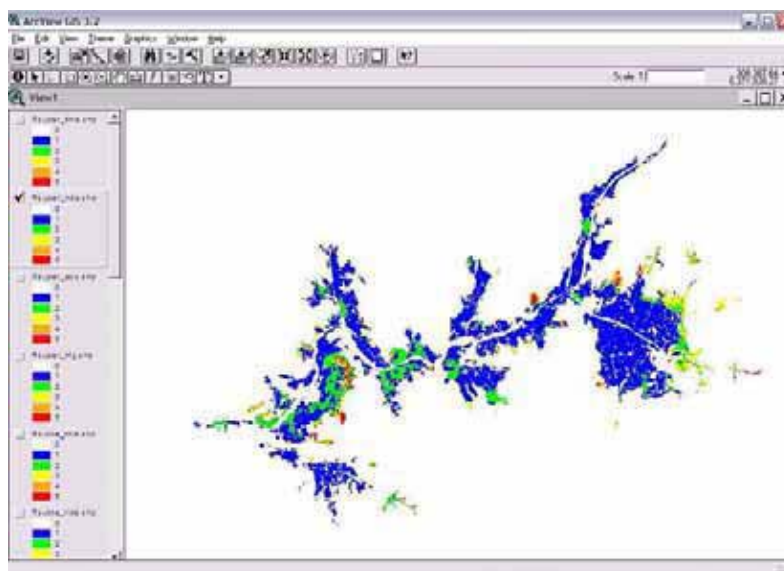


Figura 47: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de noviembre, diciembre y enero.

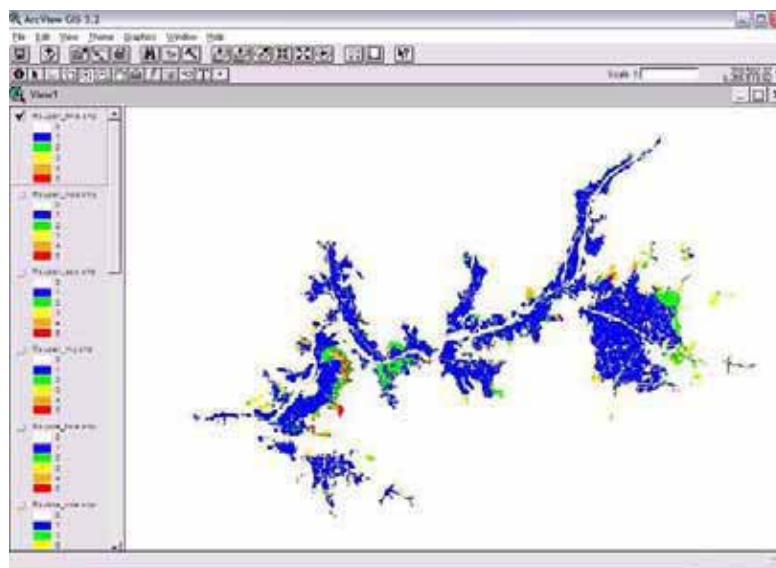


Figura 48: Mapa temático producto del cruce del Riesgo con pendientes para aguas superficiales, para la temporada de aplicación de febrero, marzo y abril.

8.3 CONCLUSIONES

1. El trabajo presentado es el producto del diseño y aplicación del nuevo Factor integrado de Peligrosidad (FIP), en el cual se incluyó con diferente ponderación, una amplia gama de efectos potenciales de los principios activos de los plaguicidas, sobre diversos componentes o compartimientos ambientales. Existe una relación directa entre Kow (relacionado con la biomagnificación) y Koc (presente en el cálculo del GUS) dado por la siguiente relación; $\log Koc = a \log Kow + b$, donde a y b son coeficientes de ajuste a la curva (Kapila. S., 2005).
2. Se observa en general, que las áreas de mayor impacto fueron las áreas pilotos seleccionadas, siendo aún más afectada la zona comprendida entre La Calera y Nehuenco y San Isidro
3. Al analizar los 3 tipos de riesgo, se aprecia que en la temporada agosto - octubre y noviembre - enero, los niveles de riesgo son los más elevados, obviamente coincide con que dichas temporadas son las de mayor aplicación de plaguicidas. A su vez, los niveles más bajos de riesgo se presentan en la temporada de mayo - julio.
4. Llama la atención que los mapas de menor riesgo se presentan en el cruce entre las aguas superficiales y las pendientes de la cuenca (riesgo 3). A su vez, las temporadas de agosto a octubre y de noviembre a enero, presentan niveles de riesgo casi equivalentes.

5. Por otra parte, durante el mes de octubre, en pleno período de aplicación, se efectuó una campaña de toma de muestras en 30 estaciones correspondientes a canales de las áreas piloto.
6. Debe recordarse que el análisis de riesgo se efectuó a partir de la carta de uso de suelos actualizada para el año 2004, la cual fue cotejada con el catastro de Ciren CORFO y de la encuesta realizada a los agricultores de la cuenca. No obstante, suele haber cambios de cultivos, producto de las demandas del mercado de un año a otro, incluso en algunas secciones de la cuenca se ha incrementado sustancialmente el cultivo en laderas. Por lo tanto, debiera actualizarse en forma periódica la base de datos, sobre la base de encuestas acerca del uso de plaguicidas agrícolas (bianuales al menos) y de visitas de terreno para actualizar la carta de uso. De esta forma, se puede efectuar un seguimiento de las variaciones del riesgo generado por las aplicaciones de plaguicidas a lo largo del tiempo y adoptar medidas de gestión para morigerar dicho riesgo.

8.4 REFERENCIAS

AFIPA, 1999. Manual Fitosanitario 1998-1999. Editado por AFIPA.

AFIPA, 2003, Manual Fitosanitario 2002-2003. Editado por AFIPA.

CALAMARI D., 2000. "The Predictive Approach to Environmental Distribution and Fate of Chemical Substances", por Instituto de Entomología Agrícola, Universidad de Milán, Italia.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. CIAT. 2001. (<http://www.cgiar.org>)

GUSTAFSON, D. I., 1989. Groundwater Ubiquity Score: A simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*. Volume 8, pp. 339-357.

JENKINS J.J. & THOMSON P.A. Extension Pesticide Properties Database, Oregon State University Extension Service, January 1999. (<http://pmep.cce.cornell.edu/facts-slides-self/facts/pest-gr-gud-grw89.html>)

KAPILA S., 2005. <http://chem.umn.edu/skapila.html>, en *Class notes*, el tema *Transport Process*: http://web.umn.edu/~kapilas/Transport_Process.html.

MARTÍNEZ A., 2003. Modelo de dispersión de plaguicidas. Magister Gestión y Ordenamiento Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Santiago de Chile. Informe de circulación interna.

PAN PESTICIDES DATABASE, 2004. (<http://www.pesticideinfo.org>)

THE e-PESTICIDE MANUAL 2002-2003, XII Edición, versión 2,2 del British Crop Protection Council,

VON IGEL GRISAR, W. 1999. Redefinición de la Red de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea en el Valle del Aconcagua. Edit. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

VOGUE P.A. KERLE E.A & JENKINS J.J. 1994. OSU Extension Pesticide Properties Database Oregon State University Extension Service (<http://npic.orst.edu/ppdmove.htm>).

CAPÍTULO 9: CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ÁREA PILOTO

9.1 INTRODUCCIÓN

Debido a que la aplicación de modelos de fugacidad de contaminantes para aguas superficiales y subterráneas para toda la cuenca del Aconcagua pareció inviable, debido a la necesidad de contar con mayores recursos, los cuales superaban los fondos comprometidos, el equipo ejecutor, en conjunto con la supervisión técnica del SAG, adoptaron la decisión, de seleccionar un área piloto la cual abarcara un área importante de la cuenca, con el fin de efectuar la modelación. Los criterios de selección de dicha área fueron descritos en el informe de avance de abril de 2005, por tanto, en el presente capítulo se entrega una síntesis de la metodología.

9.2 METODOLOGÍA

Para seleccionar el área piloto con un criterio objetivo, se utilizaron las capas de información disponibles, cuya información fuese relevante considerando la contaminación generada por fuentes puntuales y la contaminación difusa potencial generada eventualmente por la aplicación de plaguicidas. El análisis se llevó a cabo considerando el diagrama conceptual señalado en la **figura 49** (Informe de avance noviembre de 2003).

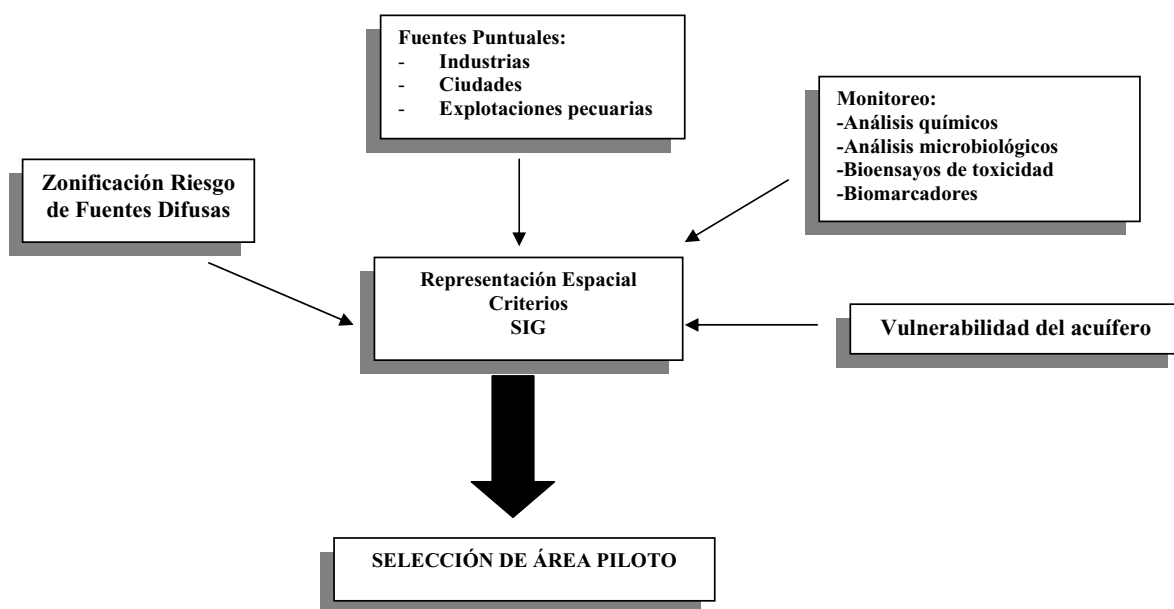


Figura 49: Diagrama conceptual para la selección del área piloto

En síntesis los pasos fueron los siguientes:**a) Identificación de las fuentes puntuales de contaminación que afectan directa o indirectamente al río Aconcagua o alguno de sus afluentes (paso 1).**

Se realizó una recopilación de los estudios realizados en la cuenca y luego se llevó a cabo el trabajo de terreno, a fin de efectuar un catastro georreferenciado de las fuentes puntuales que descargan sus riles directamente al río Aconcagua y sus afluentes, de esta forma se identificaron y georreferenciaron las fuentes siguientes:

- Industrias (descargas de Riles con o sin tratamiento)
- Ciudades (plantas de tratamiento de aguas servidas)
- Explotaciones pecuarias (principalmente lecherías)

Además de las descargas a aguas superficiales identificadas y georreferenciadas, se identificaron 315 fuentes potenciales de contaminar los acuíferos (metodología descrita en el capítulo 4)

Con los datos se elaboró una planilla Excel, la cual incluyó los siguientes datos (**ver figura 50**):

- **Nº** = Corresponde a la numeración secuencial de identificación de cada punto.
- **Coordenadas** = Corresponde al registro en UTM de las actividades.
- **Comuna** = Corresponde a la ubicación administrativa del punto.
- **Código CIU**: Corresponde al Índice de la Clasificación Industrial Uniforme de todas las Actividades Económicas, Organización de Estados Americanos, 1976.
- **Actividad**: Corresponde a la actividad industrial relacionada con el índice, también identificada por la OEA, 1976.
- **Nombre**: Corresponde a la denominación comercial del punto.
- **Dirección**: Corresponde al nombre de la vía de emplazamiento del punto.
- **Origen**: Corresponde a la procedencia de las coordenadas UTM.

Nº	COORD. EST	COORD. NO	COMUNA	COD. CIU	ACTIVIDAD
143	263603	6353539	Con Con	41021	Produccion y distribucion de gas
144	263900	6353555	Con Con	62536	Estacion de servicio
145	264030	6353559	Con Con	62536	Estacion de servicio
146	264521	6355411	Con Con	35301	Refineria de petroleo
147	264791	6355241	Con Con	31131	Elaboracion y envasado de frutas y legumbres
148	265150	6355254	Con Con	31111	Matanza de Ganado
149	265797	6350876	Con Con	95992	Pompas funebres, cementerios
150	265801	6354816	Con Con	62536	Estacion de servicio
151	265571	6355091	Con Con	62536	Estacion de servicio
152	265797	6354748	Con Con	62536	Estacion de servicio
153	267219	6354220	Con Con	41021	Produccion y distribucion de gas
154	267329	6354492	Con Con	38131	Fabricacion de estructuras y estanques metalicos
155	267406	6354485	Con Con	62182	Helados y hielo
156	267423	6354483	Con Con	33111	Aserraderos y otros talleres para preparar madera
157	267602	6354152	Con Con	41021	Produccion y distribucion de gas
158	267652	6354568	Con Con	42001	Captacion, purificacion y distribucion de agua

Figura 50: Vista parcial de planilla Excel que incluye los datos correspondientes a cada fuente puntual.

Debe indicarse que de las fuentes catastradas, en su mayor parte presentan un riesgo potencial bajo de contaminar el acuífero, tales como plantas de purificación de agua potable, hospitales, constructoras, hilanderías y otras.

b) Zonificación de riesgo por contaminación difusa

Metodología descrita en el capítulo precedente.

c) Integración de datos en SIG y representación espacial

Para la valoración de riesgo global posterior, que incluyó tanto la contaminación difusa como la originada por las fuentes puntuales, se les asignó mayor relevancia a aquellas fuentes puntuales con emisión de metales pesados, hidrocarburos, coliformes fecales, nitratos, sulfatos y percolados de residuos sólidos domiciliarios. Por tanto, para el análisis espacial se consideraron como fuentes generadoras de riesgo las explotaciones mineras, tranques de relave, refinерías de petróleo, gasolineras (potencial filtración de estanques), mataderos, lecherías, criaderos de aves (a nivel industrial), vertederos y cementerios (potencial lixiviación de nitratos).

El paso siguiente consistió en generar una grilla de 3 x 3 km, la cual se ubicó de forma aleatoria sobre la cuenca.

Mediante las herramientas de análisis espacial, disponibles en ArcView, se realizó un proceso de unión espacial entre la grilla y el plano de riesgo de contaminación, descrito previamente.

La vista inicial de las capas de información se presenta en la **figura 51**, en la cual se puede apreciar la grilla en color magenta, los riesgos en amarillo (3), café (4) y rojo (5), la capa de hidrografía, en azul y las fuentes puntuales en color cian.

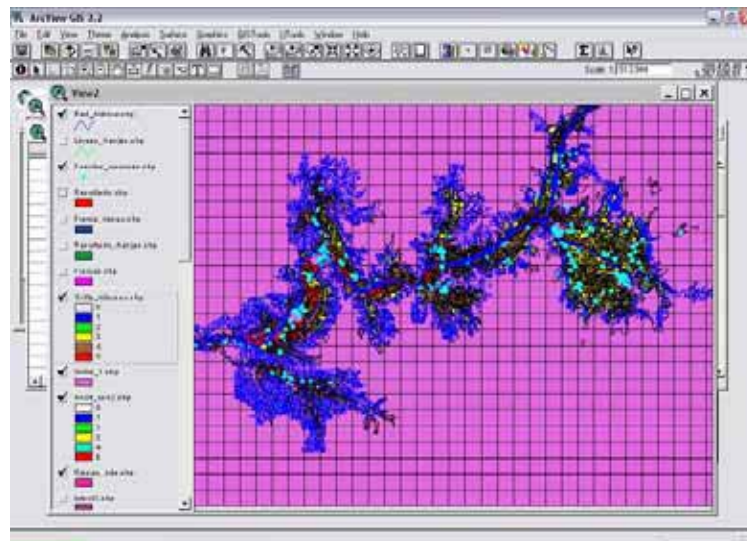


Figura 51: Capas de información utilizadas para el análisis.

Al realizar la unión espacial entre la grilla y el riesgo, se generó una nueva capa de polígonos, que contiene la información de riesgo y a que celda pertenece dicho riesgo. Para esta nueva capa de información, se calculó la superficie a cada polígono y se separaron aquellos polígonos sólo con riesgo 4 y 5. Utilizando la función de estadística de ArcView, tomando como campo de análisis la identificación de la celda, se obtuvo la superficie total de los polígonos con riesgo 4 y 5 para cada una de ellas.

A partir de esta tabla estadística, se seleccionaron aquellas celdas cuya superficie fuera mayor o igual a 450 ha (la celda tiene 900 ha y al menos la mitad de la celda presenta riesgos alto y extremo). El resultado de esta selección se muestra en la **figura 52**, identificándose las celdas en color rojo, a través de las cuales se puede apreciar que quedan delineadas al menos cuatro posibles áreas pilotos, las cuales se presentan marcadas en la **figura 53**, indicándose con un número la priorización inicial.

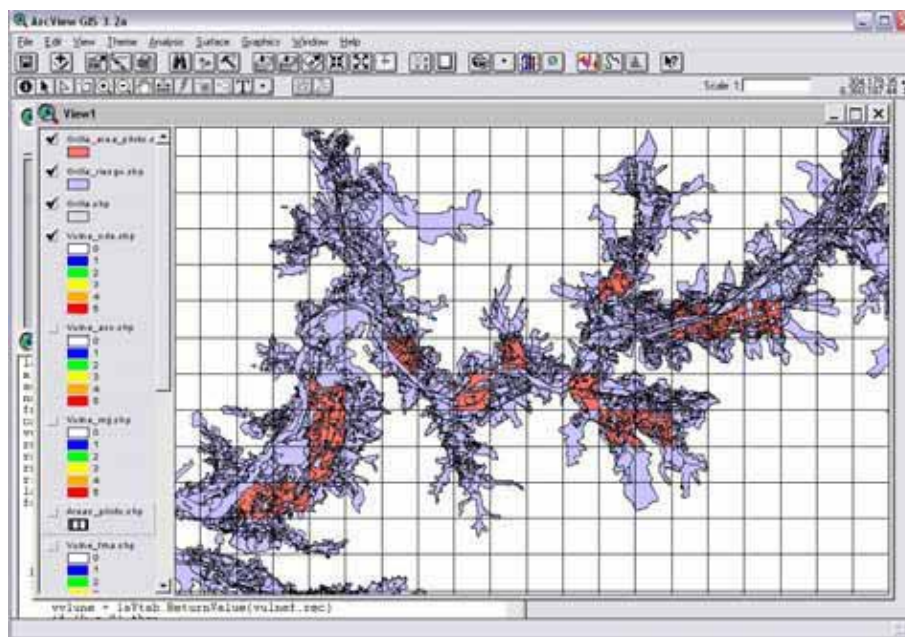


Figura 52: Resultado del análisis de riesgo.

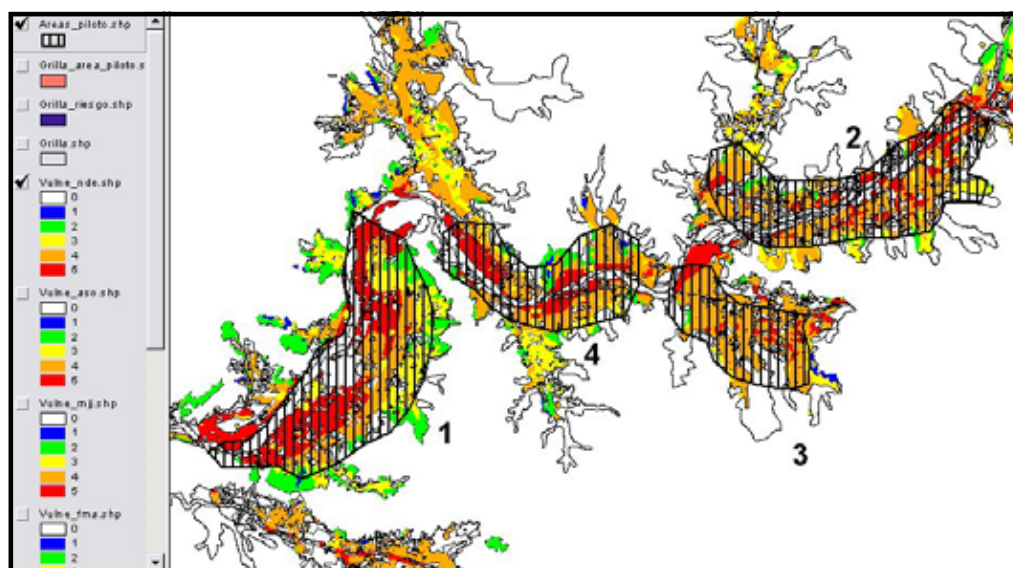


Figura 53: Áreas pilotos propuestas.

Las superficies de cada una de estas áreas, se presentan en la **tabla 30**.

Tabla 30: Superficie de las áreas resultantes

Shape	Id	Area
Polygon	1	11785.23
Polygon	2	10190.28
Polygon	3	4890.29
Polygon	4	6698.86

d) Monitoreos efectuados (metodologías descritas en capítulos 5 y 6).

El paso siguiente consistió en incorporar toda la información relativa a los monitoreos realizados, considerando los siguientes análisis:

- Análisis químicos
- Análisis microbiológicos
- Bioensayos de toxicidad
- Biomarcadores (A pesar de que este estudio entrega antecedentes en matrices muy diferentes, aportó un antecedente más para considerar el efecto de plaguicidas organofosforados y carbamatos sobre fauna silvestre y relacionar los datos con el resto de las variables).

Para la selección de áreas se consideró como relevante la información relativa al monitoreo de aguas superficiales, para lo cual se evaluaron los resultados de los análisis químicos y bioensayos de toxicidad hasta la campaña de mayo de 2004.

Debe recordarse que los parámetros medidos fueron comparados con la **Norma Chilena Oficial Nch 1333** y la **Guía CONAMA para establecer las Normas de Calidad para la Protección de Aguas Continentales Superficiales**". Una vez determinadas las excedencias y sus variaciones a través del tiempo, se relacionaron los datos con la toxicidad detectada y los caudales, ingresando la información a la base de datos SIG Aconcagua (fig. 54)

UNIDAD		Expresión	Fecha	Sólidos disueltos totales (105 °C)	Conductividad Eléctrica	pH Laboratorio	Bicarbonatos	Carbonatos	Cloruros
				mg/l	Microsiemens	PH	mg/l	mg/l	mg/l
A1				440	452	5.0	80.1	0.0	2.85
A1B				240	253	5.2	19.7	0.0	2.99
A2				216	217	5.5	22.9	0.0	1.20
A3				230	256	5.3	33.7	0.0	5.36
A4				190	225	5.1	61.7	0.0	5.1
A5				158	195	5.1	59.6	0.0	4.38
A6				181	195	5.3	73.9	0.0	5.20
A7				110	200	5.3	45.3	0.0	5.08
A8				270	250	5.4	65.9	0.0	5.25
A9				160	200	5.3	50.3	0.0	5.43
A10				85	106	5.6	61.3	0.0	4.1
A11				190	240	5.6	55.2	0.0	5.6
A12				186	231	5.6	63.2	0.0	5.40
A13				201	240	5.3	60.7	0.0	5.95
A14				280	266	5.7	37.7	0.0	6.5
A15				646	675	5.0	240.6	0.0	49.6
A16				245	254	5.2	59.9	0.0	7.09
A17				270	260	5.6	30.1	0.0	4.47
A18				244	265	5.6	26.6	0.0	5.38
A19				790	759	5.0	155.0	0.0	29.5
A20				330	444	5.6	163.0	0.0	46.5
A21				420	446	5.4	250.0	2.4	52.2

Figura 54: Planilla Excel para ingreso de los datos generados en los monitoreos.

Según se observa en la fig. 52, el área que presenta mayor riesgo es la N°1, correspondiente a Quillota, la cual presenta complejidades propias de un área receptora de las secciones precedentes de la cuenca y que además se caracteriza por una intensa actividad agrícola. Además, corresponde al tramo de la cuenca inmediatamente aguas abajo de la ciudad de La Calera hasta el área de ubicación de las plantas termoeléctricas de Nehuenco y San Isidro. Finalmente, las razones para seleccionar dicha área fueron las siguientes:

- Las celdas caen netamente en un área agrícola, no influenciada por el riesgo extremo asociado al río Aconcagua.
- El área se encuentra en la tercera sección del río y por lo tanto, se debiera detectar los problemas de contaminación que provienen de aguas arriba, incluida varias zonas urbanas

de importancia, tales como las ciudades de Quillota (dentro del área), La Calera (inicio del área piloto), Llayllay y otras.

- c) La cantidad y riesgo de las fuentes puntuales (potenciales en su mayoría), también se concentran de manera importante en esta área, ya que se encuentran 27 fuentes en la comuna de Quillota y 6 en la comuna de La Cruz, encontrándose las descargas de las plantas de tratamiento de aguas servidas, un vertedero, dos centrales termoeléctricas, lecherías y otros. Se encuentran además 2 cementerios y 5 estaciones de servicio a incluir como eventuales fuentes de contaminación de aguas subterráneas.
- d) Los análisis microbiológicos realizados a través de la ejecución del proyecto, demuestran que esta área presenta una moderada contaminación fecal en A16 (La Calera), A17 (La Cruz) y A23b (aguas abajo de Nehuenco y San Isidro). La primera estación mejoró paulatinamente su contenido microbiológico.
- e) Con respecto a los bioensayos de toxicidad, se observa una importante toxicidad para microalgas en A16, A17, A18 (Puente Colmo), A22 (Puente Boco, Quillota), A23 (aguas arriba de Nehuenco y San Isidro) y A23b. Ésta última alcanzó un 92,87% de inhibición. La estación A18 ha ido incrementando su toxicidad.
- f) En relación con los metales detectados, se observaron excedencias de cobre total sólo en la 4ª campaña en A16, A17, A20b, A23 y A21 en concentraciones que oscilaron entre 2,38 y 1,12 mg/L.

El área N° 2, también es relevante y a solicitud del equipo supervisor técnico del SAG, ésta fue seleccionada como 2ª área piloto.

Esta área se encuentra en la segunda sección del río y se inicia en la provincia de San Felipe, posterior a la confluencia del río Putaendo con el Aconcagua, hasta la provincia de Catemu. En dicha área se encuentran 20 fuentes puntuales (potenciales en su mayoría), de las cuales 10 están ubicadas en la comuna Panquehue y las 10 restantes en la comuna de Catemu. Entre éstas se destacan plantas de tratamiento de aguas servidas, 2 mataderos, la Fundición Chagres, agroindustrias, 2 estaciones de servicio y un cementerio, entre otros.

Las estaciones de muestreo ubicadas en dicho tramo de la cuenca, corresponden a A12 (después de la confluencia del Putaendo), A13 (sector Manantiales, Panquehue), A13b (Sector Panquehue), A14 (Chagres) A14b (estero Catemu) y A19 (Punta Torrejón, sector Ocoa).

Esta área presenta una leve a moderada contaminación fecal. La estación A13b presentó niveles considerables de contaminación, sólo hasta la 5ª campaña (90.000 coli fecales NMP/100 ml) y posteriormente disminuyó a 40 coli fecales NMP/100 ml, por efecto directo de la planta de tratamiento de aguas servidas.

Además se ha observado una importante toxicidad en microalgas en todas las estaciones, presentando inhibiciones del crecimiento algal sobre 50%.

CAPÍTULO 10: CALIDAD DE SUELOS EN ZONAS DE USO AGROPECUARIO

10.1 INTRODUCCIÓN

Se puede definir contaminación como la alteración de las características físicas, químicas o biológicas de los factores ambientales en grado tal que supongan un riesgo inaceptable para la salud humana o los ecosistemas. De acuerdo a la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, se entiende por contaminación, para todos los efectos legales, *“la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente”*. Es decir, legalmente existiría contaminación cuando la normativa se vea sobrepasada.

En la componente suelo no existe normativa que permite reconocer la contaminación, por lo que para este estudio, se entenderá por suelo contaminado a todo aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que implican un riesgo para la salud humana o el ambiente, de acuerdo con ciertos niveles de referencias o estándares. Ello implica necesariamente contar con estándares para declarar efectivamente a un suelo como contaminado.

Los suelos contaminados pueden tener efectos muy diversos, desde el riesgo tóxico para la salud humana hasta pérdidas de recursos naturales y económicos. Los principales peligros que puede suponer un suelo contaminado son:

- Peligro toxicológico para la salud humana:
 - Por inhalación: problemas alérgicos y respiratorios desde leves hasta muy graves.
 - Por ingestión: por desconocimiento al cultivar suelos contaminados (los elementos contaminantes son transferidos desde el suelo a las plantas y a los hombres, donde los animales domésticos pueden formar parte de la cadena alimentaria).
 - Por contacto directo con la piel: alergias y problemas cutáneos en trabajadores que manipulan este tipo de suelos.
- Peligro de contaminación de aguas superficiales, aguas subterráneas, atmósfera, sedimentos de río, del aire interior de las instalaciones y otros, cuando los contaminantes pasan desde el suelo a los otros medios.
- Peligro físico: explosión o fuego, corrosión de estructuras o efectos en las propiedades mecánicas del suelo en las excavaciones.
- Peligro de utilización de agua de abastecimiento contaminada.
- Peligro de contaminación de los cultivos y animales por utilización de agua subterránea contaminada.

Finalmente, debe tenerse presente que los efectos causados por un suelo contaminado son, en general, a largo plazo y en ocasiones las consecuencias no se detectan de inmediato, por lo que los peligros potenciales pueden tardar décadas en manifestarse con efectos de gran magnitud.

10.1.1 Suelos de la cuenca del río Aconcagua

El paisaje geomorfológico donde se han formado los suelos de este valle es bien característico. El valle es relativamente amplio y los suelos aluviales recientes y los suelos Nogales, San Felipe, ocupan terrazas bastante amplias. El constante relleno del cauce del río con rodados, ha originado un sollevamiento de su lecho, dejando áreas depresionales ubicadas preferentemente próximas a los cerros. En estas zonas, además se encuentran suelos de materiales finos y orgánicos, como los tipos: Las Vegas, Quillota, Panquehue, entre otros. Las altas pendientes de los cerros y el continuo desprendimiento de sus materiales, ha originado grandes formaciones de piedemontes, a ambos lados del valle. La cuenca del río Aconcagua posee unidades taxonómicas características de la V Región de Valparaíso y corresponden básicamente a suelos anfisoles, inceptisoles y mollisoles (CADE IDEPE, 2004). En la tabla 31, se describen las principales características que presentan estas unidades.

Otra característica de los suelos de la cuenca, es la presencia de suelos con terrazas remanentes, que constituyen los mejores suelos de la zona y se caracterizan principalmente, por presentar perfiles profundos, bien desarrollados, de texturas medias a finas, de buena estructura, planos suavemente ondulados (CADE IDEPE, 2004; CIREN-CORFO, 1997), permitiendo un buen desarrollo radicular y buena retención de humedad. Éstos se encuentran localizados en los siguientes sectores: estero Pocuro, Curimón, Catemu, Las Chilcas y en La Calera. Además, se ubican suelos aluviales recientes, con desarrollo incipiente de sus perfiles, de texturas medias a gruesas, con diversos grados de pedregosidad tanto en superficies como en el perfil; se ubican de modo preferente en sectores de Chagres y Putaendo. Los suelos aluvio-coluviales ubicados en San Francisco de Limache y Granizo, ocupan una posición de plano inclinado suave y en posición más alta que los típicamente aluviales, presentando texturas gruesas y clastos redondeados y angulares.

10.1.2 Macronutrientes y Materia Orgánica

a) Fosfatos

El fósforo es esencial para el crecimiento de las plantas, las cuales lo utilizan para completar su ciclo normal de producción. Las plantas absorben la mayor parte del fósforo que necesitan como ion ortofosfato primario (H_2PO_4^-) (Opazo, 1992; PPI *et al.*, 1988). También absorben cantidades menores del ion ortofosfato secundario (HPO_4^{2-}). Otras formas de P también pueden ser utilizadas pero en cantidades mucho menores que los ortofosfatos.

El fósforo elemental es químicamente muy activo. Debido a ello no se le encuentra en estado puro en la naturaleza y se encuentra en combinación con otros elementos. La capa arable de la mayoría de los suelos contiene entre 800 y 1.600 kg de P/ha, combinado con otros elementos, la mayoría no disponible para las plantas. Sólo una cantidad muy pequeña del P total del suelo se encuentra en solución, por lo general, menos de 4 kg/ha (Opazo, 1992).

Tabla 31: Unidades Taxonómicas presentes en la cuenca del río Aconcagua

Taxa	Características
Alfisoles	Se presentan en sectores costeros. Suelos con buen grado de evolución. En la vertiente poniente de la Cordillera de la Costa estos suelos se han desarrollado directamente a partir de roca granítica, presentando un fuerte incremento del contenido de arcilla en profundidad.
Inceptisoles	Situados preferentemente en la costa, pero que también se les encuentra en el interior. Son suelos de desarrollo incipiente a suelos con mayor desarrollo que forman inclusiones en toda la región V, generalmente son derivados de terrazas marinas altas y de relieve plano a ligeramente inclinado, y sedimentarios, en áreas que pueden presentar drenaje restringido. Son de color pardo rojizo a gleyzados cuando domina el mal drenaje.
Mollisoles	Ubicados en el valle central. Suelos aluviales, en la zona que comprende a la región de Valparaíso alcanzan un desarrollo moderado a profundos, con un horizonte superficial que puede ser rico en materia orgánica y de colores oscuros a negro. Cabe mencionar que sobre estos suelos se desarrolla la mayor parte de la agricultura de riego de la zona.
Histosoles	Suelos orgánicos en los cuales los residuos orgánicos se encuentran en diferentes grados de descomposición. Pueden ser muy productivos con adecuados sistemas de drenaje, especialmente para el cultivo de hortalizas.

El contenido de fósforo se expresa como fosfato, aún cuando no se presente como tal. El fosfato (P_2O_5) es la designación corriente del contenido de $P^{(2)}$.

La concentración de fosfato en los suelos se considera baja, adecuada o alta, dependiendo de los requerimientos de las plantas.

Los contenidos de fósforo total en los suelos varían entre 90 y 2.000 mg/k (206 y 4.580 mg/k de P expresado como fosfato) y el valor promedio estaría en torno a 900 mg/k (2061 mg/k expresado como fosfato). Según Opazo (1992), en suelos de la zona central del país se han determinado valores de entre 730 y 1.290 mg/k (1.672 y 2.954 mg/k en términos de fosfato) y en suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona sur del país, entre 940 y 1.725 mg/k (Opazo, 1992).

En los suelos el 2% del P, referido al total, se encuentra en formas disponibles para las plantas (Opazo, 1992). Luego, de acuerdo a lo anterior los niveles de fosfato se pueden encontrar en los suelos de la zona central del país entre 33 a 60 mg/k.

En la tabla 32 se presenta una clasificación de los niveles de fósforo aprovechable en los suelos, de acuerdo a la Escuela de Agronomía de la Universidad de Chile y al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), mientras que en la tabla 33 se consigna la disponibilidad del fósforo para las plantas, de acuerdo a distintas concentraciones.

² Para convertir el P en P_2O_5 se multiplica por el factor 2,29. Para convertir de a P_2O_5 P, se multiplica por el factor 0,43, dado que en 144 de P_2O_5 hay 64 de P, puesto que el O tiene un peso molecular de 16 y el P de 32.

Tabla 32: Niveles de referencia del fósforo aprovechable en los suelos (mg/k)

Nivel	U. de Chile	INIA
Bajo	< 7	< 3
Medio	7 – 15	4 – 7
Alto	> 15	7 – 15

Fuente: CONAMA. Metodologías para la caracterización de la calidad ambiental. 1996.

Tabla 33: Índices de disponibilidad de fósforo en el suelo

Concentración (mg/k)	Calificación
< 5	Muy Bajo
5 – 10	Bajo
10 – 15	Medio
15 – 25	Alto
> 25	Muy Alto

Fuente: FAIGUEN BAUM, Hugo. Análisis de suelo y su interpretación. Publicación Docente. Depto. de Producción Agrícola, Fac. de Cs. Agrarias, Veterinarias y Forestales, Univ. De Chile. Mayo, 1983.

b) Amonio y Nitrato

El nitrógeno es esencial para el crecimiento de las plantas. Forma parte de todas las células vivientes. Las plantas absorben la mayor parte del N en forma de iones amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-) (Opazo, 1992; PPI *et al*, 1988). Los cultivos utilizan cantidades considerables de amonio, si éste se encuentra en el suelo. Esto se debe a que la reducción de nitrato en la planta requiere de energía, el que pasa a amonio. El amonio en la planta es convertido a aminoácido. Para la reducción, la energía es suministrada por carbohidratos en desmedro de la producción.

El N se presenta en el suelo de tres formas principales (Casanova, 1991):

- **Nitrógeno orgánico:** como parte de la materia orgánica del suelo; no disponible para las plantas en crecimiento.
- **Nitrógeno amoniacal:** fijado en minerales arcillosos; disponible en forma lenta para las plantas.
- **Iones de amonio y nitrato o compuestos solubles:** forma en que las plantas utilizan el nitrógeno.

El nitrógeno orgánico representa el 97-98% del N total del suelo, por lo que el nitrógeno inorgánico representa sólo entre el 2 al 3%.

El N orgánico cuando pasa a las formas inorgánicas se hace disponible para las plantas. A dicho proceso se le denomina mineralización. Este proceso se produce a medida que los microorganismos descomponen las materias orgánicas para obtener su energía. El exceso de N (una vez que los microorganismos lo utilizan) es liberado al suelo, para el crecimiento de las plantas.

Por otra parte, las formas inorgánicas se pueden convertir a formas orgánicas, en un proceso denominado inmovilización. Es el proceso opuesto a la mineralización.

La mineralización y la inmovilización se producen en forma simultánea, lo que depende, en gran parte, de la proporción de carbono/nitrógeno (C/N) de los materiales orgánicos que se están descomponiendo. Aquellos materiales con una proporción C/N amplia (más de 30:1) favorecerán la inmovilización. Aquellos materiales con una proporción C/N más estrecha (menor de 20:1) favorecerán una mineralización más rápida. En las proporciones C/N en la gama de 20:1 a 30:1, los dos procesos son casi iguales.

Cuando la inmovilización del N del suelo excede la mineralización, prácticamente no se encontrará N disponible para el crecimiento del cultivo, a menos que se hayan aplicado fertilizantes nitrogenados.

Los nitratos tienen una movilidad muy alta en el suelo. Se mueven libremente con el agua del suelo. De modo que los nitratos pueden ser lixiviados del perfil de suelo, más profundamente en los suelos arenosos que con respecto a los suelos arcillosos con drenaje moderado y alta pluviosidad.

Los nitratos se pueden perder por desnitrificación, proceso en el cual los nitratos son reducidos a óxido nitroso o nitrógeno elemental perdiéndose en la atmósfera como un gas. En condiciones normales de nitrificación predomina en el suelo el ion nitrato y sólo se encuentran pequeñas cantidades de amonio.

En la tabla 34 se presenta una clasificación de los niveles de nitrógeno aprovechable en los suelos de acuerdo a la Escuela de Agronomía de la Universidad de Chile y al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Tabla 34: Niveles de referencia del nitrógeno aprovechable en los suelos (mg/k)

Nivel	U. de Chile	INIA
Bajo	< 25	< 20
Medio	25 – 50	20 – 40
Alto	> 50	> 40

Fuente: CONAMA. Metodologías para la caracterización de la calidad ambiental. 1996.

De acuerdo a Faiguenbaum (1983), los índices de disponibilidad de nitrógeno en los suelos son los que se expresan en la tabla 35.

Tabla 35: Índices de disponibilidad de nitrógeno en el suelo

Concentración (mg/k)	Calificación
< 10	Muy Bajo
10 – 20	Bajo
20 – 40	Medio
40 – 60	Alto
> 60	Muy Alto

Fuente: FAIGUENBAUM, Hugo. Análisis de suelo y su interpretación. Publicación Docente. Depto. de Producción Agrícola, Fac. de Cs. Agrarias, Veterinarias y Forestales, Univ. De Chile. Mayo, 1983.

En nuestro país el contenido total de nitrógeno se incrementa hacia el sur, pero no hay suficiente temperatura para transformarlo de orgánico a inorgánico, siendo muy lenta la mineralización. Si bien existe humedad, no hay suficiente temperatura para que ocurra el proceso de transformación (Opazo, 1992).

Las sales formadas por el ión nitrato son generalmente solubles, y el nitrato de calcio tiene tal afinidad por el agua que es deliquescente, lo que significa que capaz de captar humedad atmosférica y se disuelve. Los cationes principales que se asocian en aguas subterráneas probablemente son el Ca, Mg, K, Na, Fe y Al, y las sales que ellos forman con nitrato son altamente solubles (Opazo, 1992).

En términos de salud para el hombre, el nitrato genera cáncer estomacal, gastroenteritis, enfermedades al corazón y problemas a la piel, metahemoglobinemia (síndrome de los bebés azules) y diabetes (Casanova, 2002).

c) Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo consiste en residuos vegetales y animales a varios niveles de descomposición. La materia orgánica en el suelo tiene varios efectos que lo benefician de diferente forma (Varnero, 1991; Opazo, 1992; Fenech, 1993):

- Mejora la condición física
- Aumenta la infiltración del agua
- Mejora la porosidad del suelo
- Mejora la friabilidad
- Provee de nutrientes a las plantas
- Disminuye las pérdidas por erosión

La materia orgánica contiene cerca del 5% del nitrógeno total, encontrándose en compuestos orgánicos y por lo tanto, no está disponible en forma inmediata para las plantas. La materia orgánica del suelo contiene, en cantidades variables, otros elementos esenciales para las plantas como son los elementos minerales fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes. A medida que la materia orgánica se descompone, estos elementos quedan disponibles para las plantas en crecimiento (Opazo, 1992).

Los suelos contienen niveles variables de materia orgánica. En zonas de climas calurosos con elevados montos pluviométricos la materia orgánica se descompone aceleradamente a diferencia de climas más frescos y fríos, donde la materia orgánica se descompone a menor velocidad. La labores culturales favorecen la descomposición de la materia orgánica, producto de la oxidación de la misma (Faiguenbaum, 1983).

La materia orgánica representa, en general, menos del 5% en peso, en el caso de un suelo típico, pudiendo los suelos minerales llegar a tener hasta un 20% de materia orgánica, situación que es muy poco común. En suelos orgánicos como los pantanos y los estratos de humus, la materia orgánica de 20% hasta 90% (Faiguenbaum, 1983).

Los contenidos de materia orgánica en suelos “no trumaos”, según Peralta (1976) se pueden clasificar según se indica en la tabla 36.

Tabla 36: Calificación de la materia orgánica de acuerdo a su concentración según Peralta

Porcentaje (%)	Calificación
< 0,5	Muy Bajo
0,5 – 2,0	Bajo
2,0 – 3,5	Medio
3,5 – 6,0	Alto
> 6,0	Muy Alto

Nota: En caso de suelos trumaos los porcentajes de materia orgánica aumentan significativamente para la misma clase.

Fuente: PERALTA, Mario. Uso, Clasificación y Conservación de Suelos. Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 1976.

10.1.3 Metales pesados

El Cu, Fe, Mn, Mo y Zn son considerados elementos micronutrientes. Desde un punto de vista geoquímico son un grupo heterogéneo. El Mn es un elemento litófilo, es decir se presenta en forma dominante como mineral de silicato. El Zn es litófilo y calcófilo, encontrándose en forma dominante en silicatos y sulfuros. El Cu y Mo son calcófilos y siderófilos, por lo que se les encuentra en sulfuros y en elementos nativos como el hierro. El Fe se encuentra en silicatos, sulfuros y metales nativos, por lo que se le considera litófilo y calcófilo (Krauskopf, 1983).

Según Krauskopf (1983) de datos analíticos obtenidos de materiales geológicos comunes que se presentan como concentraciones habituales en la tabla 37.

Tabla 37: Abundancia de los elementos micronutrientes y rango de concentración habitual en los suelos (mg/k)

Elemento	Corteza Terrestre	Rocas ígneas		Rocas sedimentarias			Suelos	
		Granito	Basalto	Caliza	Arena	Esquisto	Mortvedt <i>et al</i> (1)	Loué (2)
Fe	56.000	27.000	86.000	3.800	9.800	47.000	10.000– 100.000	200-100.000
Mn	950	400	1.500	1.100	10-100	850	20 – 3.000	20-6.000
Cu	55	10	100	4	30	45	10 – 80	3-100
Zn	70	40	100	20	16	95	10 – 300	10-300
Mo	1,5	2	1	0,4	0,2	2,6	0,2-10	0,5-5

Fuente: . 1. Krauskopf, 1983.

2.- Loué.1988.

Nota: Loué señala que pueden detectarse variaciones poco usuales en condiciones de inexistencia de contaminación, sin incluir valores extremos relativos por las cercanías a depósitos de minerales, los que pueden llegar, como valores inferiores y superiores, respectivamente, a:

Mn:			8.000 a 10.00	mg/k
Cu:	0,1 – 3	;	110 – 3.000	mg/k
Zn:	3 – 10	;	600 – 10.000	mg/k
Mo:	0,1 – 0,2	;	7 – 200	mg/k

De la información presente en la tabla 31, las concentraciones de los elementos en el suelo quedan sujetas a la concentración de los mismos en las rocas parentales que le dan origen.

a) Cobre

El Cu en el suelo está presente, generalmente, como Cu^{+2} adsorbido y en solución como ion y en formas complejas. La adsorción es suficientemente fuerte para mantener una concentración baja de Cu en solución en el suelo. Donde las cantidades de Cu exceden la capacidad de adsorción y donde las condiciones son ácidas y oxidantes, se pueden encontrar cantidades abundantes de Cu en solución (Krauskopf; 1983; Loué, 1988).

b) Hierro

El Fe es el elemento más abundante en el planeta y el cuarto más abundante en las rocas de la corteza terrestre. Es el elemento que parece estar adaptado a los principales ambientes geoquímicos (Krauskopf; 1983; Loué, 1988).

Comúnmente y en forma principal se encuentra como óxidos férricos en las partes oxidadas de los suelos. El óxido está comúnmente hidratado, pero en suelos más antiguos se presenta como hematita. Adicionalmente al óxido, parte del hierro en muchos suelos, se puede encontrar como gránulos de minerales primarios parcialmente desgastados, en los cuales la magnetita es el compuesto más común debido a que se desgasta más lentamente que los silicatos de Fe. En zonas muy localizadas, otros minerales de Fe(III), particularmente los sulfatos y fosfatos, pueden ser constituyentes del suelo. En condiciones oxidantes, en la solución suelo, se mueve principalmente como Fe_2O_3 coloidal, en parte estabilizado por la materia orgánica y por adsorción en partículas de arcilla. Los complejos de Fe^{+3} con enlaces orgánicos son otra posibilidad de existencia.

En zonas de suelos ricos en materia orgánica gran parte del hierro puede ser reducido y estar presente en soluciones del suelo o adsorbido en superficies como Fe^{+2} o complejos de este ion. A medida que el pH de las soluciones del suelo se eleva, la adsorción se incrementa y la formación de minerales específicos de Fe(II) se hace posible.

c) Manganeso

El comportamiento químico y la presencia geológica del Mn son similares a la del Fe. Sin embargo se encuentran muy separados en la naturaleza. El Mn tiene una naturaleza más electropositiva, mayor solubilidad de sus compuestos y menor estabilidad y mayor solubilidad de sus sulfuros. Los minerales de Mn son principalmente óxidos pero también se incluyen carbonatos y silicatos.

El Mn se encuentra presente en forma natural mostrando 3 valencias: 2^+ , 3^+ y 4^+ . El ion trivalente es inestable en solución. La concentración de Mn en suelos muestra un rango extremo que va desde valores menores a 20 ppm hasta mayores de 6.000 ppm. El Mn intercambiable es mucho menor, aún cuando puede mostrar un amplio rango. Ni el Mn total, ni el intercambiable muestran mucha correlación con la composición de las rocas que le dan origen. El Mn es altamente móvil en los suelos, de forma que se pueden encontrar amplias diferencias de concentración entre un lugar y otro, para suelos de igual origen.

El Mn se puede encontrar en los suelos de la siguiente forma:

- En suelos fuertemente reductores se podría esperar como Mn^{+2} adsorbido, con la excepción de suelos alcalinos, donde parte del Mn podría formar MnCO_3 .
- En soluciones de suelo la mayoría del Mn está presente principalmente como complejos más que como ion simple.
- En suelos oxidados el Mn^{+2} adsorbido puede precipitar en cantidades considerables, pero una buena parte debe estar presente como uno de o más de los óxidos minerales superiores.

d) Molibdeno

El molibdeno se presenta como molibdato cuando el sulfuro es oxidado. En la naturaleza las valencias importante geológicamente son 4^+ y 6^+ . La valencia inferior está prácticamente limitada al más abundante mineral de Mo, la molibdenita (MoS_2), mientras que la valencia superior es característica de los molibdatos formados en ambientes superficiales. En gran parte, la química del Mo en ambiente cercanos a la superficie, a diferencia de otros metales micronutrientes, es la química de los aniones; ésta se refiere al comportamiento del MoO_4^{-2} y de pocos molibdatos insolubles, de los cuales los más abundantes son wolfenita (PbMoO_4), powllita (CaMoO_4) y ferrimolibdita ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) (Krauskopf; 1983; Loué, 1988).

Los análisis de suelo para Mo muestran un amplio rango de concentración, generalmente menor de 5 ppm. Como regla general, la disponibilidad de Mo es elevada en suelos alcalinos, suelos ricos en materia orgánica y suelos jóvenes derivados de rocas volcánicas, mientras que los suelos podzol y aquellos desarrollados en rocas con abundancia de hierro, tiene valores particularmente bajo.

El molibdato se encuentra en los suelos principalmente como MoO_4^{-2} adsorbido, aunque la capacidad de un suelo para adsorber este ion depende principalmente de su contenido de Fe_2O_3 .

e) Zinc

El Zn es un mineral de sulfuro, la escalerita, El Zn^{+2} sustituye en cierto grado al Mg^{+2} en minerales de silicato y forma tres minerales de silicato. La química del Zn muestra únicamente una sola valencia en materiales naturales. En comparación con el Cu, el Zn migra más lejos de su fuente original en los suelos y rocas y debido a este comportamiento se le conoce como uno de los elementos pesados de mayor movilidad (Krauskopf, 1983; Loué, 1988).

En los suelos el Zn está probablemente presente en mayor parte como iones simples absorbidos en los constituyentes más finos. El Zn^{+2} en solución, se reduce a valores cercanos a pH 9, a diferencia del Cu, que a menores pH desaparece como disuelto. En soluciones básicas se precipita a $\text{Zn}(\text{OH})_2$ si la concentración del ion zinc es elevada. Este compuesto muestra una solubilidad mínima a pH 9,5 y se disuelve a valores de pH mayores para formar el ion zincato, $\text{Zn}(\text{OH})_4^{-2}$.

f) Plomo

El plomo no es fisiológicamente un mineral esencial y por lo tanto, potencialmente, es un metal dañino. Su promedio en la corteza terrestre es de 16 ppm, encontrándose valores tan altos como 40 a 70 ppm en suelos no contaminados (Davies, 1968). En general, los horizontes superficiales de los suelos contienen mayor concentración de plomo adsorbido que los horizontes más profundos. Según informa Swaine y Mitchell (1960) un suelo no cultivado de Escocia presentaba concentraciones de 20 a 30 ppm de Pb en los horizontes más bajos, comparado con 550 ppm en el horizonte superficial A₁. Existirán evidencias que indican que las raíces extraen plomo de los horizontes inferiores y posteriormente quedar depositados en la superficie por descomposición de la materia (Lagerwerff, 1983).

g) Cadmio

La presencia ambiental de Cd está normalmente unida a la del Zn debido a su relación geoquímica. El Cd es un constituyente normal de los depósitos marinos y puede llegar a la zona radicular como una impureza en los fertilizantes fosfatados, provenientes principalmente de la roca de fosfato y del superfosfato. La disponibilidad de Cd a partir de los fosfatos en el suelo es desconocida (Ross y Stewart, 1969).

h) Arsénico

El arsénico es parte de algunos minerales que se explotan para la obtención de cobre y en menor medida, oro, ya sea por ser parte integrante del mineral o por ser mineral acompañante. Los principales minerales que contienen arsénico son los sulfuros y muy secundariamente, los óxidos de cobre. Entre los sulfuros de cobre con elevadas concentraciones de As destacan la enargita (Cu_3AsS_4) y arsenopirita (FeAsS). Otros sulfuros, con menores concentraciones de As posibles de encontrar, se cuenta la pirita (FeS_2), pirrotita (FeS), calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S), bornita (Cu_5FeS_4) y covelina (CuS).

Entre los óxidos que pueden tener bajas concentraciones de As, por ser elementos acompañantes, se tiene la cuprita (Cu_2O) y malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$) (Urrea, 2005).

Por otro lado, algunos materiales empleados en fundiciones contienen arsénico que tiene la posibilidad de irse al ambiente, desmejorando la calidad del aire y luego depositarse en los suelos. Entre ellos se cuenta la calcina de cobre (que se obtiene de la tostación del concentrado de cobre), los polvos de fundición de cobre (que se recuperan en el proceso de fusión de concentrados), concentrados de arsenopiritas auríferas (pueden corresponder al producto principal o producto secundario de una planta de concentración por flotación, donde la especie principal corresponderá normalmente a arsenopirita), barros arsenicales (material proveniente de la purificación del electrolito en refinerías de cobre), metal blanco (producto intermedio de la fusión), etc. Los concentrados primarios de cobre son los que tienen mayor concentración de arsénico que se va al ambiente (Urrea, 2005).

10.1.4 Plaguicidas

La mayor parte de los plaguicidas son productos químicos que se utilizan en la agricultura para combatir plagas, malezas o enfermedades de las plantas. Estos productos pueden obtenerse por extracción de las plantas o ser sintéticos.

Según la FAO (1986), un plaguicida es cualquier sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir, destruir o controlar cualquier plaga, incluyendo los vectores de enfermedades humanas o de los animales, las especies no deseadas de plantas o animales que causan perjuicio o que interfieren de cualquier otra forma en la producción, elaboración, almacenamiento, transporte o comercialización de alimentos, productos agrícolas, madera y productos de madera o alimentos para animales, o que pueden administrarse a los animales para combatir insectos, arácnidos u otras plagas en o sobre sus cuerpos. El término incluye las sustancias destinadas a utilizarse como reguladoras del crecimiento de las plantas, desecantes, agentes para reducir la densidad de fruta o agentes para evitar la caída prematura de la fruta y las sustancias aplicadas a los cultivos antes y después de la cosecha, para proteger el producto contra el deterioro durante el almacenamiento y transporte.

Los plaguicidas pueden clasificarse de muchos modos. Según la plaga a la que están destinados, según la estructura química del compuesto utilizado o según el grado o tipo del riesgo sanitario que entrañan. Una de las formas más corrientes de clasificación es en relación a los compuestos

activos. Así se tienen los insecticidas organofosforados, organoclorados, carbamatos, piretrinas y piretroides (FAO, 1986).

Los insecticidas organofosforados son los más ampliamente utilizados a nivel mundial en la agricultura, seguido de los insecticidas carbamatos. Los organofosforados han reemplazado casi por completo a los insecticidas organoclorados, Esto se debe su escasa persistencia en el medio ambiente, su mayor actividad y consecuentemente su menor posibilidad de resistencias (FAO, 1986).

Entre los organoclorados el DDT es el más representativo y su uso ha sido indiscriminado por su bajo costo y alta eficacia. Sin embargo, por su toxicidad hacia el medio ambiente y bioacumulación se encuentra prohibido en la mayor parte de los países.

Las piretrinas son sustancias orgánicas de origen natural y los piretroides son sustancias de origen sintético y semisintético. Se han utilizado con relativa confianza debido a la baja toxicidad aguda pero se deben manejar con métodos seguros (FAO, 1986).

Los plaguicidas son de gran uso en la agricultura y no se concibe una agricultura masiva y exportadora, sin la aplicación de pesticidas. Existen reducidas excepciones en que los pesticidas han sido sustituidos por productos naturales, como ocurre en la agricultura orgánica. El objetivo de los pesticidas es el control de plagas y enfermedades, las que sin embargo, han originado problemas de contaminación ambiental y de potenciales riesgos para la salud de las personas expuestas. Estos compuestos, por haber sido producidos para interactuar y afectar en forma inespecífica a seres vivos no deseados, producen efectos tóxicos a otras especies, incluyendo el hombre (FAO, 1986).

En la historia de la humanidad la aparición de la agricultura marca un hito. El autoequilibrio que había logrado el ecosistema, es radicalmente modificado en el momento en que el hombre actúa sobre determinadas especies, que a través de la evolución había seleccionado como valiosas para su alimentación. La necesidad de producir alimentos para una población cada vez mayor, le permite ir reconociendo el proceso de competencia vegetal, clasificando como malezas a las especies que son dañinas para los cultivos.

La ruptura del equilibrio ecológico, por la introducción de monocultivos, trae como consecuencia la propagación de las especies que se alimentan de dichas plantas, denominadas a partir de allí plagas. El modelo del monocultivo, especialmente en grandes extensiones, obliga al hombre a establecer controles cada vez más especializados con el uso extensivo de plaguicidas.

En el marco del Proyecto se llevó a cabo un muestreo de contaminantes en suelos del valle del río Aconcagua, para lo cual se tomaron 15 muestras de suelos en enero del año 2002, a las cuales se les realizaron análisis de arsénico, cadmio, cobre, fosfato, hierro, manganeso, materia orgánica, molibdeno, nitrato, plomo, zinc y de los plaguicidas atrazina, captan, cianazina, dimetoato, glifosato y simazina, posteriormente, una vez reestructurado el proyecto y luego de seleccionadas las áreas piloto el año 2004, se realizó un monitoreo de dos zonas que se reconocen bajo la influencia de las actividades industriales y agrícolas.

El estudio comprendió un conjunto de catorce plaguicidas, tres macronutrientes, materia orgánica y ocho metales pesados, de los cuales cinco son considerados micronutrientes.

10.2 OBJETIVOS

Caracterizar el estado de contaminación (metales pesados y plaguicidas) de algunos suelos de las áreas pilotos de la cuenca del río Aconcagua, como así, conocer el contenido basal de macronutrientes y materia orgánica.

10.3 METODOLOGÍA

10.3.1 Fuente de información

La fuente de información empleada para la selección de los sitios corresponde al Estudio de Suelos de CIREN-CORFO (1997) y las ortofotos que se indican en la tabla 38.

Tabla 38: Identificación de las ortofotos utilizadas en el muestreo de suelos y en su descripción

Ortofoto CIREN CORFO N°	Nombre
19482	San Francisco de Limache
19532	Morro Divisadero
19584	Llay – Llay
192374	El Escorial
19484	Cordón Lo Rojas
19530	Quillota
19582	Catemu
192325	Panquehue
192372	Punta de Barrancas

10.3.2 Digitalización de la Información Cartográfica

La cartografía SIG utilizada en el estudio de terreno (ortofotos con layout de suelos) fue elaborada por el Laboratorio de Ciencias de Información Geográfica de la Universidad Mayor (LCIG). En esta base cartográfica se seleccionaron los puntos de muestreo.

10.3.3 Criterios, diseño y selección de los suelos de muestreo

El diseño y selección de los sitios de muestreo se realizó en forma estratificada y dirigida, dividiendo el área en dos sectores, donde los suelos a muestrear fuesen representativos por su superficie, se ubicarán en áreas agrícolas de importancia areal y por estar influenciados por actividades industriales de diversa índole (Urrea, 2003).

El primero de los dos sectores corresponde al área conformada al poniente de San Felipe, a la altura de Putaendo hasta la localidad de Catemu, denominado Sector San Felipe. El segundo Sector quedó conformado por el área La Calera – Quillota, denominándose Sector Quillota.

Entre los conceptos empleados para la selección de los suelos se tuvo en cuenta que fueran unidades cartográficas de gran extensión superficial y que correspondiesen a la Fase 1 de las Series de Suelo seleccionadas, equivalentes al perfil modal descrito en el Estudio Agrológico de CIREN-CORFO (1997).

Empleando las bases cartográficas con las que se precisaron los sitios de muestreo, se procedió a muestrear en calicatas, previa verificación que el perfil de suelo guardara relación con la fase de la serie de suelo seleccionada en gabinete.

Al respecto cabe señalar que los suelos del Sector San Felipe presentaron Fases de suelo de mayor superficie que los suelos del Sector Quillota. Así, en el primer Sector, en un perfil de oriente a poniente, se distinguen suelos que tienden a concentrarse en la parte más alta, en tanto que otros, lo hacen en la parte más baja respecto al río. Esta tendencia se pierde o por lo menos no es clara en el Sector Quillota.

10.3.4 Suelos muestreados

Los suelos muestreados corresponden a las Series La Calera, Lo Campo, Los Pidenes y Pocuro, todos pertenecientes al Orden de Suelo Mollisols, además de las Series Las Pataguas y Palomar, que clasifican en los Órdenes Inseptsols e Histosols, respectivamente.

En el ANEXO B-1 se presenta la descripción de los suelos de acuerdo a CIREN-CORFO (1997). En dicha descripción se presentan todas las series reconocidas y las características físicas y físico-químicas. A su vez, en el ANEXO B-2 se detalla la leyenda descriptiva de suelos que permite su interpretación, como así, la descripción de los Órdenes de Suelos señalados y todos aquellos reconocidos en la actualidad.

En las figuras 55 y 56 se observa la ubicación de los puntos de muestreo.

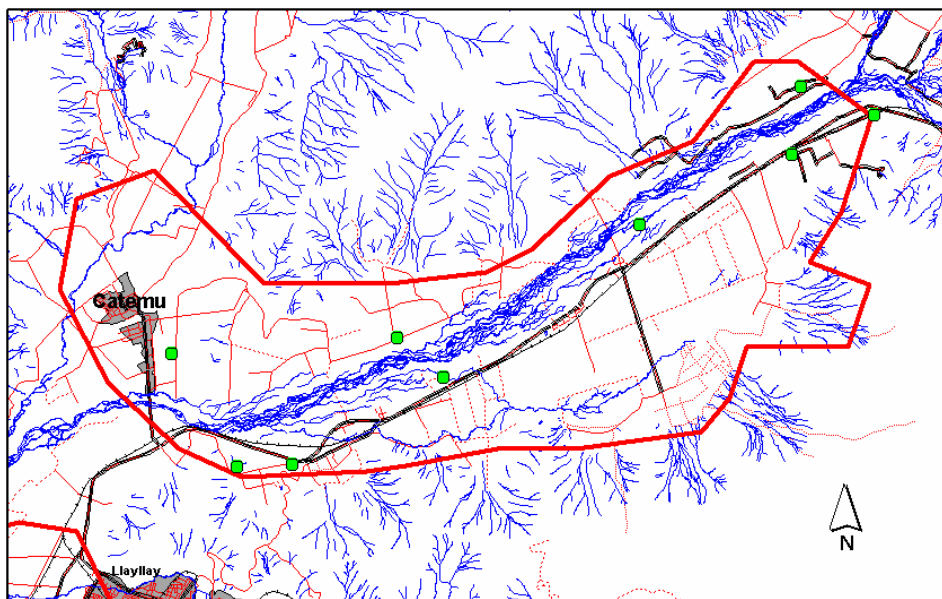


Figura 55: Puntos de muestreo de suelos en área piloto entre San Felipe y Catemu

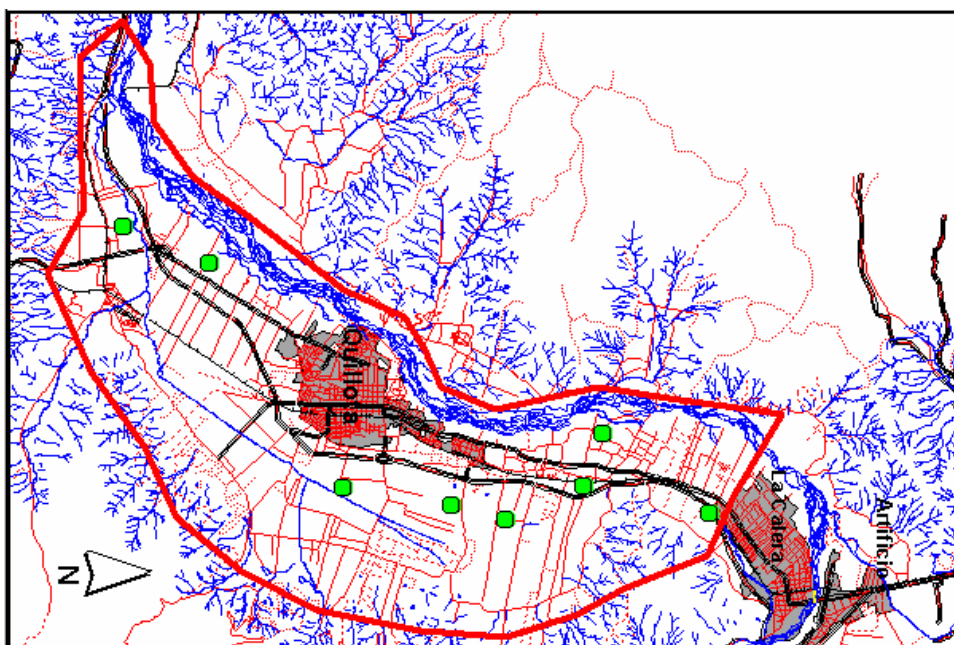


Figura 56: Puntos de muestreo de suelos en área piloto entre La Calera y Nehuenco y San Isidro

A continuación se expone una síntesis de las características de la **Serie y Fase muestreadas**.

a) Suelo La Calera (CAL)

Suelo sedimentario de origen aluvial que ocupa una posición de terraza aluvial remanente y más alta que los suelos que lo rodean. Suelo de permeabilidad moderada, muy profundo (entre 60 y 110 cm). El drenaje varía de bien drenado hasta imperfecto y la pedregosidad superficial desde libre de ella hasta moderada. De pH moderadamente alcalino (8,2) en los primeros 40 cm y ligeramente alcalino en profundidad (7,7 a 7,8). Suelo de textura franca a franco arcillo limosa en superficie y en profundidad varía (franca y ocasionalmente franco arenosa muy fina/ franco arcillo limosa a arcillo limosa/franco arcillo limosa a franco arenosa muy fina). Estructura de bloques subangulares en todo el perfil. No salino, con un contenido de materia orgánica (MO) de 3,1% en superficie a 1,6% en profundidad. Se clasifica como un Typic Haploxerolls (Mollisol).

Fase muestreada:

CAL - 1	Corresponde a la Serie y corresponde a suelos de textura superficial franca, profundos, planos y bien drenados. Se clasifica en :		
Capacidad de Uso	: I	Clase de Drenaje	: 5
Categoría de Riego	: 1	Aptitud Frutal	: A
Erosión	: 0	Aptitud Agrícola	: 1

b) Serie Lo Campo (LCM)

Suelo de origen lacustrino, moderadamente profundo (45 a 65 cm), en posición baja. De textura franco arcillo limosa en superficie y franco limosa en profundidad. Descansa sobre una estrata calcárea de color blanco de espesor variable (15 a 30 cm) con un contenido de CaCO_3 de 40 a 47,4%, lo que determina un pH de 7,9 a 8 en el perfil. No salino y contenidos de MO elevados de 5,7 a 6,9.

Presenta topografía plana y el drenaje varía de imperfecto a muy pobre, con una permeabilidad moderada en el suelo. Estructura de bloques subangulares en todo el perfil.

Taxonómicamente se le clasifica como Typic Calcixerolls (Mollisol).

Fase muestreada:

LCM - 1	Representa a la Serie y corresponde a suelos de textura franco arcillo limosa, ligeramente profundos, planos y de drenaje imperfecto. Se clasifica en :		
Capacidad de Uso	: IIIw2	Clase de Drenaje	: 3
Categoría de Riego	: 2w	Aptitud Frutal	: E
Erosión	: 0	Aptitud Agrícola	: 3

c) Serie Los Pidenes (LPD)

Suelo sedimentario, de origen aluvial, en posición de terraza baja y marginal a los ríos, estratificado; de textura franco arenosa muy fina en la superficie y franco arcillo arenosa fina en profundidad. Descansa sobre un substrato constituido por estratas arenosas y limosas, con colores gleizados, sobre ripio. Suelo de topografía plana, de drenaje pobre a muy pobre y con nivel freático alto. Algunas unidades cartográficas están sometidas a inundaciones ocasionales.

La profundidad efectiva del suelo varía entre 30 y 55 cm; pH de 8,0 en superficie y 7,5 en profundidad; es extremadamente salino y la MO varía en profundidad de 3,2% a 11%.

Se le clasifica como Aeric Calciaquolls (Mollisol).

Fase muestreada:

LPD - 1 Representa la Serie y corresponde a suelos de textura superficial franco arenosa muy fina, ligeramente profundos, planos y de drenaje pobre. Incluye suelos de textura superficial franco arenosa. Se clasifica en :

Capacidad de Uso	: IVw2	Clase de Drenaje	: 2
Categoría de Riego	: 3w	Aptitud Frutal	: E
Erosión	: 0	Aptitud Agrícola	: 4

d) Serie Pataguas (PAT)

Suelo sedimentario de origen aluvial, moderadamente profundo; de textura superficial franco limosa y franco a franco arcillo limosa en profundidad. Substrato constituido por estratas de colores de gley, de texturas franco arenosa y franco arcillo limosa, que varía en cuanto a disposición y grosor de ellas dentro del perfil y a la profundidad a que se encuentra,. Suelo de topografía plana en posición de terraza aluvial reciente, de permeabilidad moderadamente lenta y de drenaje moderado a pobre.

Su profundidad efectiva varía entre 50 y 70 cm, con pH alrededor de 8,0 e todo el perfil, MO aumentando en profundidad de 2,9 a 4,0% y CaCO₃ de 2,6% a 5,9% en el mismo sentido. No salino.

La Serie Pataguas se clasifica taxonómicamente como Fluventic Xerochrepts (Inceptisol).

Fase muestreada:

PAT - 1 Representa a la Serie y corresponde a suelos de textura superficial franco limosa, ligeramente profundos, planos y de drenaje imperfecto. Incluye suelos con ligera pedregosidad. Se clasifica en :

Capacidad de Uso	: IIIw2	Clase de Drenaje	: 3
Categoría de Riego	: 2w	Aptitud Frutal	: D
Erosión	: 0	Aptitud Agrícola	: 3

e) Serie Pocuro (PCR)

Suelo profundo (65 a 140 cm) en posición de terraza remanente; de textura superficial franca y franco arcillo limosa a arcillo limosa en profundidad. Descansa sobre un substrato aluvial constituido por clastos redondeados de composición mixta con predominio de rocas eruptivas neutras (andesita), con matriz de textura franco arcillo arenosa a areno francosa. Suelo de topografía plana hasta 3% de pendiente, bien estructurado, de permeabilidad moderada y actividad biológica en todo el perfil.

El drenaje varía de bueno a moderado y está libre de pedregosidad superficial. No salino y de pH en todo el perfil alrededor de 6,7, con niveles de MO superficiales de 1,7%, que disminuyen en profundidad hasta 0,9%, ambos considerados bajos.

La Serie taxonómicamente corresponde a un Fluventic Haploxerolls (Mollisol).

Fase muestreada:

PCR - 1	Representa a la Serie y corresponde a suelos de textura superficial franca, profundos, planos y bien drenados. Se clasifica en :		
Capacidad de Uso	: I	Clase de Drenaje	: 5
Categoría de Riego	: 1	Aptitud Frutal	: A
Erosión	: 0	Aptitud Agrícola	: 1

f) Serie Palomar (PLM)

Suelo formado a partir de sedimentos aluviales finos depositados en aguas tranquilas (lacustrino), moderadamente profundo; ocupan una posición de terraza baja o cuenca de sedimentación; de textura superficial arcillo limosa y arcillo limosa a franco arcillo limosa en profundidad. Descansa sobre un substrato heterogéneo constituido por arenas finas, arcillas, limos gleizados y materia orgánica (presentan variaciones en cuanto a grosor y a ubicación dentro del perfil, incluso puede faltar una o más de estas estratas). Suelo de topografía muy plana, deprimida dentro del paisaje general, de permeabilidad lenta y de drenaje imperfecto a muy pobre. Presenta nivel freático entre los 40 y 70 cm.

La profundidad efectiva varía entre los 30 y 80 cm. Estructura de bloques subangulares y pH que fluctúa de 7,8 en superficie a 7,4 en profundidad; elevados contenidos de MO (35,7%) en superficie a 14,1 en el fondo del perfil. No salino pero con elevados contenidos de CaCO₃ en los primeros 44 cm (29 a 35%), que disminuyen 0,5% a los 72 cm.

La Serie Palomar corresponde a un Typic Medihemists (Histosol).

Fase muestreada:

PLM - 1 Representa la Serie y corresponde a suelos de textura superficial arcillo limosa, moderadamente profundos, planos y de drenaje pobre. Se clasifica en:

Capacidad de Uso	:	IIIw2	Clase de Drenaje	:	2
Categoría de Riego	:	3w	Aptitud Frutal	:	E
Erosión	:	0	Aptitud Agrícola	:	3

g) Localización y Uso del Suelo

En las tablas 39 y 40 se incluyen las características de los sitios muestreados.

Tabla 39: Localización de los puntos de muestreo de suelos sector San Felipe

Punto	Fase de la Serie	Coordenadas UTM (m)		Dirección	Contacto	Teléfono
		X	Y			
SA1	PCR-1	332.450	6.377.279	(Fundo los Agustinos)	Pablo Astudillo Miguel Tapia	
SA2	PCR-1	332.255	6.375.663	(Agrícola Peppi)	Andrés Huerta	09/1974909
SA3	PCR-1	334.222	6.376.600		Sergio Simonetti Rodrigo Espinoza	34/591390 09/8211333
SB1	LPD-1	322.785	6.371.267	Sector Reinoso Catemu	David Arredondo	09/7699828
SB2	LPD-1	328.588	6.373.964	Panquehue	Ernesto Salgado	34/591038
SB3	LPD-1	323.895	6.370.314			
SC1	PLM-1	317.362	6.370.898	Catemu	Ricardo Campos Fundo Sn. Carlos	09/7467112
SC2	PLM-1	318.938	6.368.182	Catemu		
SC3	PLM-1	320.277	6.368.247	(Fundo San Antonio)		

Tabla 40: Localización de los puntos de muestreo de suelos sector Quillota

Punto	Fase de la Serie	Coordenadas UTM (m)		Dirección	Contacto	Teléfono
		X	Y			
SD1	CAL-1	292.144	6.365.496	Ricardo Sta. Cruz N°28. Chacra Corintia	Álvaro Rojas	09-3965443
SD2	CAL-1	290.824	6.365.978	Villarrica 114. Quinta Rocío (Agrícola Sta Clara)	Miguel Sánchez	08-2061514
SD3	CAL-1	292.825	6.368.669	Los Aromos 12	Carmen Gloria	08-2035819
SE1	LCM-1	292.987	6.363.533	Parcela 18 Pocochay, Frente Vivero San José.	Felipe Redondo	08-4090705
SE2	LCM-1	292.662	6.362.172	Vivero La Puntilla	Claudio Molina	09-940920
SE3	LCM-2	292.196	6.359.468	Parcela El Palacio- La Palma	Giovanni Scalia	33-352373
SF1	PAT-1	286.576	6.356.082	Callejón La Glorieta Pd. 8 Frente Productos Jano.	Luis Peña	33-269996
SF2	PAT-1			Fundo Las Cruzadas	Gregory Brown Pérez	33-310703
SF3	PAT-1	285.651	6.353.912	Fundo Lo Valencia	Waldo Tuma	33-269039

El uso de los suelos en los sitios de muestreo se aprecia en la tabla 41. De los 18 suelos muestreados, 5 de ellos presentaron parronales, 5 paltos, 3 con chacras, 2 con invernaderos de tomate (uno de ellos abandonado), 1 con pradera de alfalfa y el último con terreno arado.

La toma de muestra de suelos se realizó por horizonte, de acuerdo a la descripción de CIREN o se modificó según la observación de terreno. En aquellos casos en que el límite de horizontes era difuso, la muestra se recolectó a la profundidad donde había pleno reconocimiento que correspondía al suelo. La salvedad la constituye la muestra SB2 (Calicata 2 Los Pidenes LPD-1), donde se presentaron varias dificultades para tomar la muestra por existir negativa de los propietarios para llevar a cabo la actividad.

Tabla 41: Uso del suelo en los puntos donde se recogieron las muestras

Muestra de Suelo	Fecha Muestreo	Profundidades (cm)	Uso del Suelo	Observación
SA1	15/12/2004	0 - 20 20 - 40 50 - 60	Parronal de uva de mesa (antiguo)	
SA2	15/12/2004	0 - 20 20 - 40 50 - 60	Parronal de uva de mesa (nuevo)	
SA3	15/12/2004	0 - 20 20 - 40 60 - 70	Parronal de uva de mesa	
SB1	11/01/2005	0 - 26 26 - 55 55 - 75	Potrero en barbecho, al lado de cancha de fútbol, cerca de acequia	
SB2	11/01/2005	0 - 25 25 - 29 + 29	Material de depósitos fluviales a 5 m del costado de un alfalfal y a unos 50 m del río Aconcagua	El suelo presenta gran desviación del suelo Los Pidenes, presentando características distintas. El propietario del predio no permitió obtener la muestra de suelos en el interior del alfalfal, más retirado de los depósitos fluviales y que si correspondería plenamente a la Serie y Fase de Suelos buscada. No fue posible obtener autorización de muestreo en predios vecinos. El suelo debe estar sujeto a inundaciones con cierta frecuencia. Entre 5 a 25 cm se detectaron moteados débiles. Entre 25 y 29 cm la textura es arenosa (fina) Bajo los 29 cm se encontró pedregosidad.
SB3	15/12/2004	0 - 20 20 - 40 40 - 50	Parronal de uva de mesa (antiguo)	
SC1	11/01/2005	0 - 10 10 - 32 32 - 80	Alcachofal (cosechado).	Suelo plano. Se encontró agua libre a los 90 cm. Entre los 32 y 80 cm se presentan moteados. Color matriz entre 32 y 80 cm 2YR 4/2
SC2	15/12/2004	0 - 20 20 - 40 40 - 45	Terreno arado	
SC3	23/12/2004	0 - 10 10 - 20 20 - 50	Parronal de uva de mesa	
SD1	23/12/2004	0 - 10 20 - 35 50 - 60	Paltos (antiguos)	
SD2	11/01/2005	0 - 21 21 - 52 52 - 75	Sector al lado de paltos y terreno que se está habilitando con camellones altos para el cultivo de paltos.	
SD3	11/01/2005	0 - 21 21 - 42 22 - 106	En patio con paltos, al interior de una población de La Calera.	
SE1	23/12/2004	0 - 10 20 - 30 30 - 50	Paltos (antiguos)	
SE2	23/12/2004	0 - 15 30 - 40 40 - 50	Paltos antiguos	

Muestra de Suelo	Fecha Muestreo	Profundidades (cm)	Uso del Suelo	Observación
SE3	23/12/2004	0 - 10 20 - 30 30 - 50	Invernadero tomate	
SF1	23/12/2004	0 - 10 30 - 40 40 - 50	Chacra	
SF2	23/12/2004	0 - 10 20 - 30 30 - 50	Cítricos Nuevos	
SF3	11/01/2005	0 - 15 15 - 33 33 - 55	Sector sin uso entre invernaderos.	

10.3.5 Parámetros muestreados

Los parámetros muestreados se dividen en tres grupos:

- Macronutrientes y materia orgánica
- Metales pesados
- Plaguicidas

Macronutrientes y Materia Orgánica

- Fosfatos
- Amonio
- Nitratos
- Materia orgánica

Metales pesados

- Arsénico total
- Cadmio total
- Cobre disponible
- Cobre total
- Hierro disponible
- Hierro total
- Manganeso disponible
- Manganeso total
- Molibdeno total
- Plomo total
- Zinc disponible
- Zinc total

Además, se determinó la relación entre el elemento disponible (D) y el elemento total (T) para los micronutrientes cobre, hierro, manganeso y zinc.

- Relación Cu D / Cu T
- Relación Fe D / Fe T
- Relación Mn D / Mn T
- Relación Zn D / Zn T

Según se indicó previamente el hierro, manganeso, zinc, cobre y molibdeno son micronutrientes; los cuatro primeros son cationes, en tanto que el molibdeno tiene un comportamiento aniónico.

a) Micronutrientes catiónicos

Hierro: como Fe^{+2} , como quelato de Fe y Fe^{+3} . Los compuestos que contienen Fe^{+3} son de baja solubilidad y por lo tanto, su disponibilidad y absorción se ve limitada. En la medida que el pH del suelo disminuye, aumenta su disponibilidad.

Manganeso: El Mn se encuentra en solución principalmente como Mn^{+2} y su concentración como disponible disminuye 100 veces por cada unidad de incremento de pH.

Zinc: Se encuentra en los suelos solubles en solución, como zinc de intercambio, acompañado orgánicamente y en los minerales primarios y secundarios.

Cobre: Con pH bajo 6,9 el cobre se encuentra en la solución suelo principalmente como Cu^{+2} . Por sobre el pH señalado, se le encuentra en la forma de hidróxido: $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y CuOH^+ . La solubilidad del cobre es muy dependiente del pH y por cada unidad que decrece el pH, el cobre disuelto aumenta 100 veces.

b) Micronutrientes aniónicos

Molibdeno: El molibdeno disponible para las plantas disminuye con la disminución del pH, a diferencia de los micronutrientes catiónicos.

c) Plaguicidas

Los plaguicidas pesquisados en los suelos son aquellos que fueron reconocidos como los más relevantes en el valle del río Aconcagua, información que fue obtenida a través de la encuesta que se realizó como parte del proyecto que conforma este informe. A continuación, en orden alfabético se indican los plaguicidas de estudio.

Acefato: Insecticida organofosforado sistémico.

Metamidofós: Insecticida y acaricida organofosforado, sistémico y por contacto, altamente tóxico.

Azinfos metil: Insecticida organofosforado, gástrico y de contacto, extremadamente tóxico.

Benomilo: Fungicida benzimidazol, sistémico, ligeramente tóxico para el efecto agudo,

Captan: Fungicida ftalimida, de contacto, ligeramente tóxico.

Clorpirifos: es un insecticida organofosforado.

Deltametrina: Insecticida piretroide que aniquila a los insectos por contacto directo o ingestión.

Diazinon: Insecticida que aplicado en el suelo se pierde por degradación química y biológica a los dos meses aproximadamente de la aplicación.

Dicamba: Es un herbicida poco volátil de regular residualidad.

Dimetoato: Insecticida organofosforado sistémico y de contacto, altamente tóxico.

Endosulfan: Un insecticida organoclorado, de efecto agudo altamente tóxicos si se ingiere.

Imidacloprid: Insecticida exhibe toxicidad oral en mamíferos moderadamente aguda.

Metalaxil: Fungicida con capacidad baja para causar toxicidad oral y cutánea aguda en animales de laboratorio.

Trifluralina: Herbicida residual, ligeramente tóxico En términos agudos produce oxidación de la hemoglobina, formando metahemoglobina.

10.3.6 Metodología Analítica y Laboratorio

Las técnicas analíticas utilizadas para la determinación de la concentración de los elementos en estudio se incluyen en la tabla 42.

Los análisis de las muestras de suelo se realizaron en:

Macronutrientes y materia orgánica :Laboratorio de Suelos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA-Quilamapu) con sede en Chillán

Metales pesados y pesticidas : Laboratorio Manuel Ruiz y Compañía Ltda., MR-LAB ⁽³⁾.

³ Acreditado por el Instituto Nacional de Normalización según Guía ISO/IEC 25, en convenio con la Superintendencia de Servicios Sanitarios, SISS-INN.

Tabla 42: Técnicas analíticas empleadas en la determinación de los parámetros de interés.

Elemento o compuesto	Técnica de análisis	Laboratorio
Fosfatos	Extracción con solución de bicarbonato de sodio y determinación colorimétrica del azul de molibdeno.	INIA
Amonio	Electrodo específico	INIA
Nitratos	Colorimetría	INIA
Materia orgánica	Combustión húmeda y determinación colorimétrica	INIA
Cobre, Hierro, Manganeseo y Zinc disponible	Absorción Atómica – Extracto de Acetato de Amonio a pH 7 (Técnica INIA) (5 g/50 mL AcNH ₄ 1 M)	MR-LAB
Metales totales: Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb y Zn	EPA o AOAC Digestión Ácida y Absorción Atómica.	MR-LAB
Metal total: As	Generación de Hidruros y Absorción Atómica	MR-LAB
Plaguicidas	Norma SW-846797 EPA y Cromatografía de gases EPA y AOAC	MR-LAB

Los resultados y discusión de este trabajo, se entregan en el 2° tomo de este informe,

10.4 REFERENCIAS

CADE IDEPE, 2003. Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.

CASANOVA, M. 1991. Volatilización potencial del amoníaco a partir de la urea aplicada superficialmente en suelos de la zona de Chile. Memoria Ing. Agrónomo. Santiago, Fac. de Cs. Agrarias y Forestales, Universidad de Chile.

CASANOVA, M. 2002. Curso Prevención y Control de la Contaminación de Suelos. Mag. Medio Ambiente, Universidad de Santiago de Chile, Programa de Gestión y Ordenamiento Ambiental.

CIREN CORFO, 1997. Estudio Agrológico V Región. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Formación Las Chilcas, publicación 116. Tomos 1 y 2.

CONAMA, 1994. Ley N° 19.300, Ley de Bases del Medio Ambiente.

CONAMA, 1996. Metodologías para la caracterización de la calidad ambiental.

DAVIES, B.E. 1968. Anomalous levels of trace elements in Welsh soils. Welsh Soils Discussion Group Rep. N° 9:72-87. Citado por Lagerwerff, J.V. Plomo, mercurio y cadmio como contaminantes ambientales. *En* Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsay. Micronutrientes en Agricultura. Ed. AGT Editor, S.A. 1983.

FAIGUENBAUM, H. 1983. Análisis de suelo y su interpretación. Publicación Docente. Depto. de Producción Agrícola, Fac. de Cs. Agrarias, Veterinarias y Forestales, Univ. De Chile.

FAO. 1986. Programmes Pesticide Residues in Food and the Environment.

FENECH, L. 1993. Física y Química de Suelos. Universidad Autónoma De Baja California Sur. Serie Didáctica, Apuntes Universitarios 10.

KRAUSKOPF, K.B. 1983. Geoquímica de los micronutrientes. *En* Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsay. Micronutrientes en Agricultura. Ed. AGT Editor, S.A.

LAGERWERFF, J.V. 1983. Plomo, mercurio y cadmio como contaminantes ambientales. Laboratorio del Suelo de Estados Unidos, de la División de Investigación para la Conservación del Suelo y del Agua, ARS, USDA, Beltsville, M.D. *En* Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsay. Micronutrientes en Agricultura. Ed. AGT Editor, S.A.

LOUÉ, A. 1988. Los microelementos en agricultura. Ediciones Mundi-Prensa.

OPAZO, J. 1992. Fertilidad de suelos. En Suelos, una visión actualizada del recurso. Publicación Miscelánea Agrícola N° 38, Fac. de Cs. Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Santiago.

PERALTA, M. 1976. Uso, Clasificación y Conservación de Suelos. Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

PPI. 1988. Manual de Fertilidad de los Suelos. POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE, POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE OF CANADA Y FOUNDATION FOR AGRONOMIC RESEARCH. Atlanta, Georgia. Primera Edición en Español. 84 p.

ROSS R.G. & STEWART D.K.R. 1969. Cadmium residues in apple fruit and foliage following a cover spray of cadmium chloride. Can. J. Plant Sci. 49:49-52.

SWAINE, D.J. & MITCHELL R.I. 1960. Trace element distribution in soil profiles. J. Soil Sci. 11:347-368. Citado por Lagerwerff, J.V. Plomo, mercurio y cadmio como contaminantes ambientales. *En* Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsay. Micronutrientes en Agricultura. Ed. AGT Editor, S.A. 1983.

URRA, M. 2003. Muestreo y Monitoreo de Suelos, Aguas y Tejido Vegetal. En Curso Uso de aguas de descarte de la minería en sistemas silvoagropecuarios. Diplomado en Medio Ambiente, para Minera Los Pelambres. Universidad de Santiago de Chile, Programa de Gestión y Ordenamiento Ambiental.

URRA, M. 2005. Evaluación ambiental de la calidad del aire en el área de influencia de Fundición Altonorte: optimización y flexibilización en el uso de materias primas alternativas. Tesis Mag. Medio Ambiente. Universidad de Santiago de Chile, Programa de Gestión y Ordenamiento Ambiental.

VARNERO, M.T. 1991. Los Bioabonos. En Manejo de Suelos en Huertos Frutales. Publicación Miscelánea Agrícola N° 35. Universidad de Chile, Fac. de Cs. Agrarias y Forestales. Santiago.

CAPÍTULO 11: ESTUDIO DE BIOMARCADORES EN FAUNA SILVESTRE EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

11.1 INTRODUCCIÓN

Los organofosforados y carbamatos son plaguicidas ampliamente utilizados debido a su baja persistencia y su poderosa acción neurotóxica. Ambos pesticidas inhiben la actividad de la enzima *acetilcolinesterasa* (*AChE*) que hidroliza el neurotransmisor *acetilcolina*. La acetilcolina es el neurotransmisor fundamental en las terminales nerviosas postganglionares del sistema simpático y parasimpático y de algunas sinapsis del sistema nervioso central. Es sintetizada a partir de colina y *acetil-CoA* mitocondrial por la *colinacetiltransferasa*. Cuando la acetilcolina es liberada, estimula receptores colinérgicos específicos y su acción termina rápidamente por la hidrólisis local a colina y ácido acético gracias a la acetilcolinesterasa. La colina puede regresar a la membrana presináptica y ser reutilizada en la síntesis de acetilcolina. Por lo tanto, la acetilcolinesterasa es imprescindible para el normal funcionamiento de la transmisión del impulso nervioso, ya que la acción de la acetilcolina debe ser muy corta. Existen muchos tipos de neurotransmisores, pero la acetilcolina es el único responsable de activar el motor de las células nerviosas, por tanto, si se inhibe la acción de la enzima, el nervio se mantiene activo de forma descontrolada, originando parálisis y muerte (Spiro y Stigliani, 2004).

¿Cómo inhiben los insecticidas la colinesterasa? La enzima actúa por su unión a la acetilcolina y posterior desplazamiento de un grupo acetilo, para ello la enzima emplea un grupo OH del aminoácido residual serina, situado en el sitio activo. Como resultado de la reacción, se libera el grupo *colina* de la molécula, mientras que el grupo *acetilo* queda unido a la enzima. Posteriormente, la enzima induce, por medio de una molécula de agua, un segundo desplazamiento del grupo acetilo, lo que origina la liberación del ácido acético. Esto ocasiona la regeneración de la enzima que queda preparada para un nuevo proceso de catálisis. Las moléculas del plaguicida “engañan” a la enzima, copiando de forma mimética a la acetilcolina, uniéndose a los puntos activos de la enzima e induce a la serina residual a realizar la reacción de desplazamiento, de forma análoga a como lo hace la acetilcolina. Pero en vez de un grupo acetilo, queda unido a la enzima un grupo *fosforilo*, en el caso de los organofosforados o un grupo *carbamilo*, en el caso del carbamilo en el caso de los carbamatos. Estos grupos son más resistentes al ataque de la molécula de agua que el grupo acetilo. En ambos casos, el átomo susceptible del ataque por el agua, el nitrógeno en el caso del carbamilo y el fósforo en el fosforilo, se une a otros grupos adicionales, lo que inhibe su ataque por parte de la molécula de agua. Como consecuencia de esta acción sobre el grupo fosforilo o carbamilo, la enzima queda desactivada (Spiro y Stigliani, 2004).

La potencia del inhibidor depende de la velocidad inicial de la reacción de desplazamiento, es decir, la que origina la captura del sitio activo, serina, en la enzima. Cuanto mejor se elimine el grupo, más rápida será la reacción. Por ejemplo, el fluoruro es un grupo que se elimina con facilidad, debido a que es muy estable en agua. Los organofosforados con sustituyentes fluoruro, son poderosos inhibidores de la enzima colinesterasa, de hecho los gases nerviosos (sarín) pertenecen a esta clase de compuestos. (Spiro y Stigliani, 2004). No obstante, se ha descubierto que en menos de 30 días la actividad de la acetilcolinesterasa cerebral vuelve a niveles normales en

aves que han sido expuestas a organofosforados; la actividad de la acetilcolinesterasa plasmática se recupera en el mismo tiempo. En contraste, la inhibición de la actividad de la acetilcolinesterasa por carbamatos es reversible, hay reactivación espontánea (Fairbrother et al, 1991).

La reactividad de los insecticidas organofosforados se ha reducido, con el fin de que puedan aplicarse sin ocasionar intoxicaciones en la población y los animales. Una forma de hacerlo es sustituir el grupo P=O por un grupo P=S, originando *fosfotionato*. El átomo de S desactiva el ataque hacia el átomo de P y reduce la velocidad de la reacción con la colinesterasa. Sin embargo, una vez en el interior del insecto, el átomo de S se elimina rápidamente mediante oxidación enzimática y la molécula se transforma de nuevo en una potente neurotoxina (Spiro y Stigliani, 2004).

La enzima acetilcolinesterasa ha sido reconocida como un indicador de la exposición a insecticidas organofosforados y carbamatos en diferentes especies (Chambers & Carr, 1995; Ozmen *et al*, 1999). Tanto, en aves (eg: Britt *et al*, 1997) como en anfibios (eg: El-Merhibi *et al*, 2004) y roedores (eg: Atterberry *et al*, 1997) ha sido demostrado el efecto tóxico de insecticidas de uso agrícola, transmitidos al ambiente en forma secundaria por deriva del spray en el sustrato terrestre y acuático (Cordi *et al*, 1997; Laposata & Dunson, 2000).

En el presente estudio, las capturas de fauna se realizaron en localidades o sitios cercanos a la aplicación de diversos biocidas, que por acción de la deriva, escurrimiento y/o arrastre pueden estar afectando la fauna local, como ha sido demostrado en investigaciones similares realizadas en otros países.

11.2 OBJETIVO

Determinar la actividad de la enzima acetilcolinesterasa en muestras de tejido cerebral y de butirilcolinesterasa en muestras de sangre completa de aves y anuros silvestres y de cerebro de roedores. Estos animales fueron capturados en predios de aplicación intensiva de plaguicidas tipo organofosforados y carbamatos, ubicados en las provincias de San Felipe y Quillota.

A continuación se exponen los aspectos metodológicos.

11.3 MUESTREO

Con el objeto de determinar el efecto de contaminantes sobre la actividad de la enzima acetilcolinoesterasa, se realizó un estudio consistente en capturas de roedores, aves y anuros en diferentes predios del valle del Aconcagua a los cuales se les extrajo muestras de sangre y cerebro. En el caso particular de los roedores, se estableció no usar muestras de sangre por el riesgo asociado al contagio por hantavirus. La determinación de la actividad de la colinesterasa en el laboratorio DIAMOLAB de la Universidad Mayor.

En las tablas 43 a y b, se presenta una lista que resume los principios activos aplicados en los sitios de captura o en zonas cercanas a éstos, recopilados en la encuesta descrita en el capítulo 3 del presente informe. Es importante destacar que en las áreas de muestreo se utilizan los carbamatos carbaryl, methomyl, methiocarb y pirimicarb y respecto de los organofosforados, se

aplican diazinon, dimetoato, clorpirifos, metil azinfos, metamidofos y metidation. El efecto tóxico de estos compuestos ha sido previamente demostrado en anuros (El-Merhibi *et al.*, 2004; Harris *et al.*, 2000; Calumpang *et al.*, 1997); aves (Cordi *et al.*, 1997) y mamíferos (Shore & Dell'Omo, 1998; Dell'Omo *et al.*, 2003).

Tabla 43 a: Listado de plaguicidas utilizados en las áreas de muestreo de fauna silvestre, con sus respectivos grupos químicos.

	GRUPO QUIMICO	PRINCIPIO ACTIVO
1	Ac.Benzoico	Dicamba
2	Ac.Fosfinico	Glufosinato de amonio
3	Acidos cyninnamic	Dimethomorph
4	Acilalaninas	Metalaxyl
5	Bencimidazoles	Thiophanate-methyl
6	Bencimidazoles	Benomyl
7	Biopesticida	Spinosad
8	Bipiridilo	Paraquat
9	Carbamato	Carbaryl
10	Carbamato	Methomyl
11	Carbamato	Methiocarb
12	Carbamato	Pirimicarb
13	Chloronitrilos	Clorotalonil
14	Cloronicotinilo	Imidacloprid
15	Dicarboximidas	Iprodione
16	Difeniléter	Oxifluorfen
17	Dinitroanilina	Dicloran
18	Dinitroanilina	Trifluralin
19	Ditiocarbamato	Mancozeb
20	Glicina	Glifosato
21	Hidroxianilida	Fenhexamida
22	Inhibidor de esterol	Tebuconazole, triadimenol
23	Inhibidor de quitina	Buprofezin
24	Neonicotenoide	Thiamethoxan

Tabla 43 b: Listado de plaguicidas utilizados en las áreas de muestreo de fauna silvestre, con sus respectivos grupos químicos

	GRUPO QUIMICO	PRINCIPIO ACTIVO
25	Organofosforado	Clorpirifos
26	Organofosforado	Diazinon
27	Organofosforado	Dimetoato
28	Organofosforado	Metamidofos
29	Organofosforado	Methidathion
30	Organofosforado	Metyl Azinfos
31	Organofosforado; piretroide	Clorpirifos; Cipermetrina
32	Phenylamide: acylalanine	Metalaxyl
33	Piretroide	Lambda-cyhalothrin
34	Piretroide	Deltametrina
35	Piretroide	Permetrina
36	Piridamina +Fenilpirrol	Cyprodinil
37	Piridamina +Fenilpirrol	Fluoxionil
38	Pirimidina	Fenarimol
39	Strobilurin type	Kresoxim-methyl
40	Thalimida	Captan
41	Triazol	Aminotriazol (Amitrole)
42	Triazol	Difenoconazole
43	Triazoles	Triadimefon
44	Triazoles	Propiconazol
45	Tritiano amina	Thiocyclam-hidrogenoxalato

Es importante señalar que las modificaciones que se propusieron para el desarrollo del proyecto, sólo se pudieron establecer con posterioridad a las primeras campañas realizadas, siendo imposible su determinación *a priori*, considerando la logística (ej. número de redes y trampas), características de los lugares, riqueza y abundancia faunística de las localidades visitadas. De esta forma, las especies de fauna se escogieron en función de su abundancia y representación en los muestreos iniciales, con el fin de obtener los tamaños muestrales mínimos, susceptibles de ser analizados estadísticamente. Durante el período 2001 – 2004, se realizó un total de 10 sesiones de captura en sectores de Quillota y San Felipe. Cada sesión tuvo una duración de cinco días. Se capturó un total de 325 especímenes. En anfibios las capturas se limitaron a dos especies, mientras que en aves y roedores a 13 y 9, respectivamente (tabla 38). A su vez, los resultados obtenidos, revelaron una alta variabilidad en la captura de especies de aves y roedores, en cuanto a riqueza de especies y abundancia relativa (tabla 44).

Tabla 44: Especímenes capturados por especie. Quillota y San Felipe. 2001 – 2004.

TAXA	Número capturado
AVES	166
Ap: <i>Anairetes parulus</i>	1
Cc: <i>Callipepla californica</i>	3
Cu: <i>Carduelis barbata</i>	8
Cp: <i>Columbina picui</i>	3
Dd: <i>Diuca diuca</i>	4
Ea: <i>Elaenia albiceps</i>	13
La: <i>Leptasthenura aegithaloides</i>	2
Mt: <i>Mimus thenca</i>	1
Sa: <i>Sicalis luteiventris</i>	1
Ta: <i>Troglodytes aedon</i>	36
Tf: <i>Turdus facklandii</i>	6
Za: <i>Zenaida auriculata</i>	2
Zc: <i>Zonotrichia capensis</i>	86
ROEDORES	76
<i>Abrocoma bennetti</i>	1
<i>Abrothrix olivaceus</i>	31
<i>Abrothrix longipilis</i>	1
<i>Mus musculus</i>	19
<i>Octodon degus</i>	4
<i>Oligoryzomys longicaudatus</i>	4
<i>Phyllotis darwini</i>	2
<i>Rattus norvegicus</i>	2
<i>Rattus rattus</i>	12
ANFIBIOS	83
<i>Pleurodema thaul</i>	21
<i>Xenopus laevis</i>	62

Tabla 45: Lugares de muestreo y número de especímenes capturados. Quillota y San Felipe. 2001 - 2005.

LUGAR	AVES	ROEDORES	ANFIBIOS
Vilcuya	8	3	0
San Felipe 1	9	0	5
San Felipe 2	30	0	0
San Felipe 3	21	7	0
San Felipe 4	13	21	0
San Felipe 5	2	0	0
Quillota 1	6	4	8
Quillota 2	4	7	0
Quillota 3	19	6	7
Quillota 4	21	11	18
Quillota 5	8	0	42
Quillota 6	25	17	3
Total	164	76	83

La experiencia acumulada, el conocimiento de los lugares y los resultados de captura obtenidos en ellos, sugirieron la realización de modificaciones y ajustes, con respecto a lo originalmente planteado en el proyecto.

A continuación se describen los métodos de captura por especie y la optimización del diseño de muestreo.

a) Aves

Para la captura de las aves se utilizaron redes de nylon AVINET, catálogo 70/2, # PQ6, de 30 mm x 6 metros de ancho y 2,6 metros de alto (fig. 57). Las redes se instalaron al ocaso, para capturar las especies durante la mañana, entre las 7 y 10 AM. En cada ocasión se dispusieron tres redes de captura, en sectores cercanos a árboles y arbustos, de acuerdo a la accesibilidad y topografía de los sitios.

Previo a la obtención de las muestras se procedió a la identificación de las especies capturadas y se les asignó un número único para cada ejemplar.

Con respecto a las muestras de sangre, éstas se extrajeron mediante punción intracardiaca. La sangre fue colectada en tubos con EDTA, identificándose cada muestra en forma individual, siendo refrigerada a 4°C y enviada al laboratorio. Previamente, todas las aves fueron anestesiadas con isoflurano.

La obtención de tejido cerebral fue posterior al sacrificio de las aves con una sobredosis de isoflurano. Se extrajo el encéfalo completo, el cual fue colocado en un criovial, el que fue rotulado y almacenado en un tanque de nitrógeno líquido (-180°C) hasta la realización de los análisis correspondientes.

Se determinó inicialmente que las especies de aves más abundantes, correspondieron a *Zonotrichia capensis* (Zc), *Elaenia albiceps* (Ea) y *Troglodytes aedon* (Ta). De éstas, Zc produjo el mayor número de capturas, con un promedio de 7,3 individuos capturados por campaña. Por tanto y en función de estos resultados, se proyectó realizar capturas focalizadas en dos de las especies antes indicadas (Ta y Zc), en las expediciones posteriores. De esta forma, se evitó el sacrificio inútil de especies, que desde el punto de vista estadístico, no satisfacían los tamaños mínimos de muestra requeridos para su análisis.

Además, es importante señalar que dichas especies, son de hábitos alimenticios diversos (Zc= granívoro-insectívoro, Ta= insectívoro), lo cual podría permitir evaluar el efecto de la contaminación por químicos a diferentes niveles tróficos. En este sentido, es conocida la secuencia creciente de bioacumulación al pasar del nivel de productores primarios (vegetales) al de consumidores primarios (herbívoros) y secundarios (carnívoros).



Figura 57: Captura de aves silvestres

b) Anfibios

Como se propuso originalmente, la captura de anfibios se centró en el anuro *Pleurodema thaul*, realizando su búsqueda en pozas y charcas aledañas al curso del río Aconcagua (figura 58). La presencia de este animal fue menor a lo esperado en los lugares prospectados. Esto, sumado a la dificultad de su captura (manual y nocturna), restringida a su temporada de apareamiento (agosto - diciembre), no produjo los tamaños de captura estipulados originalmente. No obstante estas dificultades, se obtuvo un promedio de 6,6 individuos capturados por campaña, número que permitió realizar comparaciones con significancia estadística.

Durante el segundo año de trabajo, se detectó la presencia en uno de los sitios de captura del anuro *Xenopus laevis* (sapo africano). Debido a lo inesperado de este hallazgo, ya que hasta el momento la literatura no lo reporta en esta zona, sólo se capturaron seis ejemplares, haciendo uso de trampas improvisadas. Se estimó que utilizando las trampas y cebo adecuado, se podría incrementar significativamente su captura, ya que se pudo observar un gran número de ellos. La inclusión de esta especie fue relevante, ya que se trata de una especie introducida, con características de plaga en otras zonas y que es de hábitos esencialmente acuáticos, posibilitando su captura en cualquier época del año.

Al igual que en el caso precedente, todos los animales fueron anestesiados con isoflurano. La extracción de sangre y cerebro fue similar a las aves, sin embargo, para este último hubo dificultad para obtener la cantidad suficiente de muestra, por tanto, no todos los cerebros pudieron ser analizados.



Figura 58: Captura de *Pleurodema thaul* en la cuenca del río Aconcagua

c) Roedores

Los roedores fueron capturados utilizando trampas Sherman (fig. 59), con avena en su interior. Se establecieron líneas de trampas (1-4), hasta completar un total de 100 trampas por área de captura. Las líneas fueron dispuestas durante la tarde y chequeadas en las mañanas. Un análisis similar a las aves y anfibios fue realizado con los resultados de la captura de roedores, determinándose una baja densidad de estos animales en las áreas muestreadas, siendo la especie significativamente más predominante *Abrothrix olivaceus*, con un promedio de 3,3 individuos capturados por campaña.



Figura 59: Trampa Sherman para captura de roedores

11.3.1 Optimización del diseño de muestreo original.

La experiencia e información acumulada en las campañas iniciales, permitió realizar las siguientes acciones:

- Prolongar los períodos de captura, en al menos dos días.
- Incrementar el esfuerzo de captura, incorporando una red de niebla adicional a las tres en uso (aves) y aumentando el número de trampas Sherman (roedores).
- Concentrar los muestreos en dos sitios de la cuenca del río Aconcagua, San Felipe y Quillota, en la cercanía inmediata a estaciones de muestreo de agua.
- En el caso de los roedores, se propuso buscar en las inmediaciones de los sitios definidos, lugares con características ambientales más favorables para la presencia de estos animales, considerando que los plaguicidas pueden depositarse, por efecto de deriva, hasta 200 m de sus sitios de aplicación, lo cual permite ampliar las áreas de captura.

11.3.2 Tamaños muestrales.

El tamaño muestral se determinó en función de la variabilidad observada en la actividad de AChE en cerebro. Así, se consideró el coeficiente de variación de la variable AChE, una significancia del 95% y un error de estimación entre 15 y 25 %, según las recomendaciones de Krebs (1989) para una variable continua de distribución normal.

El tamaño muestral está dado por (Krebs, 1989)*:

$$N = (t_{\alpha} * s / d)^2 \quad \text{donde } N = \text{número de muestras}$$

t_{α} = valor de distribución de t para 95%
 s = desviación estándar de la variable
 d = error absoluto deseado

Conocido el coeficiente de variación (CV) la expresión se reduce a:

$$N = (200 * CV / d)^2$$

De tal modo, para aves, considerando un CV = 0,36 y un d = 15% el tamaño muestral fue de 23 especímenes. Considerando d = 25%, el tamaño muestral baja a 12,96. Parsimoniosamente, se estableció el promedio de ambas cifras, lo que entrega un tamaño muestral de 18 especímenes de aves por sesión.

En forma similar para anuros, considerando un CV de la AChE = 0,49 y un d = 25% (d más alto, dadas las mayores dificultades para capturar estos especímenes) el tamaño muestral por sesión se fijó en 15 especímenes. Estos pueden capturarse al aumentar el período de muestreo.

Para roedores el CV de la AChE fue de 0,27 y consideramos un d conservador de un 20% que da cuenta de la dificultad de la zona para captura de roedores. El tamaño muestral significativo con estas condiciones se determinó en 7 especímenes por captura.

11.4 MEDICIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA COLINESTERASA

Para evaluar la actividad de la acetilcolinesterasa se utilizaron los métodos Ellman y Augustinsson descritos por Trudeau y Sans Cartier (2000), el 1° basado en Ellman *et al* (1961) y modificado por Hill y Flemming (1982), el 2° basado en Augustinsson *et al* (1978), los cuales se describen a continuación.

11.4.1 Método Ellman

Este es un método colorimétrico para la medición de actividad de colinesterasa (ChE) en plasma y cerebro. Se utiliza en investigación toxicológica en vida silvestre para detectar exposición a pesticidas inhibidores de colinesterasa (organofosforados y carbamatos). La baja de la actividad ChE bajo los niveles normales de las especies se usa a menudo como evidencia de la exposición y, en el caso de mortalidad, la causa de la muerte (Ludke, *et al*, 1975).

a) Procedimiento:

- En terreno, a cada ejemplar se le extirpa el cerebro completo (fig. 60) y se deposita en un tanque de nitrógeno a -120°C (fig. 61). El almacenamiento a largo plazo se debe evitar con el objeto de minimizar los problemas asociados con la deshidratación de las muestras y la estabilidad de las enzimas inhibidas.



Figura 60: Extracción de cerebro de ave passeriforme



Figura 61: Almacenamiento de las muestras en tanque de nitrógeno a -120°C

- Colocar un tubo Wheaton del tamaño adecuado en una cubeta con hielo sobre una balanza de carga superior. Para tejidos de 1 g o menos, usar un tubo de 1,5 mL
- Transferir el cerebro parcialmente licuado al tubo Wheaton y registrar su peso en un formulario. Siempre se usó la balanza analítica.
- Usando el tubo Wheaton como triturador de tejidos, homogeneizar minuciosamente con 3 volúmenes de Triton X-100 al 1% enfriado en hielo en una proporción de 250 mg/mL (p. ej. si el peso del cerebro es de 3 g, agregar 9 mL). La homogeneización se realiza en cada muestra, moviendo el tubo hacia arriba y abajo (20 veces al menos) y girando un poco cada vez, manteniendo el mortero de molienda en hielo.
- Transferir a tubos de centrifuga de 1,5 mL. Asegurarse que los tubos estén bien equilibrados en el rotor y centrifugar a 14.500 RPM, durante 45 minutos a 4°C. Decantar lentamente en un tubo de prueba etiquetado y se extrae el sobrenadante el que se mantiene en hielo.
- **Tamaño mínimo de muestra recomendado:** 100 mg de tejido. Cuando el cerebro es muy pequeño, el ensayo se hace sin centrifugar el homogeneizado.

b) Análisis:

Se colocan 3 mL de la mezcla de reacción (DTNB) en una cubeta de espectrofotometría y se le agregan 20 µl de extracto enzimático. Se homogeneiza la mezcla y se calibra el espectrofotómetro en absorbancia cero a 405 nm (longitud de onda). Hay que agregar 100 µl de solución de sustrato (yoduro de acetilcolina), y se inicia el estudio cinético.

c) Expresión de resultados

El porcentaje de actividad de enzima se reporta en µmol de sustrato hidrolizado por gramo de tejido (peso húmedo) a 30° C. Se calcula multiplicando el cambio en la absorbancia por minuto por 46.8.

$$\text{Actividad} = \frac{\Delta A/\text{min} \times 3.12 \text{ mL} \times 1000}{13.33 \text{ cm}/\mu\text{mol} \times 1 \text{ cm} \times .02 \text{ mL} \times 250 \text{ mg/mL}} = \Delta A/\text{min} \times 46.8 = \mu\text{mol}/\text{min}/\text{g}$$

d) Hidrólisis espontánea del sustrato

El yoduro de acetiltiocolina reconstituido (AthChI) reduce la tasa de actividad ChE debido a la hidrólisis no enzimática. Este valor se determina al principio de cada día laboral agregando AthChI directamente a DTNB y midiendo el cambio en la absorbancia en ausencia de la enzima ChE y se resta del valor total de la hidrólisis obtenida. Con las condiciones del ensayo del método actual, el $\Delta A/\text{min}$ es de alrededor de 0.0086 AU (equivalente a aproximadamente 100 µmol/min/L o 0.4 µmol/min/g). Si el ensayo se realiza con una concentración final de sustrato de 1×10^{-3} M, la hidrólisis espontánea es insignificante.

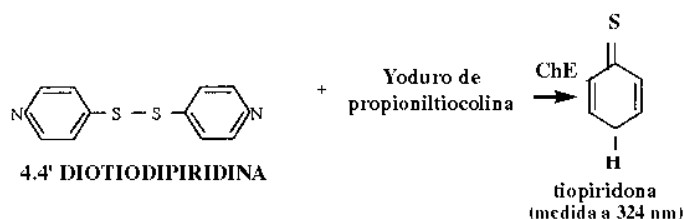
e) Puntos críticos de control

- Los tejidos se deben mantener en hielo en todo momento y la duración de la prueba debe mantenerse al mínimo para prevenir disociación de enzimas inhibidoras de carbamatos.
- El ensayo se debe realizar en una sala con luz artificial, con eliminación de luz día, debido a que el DTNB es sensible a la luz (Walmsley, *et al* 1987).
- La actividad catalítica de ChE es dependiente de la temperatura, por lo que la temperatura durante el análisis debe ser monitoreada.
- Aunque este método es útil en diagnosticar la exposición a sustancias inhibidoras de colinesterasa, tales como plaguicidas carbamatos y organofosforados, pueden producir resultados que subestimen el alcance de la inhibición de ChE en tejidos de animales, expuestos a pesticidas con carbamatos, debido a que la enzima posee la capacidad de reactivar, en forma espontánea, a través de decarbamilación. Se deben adoptar precauciones para minimizar esta reactivación de la enzima, de otro modo los resultados no reflejarán la actividad de la ChE *in vivo*.
- La actividad ChE varía entre las especies y la concentración del sustrato usada en este método podría no ser apropiada. Con las condiciones de ensayo descritas en este método, se debería analizar el tejido cerebral con una concentración de sustrato final de 1×10^{-3} M para evitar inhibición de la enzima a causa de altas concentraciones del sustrato.
- Al parecer, modificaciones menores del método pueden influenciar los porcentajes finales de actividad de la ChE significativamente, en consecuencia, se deben evitar las comparaciones de datos de ChE entre laboratorios a menos que los métodos estén estandarizados (Marden *et al*, 1994).

Las muestras pertenecientes a un estudio en particular se deben procesar y almacenar de la misma manera.

11.4.2 Método Augustinsson

Es un método colorimétrico para la medición de la actividad colinesterasa (ChE) en la sangre completa de aves y otras especies, el cual se basa en la hidrólisis de propioniltiocolina y determinación espectrofotométrica de la tiocolina producida por la reacción de 4,4' ditiopiridina (4-PDS). (Trudeau y Sans Cartier, 2000)



a) Procedimiento:

Hay que hemolizar 25 µl de sangre entera con 1,47 ml de agua destilada. Mezclar suavemente y mantener frío. (*Volumen mínimo recomendada de muestra: 75 µL de sangre entera*)

b) Análisis:

Depositar 2,65 ml de solución buffer 4-PDS en una cubeta de espectrofotómetro. Cuando la temperatura ascienda a 27°C, agregar 300 µL de sangre hemolizada. Luego, cuando la temperatura llegue a 30° C, llevar a 0 el espectrofotómetro en una longitud de onda de 324 nm y agregar 50 µL de yoduro de propioniltiocolina y se comienza el estudio cinético.

c) Expresión de resultados

Para un volumen total de 2 mL y 1 cm iluminación el cálculo es:

$$\frac{\Delta A / \text{min} \times .003 \text{ L} \times 10^6 \mu\text{mol} \times 60 \text{ seg.}}{\text{seg.} \times 1.98 \times 10^4 \text{ m}^{-1} \times \text{cm}^{-1} \times \text{M} \times 1 \text{ cm} \times \text{min}} = \Delta A / \text{min} \times 9.09 = \mu\text{mol} / \text{min} / \text{L}$$

d) Hidrólisis espontánea del sustrato

La hidrólisis espontánea del sustrato se determina al principio de cada día, agregando 50 µL de propioniltiocolina (PrThCl) directamente a 2.95 mL de solución 4-PDS y midiendo el cambio en la absorbancia en ausencia de la enzima ChE. Se sustrae del valor total de la hidrólisis obtenida. Con las condiciones del ensayo del método actual, el ΔA/min es de alrededor de 0.0086 AU (equivalente a aproximadamente 100 µmol/min/L).

e) Puntos críticos de control

- Los tejidos se deben mantener en hielo en todo momento y la duración de la prueba debe mantenerse al mínimo para prevenir disociación de enzimas inhibidoras de carbamatos.
- Las muestras pertenecientes a un estudio en particular se deben procesar y almacenar de la misma manera.
- La actividad catalítica de ChE es dependiente de la temperatura, por lo que la temperatura experimental debe ser monitoreada.
- Aunque este método es útil en diagnosticar la exposición a sustancias inhibidoras de colinesterasa, tales como, plaguicidas carbamatos y organofosforados, se pueden producir resultados que subestimen el alcance de la inhibición de ChE en tejidos de animales expuestos a pesticidas con carbamatos, debido a que la enzima posee la capacidad de reactivar, en forma espontánea, a través de decarbamilación. Se deben adoptar precauciones para minimizar esta reactivación de la enzima, de otro modo, los resultados no reflejarán la actividad de la ChE *in vivo*.

- Al parecer, modificaciones menores del método pueden influenciar los porcentajes finales de actividad de la ChE significativamente, en consecuencia, se debe evitar las comparaciones de datos de ChE entre laboratorios a menos que los métodos estén estandarizados.

11.5 DISEÑO ESTADÍSTICO

El conocimiento acumulado permitió establecer, para el análisis de los resultados, el siguiente diseño estadístico:

- Determinación de valores promedio, desviaciones estándar y rangos, de la actividad de AChE.
- Comparaciones de los valores de actividad de la ChE, considerando los siguientes niveles de clasificación: especie, localidad, época y hábito alimenticio.

11.5.1 Análisis estadístico

Las comparaciones entre especies, localidades y fechas se realizaron mediante Análisis de Varianza (ANDEVA) de una vía.

Por tanto, no se aplicó un modelo estadístico. Se partió del supuesto, proveniente de trabajos previos informados en la literatura sobre el particular, que la aplicación de pesticidas altera los niveles de ACE tanto en sangre como en cerebro de vertebrados presentes en el lugar. De acuerdo con esto, la presunción es que los valores de la varianza obtenidos, serán igual a la media del universo involucrado, mas el efecto que tenga sobre ella la variable involucrada (especie, lugar o fecha) y más el error estadístico. Todo esto bajo el supuesto que hay especies que se afectan diferencialmente y que los niveles de las aplicaciones de plaguicidas pudieron ser distintos entre lugares o entre fechas. Este es el supuesto de un análisis de varianza simple, que fue en general el modelo usado para probar eventuales diferencias.

La única área sin aplicación de productos químicos correspondió a Vilcuya, la cual tuvo una muestra insuficiente, como para usar de patrón de comparación. Sin embargo, en el proyecto inicial no se contempló usar una zona testigo, sino más bien realizar comparaciones entre zonas de interés sugeridas por el SAG. De esta manera se obtuvieron cifras relativas que permiten establecer diferencias, pero no definir frente a una zona libre de pesticidas. Al respecto, la continua aplicación de plaguicidas en toda la zona y su difusión por una parte y la amplia vagilidad de las aves, hacen poco manejable establecer un lugar testigo dentro de la misma zona.

11.6 REFERENCIAS

- AUGUSTINSSON, K.B., ERICSSON, H. & FAIJERSON, Y. (1978)** A new approach to determining cholinesterase activities in samples of whole blood. *Clinica Chimica Acta*, 89, 239-252.
- CALUMPANG, S.M, MEDINA MJ, TEJADA AW & MEDINA JR 1997.** Toxicity of Chlorpyrifos, Fenobucarb, Monocrotophos, and methyl Parathion to fish and frogs after a simulated overflow of paddy water. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 58: 909-914.
- CORDI B, FOSSI C & DEPLEDGE M. 1997.** Temporal biomarker responses in wild passerine bird exposed to pesticide spray drift. *Environ. Toxicol. & Chem.* 16: 2118-2124.
- DELL'OMO G, PLESKACHEVA MG, WOLFER DP, LIPP HP & SHORE RF. 2003.** Comparative effects of exposure to an organophosphate pesticide on locomotor activity of laboratory mice and five species of wild rodents. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 70: 138-145.
- EL-MERHIBI A, KUMAR A, & SMEATON T. 2004.** Role of piperonyl butoxide in the toxicity of chlorpyrifos to *Ceriodaphnia dubia* and *Xenopus laevis*. *Ecotoxicol & Environ Safety* 57: 202-212
- ELLMAN, G.L., COURTNEY, K.D., ANDRES V. JR. & FEATHERSTONE, R.M. (1961)** A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochem. Pharmac.*, 7, 88-95.
- FAIRBROTHER, A., MARDEN, B.T., BENNETT, J.K. & HOOPER, M.J.,** "Methods used in determination of cholinesterase activity". In Mineau, P. [Ed.] Biological consequences of depressed brain cholinesterase activity in wildlife. 1991.
- HARRIS ML, CHORA L, BISHOP CA & BOGART JP. 2000.** Species and age-related differences in susceptibility to pesticide exposure for two amphibian, *Rana pipiens*, and *Bufo americanus*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol* 64: 263-270
- HILL E.F., 1988.** Brain cholinesterase activity of apparently normal wild birds. *J. Wildl. Dis.* 24: 51-61
- HILL E.F. & FLEMING, W.J. (1982).** Anticholinesterase poisoning of birds: Field monitoring and diagnosis of acute poisoning. *Environmental Toxicology*, 1(1), 27-38.
- LUDKE, J.L., HILL, E.W. & DIETER, M.P. (1975)** Cholinesterase (ChE) response and related mortality among birds fed ChE inhibitors. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 3, 1-21.
- MARDEN, B.T., FAIRBROTHER, A. & BENNETT, J.K. (1994)** Interlaboratory comparison of cholinesterase assay measurements, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 13(11), 1761-1768.

SHORE R, & DELL'OMO G. 1998. Does sub-lethal exposure to organophosphate pesticide affect capture rates in free-living rodents? *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 61 : 440-447

SPIRO T. G. & STIGLIANI W.M. 2004. Química Medioambiental. Pearson Educación S.A. Madrid. 2ª Edición.

TRUDEAU, S & SANS CARTIER, G. 2000. Biochemical Methods to Determine Cholinesterase Activity in Wildlife Exposed to Pesticides. National Wildlife Research Centre. Canadian Wildlife Service. Environment Canada. Technical Report Series No. 338..

WILSON, L., P. A. MARTIN, J. E. ELLIOTT, P. MINEAU & K. M. CHENG. 2001. "Exposure of California Quail to Organophosphorus Insecticides in Apple Orchards in the Okanagan Valley, British Columbia". *Ecotoxicology*, 10, pp. 79 - 90.)

WALMSLEY, T.A., ABERNETHY, M. H. & FITZGERALD, H.P. (1987) Effect of daylight on the reaction of tilos with Ellman's reagent, 5,5'-Dithiobis (2-Nitrobenzoic acid) *Clin. Chem.* 33(10), 1928-1931.

CAPÍTULO 12: IMPLEMENTACIÓN DEL SIG AMBIENTAL PARA LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

12.1 INTRODUCCIÓN

La implementación del Sistema de Información Geográfico (SIG) asociado al proyecto, está orientada a caracterizar ambientalmente la Cuenca del río Aconcagua y la disposición espacial de los resultados sobre calidad de agua y suelos de la zona agrícola, cuyo resultado será un mapa de síntesis o Mapa Ambiental de la Cuenca.

El sistema está formado por diferentes tipos de planos de información digital, los cuales se pueden separar en tres grandes grupos:

A) **Cartografía Base:** Correspondiente a la información escala 1:50.000 del IGM y escala 1:5.000 de las zonas urbanas, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, V Región. Estas capas son:

- 1.- Curvas de Nivel (líneas)
- 2.- Cotas (puntos)
- 3.- Red de Transporte (líneas)
- 4.- Red de Drenajes (líneas y polígonos)
- 5.- Manzanas Urbanas (polígonos)
- 6.- División predial urbana (líneas)
- 7.- Edificaciones (polígonos)
- 8.- Áreas Verdes

B) **Cartografía Temática:** Corresponde a información recopilada y/o generada por el proyecto, utilizada como base para generar los resultados del proyecto. Estas capas son:

- 1.- Estaciones de Calidad de Agua (DGA, Proyecto) (puntos)
- 2.- Estaciones de muestreo de aguas Subterráneas (pozos proyecto) (puntos)
- 3.- Estaciones limnimétricas (caudales, DGA) (puntos)
- 4.- Muestras de suelo (proyecto) (puntos)
- 5.- Vulnerabilidad de Acuífero (Estudio de Wolf Von Igel Grisar, 1999)
- 6.- Uso actual de Suelo (proyecto) (polígonos)
- 7.- Límites prediales rurales (CIREN) (polígonos)
- 8.- Zonificación Climática
- 9.- Series de Suelo y Capacidad de Uso Potencial (CIREN)

C) Información Temática Derivada y Mapa de Síntesis: Corresponde a los resultados del proyecto, producto del análisis y procesamiento de la información base y temática disponible.

- 1.- Modelo Digital de Elevación (raster)
- 2.- Mapa de Pendientes (raster y polígonos)
- 3.- Red hídrica simplificada (líneas M)
- 4.- Zonificación de uso de Agroquímicos (polígonos)
- 5.- Zonificación de Riesgos en aguas subterráneas (polígonos)
- 6.- Zonificación de Riesgos en aguas superficiales (polígonos)
- 7.- Zonificación de Calidad de Aguas superficiales (polígonos)
- 8.- Zonificación de Calidad en aguas Subterráneas (polígonos)
- 9.- Mapa ambiental de la Cuenca, cartografía final (polígonos, puntos y líneas)

Cada una de estas capas de información tiene asociada su base de datos respectiva y en varios casos (p.ej. estaciones de medición), una tabla relacional donde se almacenan los datos tomados para cada punto.

12.2 INTEGRACIÓN DE DATOS EN EL SIG

En todos los modelos conceptuales aparece el recuadro “Análisis Espacial en SIG” o “Integración en SIG”, como una forma de indicar que la información recolectada debe ser especializada de alguna forma lógica e integrada con otras fuentes de información complementarias que permiten dar coherencia a dicha espacialización.

En este punto, se describe la preparación de las capas espaciales que se utilizarán y una metodología propuesta para la integración de los datos.

12.2.1 Metodología

Adicionalmente a las capas temáticas mencionadas en los diagramas (uso del suelo, vulnerabilidad del acuífero, fuentes puntuales, estaciones de monitoreo, etc.) y de la información de cartografía base del IGM, existe una serie de capas auxiliares que permiten generar un mapa final de síntesis, denominado mapa ambiental.

Estas capas son: **a) Red hídrica; b) División de Subcuencas y Subsubcuencas y c) Modelo Digital de Terreno.**

a) Red Hídrica:

La información sobre hidrología que se entrega en las cartas topográficas del IGM, incluso en su versión digital (Cartografía Digital), no sirve para realizar análisis espacial en un SIG porque, a pesar que representa muy bien la realidad, al momento de su confección, es un simple dibujo el cual no permite realizar consultas genéricas ni menos caracterizar los cursos de agua en su función como red de drenaje superficial.

Por esta razón, debe ser reprocesada y transformada en una red conexa de arcos simples, con el sentido correcto dado por el escurrimiento natural de las aguas. En esta red simplificada, existen “nodos” donde se agregan o extraen flujos de agua conocidos. Estos flujos se dimensionan con una red de estaciones limnimétricas que, si está bien diseñada, permite conocer el caudal en cada una de las componentes de la red de drenaje (ríos, esteros, canales).

La red construida de esta forma, genera tramos espaciales concretos que se pueden caracterizar (pendiente, ancho, perfil, etc.) y por lo tanto, conocer y analizar su comportamiento específico.

Por la presencia de elementos singulares al interior de cada tramo (microcuenca, fuente puntual de contaminación, uso del recurso, cambio de pendiente, etc.), es necesario dividir cada tramo en segmentos y serán estos últimos, los que en definitiva representarán una característica determinada o calidad objetivo, dentro de la red principal.

En la práctica, existen dos formas de generar estos segmentos. La primera es una intervención directa sobre los arcos de cada tramo, cortándolos en forma dura, es decir, insertando un pseudo-nodo en el arco. La segunda, es conocida como segmentación dinámica, donde los segmentos se manejan en simples tablas de localización y mediante funciones propias del SIG, como ArcView, se espacializan automáticamente.

La ventaja de este segundo método es que basta con cambiar la información de las tablas, cosa simple de hacer, y se tiene rápidamente la nueva segmentación, sin tener que intervenir físicamente la información espacial original de la red de drenaje (poner o sacar pseudo-nodos).

Cada arco que forma la red hídrica tiene asociada una base de datos con los siguientes campos:

- a. Nombre
- b. Pendiente
- c. Largo
- d. Largo_Real
- e. Largo_Acum (largo real acumulado desde el inicio de la fuente)
- f. Subsubcuenca (código DGA)

Como tabla relacional, se tiene una tabla que especifica la separación inicial por tramos y segmentos de la fuente. Esta tabla tiene los siguientes campos:

- Nombre
- Tramo (número de tramo dentro de la red)
- Segmento (número de segmento asociado al tramo)
- M_inicio (distancia de inicio del segmento, desde el origen de la fuente)
- M_término (distancia de término del segmento, desde el origen de la fuente).

La numeración de los tramos se realiza desde el inicio de la fuente principal de la red hídrica y se va cambiando a medida que se encuentra un afluente, continuando en ese caso desde el inicio del afluente encontrado (figura 62)

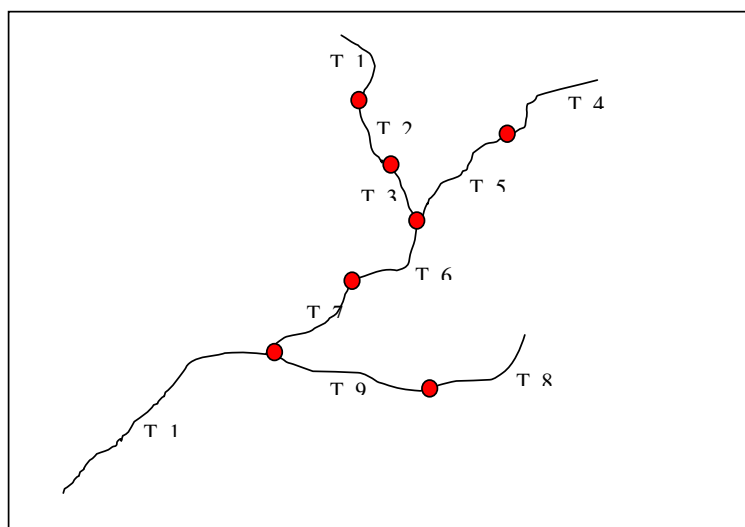


Figura 62: Numeración de tramos

b) División de Subcuencas y Subsubcuencas:

Corresponde a la división espacial del territorio donde el comportamiento hidrológico puede ser caracterizado (pendiente media, compacidad, etc.) y asignado a un punto conocido o a un segmento dentro de la red de drenaje principal. La Dirección general de aguas cuenta con una división de subsubcuencas, la cual debe ser adaptada de acuerdo a los objetivos de este proyecto ya que, en el caso de la DGA, sólo interesa el cálculo del caudal aportado por cada subsubcuenca. En general, para este proyecto, se debe aumentar el detalle de las divisiones, separando, en muchos casos, laderas de escurrimiento hacia la red principal.

c) Modelo Digital de Terreno (MDT):

En la mayoría de los análisis, la topografía juega un rol preponderante. Para ello, se debe contar con un MDT que en la práctica esta compuesto por cuatro capas de información:

- Modelo Digital de Elevación o representación continua de las altitudes del terreno.
- Pendientes o inclinación natural del terreno.
- Exposición de laderas o aspecto, que es la orientación en azimut de las laderas (norte, sur, sureste, etc.).

- Rangos de altitud o cortes en altura, donde las curvas de nivel representan los bordes de dichos rangos.

Estas capas de información cumplen un rol fundamental en el análisis espacial, mediante el cual se pretende zonificar características homogéneas de comportamiento hidrológico, arrastre de sedimentos, zonas de recarga, etc.

d) Vulnerabilidad del Acuífero

Para el estudio de contaminación de las aguas subterráneas se usa el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero del Río Aconcagua desarrollado por Wolf Von Igel Grisar, 1999 y que se basa en la aplicación de una modificación del modelo GOD de Foster (1987).

La vulnerabilidad *intrínseca* del acuífero es más útil para el estudio que la vulnerabilidad específica dado que se quiere estudiar el potencial impacto de diversos contaminantes. La variables más importantes para determinar la vulnerabilidad intrínseca son las propiedades del suelo, de la zona no saturada, de la zona saturada y las características de recarga. Otras variables tales como la topografía, propiedades de la unidad geológica subyacente y el contacto de las aguas subterráneas con el agua superficial y marina son de menor importancia (Von Igel, 1999).

Se necesitan los siguientes parámetros:

- a. Suelos**
 - Textura, estructura, espesor, % materia orgánica y % de arcilla
- b. Zona no saturada**
 - Profundidad/espesor, litología y permeabilidad vertical
- c. Zona Saturada (acuífero)**
 - Naturaleza y geometría (confinado, semiconfinado, freático etc), porosidad, conductividad hidráulica, propiedades de almacenamiento, transmisibilidad y dirección de flujo.
- d. Recarga**
 - Cantidad, calidad y variabilidad espacial

Un modelo ampliamente usado que contempla la mayor parte de estos factores es DRASTIC (Aller et al 1987), sin embargo, debido a la falta de información pública, detallada y necesaria para el Aconcagua, se optó por el otro método comúnmente utilizado, que a la vez, es más práctico: GOD de Groundwater ocurente (tipo de acuífero), Overlying litología (litología de la zona no saturada) y Depth to groundwater (profundidad al agua subterránea).

La variabilidad de estos tres parámetros se resumen en índices que, en general, varían de 0 a 1 y el producto de ellos entrega otro índice de la vulnerabilidad, variando de 0 (despreciable) a 1 (extrema).

Von Igel (1999) propuso valores para los índices de los distintos parámetros y obtuvo la siguiente clasificación para el acuífero de Río Aconcagua:

Indice (I)	$I < 0,15$	$0,15 \leq I < 0,25$	$0,25 \leq I < 0,35$	$0,35 \leq I < 0,45$	$I \geq 0,45$
Categoría	despreciable	baja	moderada	alta	extrema

Estos son los valores utilizados en la creación del mapa de vulnerabilidad intrínseca usado en el estudio.

12.3 REFERENCIAS

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J. & HACKETT, G. DRASTIC. A Standardized system for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeological Settings. US EPA, Ada. 1987. 455.

FOSTER, S.S.D., 1987. Fundamental Concepts in Acuífer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. En W. van Duivenbooden y H.G. van Waegeningh, eds, Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. TNO. The Hague, pp69-86.

VON IGEL GRISAR W., 1999. Redefinición de la Red de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea en el Valle del Aconcagua. Edit. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

CAPÍTULO 13: MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

13.1 CONCEPTOS BÁSICOS

El objetivo de un modelo de calidad de aguas es producir una herramienta que tenga la capacidad de determinar nuevas concentraciones de contaminantes en un cuerpo de agua, en cada punto y a lo largo del plazo de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidos. El desarrollo de esta herramienta se hace aplicando un modelo matemático, producto de 3 fases generales:

- ❑ **Representación conceptual:** es la idealización gráfica del prototipo, mediante la descripción de las propiedades geométricas, físicas y biológicas que serán modeladas e identificando las condiciones de borde e interrelaciones entre las diversas partes del prototipo. Usualmente, este proceso comienza dividiendo el sistema estudiado en “elementos” discretos de un tamaño compatible con los objetivos de la modelación, definiendo dichos elementos de acuerdo a reglas geométrica simples, y diseñando la forma en que serán conectados entre sí, ya sea física o funcionalmente, como partes integrales del todo.
- ❑ **Representación funcional:** aquí se transforman las características físicas, procesos y condiciones de borde de la etapa anterior, en ecuaciones matemáticas. Esto implica la definición precisa de cada variable y sus relaciones con todos los otros parámetros que caracterizan el modelo.
- ❑ **Representación computacional:** Es la etapa en la cual el modelo funcional es traducido a algoritmos y procedimientos computacionales que permiten solucionar el problema dentro del espacio y tiempo deseados.

Para que un modelo de calidad de aguas pueda ser aplicado con confianza para la predicción de las condiciones futuras de los diversos parámetros, tiene que cumplir, obviamente, con la condición básica de reproducir aceptablemente las condiciones actuales (Vargas y Mellado, 1994).

El problema de modelar el comportamiento de los indicadores de calidad de un cuerpo de agua es en sí fundamentalmente tridimensional e impermanente, lo que lo hace difícil de abordar. Esta condición hace que el desarrollo de modelos de calidad de aguas sea una ciencia y un arte (Vargas y Mellado, 1994).

Cada coeficiente o expresión usada en un modelo de calidad de agua debe ser escogido cuidadosamente, considerándolo como parte integral del proceso de modelación. El primer problema asociado a cualquier modelación es la selección de la representación funcional adecuada para el modelo, la cual debe basarse en los objetivos de la modelación, los tipos y cantidad de datos disponibles y en las fortalezas y debilidades de cada formulación. Una vez que se ha seleccionado la representación funcional adecuada, aparece el segundo gran problema:

determinar los valores adecuados para cada parámetro. Aún cuando los parámetros sean determinados por calibración, es muy importante establecer el rango dentro del cual cada parámetro tiene un significado físico razonable. Por lo anterior, es necesario tener claro que **una calibración muy buena del modelo no implica que éste tenga una capacidad predictiva igualmente buena.** Esto se debe a que el modelo puede contener mecanismos físicos incorrectos, o su calibración pudo realizarse asignando valores sin significado físico a los parámetros involucrados en la modelación (Bowie *et al.* 1985, citado por Zambrano, 1999).

Ya que los valores de los coeficientes involucrados en una modelación nunca se conocen con total exactitud, es importante determinar el grado de exactitud con que se desea conocer un determinado parámetro. La relación entre la incertidumbre asociada al valor de algún coeficiente y su efecto en las predicciones del modelo puede realizarse a través de un análisis de sensibilidad (Bowie *et al.*, 1985, citado por Zambrano, 1999).

Los procesos de calibración y validación son fundamentales para la aplicación **útil** de un modelo, y en este aspecto es imprescindible realizar una **sensibilización de parámetros**, que permite averiguar cuan fuerte es la influencia de algún parámetro en la calibración de un modelo particular.

13.1.1 Factores que determinan un Modelo de Calidad de Aguas

Antes de desarrollar un modelo de calidad de aguas, o antes de aplicar un modelo ya conocido, siempre es necesario tener absolutamente claros los objetivos del estudio que se desea realizar, ya que estos son los que determinan el grado de detalle con el que se deben analizar los siguientes factores:

a) Escala temporal que rige el problema. Este factor está estrechamente relacionado con el tipo de cuerpo de agua que se quiere modelar:

- En grandes cuerpos de agua (lagos), puede llevar meses, o incluso años, apreciar una variación significativa de un indicador de calidad de aguas.
- En un estuario importante las variaciones significativas pueden tomar semanas.
- En un río las respuestas significativas generalmente toman horas o días.

b) Condiciones geomorfológicas, hidrológicas e hidrodinámicas. Dentro de la recopilación de antecedentes previos, a la aplicación de un modelo de calidad de aguas, es necesario tener una descripción lo más detallada posible de la cuenca o sector donde se aplicará el estudio, ya que aún en un cuerpo de agua bien definido geomorfológicamente, pueden observarse grandes variaciones en las concentraciones de indicadores de calidad de aguas, cuando varían las condiciones hidrológicas (por ejemplo: variaciones estacionales del caudal de un río) o hidrodinámicas (por ejemplo: viento en el océano o estuarios).

c) Cinética de las transformaciones de los indicadores de calidad de agua. Todo indicador de calidad de agua, al igual que cualquier otra sustancia presente en un cuerpo de agua, sufre diversas transformaciones durante su permanencia en dicho cuerpo. Estas transformaciones

pueden ser físicas, químicas o biológicas y la magnitud del cambio con respecto al tiempo puede indicar las características del modelo a emplear.

13.1.2 Escala Temporal

Los modelos de calidad de aguas pueden ser, desde el punto de vista de la escala temporal, "dinámicos" o de "*estado permanente*" ("*steady-state*"). Una suposición estricta de *steady-state*, implica que las variables involucradas en las ecuaciones del sistema no cambian con el tiempo. Una gran variedad de problemas de planificación, pueden ser analizados utilizando modelos matemáticos tipo *steady-state* o *quasi-steady* (lentamente variado), los cuales entregan los detalles espaciales necesarios para determinar importantes variables de calidad ambiental (Bowie *et al.*, 1985, citado por Zambrano, 1999). Ciertos fenómenos pueden alcanzar condiciones de *steady-state*, dentro de intervalos de tiempo pequeños y por ellos pueden ser modelados más fácilmente. Por ejemplo, un río puede recibir cargas contaminantes que no varían sensiblemente día tras día (en una estación del año) y lo que interesa es conocer los niveles de oxígeno disuelto a lo largo del curso.

Las representaciones tipo *steady-state* o *quasi-steady* son muy útiles debido a su simplicidad. Algunos ejemplos de fenómenos que han sido modelados suponiendo *steady-state* son:

- ☐ Decaimiento bacterial.
- ☐ Concentraciones de OD (bajo ciertas condiciones).
- ☐ Distribución de nutrientes y su reciclaje.

Cuando las variables o el proceso que interesa simular sufren variaciones estacionales importantes (por ejemplo, la distribución estacional de algunas especies biológicas o sustancias abióticas) puede ser necesario recurrir al uso de modelos de calidad de agua dinámicos.

13.1.3 Tipos de Modelos

Según Bowie *et al.* (1985 citado por Zambrano, 1999), los modelos de calidad de agua pueden clasificarse en 3 grandes grupos:

a) Modelos Cero-Dimensionales

Estos modelos son usados para estimar, con un mínimo costo, la concentración promedio de un contaminante. Ellos predicen un campo de concentraciones de la forma $C=f(t)$, donde t representa el tiempo; por lo cual usualmente permiten una solución analítica de fácil obtención.

b) Modelos Unidimensionales

En estos modelos la geometría del sistema se formula conceptualmente como una red lineal de segmentos o de secciones de volumen. La variación en los parámetros de calidad de agua ocurre longitudinalmente (en la dirección x), debido a que el agua es transportada por

advección y dispersión de un segmento a otro. La mayoría de los ríos son modelados usando representaciones unidimensionales.

c) Modelos Multidimensionales

Los modelos de calidad de aguas de lagos y estuarios, a menudo son bi o tridimensionales para representar la heterogeneidad espacial del cuerpo de agua. Dependiendo del sistema, las representaciones bidimensionales incluyen la dimensión vertical con segmentación longitudinal para lagos profundos y estrechos o estuarios.

Las representaciones espaciales tridimensionales son usadas para modelar completamente los patrones de flujo en lagos.

13.1.4 Procesos Físicos a Simular

Los procesos físicos que a menudo se simulan en los modelos de calidad de aguas, incluyen patrones de flujo y circulación, mezcla y dispersión, temperatura del agua y la distribución de densidad (la cual es función de la temperatura, salinidad y concentración de sólidos suspendidos) del cuerpo de agua. La calidad de las predicciones realizadas por un modelo de calidad de aguas, es muy dependiente del proceso físico modelado y de la forma en que es representado por el modelo. Por esto, el modelador debe balancear cuidadosamente el grado de detalle aceptable en la modelación, con el costo asociado a una modelación más minuciosa. Es deseable tanto desde el punto de vista ingenieril, como desde el punto de vista del análisis del ecosistema, seleccionar el modelo más simple que satisfaga los requerimientos espaciales y temporales de la simulación de la calidad de agua estudiada (Bowie *et al.*, 1985, citado por Zambrano, 1999).

13.1.5 Ecuación básica

Cuando una carga contaminante se introduce a un cuerpo de agua, se ve afectada principalmente por tres procesos:

- a) Transporte advectivo (convectivo).
- b) Difusión-dispersión.
- c) Transformaciones (reacciones o degradaciones).

Para conocer como se producen los cambios de concentración, espaciales y temporales, debido a estas acciones, en esta sección analizaremos brevemente estos tres factores.

a) Transporte advectivo

El transporte advectivo es aquel impuesto por un sistema en movimiento, es decir, que posee energía cinética. En otras palabras, un fluido en movimiento es capaz de llevar consigo sustancias y partículas, las cuales se desplazan siguiendo las líneas de corriente.

Para el volumen infinitesimal mostrado en la figura 63, siendo c la concentración de una sustancia que atraviesa dicho volumen y u la velocidad media de la sustancia en la dirección del flujo, se tiene un caudal másico de entrada igual a $c \cdot u$ [kg/s], y un caudal másico de

salida dado por $c \cdot u$ más la variación interna experimentada al atravesar el volumen infinitesimal, dada por $\frac{\partial(c \cdot u)}{\partial x} dx$, siendo x la variable que representa la dirección del transporte de la sustancia

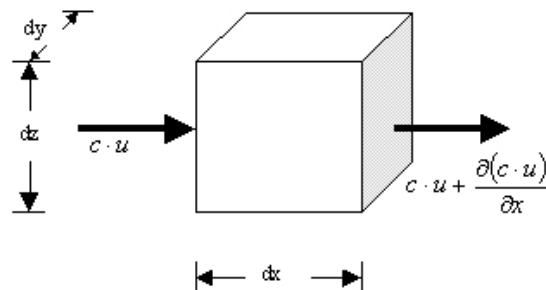


Figura 63: Esquema del transporte por advección

El balance de masa en este volumen, debido sólo al transporte advectivo, puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\text{Materia entrante} = \text{Materia saliente} + \text{Acumulación} \quad (13.1)$$

$$(c \cdot u) \cdot dy \cdot dz = \left(c \cdot u + \frac{\partial(c \cdot u)}{\partial x} dx \right) \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial c}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (13.2)$$

De donde:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial(c \cdot u)}{\partial x} \quad (13.3)$$

Ahora, si consideramos las 3 dimensiones espaciales:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \left[\frac{\partial(c \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(c \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(c \cdot w)}{\partial z} \right] \quad (13.4)$$

Donde:

- u Velocidad en el eje x, [m/s].
- v Velocidad en el eje y, [m/s].
- w Velocidad en el eje z, [m/s].

Entonces, la ecuación de continuidad para un fluido, *debida sólo al transporte advectivo*, podría escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c \cdot \vec{V}) \quad (13.5)$$

Donde:

\vec{V} : Velocidad espacial del flujo. $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z)$, [m/s].

En general, existen dos métodos para tratar la advección en modelos para ríos:

- El primero requiere de la medición en terreno de las propiedades del río (caudales, DBO, OD, etc.) y de la geometría de cada una de las secciones en que se divide a éste. Mediante métodos matemáticos, se realizan interpolaciones o extrapolaciones en cada sección, para simular la respuesta a eventos en que intervengan flujos distintos a los medidos. Esta aproximación es especialmente adecuada para ríos, que presentan propiedades hidráulicas de gran complejidad (flujos supercríticos, cascadas, etc).
- El segundo método involucra la solución simultánea de las ecuaciones de continuidad y de momentum para cada tramo del río que se está estudiando. Este método se considera más "*predictivo*" que el anterior, ya que sólo se requieren datos de flujo para la calibración y verificación del modelo. Al mismo tiempo, este método es más exacto y más apropiado para el uso en la simulación de calidad de aguas transientes.

b) Difusión y Dispersión

Si bien semánticamente los términos difusión y dispersión dan a entender una propagación de una sustancia que inicialmente se encontraba concentrada, existe una gran diferencia entre ambos, y radica en el grado de aleatoriedad del movimiento.

El término de **difusión** se aplica, generalmente, a procesos en que los movimientos de las partículas son completamente aleatorios. Si se considera un espacio discreto constituido por celdas, en las cuales cierta cantidad de partículas puede desplazarse o saltar a la siguiente o a la anterior, la probabilidad de dar un salto hacia atrás o hacia delante es la misma.

La relación que gobierna el movimiento aleatorio de las partículas a escala molecular es la conocida ley de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \xi \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (13.6)$$

Donde:

- c : Concentración de la sustancia que difunde, [mg/l].
 ξ : Coeficiente de difusión, [m²/s].

Esta ecuación sólo involucra la probabilidad de dar saltos hacia delante o hacia atrás.

En cambio, el fenómeno de **dispersión** involucra un proceso de propagación que se realiza con la ayuda de algún otro mecanismo de movimiento aleatorio, como por ejemplo, la diferencia de velocidades entre líneas de corriente contiguas. Se puede demostrar que la masa total transportada en la dirección de la corriente, es proporcional al gradiente de concentración en la misma (Fisher, 1979, citado por Zambrano, 1999). Este es exactamente el mismo resultado obtenido para el proceso de difusión molecular, pero con un coeficiente de transporte conocido como coeficiente de dispersión, que expresa la propiedad difusiva de la distribución de velocidades. Entonces, la ley de dispersión puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (13.7)$$

Donde:

- c : Concentración de la sustancia que se transporta por dispersión, [mg/L].
 D_L : Coeficiente de dispersión longitudinal, [m²/s].

La ecuación 1.7 puede expresarse en forma tridimensional de la siguiente manera:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_L \nabla c) \quad (13.8)$$

c) Transformaciones

Algunas sustancias a medida que son transportadas van sufriendo incrementos positivos o negativos en su concentración, independientes del transporte advectivo o dispersivo. Dependiendo de la existencia o no de este tipo de incrementos en la concentración de una sustancia, éstas pueden dividirse en dos grandes grupos:

- ❑ **Sustancias no conservativas:** Son aquellas sustancias que están sujetas a transformaciones o reacciones durante el tiempo en que son transportadas, como por ejemplo: DBO₅, oxígeno disuelto, nutrientes, coliformes fecales, bacterias, etc.
- ❑ **Sustancias conservativas:** Aquellas en que el efecto de las reacciones es nulo, como por ejemplo: cloruros, sólidos totales, sólidos suspendidos, etc.

Generalmente, el decaimiento de una sustancia debido a los efectos de transformaciones, degradaciones o reacciones químicas, se expresa siguiendo una relación de primer orden:

$$\frac{dc}{dt} = -K \cdot c \quad (13.9)$$

Donde:

K Constante de decaimiento de la sustancia, [L/día].

En la ecuación 13.9 el signo (-) indica una reducción en la concentración de la sustancia considerada (*K* debe ser positiva).

d) Ecuación General de un Modelo de Calidad de Aguas

La distribución de concentraciones de una sustancia afectada por los fenómenos de transporte (advección y dispersión) y de degradación o reducción, puede obtenerse al superponer los efectos de las degradaciones a los efectos de los fenómenos de transporte, debido a la naturaleza lineal de estos últimos. De esta manera, la ecuación general que debe resolver un modelo de calidad de aguas para cada sustancia que desee modelar es la siguiente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_L \nabla c) - \nabla \cdot (\vec{V} \cdot c) + \frac{dc}{dt} + S \quad (13.10)$$

Los términos del lado derecho de la ecuación 1.10 representan, respectivamente, los fenómenos de dispersión, advección, reacciones y transformaciones internas y, finalmente, las fuentes y demandas externas que afectan a la sustancia modelada.

Debe notarse que el término dc/dt sólo representa los cambios de concentración, debidos a fenómenos internos, tales como autopurificación, sedimentación, reoxigenación, crecimiento y decaimiento, respiración de las algas, etc. y no debe confundirse con el término $\partial c / \partial t$, que representa el gradiente local de concentraciones e incluye, tanto los efectos de fenómenos internos, como los efectos de la dispersión, advección, fuentes y sumideros externos y dilución.

13.2 MODELO DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES

13.2.1 Elección del Modelo de calidad a utilizar

Actualmente en el mercado existe una gran cantidad de modelos de calidad de aguas disponibles, muchos de los cuales son bastante costosos en términos económicos. Con el fin de predecir el impacto de las descargas en la cuenca del río Aconcagua, se decidió aplicar el modelo Qual2K recomendado por la USEPA a partir de diciembre de 2003, evolución del modelo Qual2E de la misma USEPA, el cual permite representar unidimensionalmente las relaciones de balance de oxígeno y decaimiento bacteriano, entre otras, en un cuerpo de agua superficial.

a) Historia y usos

QUAL2K es el resultado de un desarrollo histórico de modelos de P, O y N (Rauch *et al.*, 1998) que dieron paso a paso a extensiones y a una complejidad creciente. El punto de partida era el modelo pionero Streeter-Phelps (Streeter y Phelps, 1925) basado en la descripción del aumento y después de la disminución en el déficit de oxígeno aguas arriba y aguas abajo de una fuente de material orgánico. Más tarde fue ampliado a los procesos de nitrógeno que incluyeron sobre todo nitrificación, llaman QUAL1 a ese primer modelo (Orlob, 1982). Finalmente, los ciclos del fósforo y algas fueron añadidos en la creación de la familia de modelo de QUAL2 (Brown y Barnwell, 1987). Varias versiones de QUAL2 están disponibles según el objetivo del empleo (Brown y Barnwell, 1987). Sin embargo, QUAL2K compila los mejores rasgos de las versiones disponibles de QUAL2 sobre las cuales fueron añadidas las opciones de análisis de incertidumbre (Brown, 1986; Marrón y Barnwell, 1987).

El modelo ha sido extensamente probado, calibrado y usado en muchas partes del mundo. La siguiente tabla (tabla 46) presenta algo del uso anterior y corriente de QUAL2K.

Tabla 46: Referencias al uso del modelo QUAL2K en diversos países.

Area	Referencia
Georgia/Florida	Brown and Barnwell (1987)
Florida	Tsihrintzis et al. (1995)
North Carolina	Little and Williams (1992)
Iowa	Tillman (1992)
	Van Orden and Uchirín (1993); Melching and Yoon (1996)
New Jersey	
Chile	Dussaillant et al. (1997)
Italy	Odell (1992)
	Cubillo et al. (1992); Suárez et al. (1995)
Spain	
Slovenia	Droic and Odell (1996)
India	Ghosh and McBean (1998)
Taiwan	Lo and Chen (1991)
Ghana	Larmie et al. (1989)
South Africa	CSIR (1996)

b) Uso del modelo y limitaciones

La formulación de QUAL2K proviene directamente del marco regulador estadounidense. (Odel *et al.*, 1998). Más expresamente, QUAL2K satisface estudios de asignación de carga y otras actividades de planificación (Brown y Barnwell, 1987). Las asignaciones de carga contaminante son realizadas para las condiciones de flujo mínimo constante (regulaciones estadounidenses: “siete días consecutivos”, flujo mínimo con una probabilidad que ocurra una vez en diez años, [Odel *et al.*, 1998]) y el máximo permitido en la tasa de descarga de efluente. QUAL2K fue creado expresamente para condiciones estable-streamflow “descarga de efluente estable”, especificadas en las regulaciones de calidad de agua para la asignación de cargas contaminantes. Por consiguiente, QUAL2K ha sido extensamente usado por consultores y agencias reguladoras y es considerado como un estándar para modelos de calidad de agua (Chapra, 1997, Odel *et al.*, 1998).

El oxígeno disuelto, por lo general, es mirado como la variable de estado, principalmente durante estudios de asignación de cargas. Sin embargo, el modelo puede ser usado para estudios de fuentes no puntuales, donde OD y DBO₅ no tienen que ser simulados conjuntamente con los ciclos de fósforo y nitrógeno. Las respuestas diarias de temperatura y OD también pueden ser simuladas con QUAL2K.

Aunque el modelo fue diseñado para su empleo intencional, no trabaja bien más allá de sus limitaciones explícitas. El modelo calcula el transporte de masas y la difusión en una dimensión y por lo tanto satisface las corrientes que son bien mezcladas verticalmente y lateralmente. El modelo es inadecuado para los ríos que experimentan variaciones temporales en la descarga del efluente o donde las descargas principales fluctúan considerablemente en un período de tiempo diario o más corto.

Las limitaciones más significativas del modelo se encuentran examinando la contribución de agentes contaminantes en las fuentes no puntuales, para degradación de calidad del agua del río. La verdad, no señala los acontecimientos de precipitación. De hecho, las cargas de las fuentes no puntuales son conducidas a menudo por acontecimientos de precipitación y así tanto la carga de contaminantes y la descarga del efluente varía considerablemente en el tiempo. Ambos tipos de variación pueden desviarse considerablemente de las suposiciones de QUAL2K (Odel *et al.*, 1998).

QUAL2K también ha sido usado como un instrumento de investigación. El modelo ha sido usado para mostrar la importancia del análisis de incertidumbre en la modelación de calidad de agua (Melching y Yoon, 1996). Little y Williams (1992) usaron el modelo para mostrar la técnica de calibración que ellos desarrollaron y que podría ser aplicable a todos los modelos de calidad de agua.

QUAL2K a menudo es usado como un modelo estándar en la modelación de calidad de agua, frente al cual muchos otros modelos son evaluados (Rauch *et al.*, 1998; Odel *et al.*, 1998).

Muchas modificaciones de QUAL2K han sido realizadas para adaptar el modelo a condiciones específicas (Brown y Barnwell, 1987; Odel *et al.*, 1998).

Las capacidades de QUAL2K también fueron ampliadas con la descripción del ciclo de la sílice y de los sedimentos; llaman CE-QUAL-ICM al nuevo modelo resultante (Cерco y Cole, 1995).

El modelo CE-QUAL-RIV1 (USACE, 1990) se generó de las limitaciones de QUAL2K. Éste tiene la capacidad de simular flujos y carga de contaminantes variables.

A continuación se describe conceptualmente, y términos generales, el funcionamiento del modelo Qual2E, el cual está ampliamente documentado en la USEPA, para luego describir las mejoras introducidas por el modelo Qual2K finalmente utilizado.

13.2.2 Descripción general del modelo Qual2E

Qual2E es un modelo de calidad de aguas para ríos muy versátil, el cual puede simular hasta 15 constituyentes de calidad, en cualquier combinación deseada por el usuario. Está escrito en Fortran 7 y fue diseñado para el sistema operativo DOS. Los constituyentes que pueden ser simulados son:

- Oxígeno Disuelto
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Temperatura
- Algas como Clorofila *a*.
- Nitrógeno en forma de nitrógeno orgánico
- Nitrógeno amoniacal.
- Nitrógeno en forma de nitrito.
- Nitrógeno en forma de nitrato.
- Fósforo en forma de fósforo orgánico
- fósforo disuelto
- Coliformes.
- Un constituyente no conservativo arbitrario.
- Tres constituyentes conservativos.

El modelo es aplicable a ríos dendríticos que se encuentren bien mezclados, y asume que los principales mecanismos de transporte, advección y dispersión, son significativos sólo en la dirección principal del flujo (a través del eje longitudinal de la corriente). Permite la representación de múltiples descargas contaminantes, extracciones, flujos tributarios, descargas y extracciones incrementales. También puede calcular el flujo de dilución requerido para alcanzar cualquier nivel de oxígeno predefinido.

Hidráulicamente, Qual2E está limitado a la simulación de períodos de tiempo durante los cuales se mantengan constantes tanto los flujos de agua como las descargas contaminantes. Qual2E puede operar tanto como un modelo *steady-state* (en estado permanente) o como un modelo dinámico convirtiéndolo en una muy útil y poderosa herramienta de planificación.

Cuando se opera como un modelo *steady-state* puede ser utilizado para estudiar el impacto de descargas puntuales (magnitud, calidad y ubicación) en la calidad del cuerpo de agua receptor, o bien, ser utilizado en conjunto con un plan de monitoreo para identificar la magnitud y características de calidad de las descargas no puntuales.

Operando el modelo dinámicamente, el usuario puede estudiar los efectos sobre la calidad del agua de las variaciones a través del día de los datos meteorológicos (principalmente oxígeno disuelto y temperatura) y también puede estudiar las variaciones de oxígeno disuelto a través del día debida al crecimiento de algas y a la respiración de las mismas. Sin embargo, no es posible estudiar, en forma directa, los efectos de funciones forzadas dinámicas, tales como flujos de cabecera o descargas puntuales.

13.2.2.1 Representación Conceptual

Debido a que las propiedades geométricas, características hidráulicas, y otros factores pueden variar significativamente a lo largo de un río, es necesario dividir a éste en segmentos más pequeños, denominados **tramos**, en los cuales dichas características se mantienen aproximadamente constantes.

La Figura 63 muestra uno de los n tramos de un río, el cual a su vez se ha subdividido en un número determinado de **subtramos** o **elementos computacionales**, cada uno de longitud Δx .

Para cada uno de dichos elementos computacionales, se puede realizar un balance hidrológico en términos del flujo de entrada en la sección aguas arriba del elemento (Q_{i-1}), caudal de las fuentes o sumideros externas (Q_{xi}), y del caudal de salida a través de la sección aguas abajo del elemento (Q_i). De la misma forma, se puede escribir un balance de masa para cualquier constituyente c dentro del elemento. Para el balance de masa se considerará tanto el transporte por advección ($Q \cdot c$) como el transporte por dispersión ($A \frac{D_L}{\Delta x} \frac{\partial c}{\partial x}$). También es posible incorporar o extraer masa del sistema mediante fuentes o demandas externas ($Q_x c_x|_i$), o bien mediante fuentes o demandas internas (S_i), tales como transformaciones biológicas y demandas bénticas. Un supuesto fundamental es que **existe mezcla completa en cada elemento computacional**.

De esta forma, el río puede ser concebido como un set de reactores completamente mezclados – **elementos computacionales**– que están unidos secuencialmente uno a otro mediante mecanismos de transporte (advección-dispersión). Dentro del río podemos definir un tramo como un grupo de estos reactores secuenciales en los cuales los elementos computacionales tienen las mismas propiedades hidrogeométricas (pendiente del canal, sección transversal, rugosidad, etc.) y tasas biológicas de reacción (DBO₅, DOS, etc).

Así, el río que se observa en la figura 64, puede ser representado conceptualmente por el conjunto de tramos y elementos computacionales expuestos en la figura 65.

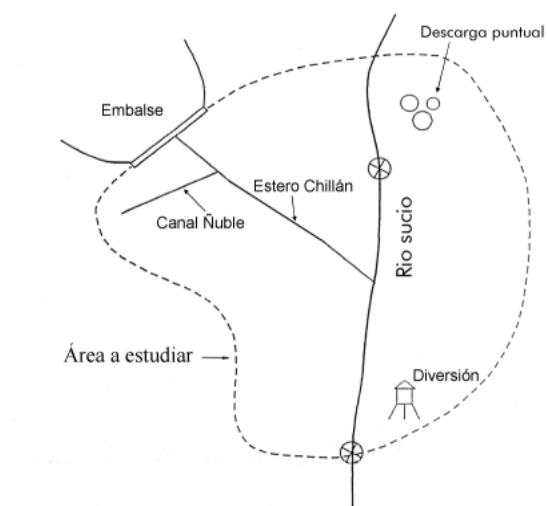


Figura 64: Ejemplo de un sistema real

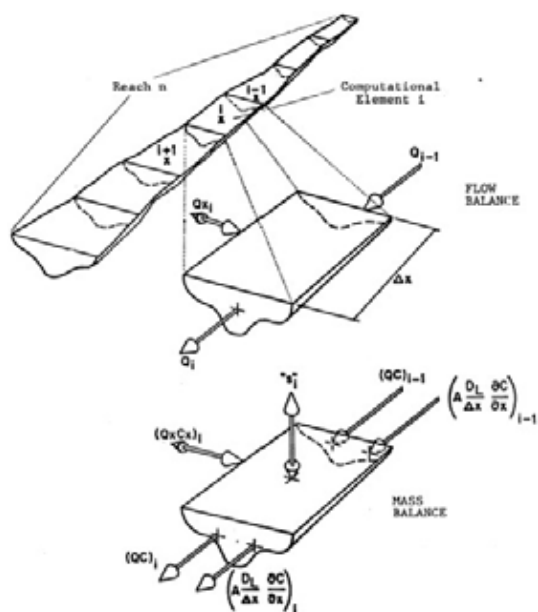


Figura 65: Discretización computacional del sistema real y balance de masa en un elemento computacional.

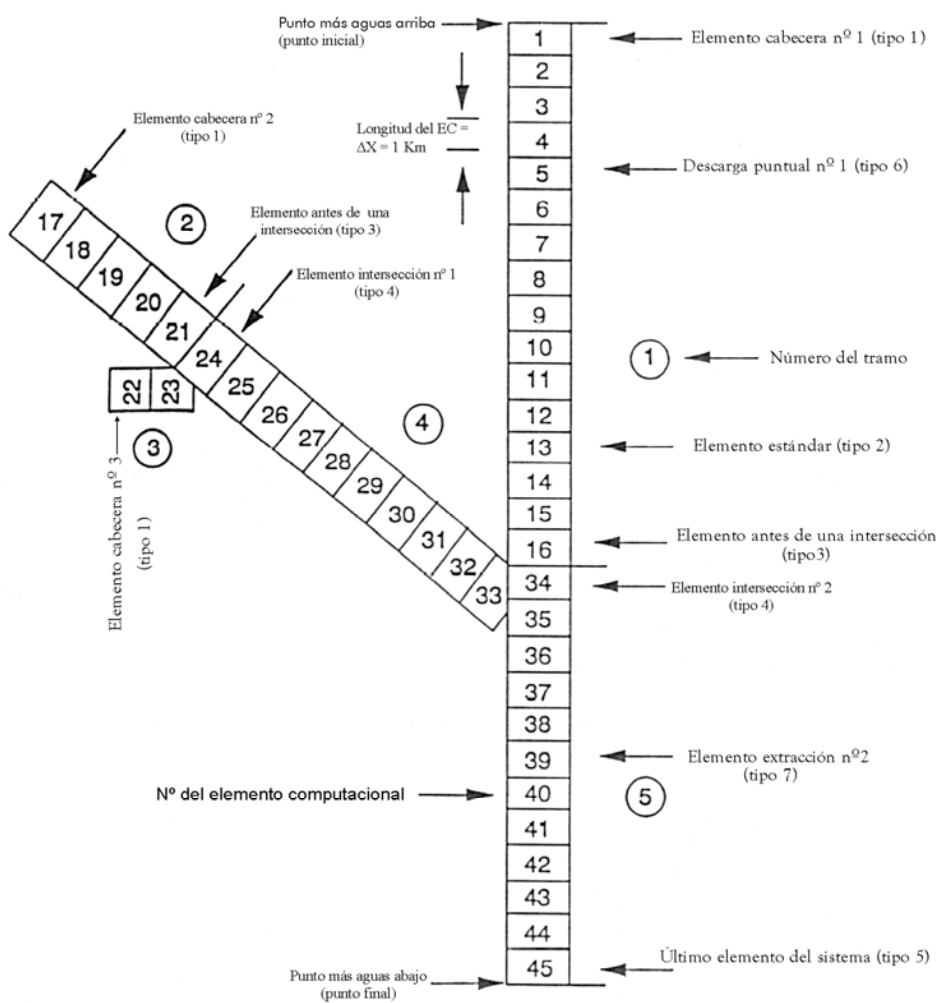


Figura 66: Representación computacional del sistema real

13.2.2.2 Representación Funcional

a) Ecuación de transporte de masa

Para encontrar la concentración de cualquier sustancia que es transportada por un cuerpo de agua en movimiento, Qual2E resuelve en forma numérica la ecuación general para el balance de masa. Esta ecuación incluye los efectos de la advección, dispersión, dilución, degradaciones y fuentes o demandas externas. Para cualquier constituyente, c , puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_L \nabla c) - \nabla \cdot (\vec{V} \cdot c) + \frac{dc}{dt} + S \quad (13.11)$$

La ecuación 1.11, se puede escribir unidimensionalmente en función de la distancia orientada hacia aguas abajo, x , como sigue:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (A_x \cdot D_L \cdot \partial c / \partial x)}{A_x \partial x} - \frac{\partial (A_x \cdot \bar{U} \cdot c)}{A_x \partial x} + \frac{dc}{dt} + S \quad (13.12)$$

Donde:

- A_x : Área de la sección transversal, [m²].
- x : Distancia orientada hacia aguas abajo, [m].
- \bar{U} : Velocidad media de la corriente en la dirección del flujo, [m/s].

Los términos del lado derecho de la ecuación 13.12 representan, respectivamente, los fenómenos de dispersión, advección, reacciones y transformaciones en la sustancia modelada y las fuentes o sumideros externos.

Bajo condiciones de equilibrio (*steady-state*) tenemos que:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (13.13)$$

Con lo cual, la ecuación 13.13 se transforma en:

$$\frac{\partial (A_x \cdot D_L \cdot \partial c / \partial x)}{A_x \partial x} - \frac{\partial (A_x \cdot \bar{U} \cdot c)}{A_x \partial x} + \frac{dc}{dt} + S = 0 \quad (13.14)$$

b) Características Hidráulicas

Qual2E supone que el régimen hidráulico de la corriente es *steady-state*, por lo cual, el balance hidrológico para un elemento computacional puede escribirse simplemente como:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right)_i = (Q_x)_i \quad (13.15)$$

Donde:

$(Q_x)_i$: Suma de los caudales entrantes y/o extracciones al elemento, $[L^3T^{-1}]$.

Para encontrar el resto de las características hidráulicas en los elementos computacionales del sistema, es necesario conocer alguna relación entre dichas variables y el caudal. Qual2E sólo da la posibilidad de escoger entre dos posibles relaciones:

- **Coefficientes de descarga:** para aplicar esta relación es necesario contar con una serie de datos de terreno de Q v/s H y Q v/s U, para posteriormente graficarlos y encontrar una relación funcional entre Q-H y Q-U, la cual queda expresada a través de unos coeficientes obtenidos por calibración.
- **Secciones trapezoidales:** esta relación sólo es aplicable cuando TODAS las secciones de los tramos del sistema son trapezoidales. Tiene la ventaja de no necesitar mediciones de terreno ni el largo trabajo que lleva el post-análisis de dichos datos.

c) Coefficientes de Descarga

Una vez que la ecuación 13.15 ha sido resuelta para Q, las otras características hidráulicas de los tramos de la corriente pueden determinarse a partir de las ecuaciones de **Leopold y Maddock (1953)**:

$$\bar{U} = a \cdot Q^b \quad (13.16) \quad A_x = \frac{Q}{\bar{U}} \quad (13.17) \quad H = \alpha \cdot Q^\beta \quad (13.18)$$

Donde:

a, b : Constantes empíricas. Usualmente se determinan a partir de curvas de
 α, β : descarga.
 H : Profundidad media de la corriente, [m].

d) Secciones transversales trapezoidales

En forma alternativa, si las propiedades de la sección transversal del tramo están disponibles como una función de la profundidad H, \bar{U} puede obtenerse en función del caudal mediante la solución de la ecuación de Manning por un procedimiento de prueba y error:

$$Q = \frac{1}{n} A_x \cdot R_x^{2/3} \cdot S_e^{1/2} \quad (13.19)$$

Donde:

- A_x : Área de la sección transversal del canal, [m²].
- R_x : Radio hidráulico efectivo promedio, [m].
- n : Factor de rugosidad de Manning. Su rango usual es de 0,010 a 0,10. Su valor para diferentes tipos de canales se encuentra en la Tabla 5.1.
- S_e : Pendiente de la línea gradiente de energía, [adimensional].
- Q : Caudal, [m³/s].

El valor de \bar{U} se obtiene de la ecuación 13.17.

e) Dispersión longitudinal

La dispersión es básicamente un mecanismo de transporte convectivo. El término “*dispersión*” se usa generalmente para designar el transporte asociado con la variación espacial de la velocidad media, en oposición a la “*difusión*”, que se usa para designar el transporte asociado con las variaciones temporales de la velocidad media.

Elder (1959) asumiendo que sólo el gradiente vertical de velocidad era importante en corrientes naturales, desarrolló la siguiente ecuación para el coeficiente de dispersión longitudinal (D_L):

$$D_L = 10,76 \cdot K_L \cdot H \cdot u^* \quad (13.20)$$

Donde:

- D_L : Coeficiente de dispersión longitudinal, [m²/s].
- K_L : Constante de dispersión, [adimensional]. Elder usó un valor de $K_L = 5.93$.
- H : Profundidad media de la corriente, [m].
- u^* : Velocidad de corte, [m/s]. $u^* = \sqrt{\tau_0 / \gamma}$.
- τ_0 : Tensión de corte del contorno, [kg/m²].
- γ : Peso específico del fluido, [kg-s²/m⁴].

Otros investigadores han desarrollado expresiones similares para D_L y han encontrado que su valor es extremadamente sensible a las variaciones del perfil lateral de velocidad. Sin embargo, la expresión de Elder parece ser adecuada para situaciones unidimensionales en las que el canal no sea demasiado ancho. Para canales muy anchos, **Fisher (1964)** ha demostrado que el ancho medio debe ser considerado, en vez de la profundidad, para determinar el coeficiente de dispersión longitudinal.

La ecuación 13.10 puede escribirse en términos del coeficiente de Manning y otras variables características de la corriente de la siguiente forma:

$$D_L = 3,82 \cdot K_L \cdot n \cdot \bar{U} \cdot H^{5/6} \quad (13.21)$$

Donde:

- D_L : Coeficiente de dispersión longitudinal, [ft²/s].
 K_L : Constante de dispersión, [adimensional].
 n : Coeficiente de rugosidad de Manning, [adimensional].
 \bar{U} : Velocidad media de la corriente, [ft/s].

 H : Profundidad media de la corriente [ft].

El valor del coeficiente de dispersión, D_L , puede variar entre 0.07 y 1486 [m²/s], según valores experimentales obtenidos para diversos ríos en Estados Unidos (Fisher *et al.*, 1979).

13.2.2.3. Representación Computacional

a) Representación del Prototipo

Qual2E puede simular cualquier sistema hídrico unidimensional de tipo convergente, esto es, cursos de agua donde sólo las variaciones longitudinales son significativas y que convergen en algunos puntos, formando un nuevo curso (situación muy frecuente en la naturaleza), pero nunca un río que se divida y de origen a dos o más nuevos ríos (situación bastante menos frecuente en el medio natural). El primer paso para modelar el prototipo es subdividir el río en **tramos**, los cuales son porciones de río con características geométricas, hidráulicas y de calidad uniformes. Luego, cada tramo se divide en **elementos computacionales** de longitud Δx (igual para todos los tramos). De esta forma, todos los tramos quedan compuestos por un número determinado de elementos computacionales, el cual dependerá de la longitud de cada tramo.

Existen siete diferentes tipos de elementos computacionales:

- **Elemento cabecera:** Estos elementos se encuentran al principio de cada afluente y del sistema principal del río. Ellos siempre son el primer elemento en un tramo cabecera. Se simbolizan por la letra **C**.
- **Elemento justo antes de una intersección:** Es aquel elemento del sistema principal que se encuentra justo aguas arriba de una intersección. Se representan por la letra **A**.
- **Elemento intersección:** Es aquel elemento del sistema principal que tiene un tramo tributario entrando en él. Se representan por la letra **I**.
- **Último elemento del sistema:** Representa el último elemento computacional en el sistema (condición de borde de aguas abajo). Sólo existe un elemento tipo 4 para cualquier sistema modelado, y se simboliza por la letra **U**.
- **Elemento de descarga:** Son elementos que agregan caudal al sistema, tales como descargas residuales y tramos tributarios simulados en forma puntual. Se representan por la letra **E**.
- **Elemento de extracción:** Son aquellos elementos en que se realiza alguna extracción de caudal. Se representan por la letra **X**.
- **Elemento estándar:** Es aquel elemento que no corresponde a ninguno de los seis tipos anteriores. Debido a que el flujo distribuido está permitido en todos los tipos de elementos, la única entrada permitida en un elemento estándar es este tipo de flujo. Se representan por la letra **S**.

Los tramos de río son la base para la mayoría de los datos de entrada. Los datos hidráulicos, las tasas de reacción, las condiciones iniciales y los datos para flujo distribuido son constantes para todos los elementos computacionales dentro de un tramo.

b) Datos ingresados por el usuario

Una vez que el usuario ha definido la geometría del sistema a modelar, es necesario que proporcione los datos conocidos del estado actual del sistema. Estos datos dan cuenta de los caudales pasantes, indicadores de calidad de agua y datos climatológicos. Qual2E incorpora cuatro tipos de funciones de carga forzadas:

- **Entradas de Cabecera:** Representan las condiciones de contorno aguas arriba, en el comienzo del sistema. Son las condiciones requeridas para generar la solución de las ecuaciones de balance de masa para el primer elemento computacional en cada tramo cabecera.
- **Fuentes o Extracciones Puntuales:** Estas cargas se usan para representar las descargas puntuales (por ejemplo, captaciones de canales, alcantarillados y descargas industriales) y pérdidas del sistema. En el modelo QUAL2E, las descargas puntuales pueden representar ya sea descargas crudas o tratadas. Si se usan descargas crudas, se puede simular el efecto del tratamiento aplicando un factor específico de remoción de DBO_C para cada descarga puntual.
- **Flujo Distribuido:** QUAL2E tiene la capacidad de manejar un caudal uniformemente agregado o extraído a lo largo de un tramo, el cual es repartido en partes iguales en todos los elementos computacionales de dicho tramo. Esta característica puede ser usada para simular los efectos de descargas no puntuales al sistema (por ejemplo, los afloramientos de un acuífero al sistema superficial), o los efectos de pérdidas de caudal debidas a infiltración o percolación.
- **Concentración de Borde Aguas Abajo** (opcional): Qual2E puede incorporar en el algoritmo de solución las condiciones de borde aguas abajo conocidas para cualquier indicador de calidad de aguas a simular. Esto es útil en la modelación de sistemas con gran dispersión en los tramos inferiores (por ejemplo: estuarios). Cuando se entregan las concentraciones aguas abajo, la solución generada por Qual2E estará limitada por dichas condiciones. Si estas condiciones no son suministradas por el usuario, las concentraciones de los constituyentes en el elemento que se encuentra más aguas abajo será calculada en la forma usual, usando el supuesto de gradiente igual a cero.

La simulación de temperatura usa un balance de calor sobre la interfaz aire-agua, por lo que requiere valores de la temperatura del aire (en estado húmedo y seco), presión atmosférica, velocidad del viento, y cobertura de nubes.

c) Limitaciones del Modelo

Qual2E ha sido desarrollado para ser un programa general, sin embargo, durante el desarrollo computacional ha sido necesario imponer algunas limitaciones dimensionales al programa. Estas limitaciones son:

Tramos	:	Un máximo de 25
Elementos computacionales	:	No más de 20 por tramo o un total de 250
Elementos cabecera		Un máximo de 7
Elementos de intersección	:	Un máximo de 6
Elementos de ingresos y extracciones	:	Un máximo de 25 en total

Sin embargo, la versión para Windows que en 1995 puso a disposición pública la EPA para este modelo, ampliaron dichos límites a:

Tramos	:	Un máximo de 50
Elementos computacionales	:	No más de 20 por tramo o un total de 500
Elementos cabecera		Un máximo de 10
Elementos de intersección	:	Un máximo de 9
Elementos de ingresos y extracciones	:	Un máximo de 50 en total

d) Técnica numérica de solución

En cada paso de tiempo y para cada constituyente, la ecuación 2.4 se debe escribir i veces, una para cada uno de los i elementos computacionales en el sistema.

Debido a que no es posible obtener una solución analítica para dicha ecuación que sea válida para todos los casos posibles del prototipo, es necesario implementar una solución numérica que nos permita conocer las concentraciones del indicador que deseamos simular. Específicamente, QUAL2E un método de *diferencias finitas implícito*.

La base general del método de diferencias finitas es encontrar la distribución espacial de una variable (por ejemplo: la concentración de una sustancia) en el instante $n+1$ cuando dicha distribución es conocida en el n -ésimo paso de tiempo. El instante cero corresponde a las condiciones iniciales. Este esquema implícito se caracteriza porque todas las derivadas parciales ($\partial/\partial x$) son aproximadas por diferencias centrales en el instante $n+1$.

13.2.3 Descripción general del modelo Qual2kw

El modelo Qual2Kw utilizado, es aquel que se encontraba disponible en el sitio web <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/> en septiembre de 2004. Qual2Kw es un modelo de calidad de aguas para ríos, lanzado en diciembre de 2003 por la EPA, diseñado para representar una versión moderna del modelo Qual2E (Brown y Barnwell 1987). Qual2kw está basado en el modelo Qual2k desarrollado por el Dr. Steven Chapra (Chapra y Pelletier 2003).

Qual2kw es similar a Qual2E en los siguientes aspectos:

- Unidimensional: el curso de agua se encuentra perfectamente bien mezclado vertical y lateralmente.

- Hidráulica del tipo steady-state. Se simula flujo no uniforme en condiciones de equilibrio.
- Balance de calor a través del día: el balance de calor y temperatura es simulado mediante una función de los datos meteorológicos en una escala de tiempo horaria.
- Representación diaria de la cinética de calidad de aguas: Todas las variables de calidad de agua son simuladas en una escala de tiempo diaria.
- Datos de entrada tanto de masa como de calor: se simulan descargas puntuales y difusas y extracciones.

Qual2kw (Q2K) incluye los siguientes nuevas características:

- Ambiente de software e interface. Qual2k está implementado dentro del ambiente Microsoft Windows. Está programado en el lenguaje de macros de Windows: Visual Basic for Applications (VBA). Se ocupa Excel como interfece gráfica de usuario.
- Discretización utilizada. Qual2E divide al sistema modelado en tramos de río compuestos de elementos igualmente espaciados. En contraste, Qual2K utiliza tramos de elementos no uniformemente espaciados. Además, es posible simular múltiples descargas y extracciones abstractas en cada tramo.
- Especialización de la DBO carbonácea. Qual2k utiliza dos formas de DBO carbonácea para representar el carbón orgánico: una forma lentamente oxidada (DBOc lenta) y una forma rápidamente oxidada (DBOc rápida). Además, es posible simular la materia orgánica particulada inerte (detritus). Este material detrítico está compuesto de partículas de carbón, nitrógeno y fósforo con una estequiometría fija.
- Anoxia. Qual2k representa las condiciones de anoxia reduciendo las reacciones de oxidación a cero para bajos niveles de oxígeno. Además, la denitrificación se modela como una reacción de primer orden que llega a ser muy pronunciada para bajos concentraciones de oxígeno.
- Interacciones agua-sedimentos. Los flujos agua-sedimento para el oxígeno disuelto y para los nutrientes se simula internamente en vez de estar predefinido. Esto es, la demanda de oxígeno de los sedimentos (DOS) y los flujos de nutrientes son simulados como una función de la sedimentación del material orgánico particulado, de las reacciones dentro de los sedimentos y de las concentraciones de las formas solubles en la capa de agua superior.
- Algas de fondo. El modelo simula explícitamente las algas del fondo del lecho.
- Extinción de la luz. La extinción se calcula en función de la presencia de algas, detritus y sólidos inorgánicos.
- pH. Se simula tanto la alcalinidad como el carbón inorgánico total. El pH del río es simulado basado en esas dos cantidades.

- **Patógenos.** Se simula un patógeno genérico. La remoción del patógeno se determina en función de la temperatura, luz y sedimentación.

Para utilizar Qual2Kw se requiere ingresar valores en las celdas celestes de las siguientes hojas (las celdas que se dejan en blanco se asumen de un valor igual a cero) :

- **Qual2k:** se utiliza para ingresar información general acerca de una aplicación particular del modelo.
- **Headwater:** se utiliza para el ingresar el flujo y concentraciones en la entrada del sistema.
- **Reach:** se utiliza para ingresar información de ubicación geográfica, flujos y concentraciones en cada uno de los tramos del sistema.
- **Shade:** se utiliza para ingresar información del sombreado efectivo horario sobre cada uno de los tramos del sistema, [%]. El sombreado es definido como aquel porcentaje de la radiación solar que es bloqueado por razones de topografía y vegetación.
- **Met1:** se utiliza para ingresar información horaria de la temperatura del aire en cada uno de los tramos, [°C].
- **Met2:** se utiliza para ingresar información horaria de la temperatura de bulbo seco en cada uno de los tramos, [°C].
- **Met3:** se utiliza para ingresar información horaria de la velocidad del viento 7m sobre el espejo de agua, [m/s].
- **Met4:** se utiliza para ingresar información horaria de la cobertura de nubes (fracción del cielo cubierta por nubes) en cada tramo, [%].
- **Met5:** se utiliza para ingresar información acerca de la representación de la radiación solar en el sistema modelado.
- **Light:** se utiliza para ingresar información de los parámetros que representan la luz y el calor en el sistema.
- **Point Sources:** se utiliza para ingresar información acerca de las descargas y/o extracciones puntuales que actúan sobre el sistema.
- **Diffuse Sources:** se utiliza para ingresar información acerca de las descargas y/o extracciones difusas que actúan sobre el sistema.
- **Rates:** se utiliza para ingresar información acerca de los coeficientes estequiométricos y tasas de decaimiento que son utilizados para representar la cinética de las reacciones que ocurren en el sistema.

Las celdas de color verde claro contienen valores que son calculados por el modelo mientras corre. Las celdas en color amarillo claro son valores (opcionales) de los datos muestreados, para comparación con las predicciones del modelo en los gráficos de salida.

Después que se ingresan los datos requeridos, el usuario debe hacer click en el botón “Run” que es accesible desde cualquiera de las hojas de entrada de datos.

El entorno de modelación Qual2Kw fue desarrollado y es actualmente soportado por el Departamento de Ecología del estado de Washington

13.3 MODELO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, MT3D

13.3.1 Introducción

De la calidad subterránea del acuífero del valle del río Aconcagua, poco se sabe. Existe información de estudios anteriores en donde, por ejemplo, se especifican las descargas al río producto de las aguas servidas, o de los residuos industriales líquidos, y que estos últimos son de menor importancia en términos de caudal y carga contaminante.

Como objetivo, parte de este trabajo, es caracterizar la calidad de las aguas del río, y también dar una primera aproximación al estado de la calidad de las aguas subterráneas del valle del río Aconcagua. Para lograrlo, se utiliza como base el modelo de flujo implementado y actualizado para el Aconcagua, correspondientes a los modelos 2 y 3, secciones legales 2ª y 3ª respectivamente, como modelos independientes pero enlazados por sus conexiones de borde y flujos subterráneos entre si y con el resto del valle.

La caracterización general del modelo de flujo, se encuentra desarrollada en el punto 13.4.2 de este estudio, y para más detalles es importante tener presente toda la base existente en la REF 2 (“Proyecto Aconcagua –Modelo de Simulación Hidrogeológico- Valle del Río Aconcagua” DOH-AC1998).

El modelo de calidad subterráneo desarrollado en este estudio, se encuentra adicionado al modelo de flujo, en ambiente Visual Modflow, versión 3.0. Los antecedentes base recopilados, son básicamente la información de mediciones de calidad que posee la Dirección General de Aguas, y los antecedentes recopilados como parte de este estudio en las campañas de terreno.

13.3.2 Antecedentes Generales

En el sistema del valle del Aconcagua, la principal fuente de recarga del agua subterránea, es la recarga de origen superficial, ésta proviene de la infiltración directa de cauces (en el área de interés alcanza los 364 L/s) , y de las zonas agrícolas ubicadas dentro del área de estudio (en el área de interés alcanza aproximadamente los 1526 L/s). La calidad del agua de los cauces influye directamente sobre la calidad del agua de las recargas, y en mayor medida en la sección 2, ya que se encuentra fuertemente influenciada por los afloramientos en la zona. La sección 3, a pesar de que también presenta una fuerte interconexión, los niveles de la napa se encuentran más

profundas y el río actúa más bien como recarga al acuífero, existiendo una zona no saturada mayor que en la sección 2, producto además de la mayor explotación existente en la zona.

Está claro que la concentración de contaminantes (nutrientes) en el agua utilizada para el riego determina en gran medida la concentración de contaminantes en el agua subterránea. Sin embargo, para efectos de este estudio, esta “influencia” no se puede saber, puesto que no se tienen las concentraciones aportantes por parte de las concentraciones aplicadas de cada parámetro a los cultivos.

Los procesos de contaminación del agua subterránea son muy lentos, debido a que las velocidades de los flujos subterráneos son muy bajas, pero sí se puede indicar que la concentración o el grado de contaminación de los acuíferos (debido a las bajas velocidades), tienen un grado de acumulación, lo que implica mayores dificultades en los temas de remediación. Ahora bien, si el nivel freático está profundo, que es más asimilado en el modelo 3 o sección 3, el trayecto que recorre el agua es bastante largo y el medio permeable actúa como filtro atenuándose el efecto contaminante de la recarga superficial. Se debe tener en cuenta eso sí, que este “filtro” tiene un poder máximo de retención, y sobrepasado este límite, el acuífero entra en estado irreversible de contaminación.

El poder de purificación de la zona no saturada, el tipo de dispersión del contaminante y las reacciones químicas, en el caso de contaminantes no conservativos, influyen en la variación de la concentración del agua subterránea; estos elementos podrían definirse teóricamente a través de concentraciones equivalentes o especificando los parámetros de dispersión, advección y reacción, pero en general dependen, además del tipo de contaminante, de las características del medio (suelo) y de la dinámica de flujo. Debido a lo anterior, es que la forma de mezcla debiera determinarse experimentalmente, es decir, contrastando concentraciones simuladas con datos medidos históricamente, tal como se hace con los niveles freáticos en el ajuste de los parámetros elásticos (transmisibilidad, permeabilidad, almacenamiento) en el modelo de flujo.

De acuerdo a lo anteriormente descrito, cabría esperar un proceso de calibración del modelo de calidad análogo al del modelo de flujo, que permitiese ajustar los parámetros de calidad. A diferencia del modelo de flujo, no se cuenta con monitoreos sistemáticos de calidad del agua subterránea que permitiese tener un marco de contraste histórico para el área estudiada, y con lo que se cuenta es con 3 campañas de monitoreo puntuales en los meses de septiembre, noviembre y diciembre del año 2004, con lo que se intentará dar una primera aproximación de la calidad de las aguas y de los parámetros que la rigen, mas representativos para ese período estival. (sept-dic)

La plataforma que se usará para modelar la calidad de las aguas subterráneas en las secciones 2ª y 3ª del valle del río Aconcagua, corresponde a la componente MT3DMS de Visual Modflow que permite modelar el movimiento de un contaminante a través del acuífero, es decir, reproducir la variación de la concentración de un contaminante espacial y temporalmente. El modelo de transporte de masa funciona teniendo como base la dinámica del escurrimiento determinada por una ejecución previa del modelo de flujo. Las concentraciones de cada contaminante, deben asignarse a cada componente del flujo para definir las entradas y las salidas de masa a través de la simulación. Se debe establecer además, la distribución inicial de concentración de cada

contaminante, la que sirve como punto de partida para el cálculo de las concentraciones en los instantes de tiempo posteriores.

Dentro de los procesos de simulación de esta plataforma, se encuentran los de: advección, dispersión, fuentes, reacción y retardo. Es importante destacar que, este software NO simula las reacciones ni procesos en la parte no saturada, por lo que, toda recarga de concentraciones de contaminantes o condición de borde de concentraciones, entrarán en juego en la modelación de manera directa, por lo que, dependiendo del modelo o sector, debe tenerse en cuenta los efectos de decaimiento de cada parámetro antes de incorporar la tasa o concentración de dichos contaminantes.

Finalmente, se plantea el desarrollo del modelo de calidad, teniendo presente situaciones hipotéticas y supuestos conservadores que permitan establecer un margen superior para la evolución de la concentración de los contaminantes en el período de tiempo definido.

13.3.3 Características del Modelo de Calidad Subterránea

En el modelo físico, se resuelven las ecuaciones que gobiernan el flujo de agua en suelos (Ley de Darcy) para obtener un campo de velocidades y a continuación, con las velocidades como dato, se resuelven las ecuaciones de dispersión, advección y reacción que gobiernan el transporte y difusión de contaminantes en suelos. Se asumen propiedades de uniformidad, aunque en casos como por ejemplo, para la elección de las dispersividades longitudinal y transversal, es posible elegir diferentes valores en cada dirección con lo que se puede tener en cuenta este tipo de anisotropías.

El modelo numérico, resuelve las ecuaciones de flujo mediante la Ley de Darcy y utiliza para ello el método de diferencias finitas. Para la modelación de transporte de contaminantes, se utilizará la plataforma MT3DMS, al cual se le deben definir previamente todos los parámetros involucrados en los términos advectivos de la ecuación de transporte.

Existen una serie de opciones de solucionadores para resolver los términos advectivos de la ecuación de transporte, los cuales se encuentran detalladamente explicados en el Manual del Usuario de Visual Modflow, donde básicamente la diferencia entre ellos es: la cantidad de dispersión numérica de la solución, memoria RAM de los PCs utilizados, balance de masa, y oscilaciones en las concentraciones resultantes. Una serie de ventajas y desventajas que sólo pueden priorizarse al momento de la simulación y que dependerán del problema planteado. Básicamente, el término advectivo se resuelve mediante el método mixto Euleriano-Lagrangiano y los términos de dispersión y reacción mediante el método de diferencias finitas.

La ecuación que rige la simulación de la calidad de las aguas subterráneas, es la siguiente:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij} \cdot \frac{\partial C}{\partial x_j} \right]}_{\text{Dispersión}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} [v_i \cdot C]}_{\text{Advección}} + \underbrace{q_s \cdot \frac{C_s}{\theta}}_{\text{Fuente}} - \underbrace{\lambda \cdot \left[C + \rho_b \cdot \frac{C}{\theta} \right]}_{\text{Reacciones}} = \underbrace{R \cdot \frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{Retardo}}$$

- **El término dispersivo**, ó mejor dicho **Dispersión Hidrodinámica**, no es más que la combinación de los procesos de Difusión Molecular y Dispersión Mecánica.

El proceso de **difusión molecular**, o simplemente conocido como **difusión**, ocurre siempre que existe un gradiente de concentración, incluso si el fluido no está en movimiento, y el soluto en el agua se moverá desde áreas de mayor concentración hacia áreas de menor concentración.

La **Dispersión Mecánica** es el proceso que origina que el agua subterránea se mueva a tasas que son mayores y también menores que la velocidad promedio lineal, y esto se debe básicamente a la tortuosidad del medio.

Así, el proceso de Dispersión, que es el avance de la pluma de solutos disueltos a una región mayor de lo que sería predicho debido a la advección solamente (no degrada masa total de contaminante, $A_1 = A_2$), es causado por dispersión mecánica a escala porosa del flujo de agua subterránea, y difusión molecular debida a gradientes de concentración. Los mecanismos de dispersión se entienden bien, pero sigue siendo un término difícil de medir con exactitud. MT3D requiere dispersividades especificadas por el usuario (α) y velocidades de flujo simuladas (v_i) para calcular los términos de dispersión.

Los parámetros de entrada espacialmente variables son:

- Dispersividad (Longitudinal - α_L) (L)
- Razón α_T/α_L donde α_T es Dispersividad Transversal
- Razón α_v/α_L y donde α_v es Dispersividad Vertical
- Difusión D^* (L^2/T)

Dentro de las variables, las razones de dispersividad longitudinal versus las transversales, vienen recomendadas en el software, como 0.1 y 0.01 respectivamente, y el coeficiente de difusión molecular como 0.1. El valor de 0.1 para el coeficiente de Difusión se considera conservativo del punto de vista de la modelación, puesto que sólo toma relevancia en estratos con alto componente de arcillas, lo cual no es el caso de nuestro estudio. Para α_L , existe un rango amplio de incertidumbre $0.1m < \alpha_L < 100m$, el cual el objetivo es calibrar, debido a la escasez de información.

- **El término advectivo** corresponde al proceso donde el transporte de solutos disueltos son llevados junto con el flujo de agua subterránea, es decir a la misma velocidad, ($t_c = \text{distancia}/v_i$); éste es el mecanismo dominante en la mayoría de los problemas de migración de plumas de contaminación y MT3D calcula v_i usando cargas y permeabilidades del modelo de flujo previo. Para ello, sólo basta con tener medidas las concentraciones de los elementos contaminantes, pues el resto de los parámetros los obtiene del modelo de flujo.

La cantidad de soluto que está siendo transportado es una función de su concentración en el agua subterránea y de la cantidad de agua subterránea que fluye. Para un flujo unidimensional perpendicular a una sección transversal del medio poroso, la cantidad de

agua que fluye es igual a la *velocidad promedio lineal* multiplicada por la *porosidad efectiva*. La **velocidad promedio lineal**, V_x , es la velocidad a la cual el agua subterránea se mueve a través de tubos de flujo individuales.

$$V_x = K/n * (dh/dL)$$

Donde K es la conductividad hidráulica (L/T), n es la porosidad, y dh/dl es el gradiente hidráulico (L/L).

- **Fuentes.** Se refiere a concentraciones de solutos disueltos ingresando o saliendo del dominio del modelo a través de puntos como fuentes puntuales o difusas (áreas de descarga).
- **Reacciones.** Se refiere todos los procesos reactivos que puedan tener lugar en el transporte de contaminantes. Sólo es aplicable para elementos no conservativos y donde el proceso de adsorción tenga relevancia. Para nuestro estudio este proceso es despreciable.
- **Retardo (R).** El factor de retardo, indica el transporte de solutos advectivo demorado debido a la división del soluto entre la fase disuelta móvil y la fase absorbida inmóvil. Éste es causado por la facilidad para unirse a la capa orgánica de las partículas del suelo. MT3DMS ofrece tres ecuaciones conocidas para calcular el coeficiente de retardo del soluto

$$R=1 + (\rho_b * K_d) / \theta$$

Donde: θ es la porosidad efectiva del suelo, ρ_b densidad del suelo, y K_d es el coeficiente de retardo. $K_d = K_{oc} * f_{oc}$, donde: f_{oc} : fracción carbono orgánico; K_{oc} : coeficiente de partición octanol-carbono.

13.3.4 Hipótesis de la modelación de calidad subterránea

Para el cálculo del flujo de aguas subterráneas consideramos válida la Ley de Darcy y que el medio se encuentra totalmente saturado. Se trata de una hipótesis conservativa, ya que supone que la zona de liberación está siempre en contacto con la capa freática, situación poco probable que se alcance incluso en épocas de lluvia.

Se supone la semi-isotropía de los coeficientes que caracterizan cada estrato del suelo y condiciones para el flujo.

En la zona bajo estudio, se analizan 5 contaminantes principales: Cobre, Manganeseo, Nitrato, Cloruros y Sulfatos.

Ante la falta de información y datos periódicos y continuos en el tiempo, se adopta como medida conservativa, la no existencia de adsorción, intercambio iónico ni fenómenos de degradación y que, por lo tanto, el coeficiente de retardo es unitario (trazador ideal). Para el valle del río

Aconcagua se asumirá que el proceso de advección es dominante frente a los otros procesos, por lo que, por ejemplo, el término de difusión podría despreciarse.

13.4 OBJETIVOS

13.4.1 Objetivo General

El Objetivo principal del presente trabajo es lograr una visión integral del análisis ambiental desarrollado durante la ejecución del proyecto, lo que en términos de análisis de la calidad de las aguas, implica caracterizar la calidad de las aguas superficiales del río Aconcagua y también dar una primera aproximación al estado de la calidad de las aguas subterráneas del valle.

Para lograrlo, se utilizó como base los modelos de flujo existentes en la cuenca del río Aconcagua, correspondientes al Estudio PROYECTO ACONCAGUA- MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICO- VALLE DEL RIO ACONCAGUA” ejecutado en el año 1998, por INGENDESA S.A. para la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) con la asesoría de AC Ingenieros Consultores.

13.4.2 Objetivos específicos

- Aplicar un modelo de evaluación de la calidad ambiental de las aguas del río Aconcagua, bajo diferentes condiciones.
- Complementar el análisis ambiental de la cuenca, generada en las fases anteriores del proyecto global.
- Lograr una mejor comprensión de los diversos procesos físicos que influyen en la generación, distribución y dinámica de los contaminantes en la cuenca.
- Elaborar mapas temáticos que muestren los resultados de la modelación superficial.
- Evaluar los niveles de contaminación del agua

13.5 REFERENCIAS TÉCNICAS

Para el presente capítulo, se contó con la información de diversos estudios, los cuales se enumeran a continuación:

- REF 1. KRISTAL Consultores, 1996. "Estudio de Impacto Ambiental de las Descargas de Aguas Servidas Industriales, Residenciales y otras en la Cuenca del río Aconcagua" – Unpublished report, CONAMA, Valparaíso, Chile.
- REF 2. Estudio "PROYECTO ACONCAGUA- MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICO- VALLE DEL RIO ACONCAGUA" ejecutado en el año 1998, por INGENDESA S.A. para la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) con la asesoría de AC Ingenieros Consultores.
- REF 3. Manual Visual Modflow User' Manual, Waterloo Hydrogeologic Inc.
- REF 4. Estudio "Evaluación de los Recursos Subterráneos de la cuenca del río Aconcagua" elaborado por la Dirección General de Aguas en Julio 2001, con Numero de serie S.D.T. N°101.
- REF 5. Estudio "Análisis del Desarrollo de los Recursos Hídricos Cuenca del río Aconcagua" DGA abril 2002, S.I.T. N°79.
- REF 6. "Qual2k: Documentation and Users Manual", Steve Chapra and Greg Pelletier. November 25, 2003
- REF 7. "RIVER WATER QUALITY MODELLING: I. STATE OF THE ART", W. Rauch, M. Henze, L. Koncsos, P. Reichert, P. Shanahan, L. Somlyódy and P. Vanrolleghem. IAWQ Biennial International Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-26 June 1998.
- REF 8. "RIVER WATER QUALITY MODELLING: II. STATE OF THE ART", W. Rauch, M. Henze, L. Koncsos, P. Reichert, P. Shanahan, L. Somlyódy and P. Vanrolleghem. IAWQ Biennial International Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-26 June 1998

13.6 METODOLOGÍA

El proceso de modelación de la calidad de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, implicó las siguientes fases:

- Selección y evaluación de los modelos a ser usados
- Campañas de Terreno
- Calibración
- Análisis e interpretación de los resultados del proceso de calibración

13.6.1 Modelos de flujo utilizados en la cuenca

Para la modelación de calidad de aguas de cualquier río y cualquier acuífero, es necesario contar de antemano con la formulación, calibración y simulación de un modelo de flujo, es decir, de un modelo que determine para el período a simular, los caudales pasantes por el río a modelar y de los flujos subterráneos que tiene lugar en el acuífero en cuestión.

Los modelos de flujo de simulación superficial y subterránea, permiten representar el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico real-histórico y futuro del sistema que se desea conocer, y son por ende, parte fundamental de la tarea previa a un modelo de calidad de aguas.

Para poder operar e implementar un modelo de calidad de aguas, se necesita poder contar previamente con los valores de caudales pasantes por el río que se desea modelar.

Para ello se cuenta como antecedente el estudio desarrollado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) en 1998, con la Asesoría de AC Ingenieros Consultores Ltda. (REF 2), el cual contempló el desarrollo de modelos de simulación de flujos superficiales y subterráneos de todo el sistema Aconcagua.

A continuación, se comienza por detallar y explicar de manera general en que consiste el modelo de simulación superficial desarrollado en el estudio anteriormente mencionado y luego una explicación del modelo de flujo subterráneo.

13.6.1.1 Modelo de Flujo Superficial. (MOS-ACN)

El objetivo original de disponer de un modelo matemático de simulación operacional del sistema MOS-Aconcagua, fue de disponer de una herramienta de análisis y planificación, que permitiera evaluar distintas alternativas y que fuera de apoyo para la toma de decisiones, relacionadas con el óptimo aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Aconcagua.

El modelo pasó a ser, entonces, una herramienta que permite evaluar y caracterizar la situación de regadío, evaluar el efecto de nuevas obras y de distribución de los recursos hídricos de la cuenca, entre las principales aplicaciones. El análisis del sistema, conduce a esquematizarlo como un conjunto de elementos regidos por la ecuación de continuidad y vinculados entre sí, a través de sus entradas y salidas. Estos elementos corresponden a: sectores de riego, acuíferos, embalses superficiales, tramos de río, nodos de distribución, canales de trasvase, etc.

La metodología empleada en la simulación de estos elementos, permite generar el caudal en diversos puntos de interés de ríos y esteros, puntos clave y de vital importancia para la caracterización de la calidad de las aguas superficiales.

La sectorización efectuada en el área de riego, junto con los otros elementos del sistema, como los nodos y tramos de río, se presentan en la figura 66, la cual entrega una visión general y de conjunto del sistema.

Los nodos, son puntos en los cuales es posible conocer el caudal pasante por el río, en lugares donde se ha determinado para el modelo de flujo, que es indispensable realizar un balance de masas, con aportes y extracciones, donde no existe control fluvimétrico o en puntos donde confluyen ríos, o captan canales y en puntos donde se ha definido, a priori, representar estaciones fluvimétricas para la calibración del mismo, pero en resumen, representan una ubicación local donde es posible determinar el caudal del río.

En la figura 67 se presenta el esquema del sistema, mostrando todos los elementos involucrados. Este esquema constituye el fundamento sobre el cual se construye el modelo matemático MOS-ACN, que simula el flujo de agua a través del sistema del río Aconcagua.

Los sectores de riego (figura 68), corresponden a agrupaciones de zonas de riego existentes en la cuenca, realizadas y definidas por el modelador y enfocado a los fines de la modelación, los cuales involucran como criterios, por ejemplo, el tipo de riego, tipo de cultivos, tipo de fuente de abastecimiento del riego (canales o pozos), etc. pero siempre simplificando y haciendo que represente la situación real. Si se desea mayor información acerca de los criterios y sectorización definida en el modelo MOS del Aconcagua, ver REF 2.

Para los sectores de riego, están consideradas las entradas como: canales, lluvia sobre el sector, y el caudal bombeado desde el acuífero inmediatamente por debajo del sector de riego. Las salidas comprenden: la evapotranspiración de los cultivos; la percolación de los canales matrices, del agua de riego y lluvia; los derrames de riego no aprovechados internamente; y los excesos captados por los canales.

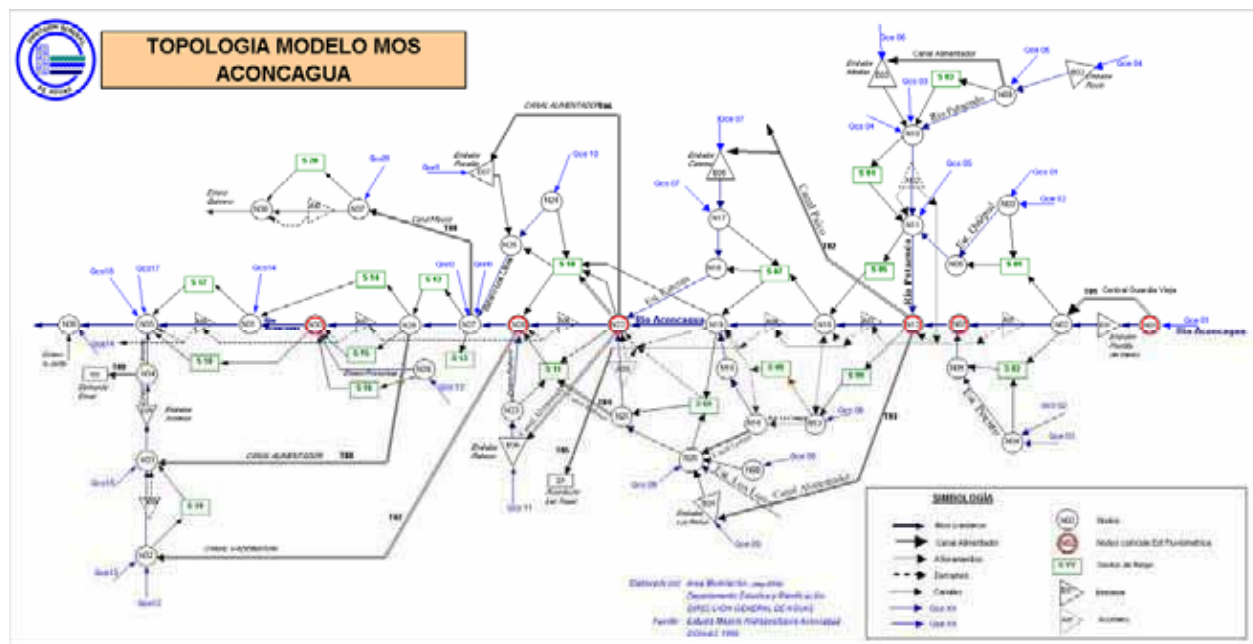


Figura 67: Topología Modelo MOS ACN, DOH 1998. Modificado por DGA 2004.

El aporte de los canales del sector se determina como un porcentaje del caudal afluente al nodo donde se concentran las captaciones del sector y limitado a la capacidad total de los mismos.

El aporte de la lluvia se determina afectando la lluvia mensual de una estación índice asociada al sector por un coeficiente que refleja la lluvia media sobre el sector según el plano de isoyetas medias anuales. Las estaciones índices consideradas en el Estudio DOH-ACN 1998 (REF 2) fueron Putaendo en Resguardo Los Patos, San Felipe y Limache.

Los caudales extraídos del agua subterránea, que son los utilizados tanto en el riego de los sectores, como en el uso Industrial, minero y de agua potable, fueron determinados con la información del Catastro de Aguas Subterráneas realizado en el mismo estudio (REF 2) y fueron ingresados como matrices de datos en el modelo.

El caudal afluente al nodo de un tramo de río, queda definido por el caudal saliente del tramo de río aguas arriba, sumado con el caudal de la cuenca lateral asociada al sector del tramo en análisis. Para los nodos de cabecera del sistema MOS-ACN, el caudal afluente es el de la estadística medida o generada según corresponda, sumada con los aportes de la cuenca lateral del sector si procede. (Figura 68).

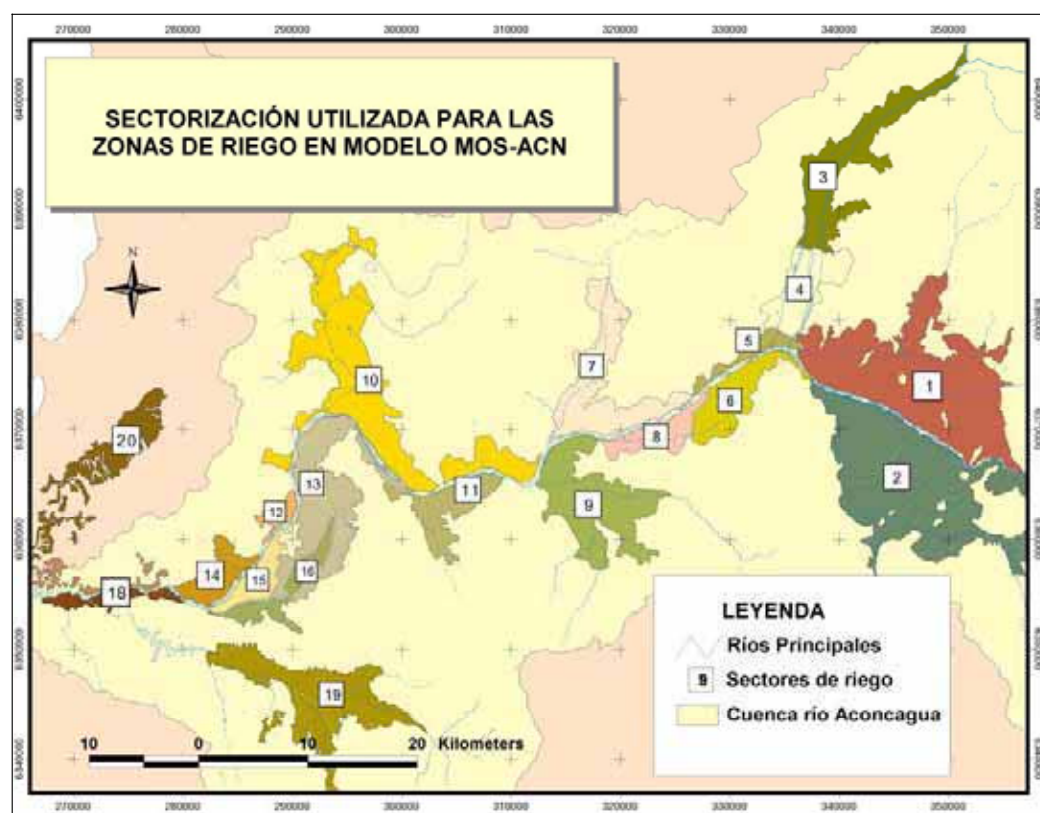


Figura 68: Sectores de riego del Modelo de flujo del río Aconcagua.

Los caudales aportantes de escorrentía para subcuencas no controladas, y de régimen pluvial, fueron estimados mediante el modelo de generación de escorrentía de cuencas pluviales MPL. Este modelo fue desarrollado por el Ingeniero Sr. Pablo Isense en el año 1986 y ampliamente utilizado en estudios desde la IV a la XII regiones del país, pudiendo ser validado en cuencas como Lliu Lliu, Quilimarí, Alhué, entre otras. (Más en REF 2)

Las figuras 68, 69 y 70, pretenden facilitar la comprensión de la topología y sectorizaciones utilizadas para el modelo de flujo superficial.

Los acuíferos o embalses subterráneos, fueron modelados aplicando la ecuación de Darcy y la ecuación de continuidad simultáneamente.

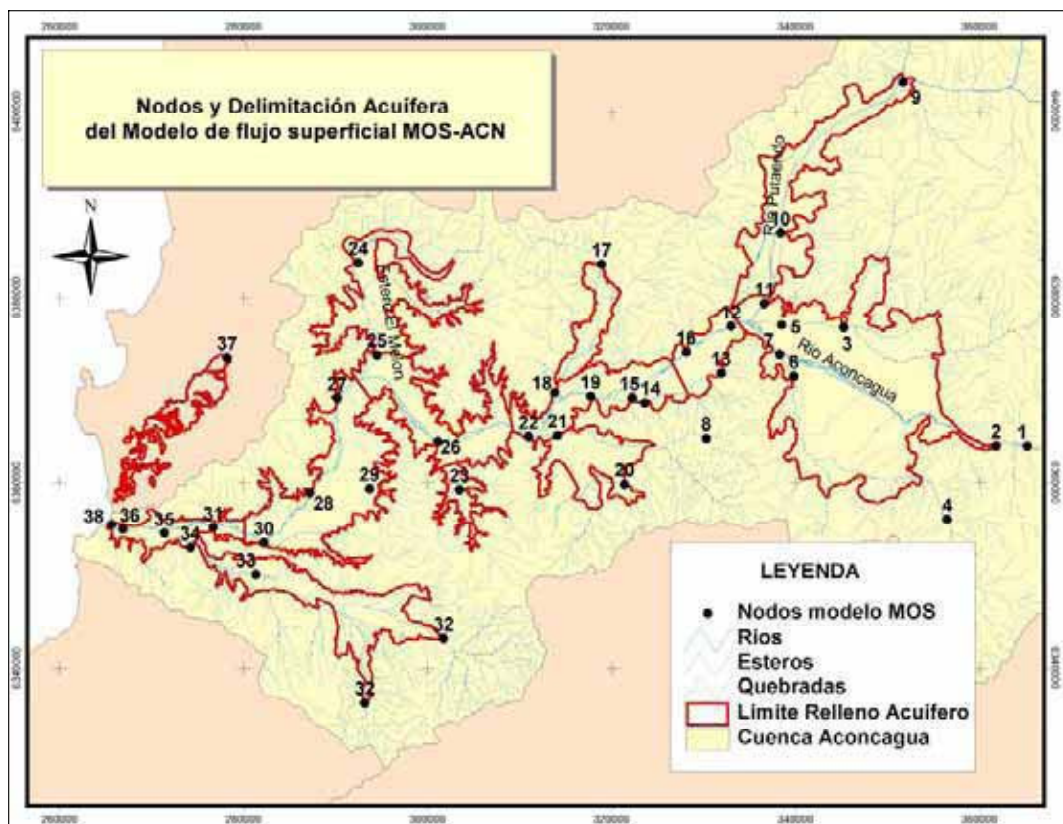


Figura 69: Nodos y Delimitación del relleno acuífero del modelo de flujo del río Aconcagua

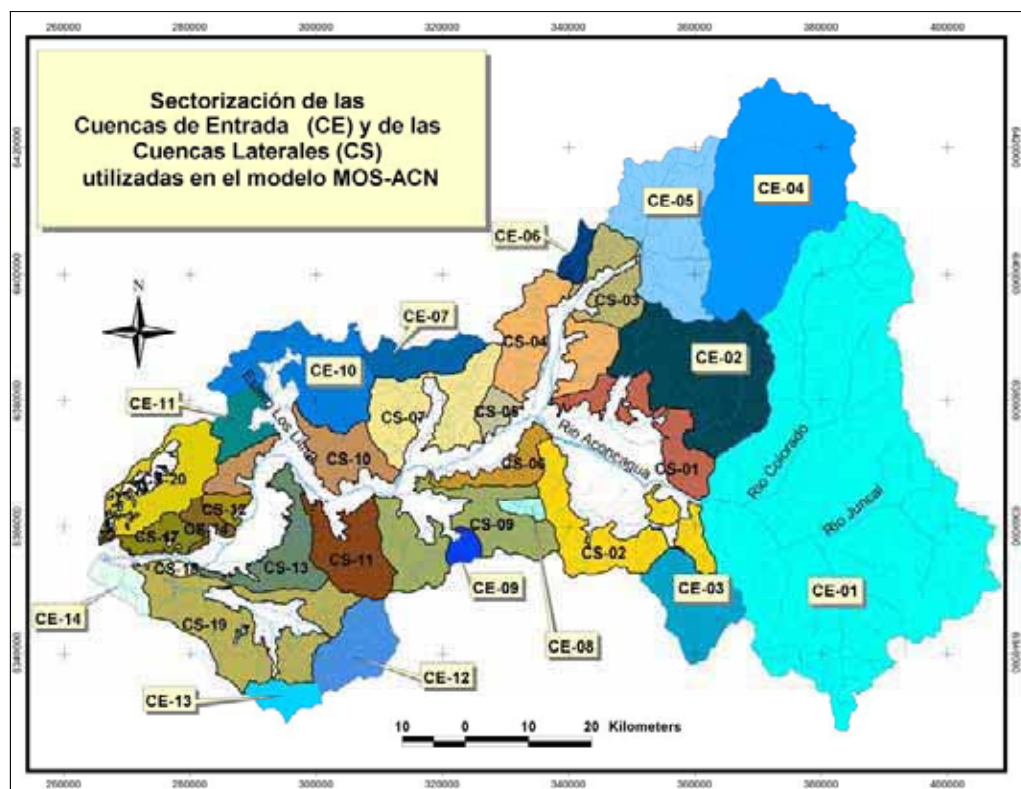


Figura 70: Sectorización Cuencas y Subcuencas del modelo de flujo del Aconcagua

Características del modelo MOS-ACN

El Modelo Operacional del Sistema MOS- Aconcagua, se encuentra desarrollado en ambiente TurboPascal 7.0 y posee 18 archivos de datos de entrada, entre los que se pueden mencionar: coeficientes de caracterización del lecho de río; Información relativa a embalses; Caracterización de los sectores de riego, como son el área regada, capacidad de regulación nocturna, eficiencias prediales, etc.; información de los sectores acuíferos, como la información geométrica y parámetros elásticos representativos del sector; Necesidades netas prediales por períodos; Precipitaciones de estaciones de referencia; caudales de entrada de cuencas aportantes; caudales de bombeo, etc., entre los mas importantes.

El programa consta de un programa principal denominado ACNSYS y de varios procedimientos para el manejo de los datos y la simulación de la operación del sistema.

Las Units utilizadas son: Hydro, Iofile, Matu, OprSys, Rwfiles, Simulate y Vars. Si se desea tener mayor información del funcionamiento de éstas y otras aplicaciones del modelo, se recomienda remitirse al estudio de la REF 2.

El programa MOS-ACN, genera una serie de archivos de resultados del tipo matriciales, de nivel mensual, desde el período comprendido entre abril 1950 hasta abril 1998. En total, cada escenario arroja 453 archivos de resultados. El listado de los archivos de salida del modelo de describe a continuación.

Formato y descripción de los archivos de resultados MOS ACN:

<i>XXX_sub.acu</i>	: Balance en el acuífero
<i>XXX_sup.rie</i>	: Balance sectores de riego
<i>XXX_sup.rio</i>	: Balance tramos de río
<i>XXXseg.rsm</i>	: Seguridades de riego en los sectores (%)
<i>XXXacuZZ.qbo</i>	: Bombeo para todos los usos desde el acuífero (m3/s)
<i>XXXacuZZ.qbr</i>	: Bombeo para riego desde el acuífero (m3/s)
<i>XXXacuZZ.qzb</i>	: Bombeo total desde el acuífero (m3/s)
<i>XXXacuZZ.qze</i>	: Flujo subterráneo entrante al acuífero
<i>XXXacuZZ.qzf</i>	: Estado final del acuífero (m3/s/mes)
<i>XXXacuZZ.qzr</i>	: Recarga total al acuífero (m3/s)
<i>XXXacuZZ.qzs</i>	: Flujo subterráneo saliente desde el acuífero (m3/s)
<i>XXXacuZZ.qzv</i>	: Vertidos o afloramientos del acuífero (m3/s)
<i>XXXchnXX.qmm</i>	: Caudal medio mensual de trasvase (m3/s)
<i>XXXdmn03.nod</i>	: Demanda en los nodos del sistema (m3/s)
<i>XXXdmn03.sec</i>	: Demandas en bocatoma de los sectores de riego (a nivel mensual) (m3/s)
<i>XXXembYY.afl</i>	: Afluente medio mensual al embalse (m3/s)
<i>XXXembYY.alm</i>	: Caudal del alimentador al embalse (m3/s)
<i>XXXembYY.dem</i>	: Demanda media mensual al embalse (m3/s)
<i>XXXembYY.ent</i>	: Entrega media mensual del embalse (m3/s)
<i>XXXembYY.evp</i>	: Evaporación media mensual del embalse (m3/s)
<i>XXXembYY.vrt</i>	: Vertido medio mensual del embalse (m3/s)
<i>XXXembYY.vuf</i>	: Volumen útil final del embalse (Mm3)
<i>XXXnodAA.afl</i>	: caudal medio mensual afluente al nodo (m3/s)
<i>XXXnodAA.per</i>	: Precolación media mensual del nodo (tramo de río) (m3/s)
<i>XXXsecBB.cnl</i>	: Caudal medio mensual del canal del sector (m3/s)
<i>XXXsecBB.def</i>	: Déficit medio mensual en bocatoma del sector (m3/s)
<i>XXXsecBB.dsb</i>	: Demanda suplida a nivel de bocatoma del sector (m3/s)
<i>XXXsecBB.pds</i>	: Porcentaje de satisfacción de la demanda (°/1)
<i>XXXsecBB.per</i>	: Precolación de riego en el sector (m3/s)
<i>XXXsecBB.pyu</i>	: Precolación de lluvia en el sector (m3/s)
<i>XXXsecBB.qbr</i>	: Bombeo para riego en el sector (opción según demandas) (m3/s)
<i>XXXsecBB.qrz</i>	: Recarga media mensual al acuífero del sector (m3/s)
<i>XXXsecBB.ret</i>	: Retorno medio mensual del sector (m3/s)

Dentro de toda la gamma de archivos de resultados generados por el modelo MOS- Aconcagua, el tipo de archivos de resultados que interesa para la modelación de calidad superficial de las aguas del río, son sólo algunos, como por ejemplo los del tipo XXXNODxx.AFL, correspondientes al caudal medio mensual afluente al nodo xx, en m3/s, como el más importante y fundamental.

Calibración del Modelo MOS-ACN

En el año 2001, el modelo operacional del sistema MOS-ACN de la DOH fue analizado, evaluado y recalibrado por la Dirección General de Aguas, para aplicaciones que se ven consumadas mediante los Informes SIT N° 79, SDT N° 132 de la DGA.

En dichas evaluaciones, se agregó además la calibración para la componente subterránea, cuyo objetivo es representar las señales o pulsos de los niveles de los sistemas acuíferos, obtenidos a partir de la información de los volúmenes finales divididos por la geometría especificada para cada sector acuífero, obteniendo así un registro de los niveles representativos para cada sector acuífero dentro del periodo de calibración. Dichos gráficos y calibraciones pueden ser visualizadas en el Informe (SIT N°79), REF 5.

La calibración de los flujos superficiales, fue realizada para tres estaciones con control fluviométrico de la Dirección General de Aguas (DGA) correspondientes a: Aconcagua en San Felipe, Aconcagua en Romeral, y ACN en Tabolango, las cuales se hicieron corresponder con los nodos NO-07, NO-22 y NO-30 respectivamente.

13.6.1.2 Modelo de Flujo Subterráneo –Modflow Aconcagua

De la misma manera que para el modelo de calidad superficial, para el modelo de calidad subterráneo, se cuenta con la modelación de flujo del río Aconcagua, pero para las aguas subterráneas. Este modelo se denomina Modelo Hidrogeológico del valle del río Aconcagua y fue desarrollado para el mismo estudio de la REF 2.

Este modelo se encuentra implementado en un ambiente Visual Modflow versión 3.0 , Software comercial de la empresa Waterloo Hydrogeologic Inc., y éste ha sido ampliamente utilizado Dirección General de Aguas (DGA) para la evaluación del Recurso Hídrico mediante la simulación de escenarios futuros de explotación y cambios en el manejo de los diferentes elementos que tienen lugar en la representación de la cuenca.

La Dirección General de Aguas, es quien actualmente maneja la última versión del modelo Hidrogeológico del Río Aconcagua, y quien ha realizado estudios de investigación enmarcado en la planificación y gestión del recurso hídrico, como puede verse en los antecedentes que se señalan en este informe.

La versión del modelo que en el presente estudio se utiliza, corresponde a la versión que maneja la DGA (año 2004).

Características Generales de los Modelos Hidrogeológicos

El modelo hidrogeológico existente para la cuenca del río Aconcagua y el que se usará como base para la modelación de calidad subterráneas de aguas del valle, corresponde al modelo hidrogeológico desarrollado dentro de la REF 2, el cual fue sectorizado en 5 submodelos, cuyos programas son independientes entre si pero interrelacionados mediante flujos pasantes entre ellos y condiciones de borde previamente estudiadas e incorporadas a los submodelos.

En la figura 72 se adjunta el diagrama conceptual del funcionamiento integrado de estos 5 submodelos y en la figura 71 el mapa de ubicación correspondiente para los mismos.

Los modelos corresponden espacialmente a los siguientes sectores del valle del río Aconcagua:

- **Modelo 1:** Valles de Los Andes-San Felipe y Putaendo.
- **Modelo 2:** Valle del Aconcagua, entre San Felipe y Romeral. También incluye al valle de Catemu. El sector de Llay Llay está modelado como otro submodelo por razones estratigráficas, pero el flujo saliente de Llay Llay es condición de borde de entrada para el Modelo 2.
- **Modelo 3:** Valle del Aconcagua entre Romeral y Tabolango. Además, valle del estero Los Litres y del Estero Rabuco.
- **Modelo 4:** Valle del Aconcagua entre Tabolango y la Costa.
- **Modelo 5:** Valle del Estero Limache.

La síntesis detallada de los diferentes sistemas acuíferos que fueron modelados, se encuentra disponible en el estudio de la REF 2.

Para este estudio, se describen sólo las características principales de los sectores del valle del Aconcagua entre San Felipe y Tabolango, sector que tiene importancia del punto de vista de vulnerabilidad para este estudio y que tendrá lugar el modelo de flujo y de transporte subterráneo, en consecuencia, la modelación de la calidad química del agua.

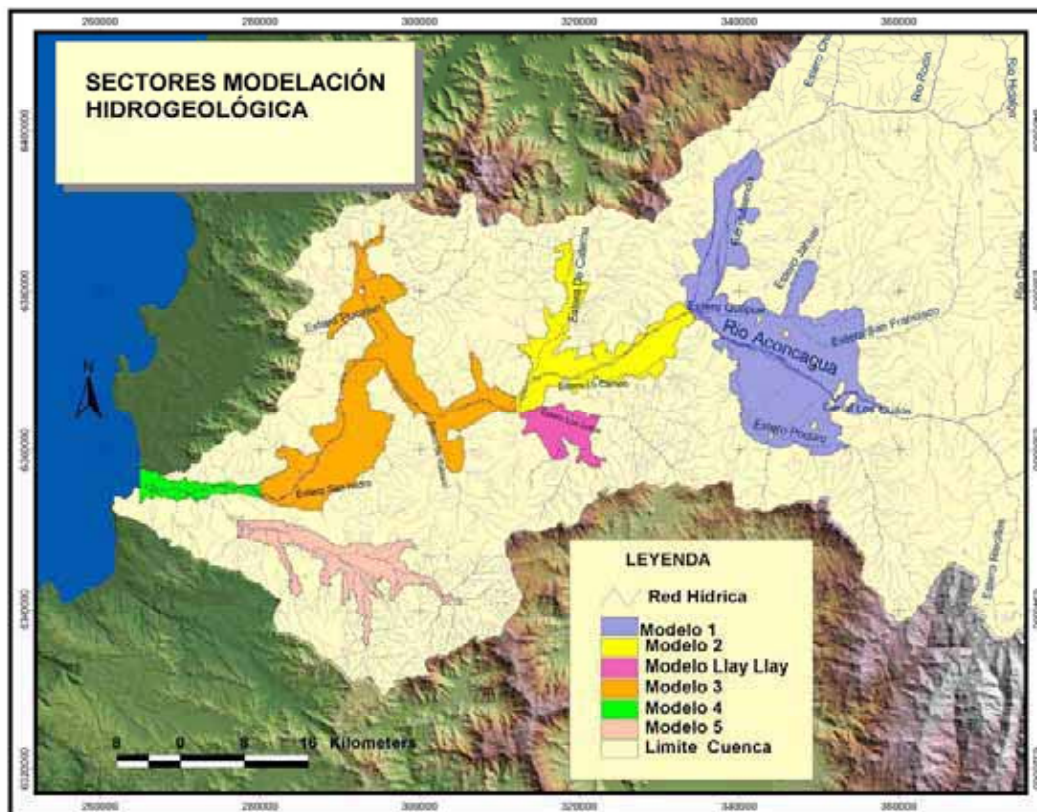


Figura 71: Submodelos Hidrogeológicos, ambiente Vmodflow, para el acuífero del valle del Aconcagua

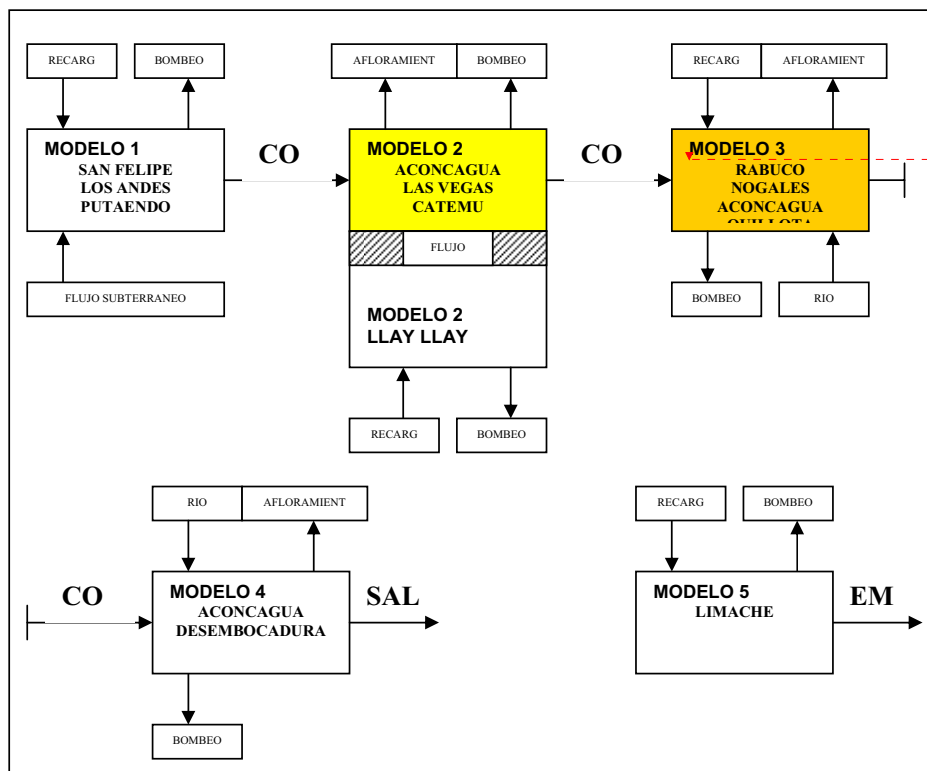


Figura 72: Esquema General de Modelación Hidrogeológica del Aconcagua. Fuente: REF 4.

Para los fines del presente estudio, sólo los modelos o submodelos que interesan y para los cuales se desarrollará su explicación, son los modelos 2 y 3, correspondientes a los sectores de Aconcagua Las Vegas-Catemu y ACN Rabuco-Nogales-Quillota.

Modelo 2: Sector San Felipe – Romeral, Catemu.

Este sector comprende desde la junta del río Aconcagua con el río Putaendo hasta aproximadamente la localidad de Romeral. Por el costado norte, incluye el valle del estero Catemu. En todo este sector el flujo es de características de acuífero libre.

En todo este tramo predomina una unidad hidrogeológica correspondiente a sedimentos de granulometría gruesa a media, de ripios gravillentos, caracterizada además por rellenos de material fino provenientes de las quebradas laterales, lo que se traduce en disminuciones de la permeabilidad hacia los costados del valle. Existe continuidad con el sector de aguas arriba, San Felipe- Los Andes, y con las formaciones asociadas a los valles laterales de Llay Llay y Catemu.

El valle de Llay Llay presenta una mayor complejidad hidrogeológica, en donde se han reconocido una secuencia de 5 unidades (estratos en el modelo) razón principal por la que se

modeló independiente de este sector, pero ligado a él mediante una condición de flujo pasante subterráneo. Este subsector no está contemplado en la modelación del presente estudio.

Una característica muy importante del modelo 2, son las recuperaciones que experimenta el río Aconcagua debido a afloramientos provenientes del acuífero, como por ejemplo, el sector de Panquehue. Tales fenómenos se deben por una parte a que la capacidad de conducción del escurrimiento subterráneo en este tramo se reduce comparado con el sector de aguas arriba, San Felipe-Los Andes, y por otro lado, a que las permeabilidades son también menores en relación con las del sector de San Felipe.

Al final del sector existe una importante singularidad que condiciona el flujo subterráneo, debido al dren transversal al valle denominado Acueducto Dren Las Vegas. Esta fue una de las razones por las que se modeló hasta este sector y representa una condición de borde del modelo 2. La condición de borde se representó como niveles conocidos en los extremos abiertos de los sectores.

El modelo 2, se encuentra configurado como un solo sistema acuífero con dos estratos (1 superior y otro inferior), que junto con el río Aconcagua incorpora a los, que junto con el río Aconcagua incorpora al valle del estero Catemu.

Modelo 3: Sector Romeral-Tabolango, Los litres y Rabuco.

Bajo la superficie de este tramo, se reconoce la existencia de dos secuencias estratigráficas principales: una unidad permeable y bajo ésta una unidad semipermeable que sobreyace al basamento rocoso. Existe continuidad de estas unidades a lo largo de todo el tramo, que se caracteriza por la presencia de tres abanicos aluviales que se disponen en el área de confluencia de los esteros Los Litres y Rabuco.

La sección de relleno sedimentario en este tramo, como consecuencia de interpretaciones geológicas e hidrogeológicas observadas, muestra que la sección acuífera tiende a reducirse hacia aguas abajo, lo que se traduce a su vez en una paulatina reducción de la capacidad de conducción de los acuíferos, tal como ocurre en la sección de San Felipe- Romeral.

El modelo 3, se encuentra configurado como un solo sistema acuífero con dos estratos (1 superior y otro inferior), que junto con el río Aconcagua incorpora a los valles de Los Litres y Rabuco.

Una descripción geológica e hidrogeológica más detallada, se desarrolla más adelante, en el capítulo de Caracterización Hidrogeológica de este mismo estudio.

13.6.2 Caracterización hidrogeológica

13.6.2.1 Descripción General

Hacia las cabeceras del valle del Río Aconcagua se acumulan potentes volúmenes de sedimentos de variada granulometría. Los depósitos de tipo morrénico se distribuyen por sobre la cota 2500 msnm hacia aguas arriba. Depósitos de corrientes de barro originados durante el período de

glaciación se exponen hasta la localidad de Santa María. Estos depósitos son los que rellenan gran parte de las quebradas tributarias y los tramos superiores de los valles principales.

Los sedimentos de rellenos más recientes, son producto de la erosión ejercida por los cursos fluviales del área que conjuntamente con los procesos gravitacionales, han retrabajado los accidentes topográficos existentes. Se reconocen estructuras depositacionales como conos de deyección, terrazas, fluviales, llanuras aluviales, depósitos de pie de monte y taludes de detritos. El origen de los fragmentos clásticos pertenecientes a estos depósitos cuaternarios proviene de la erosión de rocas volcánicas e intrusivas, con un aporte menor de rocas sedimentarias.

Los sedimentos en el área conforman una capa que cubre una extensa superficie de aproximadamente 1155 km². Los depósitos exhiben menor amplitud superficial en la desembocadura de los valles de Llay Llay, Rabuco y hacia aguas abajo de la localidad de San Pedro donde el valle se estrecha notoriamente.

13.6.2.2 Geología

El Área de Estudio se caracteriza por presentar una gruesa cobertura de rocas volcánicas, interestratificadas con sedimentos marinos y continentales, cuyas edades fluctúan entre el Paleozoico superior y el Mioceno superior (290 a 4 Ma). Existen también variados cuerpos intrusivos datados entre el Jurásico superior y el Plioceno (155 a 5Ma) y una importante extensión cubierta por depósitos sedimentarios no consolidados, de edad cuaternaria (<1.8 Ma), asociados a los procesos de erosión, transporte y sedimentación aluvial y fluvial (denominados en adelante por *Qac*)

Basados en el mapa geológico de las Hojas de Quillota y Portillo (escala 1:250.000), Rivano et al 1993, del Servicio Nacional de Geología y Minería – Sernageomin-, a continuación se realiza una breve y simplificada descripción de las unidades, formaciones y rocas que componen la cuenca del río Aconcagua y en particular de los sectores bajo estudio, sectores modelo 2 y modelo 3, ver figura 72.

En el sector oriente de la cuenca, (figura 73), se destaca la Formación Farellones (**Tfb**), que corresponde a una secuencia de rocas volcanoclásticas continentales constituidas por brechas, tobas, lavas basálticas y andesíticas, conglomerados, tufitas y lutitas. De acuerdo a dataciones radiométricas (Vergara y Drake) la Fm. Farellones tendría una edad Miocena-Pliocena (23 a 2Ma), del período Terciario, de la era del Cenozoico.

Hacia el oeste y avanzando por la cuenca, aflora la Fm. Pelambres (**Klp**), de edad más antigua que la Fm. Farellones, del Cretácico Inferior, correspondiente a una secuencia de rocas volcánicas-marinas continentales constituidas por lavas andesíticas, tobas, volcarenitas, conglomerados e intercalaciones de calcarenitas fosilíferas.

En toda la zona de la cuenca del río Aconcagua, los depósitos más jóvenes corresponden a los sedimentos Aluviales y Coluviales (**Qac**), los que conforman el potencial acuífero principal. Éstos fueron originados principalmente por conos de deyección torrencial y escombros de falda, como también por depósitos de colapso gravitacional. En la Costa, se encuentran depósitos

eólicos y litorales (Qe), formados por depósitos de playa y Dunas, que pertenecen también al período Cuaternario.

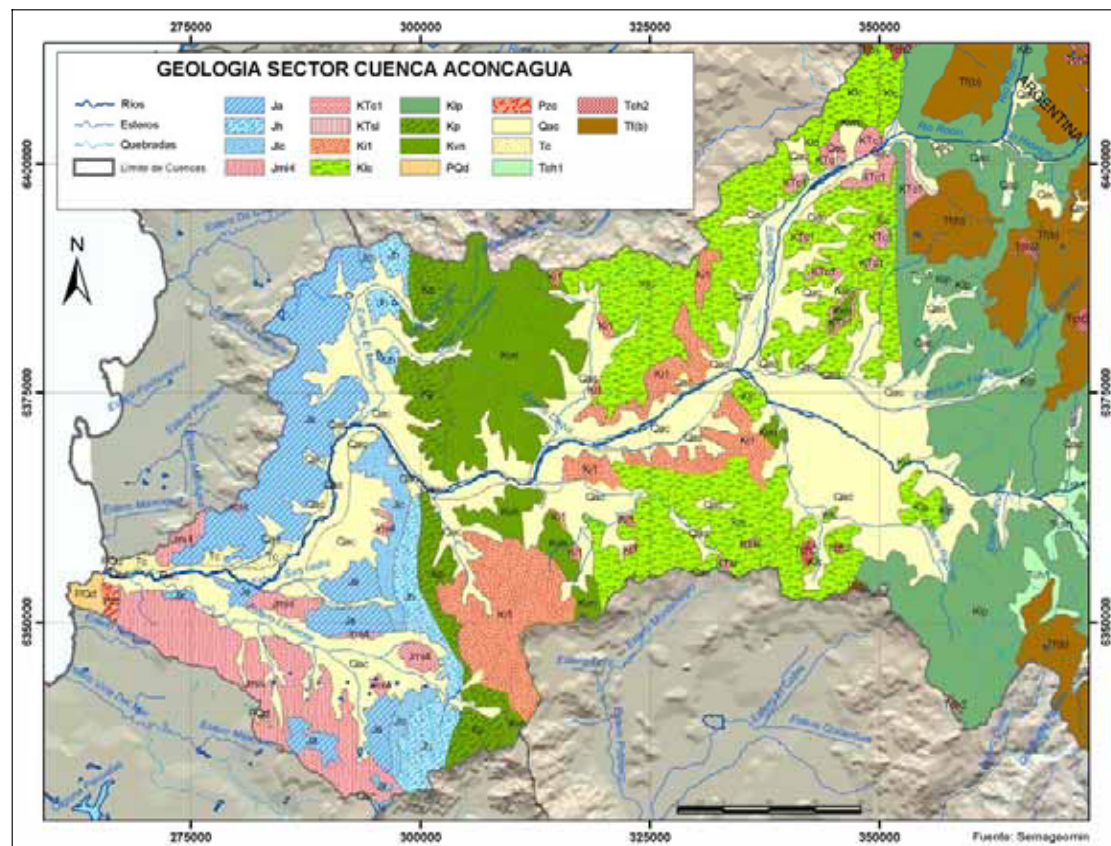


Figura 73: Geología General Cuenca del Aconcagua

En el Valle central afloran depósitos del período Cretácico, correspondientes a las Formaciones de Lo Prado (**Kp**), Fm. Veta Negra (**Kvn**) y Fm Las Chilcas (**Klc**). La Fm. Lo Prado-Kp- está compuesta por sedimentos marino-volcánicos correspondientes a andesitas y tobas con intercalaciones de areniscas, areniscas calcáreas y conglomerados marinos. Sobre la Fm. Lo Prado, se dispone la Fm. Veta Negra-Kvn, gruesa secuencia continental, en su parte inferior, con intercalaciones de areniscas y areniscas conglomerádicas. La Fm. Las Chilcas-Klc, sobreyace, concordantemente, a la Fm. Veta Negra e infrayace a la Formación Lo Ovalle. Corresponde a una secuencia volcanosedimentaria constituida por brechas, tobas rojizas, areniscas tobáceas negras, lutitas, y conglomerados.

En el mismo sector, aflora la Unidad Chalinga (**Kiag**), que compone la superunidad Illapel, y que subyace a la Unidad La Campana (Kilc). La Unidad Chalinga, corresponde a granodiorita y dioritas cuarcíferas, datada dentro del período del Cretácico Inferior.

Por último, en la zona baja de la cuenca, se encuentran las formaciones de la edad del Jurásico: Ajial, Cerro Calera y Horqueta. La Fm. Ajial-(**Ja**), corresponde a una secuencia volcánica, redefinida por Piracés (1976) constituidas por lavas queratófiras con intercalaciones de tobas, brechas y rocas sedimentarias. Subyace a la Fm Calera (**Jlc**), la cual corresponde a una secuencia sedimentaria marina constituida por areniscas tobáceas, calcarenitas, calizas, lutitas y conglomerados.

En base a la fauna existente, se le atribuye una edad de 172 a 165 Ma. La Fm. Horqueta (**Jh**), corresponde a una unidad volcanoclástica continental que se apoya concordantemente sobre la Fm. La Calera, y subyace a la Fm. Lo Prado.

La Fm. Horqueta (**Jh**) se encuentra compuesta por lavas queratófíricas, alternada con tobas, areniscas, brechas y conglomerados de colores rojizos.

En la Costa, también afloran las unidades Puerto Oscuro (**Jmi4**) y la Unidad Cochoa (**Pzc**), ambas muy antiguas, el Jurásico y de la era del paleozoico respectivamente. La Unidad Puerto Oscuro, corresponde a dioritas cuarcíferas de piroxeno y/o anfíbola; monzodioritas y garbos. La Unidad Cochoa, la más antigua, aflora en la Costa y corresponde a granitoides paleozoicos, de grano fino a medio, bandeados.

Es importante señalar, que del punto de vista hidrogeológico, los depósitos que adquieren relevancia son aquellos que no están aún completamente consolidados, y éstos corresponden, según la descripción geológica, a los rellenos aluviales y coluviales (**Qac**) y a la Fm. Confluencia (**Tc**), la cual corresponde a conglomerados, areniscas y brechas poco consolidadas. Éstos se presentan en tonos amarillos en la figura 72.

Del punto de vista geomorfológico, en el caso del valle del río Aconcagua, la acción erosiva se vio favorecida por la existencia de importantes estructuras tectónicas regionales (fallas). Dentro de la zona de estudio, un sector relevante corresponde al área donde se emplaza la ciudad de la Calera.

En esta zona el río Aconcagua experimenta una fuerte curva cuyo origen primario estaría controlado por sistemas de fallas de orientación NNO. Estas estructuras tectónicas, facilitaron a su vez la excavación del valle del estero Los Litres, que tributa al valle de Aconcagua desde su vertiente septentrional.

Las principales macroestructuras geomorfológicas tributarias al valle del río Aconcagua (Estero Llay Llay, Estero Los Litres, Catemu, etc.) corresponden a estructuras de origen fluvial, que vieron facilitada su excavación producto de la existencia de fallas y sistemas de diaclasas de gran corrida que afectaron a las rocas que actualmente hacen caja a los depósitos sedimentarios que las colmatan. La acción erosiva y depositacional de los cursos de escurrimiento superficial señalados, generó la formación de importantes estructuras geomórficas en los rellenos no

consolidados que se emplazan en los distintos valles y que corresponden a abanicos aluviales dispuestos en las zonas de confluencia. La acción del retrabajamiento de las vías de escurrimiento superficial, de sus propios depósitos, ha estructurado numerosas terrazas aluviales y fluviales dispuestas a distintas cotas y que representan épocas pretéritas en que los ríos y esteros exhibían caudales medios muy superior a los actuales.

13.6.2.3 Unidades Hidrogeológicas

En el valle del río Aconcagua, se han reconocido cuatro unidades que han sido asignadas por las letras A, B, C y D [Ref 2][Ref 3].

Unidad A

Corresponde a un conjunto de sedimentos de granulometría heterogénea con abundante matriz de arenas finas, limos y arcillas. La fracción clástica está constituida por fragmentos volcánicos que fluctúan entre el rango arenas medias a gravas finas y representan a lo sumo el 35% del volumen total del sedimento. La participación de arcillas imprime a los depósitos un carácter de regular permeabilidad. Es común encontrar también fracciones subordinadas de ripios y bolones, que no representan más allá de un 10% del volumen total de sedimento.

Estos rellenos deben su origen, primordialmente, a la acción depositacional del estero Pocuro, a probables efectos de borde del Río Aconcagua durante crecidas y posibles flujos rápidos que irrumpieron en el valle desde el Sur y Surponiente.

Estos sedimentos se emplazan hacia el Sur y Poniente de la ciudad de Los Andes, adosándose a la vertiente del valle y desplegándose casi hasta el río Aconcagua. El estero Pocuro escurre prácticamente bordeando el área cubierta por estos rellenos, por su flanco Sur y Surponiente.

Hacia el Sur de la ciudad de San Felipe los sedimentos de la Unidad A se acuñan contra la vertiente Oeste del valle. Estos sedimentos engranan, hacia el Norte con los sedimentos gruesos de la Unidad B, sobreyaciéndolos en parte.

La potencia de la Unidad A es muy variable y no es posible caracterizar sus variaciones en forma detallada con los antecedentes disponibles. El máximo espesor detectado alcanza, aproximadamente, los 30 m y en las zonas de engrane no supera los 5 m.

Con los antecedentes disponibles no resulta posible conocer cual es la relación entre esta unidad y el conjunto definido como D, de hecho, parece que es posible que los detritos de la Unidad A sobreyacen a los materiales más antiguos de la Unidad D, en el sector comprendido entre Los Andes y Curimón, hacia el centro del valle. Aguas abajo de esta última localidad son, sin duda, los sedimentos de la Unidad D los que se ubican en profundidad, continuándose ininterrumpidamente en dicha dirección.

Unidad B

Sedimentos de granulometría gruesa a media, de ripios gravillentos. Suelen presentar una matriz arenosa, que en algunos sectores exhibe contaminaciones escasas de limos arcillosos.

La fracción clástica está constituida por fragmentos de rocas volcánicas y en menor grado plutónicas y sedimentarias. El redondeamiento y esfericidad de los clastos, es variable y hacia el sector de las cabeceras suele ser relativamente bajo, para ir aumentando gradualmente, en sentido del escurrimiento.

La gruesa granulometría de los sedimentos condiciona una buena permeabilidad en los mismos. Sin embargo, existen áreas donde las contaminaciones de limos-arcillosos, aportadas por estructuras secundarias, empobrecen las buenas características hidrogeológicas de estos rellenos. Estas últimas dependen del volumen y granulometría de los sedimentos, que juegan un rol de matriz, que en algunos casos son abundantes y del rango limos finos arcillosos.

Los sedimentos de esta Unidad constituyen, el conjunto depositacional de mayor importancia hidrogeológica en el valle, tanto por sus características de buen acuífero como por su extensión [3]. Se despliegan en superficies abarcando el valle en todo su ancho, sin interrupción desde San Felipe a desembocadura, salvo áreas donde exhiben contaminaciones limo-arcillosas laterales.

En el sector comprendido entre Los Andes y San Felipe, se detectan engranes importantes entre esta unidad y las otras. Hacia el Sur, se interdigita y subyace a los rellenos de A, hacia el noroeste engrana con los depósitos de la Unidad C y sobre yace a lo largo de todo el valle a los finos depósitos de la Unidad D.

A lo largo de todo el valle se observa una contaminación de materiales finos hacia los flancos de la unidad. Este hecho se debe a los aportes de cursos torrenciales, que en el área de desembocadura al valle pierden energía y depositan las fracciones finas en suspensión. Las inundaciones laterales del río también suelen ser fuentes de sedimento fino, que alteran los depósitos de mayor granulometría.

Unidad C

Sedimentos de granulometría muy heterogénea donde priman las gravas medias que alcanzan hasta el rango de arenas finas. La matriz debe ser limosa con una participación moderada de arcillas. La presencia de esta matriz, que generalmente representa un volumen importante de sedimento, imprime al mismo un carácter de baja permeabilidad.

También se reconoce ripios, bolones y bloques aislados en porcentaje no superior al 15%.

Estos depósitos corresponden a corrientes de barro, que tienen un origen esencialmente gravitacional. La fracción clástica de estos materiales es de origen volcanoplutónica y no exhiben redondeamiento ni esfericidad alguna.

Estos sedimentos afloran sólo en el extremo Nororiente del valle. Los rellenos se despliegan hacia el valle a modo de abanico producto de su modo de ocurrencia.

Esta unidad se definió en base al análisis geomorfológico realizado en el estudio de la Ref 2, donde se puede esperar potencias que fluctúen entre 25 y 40 m en el área de engrane con los rellenos de la Unidad B. Hacia el Noroeste de este sector es posible que los espesores aumenten para luego acunarse contra la vertiente del valle.

El engrane de los depósitos de la Unidad C con los de la Unidad B, afecta sólo a rellenos que se ubican hacia el techo de esta última. Es posible además, que en los sedimentos gravitacionales de C estén representados varios eventos.

Unidad D

Corresponde a un conjunto de sedimentos de fina granulometría del tipo arenas limosas con una abundante matriz de arcilla que representa más o menos un 50% del volumen total de los depósitos. Sedimentológicamente, este conjunto de depósitos son correlacionables con la Unidad A, sin embargo, genéticamente, no dicen relación los unos con los otros.

Es posible que, en parte, estos rellenos sean el resultado de flujos laháricos y por parte se deba al retrabajo de depósitos glaciares acumulados hacia las cabeceras del valle.

También se puede asociar al derretimiento de los hielos, un lavado de las fracciones finas existentes en los abundantes depósitos morrénicos, retransportándolos y depositándolos aguas abajo.

Estos depósitos se reconocen a lo largo de todo el valle y corresponde a los sedimentos más antiguos que se emplazan en la estructura geomorfológica del río Aconcagua. Los sedimentos de esta unidad subyacen a lo largo del valle a los depósitos de B y posiblemente alcancen en muchos puntos la roca fundamental.

Según la información geofísica, existiría una fuerte depresión entre Los Andes y San Felipe, que presentaría profundidades de hasta 400 m. En el sector de Curimón, el estudio acusó un umbral rocoso que cruza el valle, aflorando en los cerros Almendral, por el Norte y Curimón por el Sur.

Esta fosa se presenta en la actualidad rellena, principalmente por rellenos de la Unidad D, que posiblemente hayan sido depositadas en un ambiente lagunar antiguo, a lo menos aquellos que se ubican hacia su base. Este período de sedimentación debe haber ocurrido inmediatamente después de finalizada la última glaciación.

En consecuencia es posible esperar, en el tramo entre Los Andes y Curimón, potencias medias de más o menos 250 m. para los depósitos de la Unidad D. Es importante señalar que el umbral rocoso indicado, no interrumpe la continuidad de los rellenos en cuestión y es un hecho que los sedimentos que se ubican hacia el techo de la unidad salvan la barrera, proyectándose aguas abajo [Ref 2].

13.6.2.4 Caracterización del Acuífero Según Sectores

Para la realización del presente estudio, se ha trabajado sobre la base de la Modelación de Flujo (cantidad), los cuales corresponden a los Modelos 2 y 3 de la Ref 2: En la Figura 73 se muestra la sectorización efectuada para el acuífero de la cuenca del río Aconcagua.

El sector que se modeló, abarca el Modelo 2, comprendido entre Aconcagua-San Felipe y Las Vegas; y el Modelo 3, que comprende entre Aconcagua-Las Vegas y el Sector de Tabolango.

Basados en el estudio de la REF2, a continuación se presenta una descripción hidrogeológica de las formaciones acuíferas de los diferentes sectores, apoyados por la información estratigráfica del mismo estudio, cuyos perfiles se muestran en la figura 74.

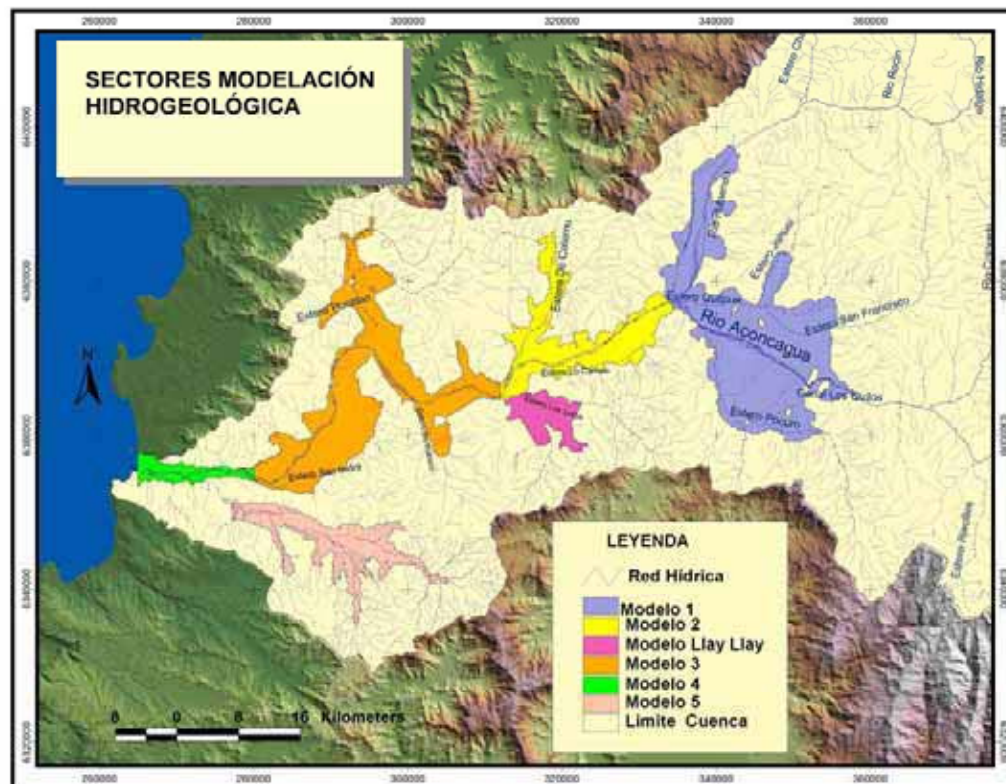


Figura 74: Submodelos Hidrogeológicos implementados y existentes en la cuenca del Aconcagua. Inf. Base: DGA 2004.

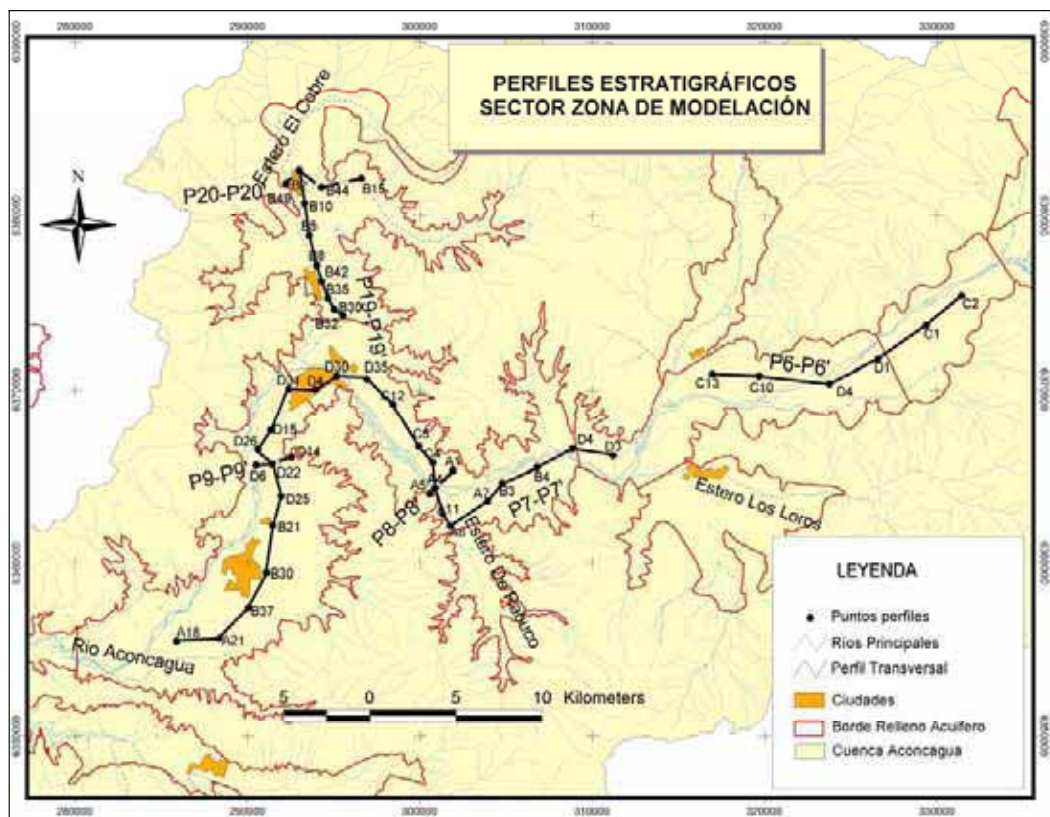


Figura 75: Ubicación de Perfiles Estratigráficos Valle del río Aconcagua. Fuente: Informe DOH-AC 1998

Sector Aconcagua-San Felipe-Aconcagua Las Vegas

De acuerdo a la descripción de las unidades hidrogeológicas, para este sector se puede decir que, la Unidad D se ubica subyaciendo a la Unidad B (en el sector cubierto por información geofísica), el valle tiene un ancho medio cercano a los 4.000 m. y la profundidad del basamento rocoso posiblemente alcance más de 150 m. Se reconoce la Unidad B con un espesor mínimo de 50 m y un nivel estático ubicado a 3,8 m de profundidad. Los sedimentos que forman el acuífero presentan una granulometría gruesa donde priman las gravas y las arenas con muy escasos finos. Hacia aguas abajo, es probable que el espesor del acuífero se mantenga o aumente, pero en ningún caso disminuya.

Desde la localidad de San Pablo hasta La Pirca (ambas en las cercanías de Panquehue), el nivel estático va gradualmente disminuyendo su profundidad. La granulometría del acuífero, por su parte, se mantiene bastante estable, presentando básicamente arenas y gravas con escasos finos. Desde el sector de La Pirca, hacia aguas abajo, hasta la localidad de El Socorro, se observa un aumento significativo en el espesor del acuífero. Éste alcanzaría cerca de 80 m y gradualmente disminuye para alcanzar unos 35 m.

El nivel estático se muestra a una profundidad muy estable que fluctúa entre 1,5 y 3,9 m y la granulometría de la unidad B continúa exhibiendo gravas y arenas, con ripios subordinados, y muy escasos finos.

Al Nororiente de la localidad de Chagres el acuífero se presenta con un espesor medio de aproximadamente 50 m y el nivel estático se emplaza a 1,3 m de profundidad desde la superficie del terreno.

El acuífero presenta una granulometría básicamente arenosa, con fracciones subordinadas de gravas y ripios, y una matriz con escasos finos.

Los sedimentos de la Unidad B, experimentan leves contaminaciones de finos en su fracción matricial hacia los flancos del valle; esto se produce debido a los aportes de las vertientes, que se presentan cubiertas por coluvios.

Estos materiales, a su vez, forman depósitos tipo escombreras de una granulometría bastante heterogénea, de manera que en las áreas de engrane con los sedimentos fluviales (Unidad B), aportan finos que disminuyen la permeabilidad del acuífero.

En la Figura 75 se muestra un perfil longitudinal del sector, cuyos perfiles estratigráficos (Figura 5.3) se encuentran indicados en mayor detalle en los planos B 3-2 y B3-3 adjuntos al Informe Aconcagua de 1998, Ref 2.

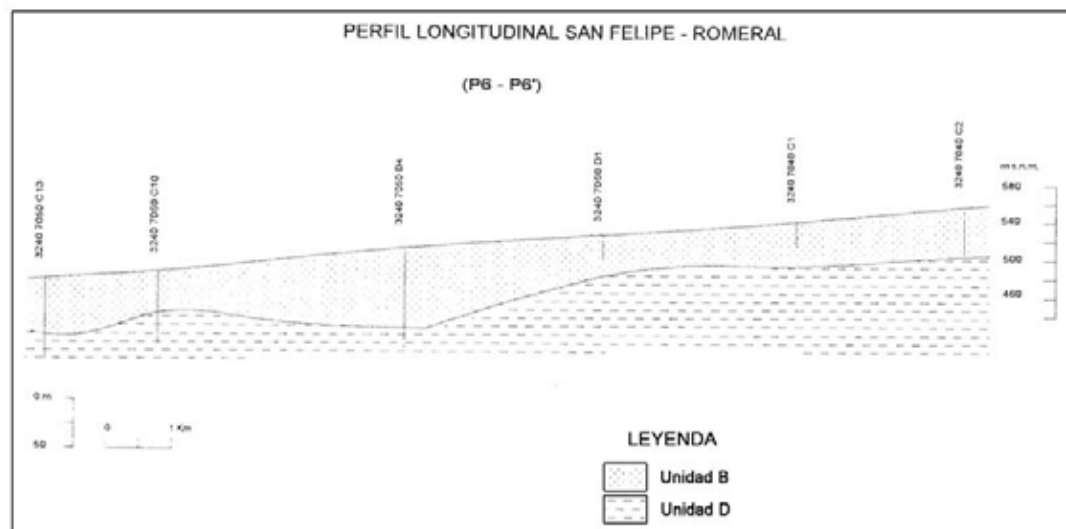


Figura 76: Perfil Estratigráfico en el sector de Aconcagua – Las Vegas

Sector Catemu

En el valle del estero de Catemu se emplazan depósitos cuaternarios que cubren una superficie de 40 km² aproximadamente.

La estratigrafía del relleno está formada por una alternancia rítmica de sedimentos finos a medios del rango arenas con matriz abundante de limo arcilla y depósitos gruesos del tipo gravas ripiosas con fracción arenosa subordinada.

Los depósitos gruesos son, obviamente el resultado de la acción depositacional del estero Catemu y los sedimentos finos son el aporte de los cursos ocasionales de escurrimiento superficial en las áreas de tributación. De este modo, es posible que hacia el centro del valle, los sedimentos gruesos cobren mayor relevancia que hacia los flancos, e inversamente, los rellenos finos tengan representatividad en las áreas adosadas a las vertientes, de preferencia en las zonas donde confluyen las quebradas tributarias del valle del estero Catemu.

En sentido transversal es difícil definir la continuidad de los depósitos debido a la carencia de antecedentes, sin embargo, dadas las características geomorfológicas de la estructura es posible esperar que hacia el centro, los rellenos finos prácticamente desaparezcan y exista una prevalescencia de los rellenos gravillentos del estero Catemu

Granulométricamente, es posible asimilar los detritos gruesos del valle Catemu a la unidad B definida en el valle Aconcagua, aún cuando en su génesis no tengan relación.

Sector de Rabuco

La superficie cubierta por los detritos emplazados en este valle asciende a unos 22 km² aproximadamente.

Los sondeos del sector se ubican en el área de tributación de la estructura al valle del río Aconcagua, de allí que no sean del todo representativos de las condiciones imperantes en el valle del estero Rabuco.

Las perforaciones acusan la presencia de detritos de granulometría fina, del rango limos, que eventualmente exhiben una fracción arenosa subordinada y fuerte contaminación de arcilla. Interestratificados con estos depósitos, se han detectado dos niveles de granulometría heterogénea, que tienen una fracción clástica del rango gravas ripiosas con matriz arenosa abundante, que presentan una contaminación importante de limos arcillosos. Estos niveles se ubican a unos 18 y 50 m de profundidad y presentan potencias de 17 y 12 m respectivamente.

Sector Nogales

En la parte Sur de este sector se ubican los depósitos del valle del estero Los Litres (Figuras 77 y 78). A esta estructura tributan varios valles pequeños, entre los cuales cabe destacar el valle del estero Pucalán, que desemboca por el Oeste y el valle del estero El Carretón, que lo hace por el Este.

Los detritos emplazados en el valle de Los Litres, constituyen un potente estrato de sedimentos esencialmente arcillo-limosos, que presentan una fracción muy subordinada de arenas que, eventualmente, pueden alcanzar el rango de gravas finas.

En este conjunto de materiales finos se reconocen a lo menos tres niveles de gravas ripiosas con abundante matriz arenosa los estratos de matriz arenosa presentan bastante buena continuidad en sentido longitudinal al valle, exhibiendo un notorio aumento del espesor en el sector terminal del valle. En este último tramo, a lo menos en profundidad, dichos niveles parecen fundirse para constituir un solo estrato.

La potencia de estos rellenos, en promedio, debe superar los 80 m estimándose que el espesor de los rellenos aumenta significativamente hacia aguas abajo y, en general, hacia el centro del valle.

Los depósitos cuya fracción clástica mayor está formada por gravas y ripios presentan porcentajes de finos limo-arcillosos en la matriz que, en promedio, alcanzan un 40% aproximadamente. Por su parte, los sedimentos finos pueden presentar hasta un 70% de arcillas y limos.

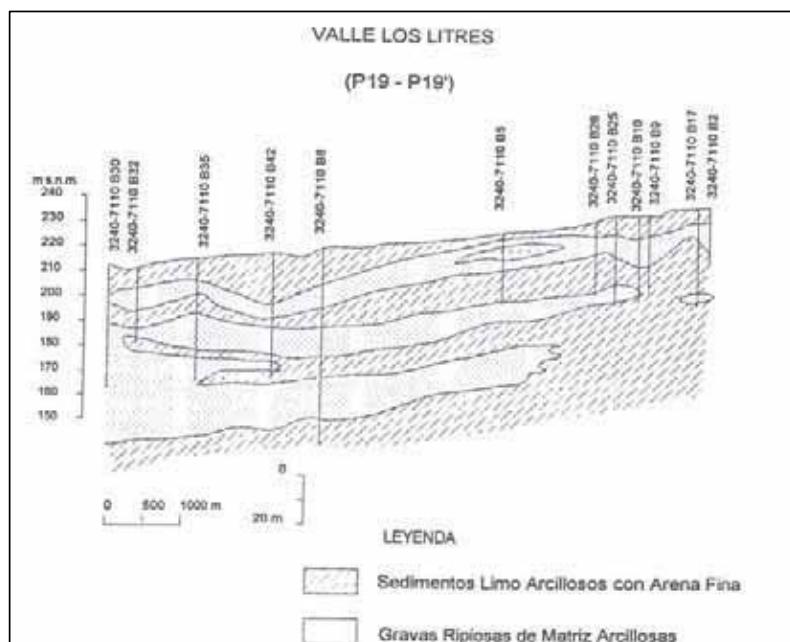


Figura 77: Perfil Estratigráfico Longitudinal en el sector de Nogales

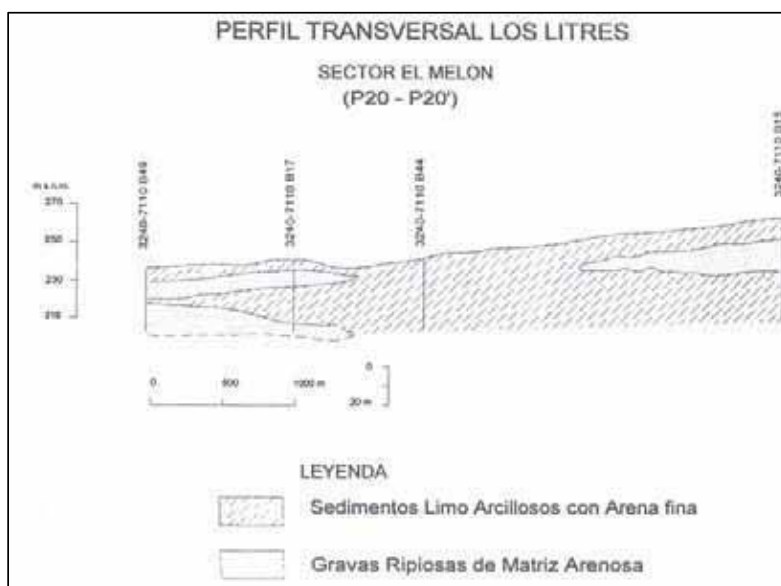


Figura 78: Perfil Estratigráfico en el sector Nogales

Sector Aconcagua-Quillota

Aguas abajo del área de tributación del estero Los Loros, los rellenos de la Unidad B presentan una potencia de aproximadamente 50 m; en las cercanías de la localidad de Ocoa la potencia de la unidad aumenta a más o menos 90 m o más, para luego disminuir, unos 30 m (Figs. 79 y 80).

En el sector de la desembocadura del estero Rabuco, los rellenos de la Unidad B presentan, en promedio, una potencia no superior a 30 m con una tendencia a aumentar a medida que se adosan a la vertiente norte del valle.

En el tramo comprendido entre Romeral y aguas arriba de la junta con Rabuco los pozos han detectado un nivel de granulometría similar a la Unidad B que se ubica en los detritos finos del estrato D. La continuidad de este nivel no es alta y presumiblemente se acuña tanto en sentido longitudinal como transversal al valle. En la zona Rabuco, se observa que este estrato presenta buena continuidad lateral hacia la vertiente Nororiental del valle y que su espesor, en dicha dirección, es bastante estable. El interés hidrogeológico de esta capa de unos 18 m de espesor es escaso, debido a su pequeña extensión areal. El espesor de la Unidad B, hacia la vertiente Nororiente del valle, es muy constante, alcanzando unos 20 m en promedio.

Desde el sector de tributación del valle de Rabuco, hasta el sector de la ciudad de La Calera, se aprecia un espesor moderado de la Unidad B, que como media alcanza los 35 m; hacia el centro es posible esperar potencias mayores para la Unidad B entre 60 y 70 m.

En el límite oriental de la ciudad de La Calera se aprecia un aumento gradual del espesor del acuífero, que alcanza unos 50 m aproximadamente. Sin embargo, hacia el Oeste de la ciudad, se aprecia una notoria disminución de la potencia, con valores no superiores a los 30 m en promedio. Desde este sector, hasta el área de San Pedro, los espesores son bastantes estables y fluctúan entre los 40 y 60 m.

En este tramo, la tendencia que exhiben los depósitos es a disminuir la potencia hacia la vertiente Oeste del valle, aumentando, levemente el espesor en sentido contrario. Este fenómeno se debe a que en épocas pasadas el río Aconcagua escurría adosado al flanco Oriental de la estructura, presentando una posición geográfica distinta a la actual. En el sector de La Cruz se observa una potencia de la Unidad B de más o menos 50 m. en el sector oriental y de unos 25 m. en el flanco Occidental.

En el sector de Chagres, ubicado directamente al Norte de Quillota, indican que los espesores de la Unidad B, en sentido transversal, son bastante constantes. El espesor medio de esta unidad, en dicho sector, es de más o menos 30 m hacia el flanco Poniente y de unos 45 m hacia el sector Oriental.

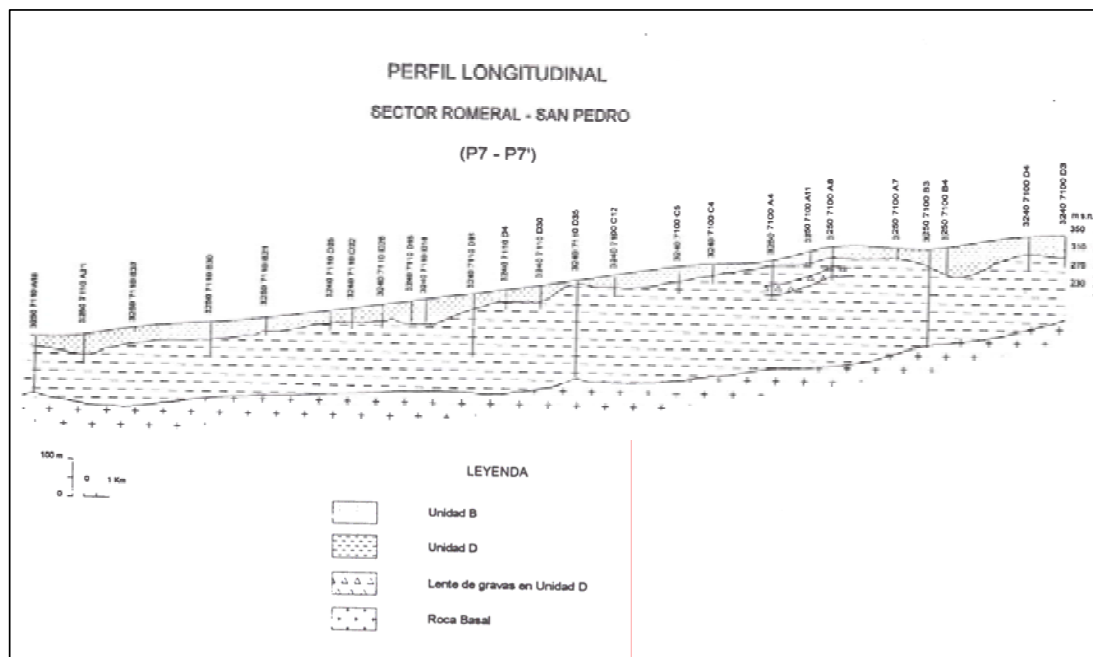


Figura 79: Perfil Estratigráfico en el sector Aconcagua Quillota

Directamente al Sur de la ciudad de Quillota, también existe una muy buena continuidad transversal de la Unidad B y que el espesor de ésta es muy estable, alcanzando como promedio unos 25 m.

La Unidad B exhibe, en el tramo de Calera a San Pedro, contaminaciones de materiales finos, de rango limos arcillosos, que disminuyen la permeabilidad de los rellenos. Estos aportes provienen fundamentalmente de la vertiente Oriental del valle donde existen numerosos conos de deyección y escombreras, cuyos aportes de finos matriciales contaminan a la Unidad B.

En el sector del San Pedro hacia Tabolango se verifica un angostamiento del mismo y una ligera baja granulometría de los depósitos que se tornan más arenosos. Esta baja granulometría no implica disminución de la permeabilidad ya que los rellenos de este tramo exhiben una fracción matricial bastante escasa, a diferencia del sector ubicado directamente aguas arriba.

Aguas abajo de la localidad de Tabolango, esta unidad presenta una interrupción en la continuidad vertical.

Es importante señalar, además de lo expuesto, que en sentido longitudinal al de los rellenos de la Unidad B muestran una tendencia a disminuir en granulometría hacia aguas abajo. Los rípios gravillentos del sector superior, presentan en el área de Quillota, una granulometría menor, que en términos generales está caracterizada por gravas finas fuertemente arenosas. Este cambio es gradual y se debe a la natural pérdida de energía que experimentan las vías fluviales en la medida que se acercan a la desembocadura.

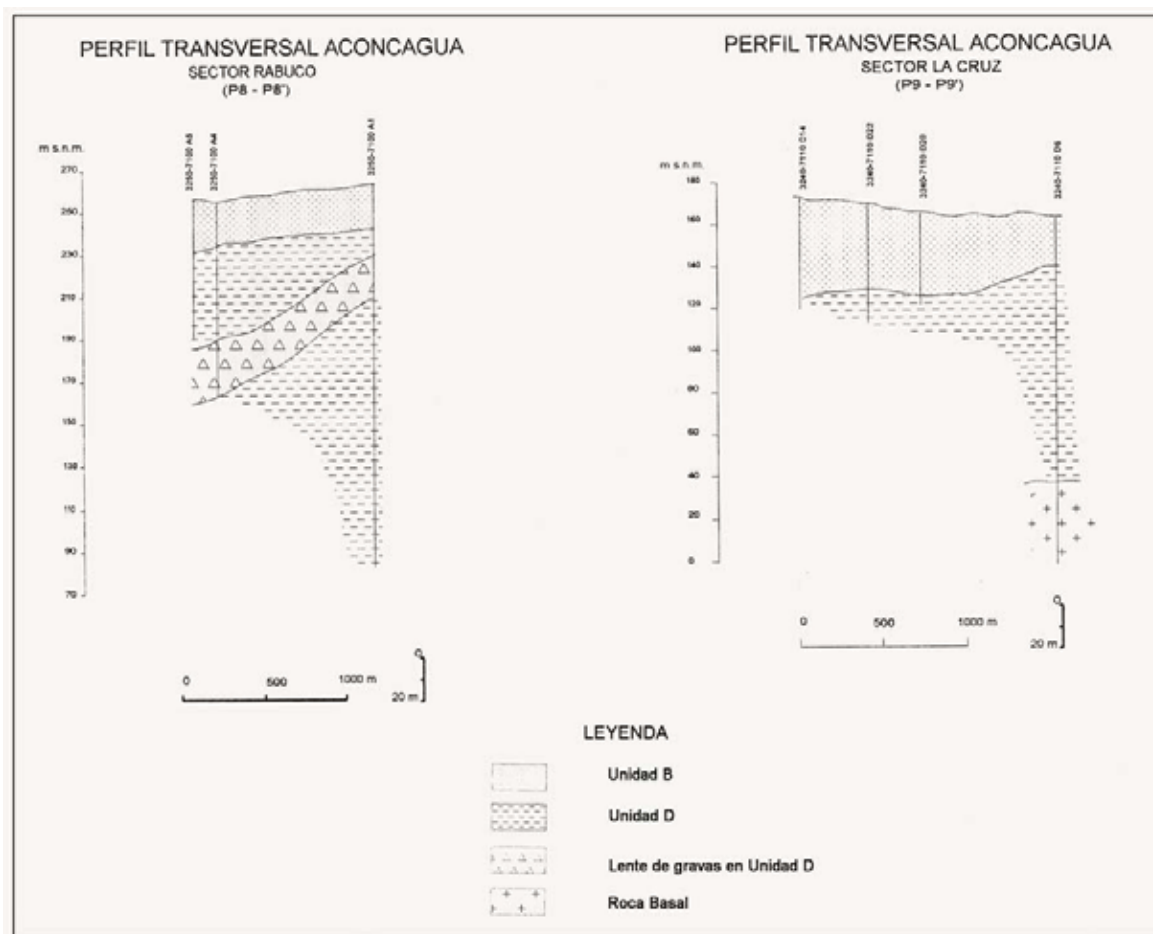


Figura 80: Perfil Estratigráfico en el sector Aconcagua Quillota

13.6.3 Implementación Modelos de Flujo

13.6.3.1 Implementación Modelo de Flujo: Mod 2 Sector ACN-Las Vegas

a) Límites de la Zona a Modelar

La zona incluida en el Modelo 2, corresponde al sector hidrogeológico comprendido entre angostura, inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Aconcagua y Putaendo y hasta 2400 metros aguas abajo del dren Las Vegas de ESVAL. S.A. Corresponde a la denominada Segunda Sección Legal de la cuenca del río Aconcagua, comprendida aproximadamente entre las siguientes coordenadas UTM:

Límite Norte: 6.387.000
 Límite Sur : 6.364.000
 Límite Este : 335.000
 Límite Oeste: 310.000

El Modelo 2 subterráneo del Aconcagua, incluye el sector del Valle del río Catemu, pero no incluye el valle del estero Llay Llay (ver figura 81).

b) Funcionamiento General del Modelo de Flujo Base Utilizado

De acuerdo con los estudios existentes, es posible identificar que el sistema hidrogeológico del valle del río Aconcagua en este sector está ligado al sistema del valle de Llay Llay, el cual en el modelo está conectado mediante una condición de borde que representa descargas de aguas subterráneas del acuífero de Llay Llay hacia el valle del Aconcagua.

El sistema acuífero del modelo 2, está conformado por dos acuíferos, donde el superficial presenta características freáticas o acuífero libre, con alta continuidad espacial en el sector y con un nivel de agua subterránea ubicado pocos metros bajo la superficie del terreno. En la práctica no se dispone de antecedentes de las propiedades hidráulicas del acuífero más profundo, ya que no está tan explotado, lo que es marginal para efectos del modelo.

El balance hídrico de este sistema está compuesto por flujos subterráneos de entrada por su límite oriental (angostura, cerros Las Tinajas y Góngora) y las descargas provenientes del valle de Llay Llay; las pérdidas naturales de aguas subterráneas correspondientes a recuperaciones del río Aconcagua y extracciones por captaciones de pozos y por el Dren las Vegas de ESVAL S.A.

El valle del estero Los Loros conforma el sector de Llay Llay y La confluencia entre el estero Catemu y el Río Aconcagua, define la zona del Dren Las Vegas.

De los estudios existentes en la zona, es posible estimar los flujos que integran el balance hídrico del Modelo2. El flujo subterráneo por el límite oriental (confluencia río Putaendo- río Aconcagua) presenta una magnitud de entre 8 a 15 m³/s; el flujo de agua proveniente del valle de Llay Llay evaluado entre 100 a 400 L/s; y el Dren Las Vegas estaría captando entre 600 y 1200

L/s de aguas subterráneas. El río Aconcagua en este tramo, sección 2, sufre casi exclusivamente recuperaciones y en estudios previos han sido estimadas entre 6 a 13 m³/s como promedio anual.

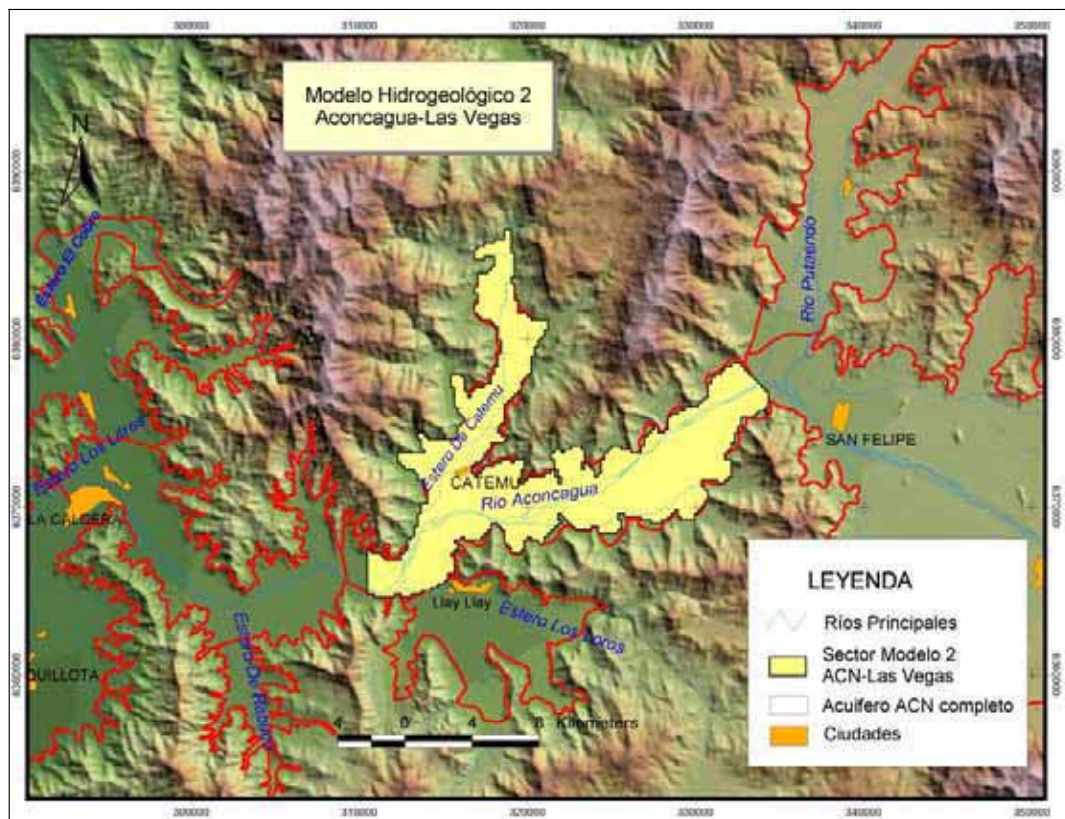


Figura 81: Área que comprende el Modelo Hidrogeológico 2 del valle del Aconcagua. Sector Aconcagua-Las Vegas.

La superficie del terreno en el valle fue obtenida originalmente de la cartografía 1:10.000 de la Comisión Nacional de Riego (CNR) y en el resto del área a base de las cartas 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM). Según el Informe ACN 1998 (Ref 2), la información fue digitalizada mediante autocad y procesada con el software Surfer y sus resultados fueron ingresados al modelo de simulación Visual Modflow.

c) Discretización Espacial y Temporal

Discretización en planta

Para la discretización espacial del modelo subterráneo del Aconcagua, se mantuvo la del modelo original y base utilizado para la modelación de calidad.

El área fue subdividida en celdas de 200 metros por 200 metros, las cuales fueron definidas en la misma dirección de las coordenadas UTM.

El número de celdas (o grillas) de la discretización espacial del área es de 134 columnas por 169 filas, lo que entrega un total de 22.646 celdas o elementos de cálculo.

En la figura 82, se pueden apreciar las grillas del modelo 2, además de los cortes A-A' y B-B' que detallan la discretización vertical considerada.

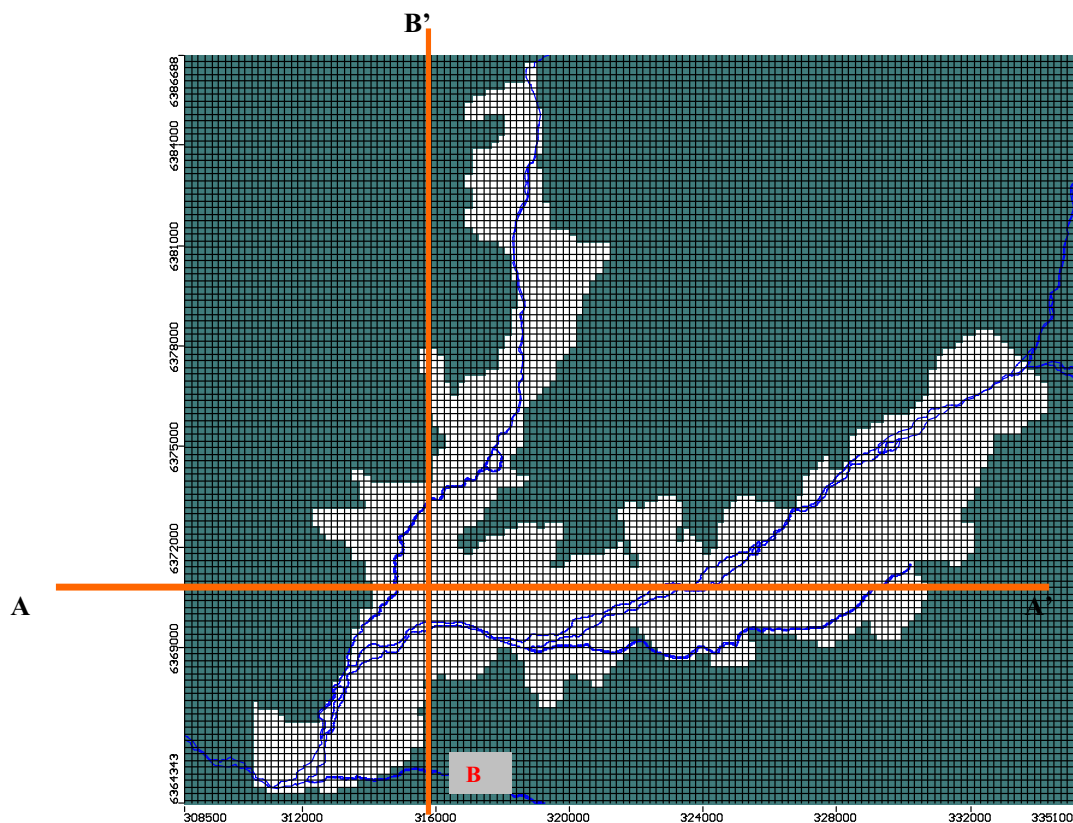


Figura 82: Visión en planta grillas Modelo 2

Discretización vertical

En profundidad, el sistema fue modelado por dos rellenos acuíferos. El límite de separación entre ellos y la posición del basamento fue deducido de la interpretación geológica de los perfiles estratigráficos del área analizados en el informe REF 2, en base a los cuales fueron interpolados para toda la zona modelada.

En las figuras 83 y 84, se muestran los perfiles verticales de los cortes A-A' y B-B', interpretados para la zona con el objetivo de mostrar la discretización espacial vertical que maneja el modelo.

Cota
(m.s.n.m)

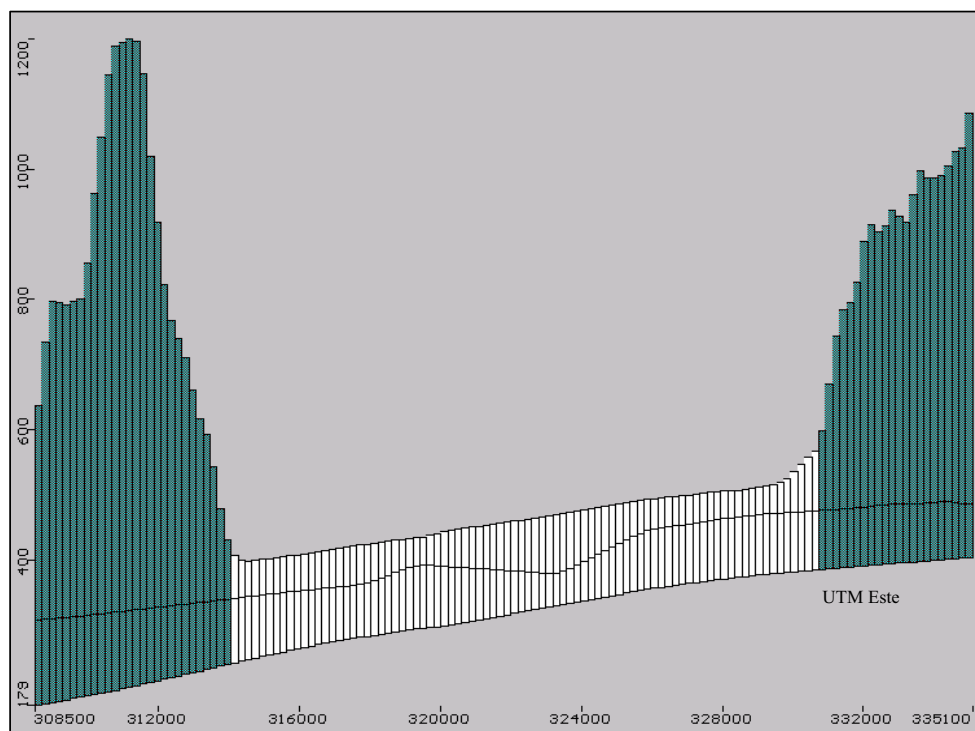


Figura 83: Corte vertical A-A' - ACN Romeral

UTM Este

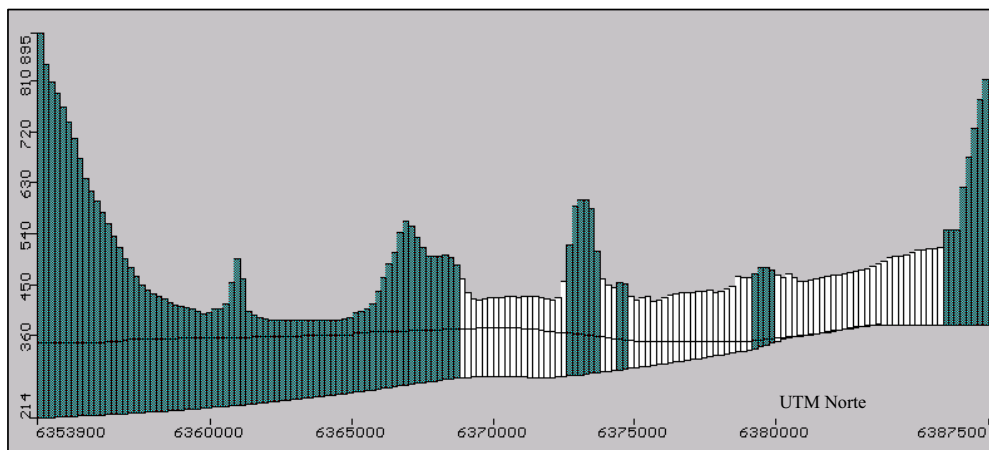


Figura 84: Corte vertical B-B' - ACN Catemu

Actualización y Discretización Temporal

El modelo original base utilizado para la modelación del valle, consta de una discretización temporal de escala semestral, la cual se ajustaba perfectamente para los objetivos que fue construido: una respuesta y análisis hídrico global del sistema.

Sin embargo, para los objetivos del presente estudio, el modelo hidrogeológico del valle del río Aconcagua, (aplicable a los Modelos 2 y 3) tuvo que ser modificado en su escala temporal, para poder representar y obtener los resultados de flujo a una escala mensual que se ajustara a la discretización temporal que se quiere para el análisis y modelación de calidad química de las aguas subterráneas.

Esta escala temporal mensual, tuvo que aplicarse para todos los parámetros que consta el modelo, esto es, definición de recargas, condiciones de borde, niveles medidos observados, bombeos de explotación, etc.

A la vez, el período de calibración utilizado en el modelo base es de abril de 1990 a septiembre de 1996. Éste también fue modificado y ampliado para este estudio desde ABRIL 1990 hasta DICIEMBRE 2004, con el objetivo de abarcar los meses en que se realizaron las 3 campañas de terreno (sept – noviembre y dic 2004) con mediciones de las concentraciones de calidad de los parámetros que se quieren simular.

Discretización temporal

Como se dijo anteriormente, el período de tiempo utilizado para efectuar la calibración del modelo es de abril 1990 a diciembre 2004. La discretización de dicho período en intervalos está determinado por las reglas de bombeo y recargas, las cuales fueron asumidas como las mismas utilizadas en el modelo base (escala semestral), repetidas en los meses correspondientes y extendidas en base al último semestre o semestre más exigido del modelo.

Finalmente el modelo ACTUAL, el adaptado para el presente estudio, opera con un total de 177 Stress Period o períodos de stress (equivalentes a los meses para simular la calibración).

Cada uno de estos intervalos es subdividido a su vez en 10 pasos de tiempo, los cuales corresponden a pasos de cálculo interno del modelo

En la Tabla 47 se muestra en detalle la discretización temporal utilizada.

Tabla 47: Períodos de Stress-(SP)- Modelo ACN Modflow SAG

Stress Period				Fechas	
SP	día inicial	día final		inicio	fin
1	1	30	01-04-90	30-04-90	
2	30	61	30-04-90	31-05-90	
3	61	91	31-05-90	30-06-90	
4	91	122	30-06-90	31-07-90	
5	122	153	31-07-90	31-08-90	
6	153	183	31-08-90	30-09-90	
7	183	214	30-09-90	31-10-90	
8	214	244	31-10-90	30-11-90	
9	244	275	30-11-90	31-12-90	
10	275	306	31-12-90	31-01-91	
11	306	334	31-01-91	28-02-91	
12	334	365	28-02-91	31-03-91	
13	365	395	31-03-91	30-04-91	
14	395	426	30-04-91	31-05-91	
15	426	456	31-05-91	30-06-91	
16	456	487	30-06-91	31-07-91	
17	487	518	31-07-91	31-08-91	
18	518	548	31-08-91	30-09-91	
19	548	579	30-09-91	31-10-91	
20	579	609	31-10-91	30-11-91	
21	609	640	30-11-91	31-12-91	
22	640	671	31-12-91	31-01-92	
23	671	700	31-01-92	29-02-92	
24	700	731	29-02-92	31-03-92	
25	731	761	31-03-92	30-04-92	
26	761	792	30-04-92	31-05-92	
27	792	822	31-05-92	30-06-92	
28	822	853	30-06-92	31-07-92	
29	853	884	31-07-92	31-08-92	
30	884	914	31-08-92	30-09-92	
31	914	945	30-09-92	31-10-92	
32	945	975	31-10-92	30-11-92	
33	975	1006	30-11-92	31-12-92	
34	1006	1037	31-12-92	31-01-93	
35	1037	1065	31-01-93	28-02-93	
36	1065	1096	28-02-93	31-03-93	
37	1096	1126	31-03-93	30-04-93	
38	1126	1157	30-04-93	31-05-93	
39	1157	1187	31-05-93	30-06-93	
40	1187	1218	30-06-93	31-07-93	
41	1218	1249	31-07-93	31-08-93	
42	1249	1279	31-08-93	30-09-93	
43	1279	1310	30-09-93	31-10-93	
44	1310	1340	31-10-93	30-11-93	
45	1340	1371	30-11-93	31-12-93	
46	1371	1402	31-12-93	31-01-94	
47	1402	1430	31-01-94	28-02-94	
48	1430	1461	28-02-94	31-03-94	
49	1461	1491	31-03-94	30-04-94	
50	1491	1522	30-04-94	31-05-94	
51	1522	1552	31-05-94	30-06-94	
52	1552	1583	30-06-94	31-07-94	
53	1583	1614	31-07-94	31-08-94	
54	1614	1644	31-08-94	30-09-94	
55	1644	1675	30-09-94	31-10-94	
56	1675	1705	31-10-94	30-11-94	
57	1705	1736	30-11-94	31-12-94	
58	1736	1767	31-12-94	31-01-95	
59	1767	1795	31-01-95	28-02-95	

Stress Period				Fechas	
SP	día inicial	día final		inicio	fin
60	1795	1826	28-02-95	31-03-95	
61	1826	1856	31-03-95	30-04-95	
62	1856	1887	30-04-95	31-05-95	
63	1887	1917	31-05-95	30-06-95	
64	1917	1948	30-06-95	31-07-95	
65	1948	1979	31-07-95	31-08-95	
66	1979	2009	31-08-95	30-09-95	
67	2009	2040	30-09-95	31-10-95	
68	2040	2070	31-10-95	30-11-95	
69	2070	2101	30-11-95	31-12-95	
70	2101	2132	31-12-95	31-01-96	
71	2132	2161	31-01-96	29-02-96	
72	2161	2192	29-02-96	31-03-96	
73	2192	2222	31-03-96	30-04-96	
74	2222	2253	30-04-96	31-05-96	
75	2253	2283	31-05-96	30-06-96	
76	2283	2314	30-06-96	31-07-96	
77	2314	2345	31-07-96	31-08-96	
78	2345	2375	31-08-96	30-09-96	
79	2375	2406	30-09-96	31-10-96	
80	2406	2436	31-10-96	30-11-96	
81	2436	2467	30-11-96	31-12-96	
82	2467	2498	31-12-96	31-01-97	
83	2498	2526	31-01-97	28-02-97	
84	2526	2557	28-02-97	31-03-97	
85	2557	2587	31-03-97	30-04-97	
86	2587	2618	30-04-97	31-05-97	
87	2618	2648	31-05-97	30-06-97	
88	2648	2679	30-06-97	31-07-97	
89	2679	2710	31-07-97	31-08-97	
90	2710	2740	31-08-97	30-09-97	
91	2740	2771	30-09-97	31-10-97	
92	2771	2801	31-10-97	30-11-97	
93	2801	2832	30-11-97	31-12-97	
94	2832	2863	31-12-97	31-01-98	
95	2863	2891	31-01-98	28-02-98	
96	2891	2922	28-02-98	31-03-98	
97	2922	2952	31-03-98	30-04-98	
98	2952	2983	30-04-98	31-05-98	
99	2983	3013	31-05-98	30-06-98	
100	3013	3044	30-06-98	31-07-98	
101	3044	3075	31-07-98	31-08-98	
102	3075	3105	31-08-98	30-09-98	
103	3105	3136	30-09-98	31-10-98	
104	3136	3166	31-10-98	30-11-98	
105	3166	3197	30-11-98	31-12-98	
106	3197	3228	31-12-98	31-01-99	
107	3228	3256	31-01-99	28-02-99	
108	3256	3287	28-02-99	31-03-99	
109	3287	3317	31-03-99	30-04-99	
110	3317	3348	30-04-99	31-05-99	
111	3348	3378	31-05-99	30-06-99	
112	3378	3409	30-06-99	31-07-99	
113	3409	3440	31-07-99	31-08-99	
114	3440	3470	31-08-99	30-09-99	
115	3470	3501	30-09-99	31-10-99	
116	3501	3531	31-10-99	30-11-99	
117	3531	3562	30-11-99	31-12-99	
118	3562	3593	31-12-99	31-01-00	

Stress Period				Fechas	
SP	día inicial	día final		inicio	fin
119	3593	3622	31-01-00	29-02-00	
120	3622	3653	29-02-00	31-03-00	
121	3653	3683	31-03-00	30-04-00	
122	3683	3714	30-04-00	31-05-00	
123	3714	3744	31-05-00	30-06-00	
124	3744	3775	30-06-00	31-07-00	
125	3775	3806	31-07-00	31-08-00	
126	3806	3836	31-08-00	30-09-00	
127	3836	3867	30-09-00	31-10-00	
128	3867	3897	31-10-00	30-11-00	
129	3897	3928	30-11-00	31-12-00	
130	3928	3959	31-12-00	31-01-01	
131	3959	3987	31-01-01	28-02-01	
132	3987	4018	28-02-01	31-03-01	
133	4018	4048	31-03-01	30-04-01	
134	4048	4079	30-04-01	31-05-01	
135	4079	4109	31-05-01	30-06-01	
136	4109	4140	30-06-01	31-07-01	
137	4140	4171	31-07-01	31-08-01	
138	4171	4201	31-08-01	30-09-01	
139	4201	4232	30-09-01	31-10-01	
140	4232	4262	31-10-01	30-11-01	
141	4262	4293	30-11-01	31-12-01	
142	4293	4324	31-12-01	31-01-02	
143	4324	4352	31-01-02	28-02-02	
144	4352	4383	28-02-02	31-03-02	
145	4383	4413	31-03-02	30-04-02	
146	4413	4444	30-04-02	31-05-02	
147	4444	4474	31-05-02	30-06-02	
148	4474	4505	30-06-02	31-07-02	
149	4505	4536	31-07-02	31-08-02	
150	4536	4566	31-08-02	30-09-02	
151	4566	4597	30-09-02	31-10-02	
152	4597	4627	31-10-02	30-11-02	
153	4627	4658	30-11-02	31-12-02	
154	4658	4689	31-12-02	31-01-03	
155	4689	4717	31-01-03	28-02-03	
156	4717	4748	28-02-03	31-03-03	
157	4748	4778	31-03-03	30-04-03	
158	4778	4809	30-04-03	31-05-03	
159	4809	4839	31-05-03	30-06-03	
160	4839	4870	30-06-03	31-07-03	
161	4870	4901	31-07-03	31-08-03	
162	4901	4931	31-08-03	30-09-03	
163	4931	4962	30-09-03	31-10-03	
164	4962	4992	31-10-03	30-11-03	
165	4992	5023	30-11-03	31-12-03	
166	5023	5054	31-12-03	31-01-04	
167	5054	5083	31-01-04	29-02-04	
168	5083	5114	29-02-04	31-03-04	
169	5114	5144	31-03-04	30-04-04	
170	5144	5175	30-04-04	31-05-04	
171	5175	5205	31-05-04	30-06-04	
172	5205	5236	30-06-04	31-07-04	
173	5236	5267	31-07-04	31-08-04	
174	5267	5297	31-08-04	30-09-04	
175	5297	5328	30-09-04	31-10-04	
176	5328	5358	31-10-04	30-11-04	
177	5358	5389	30-11-04	31-12-04	

d) Parámetros Hidráulicos

Los parámetros elásticos son: (1) la permeabilidad hidráulica (en sus tres direcciones) y (2) coeficiente de almacenamiento, para cada uno de los acuíferos definidos. La definición previa de los parámetros elásticos, es necesario para asignar valores a cada una de las celdas, los cuales fueron obtenidos del modelo que se contaba como base.

Estos valores corresponden a los valores de partida para la calibración.

Las conductividades hidráulicas o permeabilidades del sistema Aconcagua, han sido definidas en base a la hipótesis de un sistema acuífero isotrópico u homogéneo, es decir, con sus parámetros elásticos y característicos del suelo, iguales en las tres direcciones (longitudinal, transversal y vertical). Esto debido a que el relleno acuífero del río Aconcagua, presenta un origen fluvial, aluvial, poco consolidado y sus velocidades de percolación vertical son muy similares a las velocidades horizontales de flujo. (Basado en experiencias prácticas de estudios en el valle)

A continuación se muestran las figuras 85 y 86 con la zonificación de las permeabilidades.

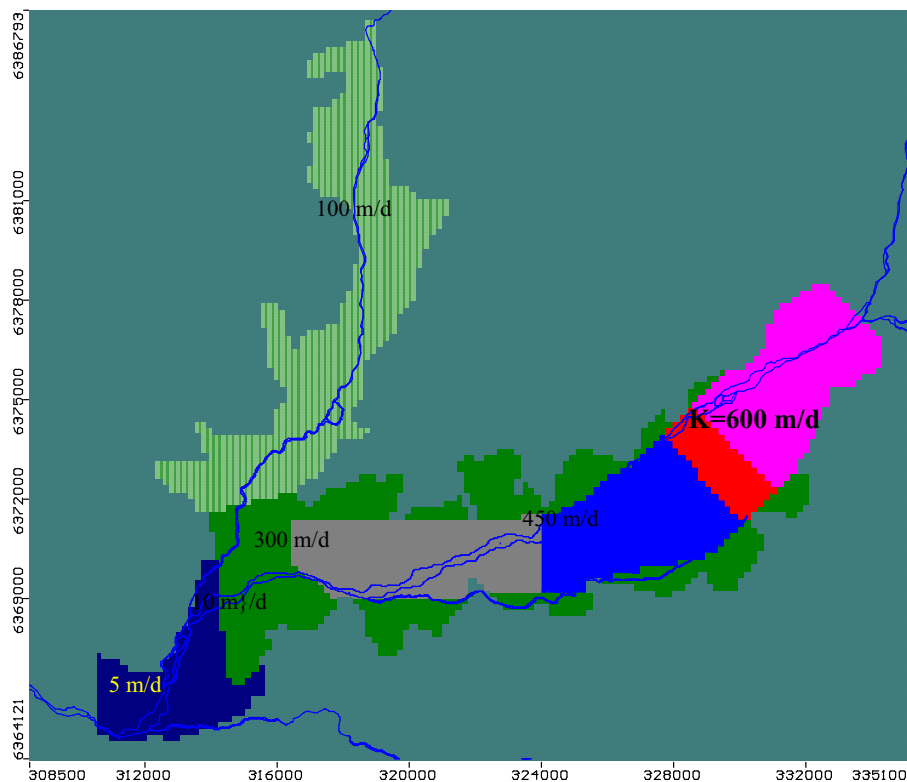


Figura 85: Distribución Inicial de Permeabilidades, estrato superior

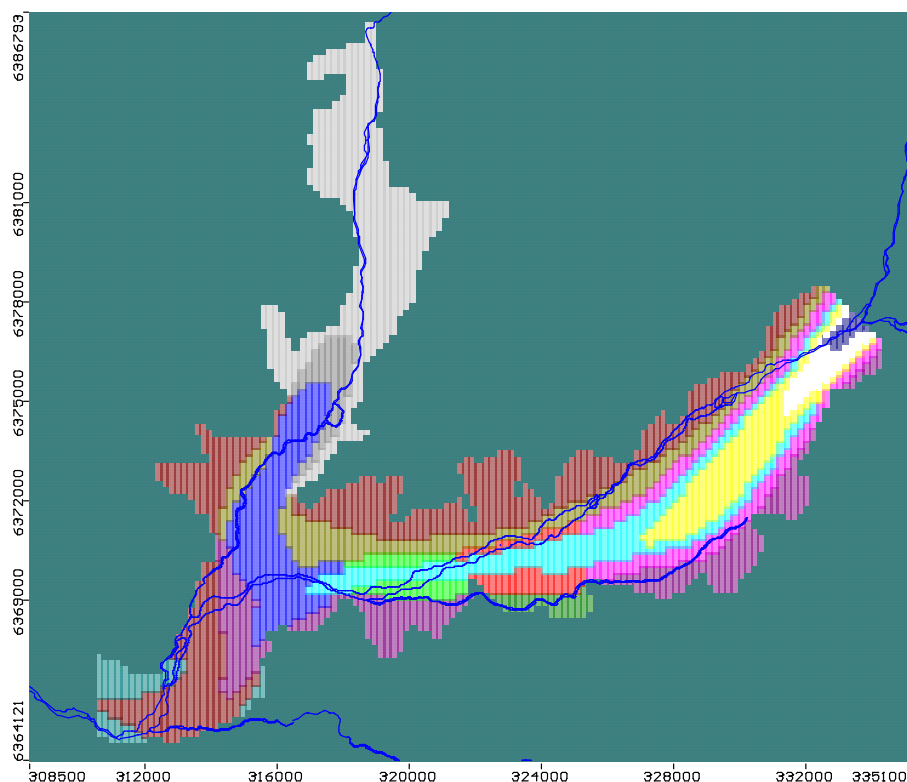


Figura 86: Distribución Inicial de Permeabilidades, estrato inferior.

El rango de variación de las permeabilidades del estrato inferior, son menores a las del primero, y fluctúan sólo entre 5 a 100 m/d, prevaleciendo más las permeabilidades de 5 m/d.

En el modelo base, para el acuífero más profundo (Unidad D), como no se contaba con suficientes antecedentes para caracterizar la permeabilidad de dicho acuífero, se estimó un valor único inicial representativo de toda el área, evaluándose en 5 m/día. Finalmente, se calibró en lo que se muestra en la figura 74, que corresponde a la distribución inicial de permeabilidades utilizadas para el modelo ACN-Calidad.

Para los valores de coeficientes de almacenamiento iniciales de la calibración, asimismo como las permeabilidades, se asumieron las finales de calibración del modelo base Aconcagua, cuyo detalle se muestra en la figura 87.

Para el estrato inferior, la distribución del Almacenamiento (S_y) es homogénea, calibrada en 0.08.-

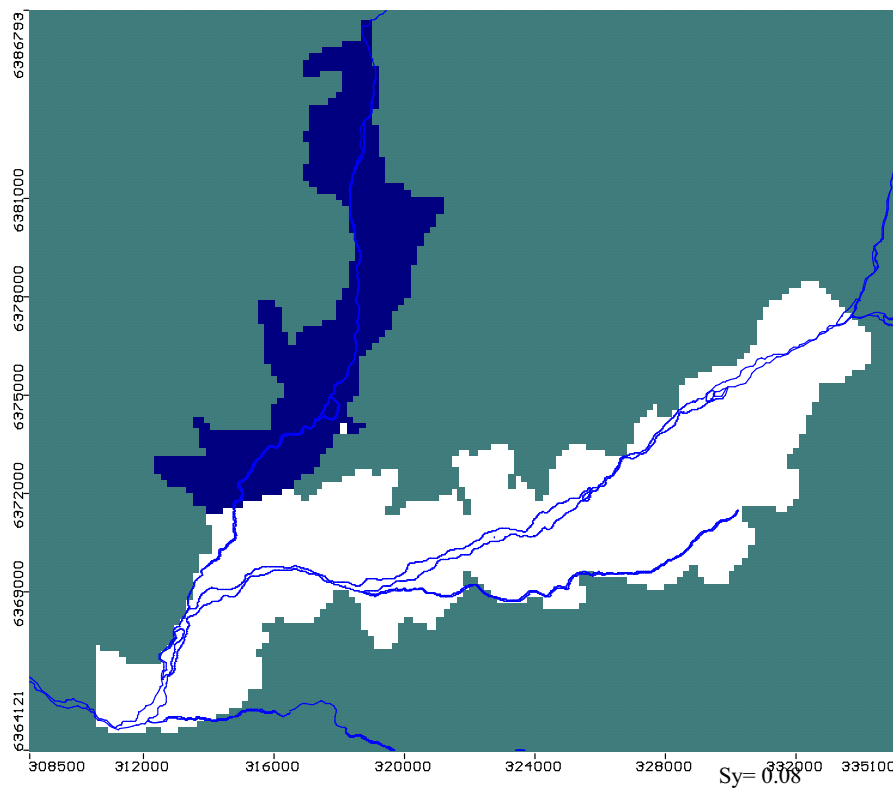


Figura 87: Distribución de los coeficientes de almacenamiento

e) Recargas y Descargas

Recarga Neta

Las recargas de los sectores de riego provienen del tratamiento conjunto de las precipitaciones, recargas de riego y pérdidas desde canales, que se obtienen como resultados del Modelo superficial, el cual considera la capacidad de recarga del acuífero considerando su espesor saturado.

Para fines de este estudio, fueron mantenidas las que estaban ingresadas en el escenario de calibración régimen histórico 1990-1996, pero extendidas hasta 2004 y llevadas a régimen mensual. Lo anterior, debido a carecer de información para modificar el modelo de flujo superficial.

En la figura 88, se presenta la zonificación de las zonas de riego, que equivalen a las zonas de recarga, dentro de las cuales la única que presenta valores de recarga neta corresponde al sector de Catemu, coloreado en tono plomo. Esto, debido a que en el resto de la zona, las recargas no alcanzan a formar parte del flujo subterráneo, dado que el nivel freático se encuentra a muy poca profundidad, por lo que tienden a constituir un flujo subsuperficial rápidamente drenado por el río y a experimentar procesos de evapotranspiración.

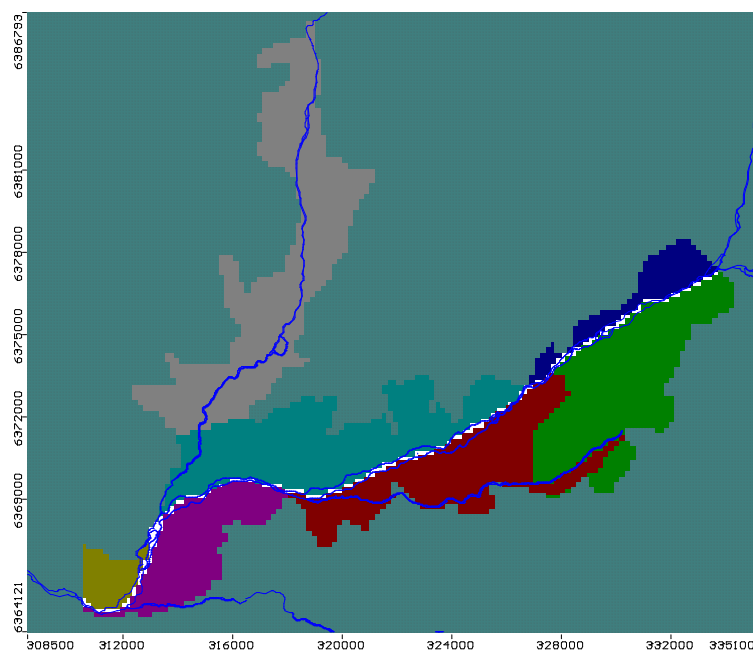


Figura 88: Zonas de Recarga en Modelo Subterráneo

A continuación, en la tabla 48, se presentan los valores de recarga impuestos en el Modelo, para el sector de Catemu.

Tabla 48: Valores de Recarga impuestos en el Modelo 2

Laboratorio de	SP	día inicial	día final	Recarga m/d	SP	día inicial	día final	Recarga m/d	SP	día inicial	día final	Recarga m/d
	SP_1	0	30	0.00112	SP_60	1795	1826	0.00153	SP_119	3593	3622	0.00153
	SP_2	30	61	0.00112	SP_61	1826	1856	0.00112	SP_120	3622	3653	0.00153
	SP_3	61	91	0.00112	SP_62	1856	1887	0.00112	SP_121	3653	3683	0.00112
	SP_4	91	122	0.00112	SP_63	1887	1917	0.00112	SP_122	3683	3714	0.00112
	SP_5	122	153	0.00112	SP_64	1917	1948	0.00112	SP_123	3714	3744	0.00112
	SP_6	153	183	0.00112	SP_65	1948	1979	0.00112	SP_124	3744	3775	0.00112
	SP_7	183	214	0.00153	SP_66	1979	2009	0.00112	SP_125	3775	3806	0.00112
	SP_8	214	244	0.00153	SP_67	2009	2040	0.00153	SP_126	3806	3836	0.00112
	SP_9	244	275	0.00153	SP_68	2040	2070	0.00153	SP_127	3836	3867	0.00153
	SP_10	275	306	0.00153	SP_69	2070	2101	0.00153	SP_128	3867	3897	0.00153
	SP_11	306	334	0.00153	SP_70	2101	2132	0.00153	SP_129	3897	3928	0.00153
	SP_12	334	365	0.00153	SP_71	2132	2161	0.00153	SP_130	3928	3959	0.00153
	SP_13	365	395	0.00112	SP_72	2161	2192	0.00153	SP_131	3959	3987	0.00153
	SP_14	395	426	0.00112	SP_73	2192	2222	0.00112	SP_132	3987	4018	0.00153
	SP_15	426	456	0.00112	SP_74	2222	2253	0.00112	SP_133	4018	4048	0.00112
	SP_16	456	487	0.00112	SP_75	2253	2283	0.00112	SP_134	4048	4079	0.00112
	SP_17	487	518	0.00112	SP_76	2283	2314	0.00112	SP_135	4079	4109	0.00112
	SP_18	518	548	0.00112	SP_77	2314	2345	0.00112	SP_136	4109	4140	0.00112
	SP_19	548	579	0.00153	SP_78	2345	2375	0.00112	SP_137	4140	4171	0.00112
	SP_20	579	609	0.00153	SP_79	2375	2406	0.00153	SP_138	4171	4201	0.00112
	SP_21	609	640	0.00153	SP_80	2406	2436	0.00153	SP_139	4201	4232	0.00153
	SP_22	640	671	0.00153	SP_81	2436	2467	0.00153	SP_140	4232	4262	0.00153
	SP_23	671	700	0.00153	SP_82	2467	2498	0.00153	SP_141	4262	4293	0.00153
	SP_24	700	731	0.00153	SP_83	2498	2526	0.00153	SP_142	4293	4324	0.00153
	SP_25	731	761	0.00112	SP_84	2526	2557	0.00153	SP_143	4324	4352	0.00153
	SP_26	761	792	0.00112	SP_85	2557	2587	0.00112	SP_144	4352	4383	0.00153
	SP_27	792	822	0.00112	SP_86	2587	2618	0.00112	SP_145	4383	4413	0.00112
	SP_28	822	853	0.00112	SP_87	2618	2648	0.00112	SP_146	4413	4444	0.00112
	SP_29	853	884	0.00112	SP_88	2648	2679	0.00112	SP_147	4444	4474	0.00112
	SP_30	884	914	0.00112	SP_89	2679	2710	0.00112	SP_148	4474	4505	0.00112
	SP_31	914	945	0.00153	SP_90	2710	2740	0.00112	SP_149	4505	4536	0.00112
	SP_32	945	975	0.00153	SP_91	2740	2771	0.00153	SP_150	4536	4566	0.00112
	SP_33	975	1006	0.00153	SP_92	2771	2801	0.00153	SP_151	4566	4597	0.00153
	SP_34	1006	1037	0.00153	SP_93	2801	2832	0.00153	SP_152	4597	4627	0.00153
	SP_35	1037	1065	0.00153	SP_94	2832	2863	0.00153	SP_153	4627	4658	0.00153
	SP_36	1065	1096	0.00153	SP_95	2863	2891	0.00153	SP_154	4658	4689	0.00153
	SP_37	1096	1126	0.00112	SP_96	2891	2922	0.00153	SP_155	4689	4717	0.00153
	SP_38	1126	1157	0.00112	SP_97	2922	2952	0.00112	SP_156	4717	4748	0.00153
	SP_39	1157	1187	0.00112	SP_98	2952	2983	0.00112	SP_157	4748	4778	0.00112
	SP_40	1187	1218	0.00112	SP_99	2983	3013	0.00112	SP_158	4778	4809	0.00112
	SP_41	1218	1249	0.00112	SP_100	3013	3044	0.00112	SP_159	4809	4839	0.00112
	SP_42	1249	1279	0.00112	SP_101	3044	3075	0.00112	SP_160	4839	4870	0.00112
	SP_43	1279	1310	0.00153	SP_102	3075	3105	0.00112	SP_161	4870	4901	0.00112
	SP_44	1310	1340	0.00153	SP_103	3105	3136	0.00153	SP_162	4901	4931	0.00112
	SP_45	1340	1371	0.00153	SP_104	3136	3166	0.00153	SP_163	4931	4962	0.00153
	SP_46	1371	1402	0.00153	SP_105	3166	3197	0.00153	SP_164	4962	4992	0.00153
	SP_47	1402	1433	0.00153	SP_106	3197	3228	0.00153	SP_165	4992	5023	0.00153
	SP_48	1433	1464	0.00153	SP_107	3228	3259	0.00153	SP_166	5023	5054	0.00153
	SP_49	1464	1495	0.00153	SP_108	3259	3290	0.00153	SP_167	5054	5085	0.00153
	SP_50	1495	1526	0.00153	SP_109	3290	3321	0.00153	SP_168	5085	5116	0.00153
	SP_51	1526	1557	0.00153	SP_110	3321	3352	0.00153	SP_169	5116	5147	0.00153
	SP_52	1557	1588	0.00153	SP_111	3352	3383	0.00153	SP_170	5147	5178	0.00153
	SP_53	1588	1619	0.00153	SP_112	3383	3414	0.00153	SP_171	5178	5209	0.00153
	SP_54	1619	1650	0.00153	SP_113	3414	3445	0.00153	SP_172	5209	5240	0.00153
	SP_55	1650	1681	0.00153	SP_114	3445	3476	0.00153	SP_173	5240	5271	0.00153
	SP_56	1681	1712	0.00153	SP_115	3476	3507	0.00153	SP_174	5271	5302	0.00153
	SP_57	1712	1743	0.00153	SP_116	3507	3538	0.00153	SP_175	5302	5333	0.00153
	SP_58	1743	1774	0.00153	SP_117	3538	3569	0.00153	SP_176	5333	5364	0.00153
	SP_59	1774	1805	0.00153	SP_118	3569	3600	0.00153	SP_177	5364	5395	0.00153

Descargas

Entre las descargas se tiene:

- Afloramientos, es decir, drenaje natural del río Aconcagua, dren Las Vegas, flujo neto de la napa que sale del sistema.
- La extracción de agua desde los pozos y norias.

Los afloramientos son representados como condición de borde tipo DREN, condición que tiene la característica de sólo recibir aportes de flujo desde el acuífero. Esta condición se encuentra implementada para todo el río Aconcagua en este sector de modelación.

Las principales descargas de la zona corresponden a bombeos de pozos y norias, las cuales fueron estimadas a partir de las encuestas de terreno realizadas en el estudio de la REF 2, indicados desde las páginas E.3-12 hasta la E.3-14 del Tomo II del estudio señalado.

Para poder extender los bombeos hasta el año 2004, se repitió el bombeo estimado para el mes mas desfavorable de explotación, respecto a las estimaciones realizadas entre 1990 y 1996.

En la figura 89 se muestran los pozos incorporados al modelo, los cuales completan un total de 71 extracciones. Los pozos incluyen los 14 pozos de inyección de flujo, utilizados para representar una condición de borde de entrada desde el sector de Llay Llay.

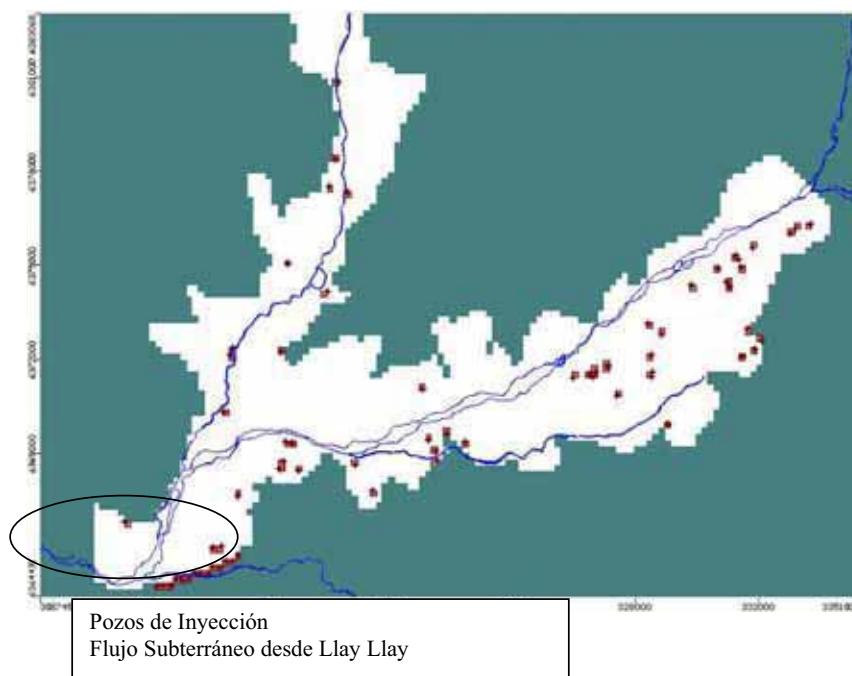


Figura 89: Ubicación de Pozos y Norias

En el Anexo B-5, se detallan los caudales de explotación incorporados para cada uno de los pozos de explotación y de condición de borde.

Las coordenadas de ubicación UTM, fueron las mismas obtenidas en el estudio REF2 y que tenía implementado el modelo.

El formato de las extracciones de los pozos, los valores negativos indican extracción, mientras que los valores positivos indican inyección.

La extracción real en promedio asciende a 433 L/s en todo el período (1990-2004) y el flujo desde el estero Los Loros de 300 L/s.

f) Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del modelo corresponden a las condiciones iniciales o de partida y a las condiciones que condicionan el flujo para cada uno de los intervalos de tiempo. Las condiciones de borde consideran condiciones de nivel constante en el límite oriente de la zona de estudio, de nivel variable en el límite poniente y de flujo constante proveniente del valle de Llay Llay.

Condiciones iniciales

Para la operación en régimen transiente del modelo, éste requiere de la definición de una superficie inicial del nivel freático en todo el dominio del modelo. La condición inicial considerada para este estudio, será la final de calibración del modelo de flujo. La figura 89 muestra las curvas equipotenciales de la cota piezométrica, en m.s.n.m.

Condiciones de borde

Para la operación del modelo en régimen transiente, se deben definir condiciones de borde en las zonas cercanas los límites y donde se crea existen flujos entrantes o salientes.

Para este sector, existen aportes desde aguas arriba, que provienen del flujo subterráneo desde el sector de la junta del río Aconcagua con el río Putaendo, altas recuperaciones del río en la zona de Panquehue, que dan origen a una zona de vegas, afloramientos en la zona del Dren Las Vegas, y la entrada del flujo subterráneo proveniente de la zona del valle de Llay Llay.

En la figura 90 se muestran en colores rojo, las condiciones de nivel constante y en color gris, la condición del río tipo Dren.

Los flujos pasantes desde el valle de Llay Llay, son representados por 14 pozos de inyección, ya ilustrados en la figura 89, los cuales suman un flujo de 300 L/s.

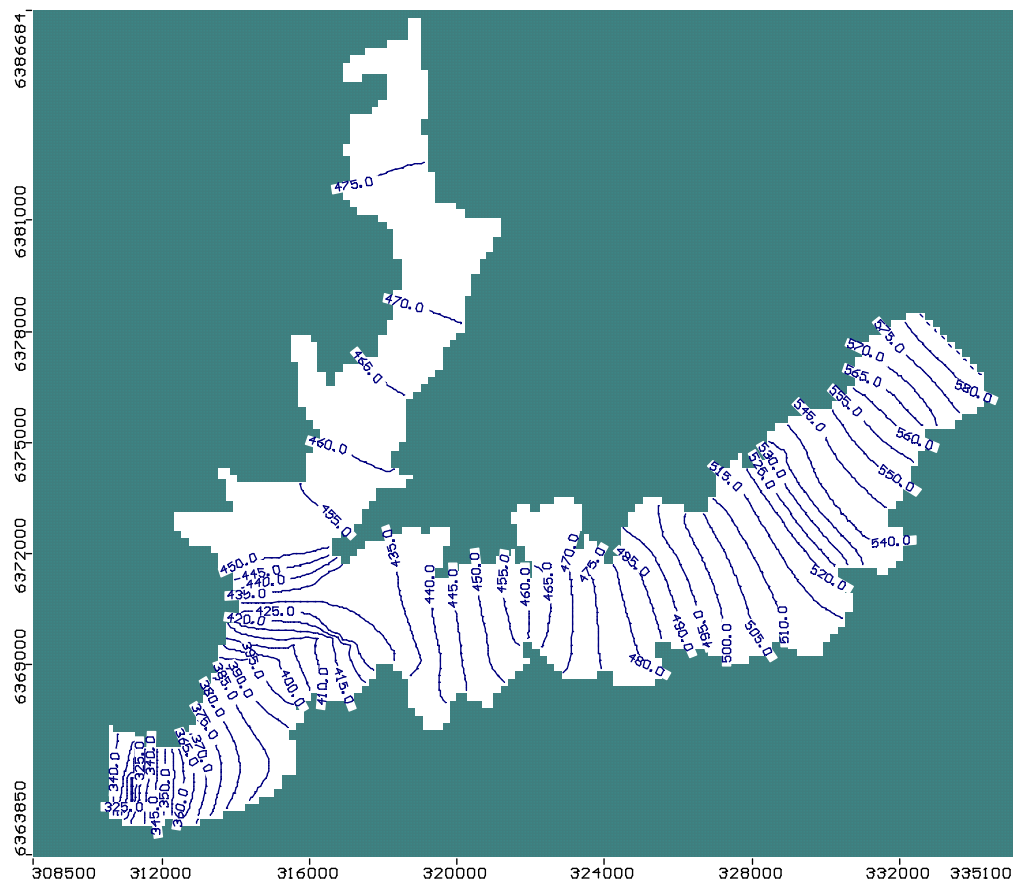


Figura 90: Nivel piezométrico inicial considerado.

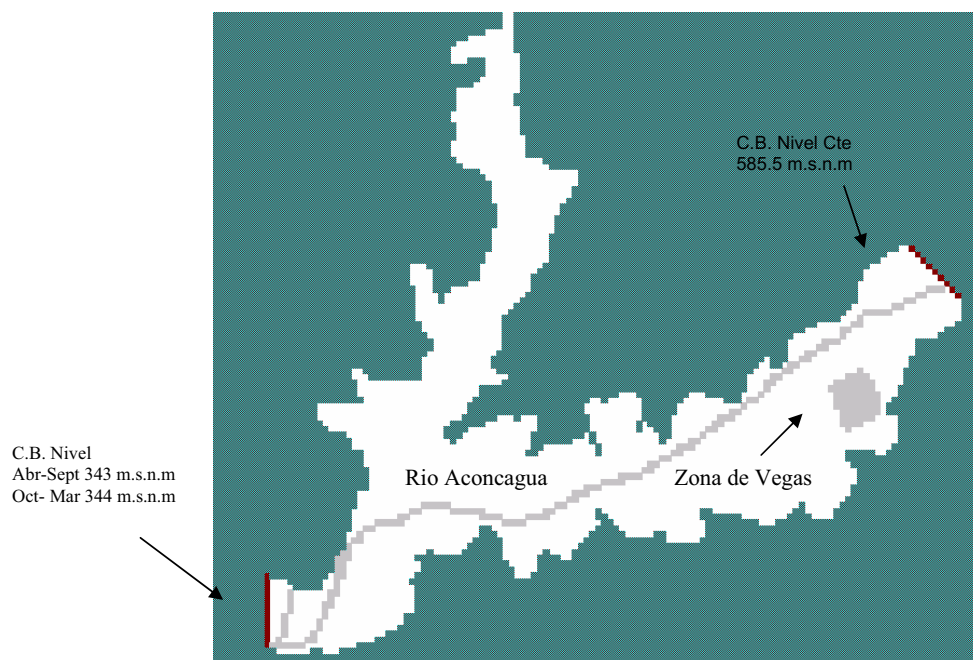


Figura 91: Esquema de las condiciones de borde del Modelo de Flujo

Los valores ingresados al modelo, corresponden a lo siguiente:

- Para el sector de aguas arriba, se conservó el valor ingresado en el modelo base utilizado, un nivel constante de 585.5 m.s.n.m., para todo el período de calibración, 1990-2004
- Para el sector de aguas abajo, se definió un nivel correspondiente a 343 m.s.n.m. para los intervalos estacionales de abril-septiembre y
- 344 m.s.n.m. entre octubre – marzo, dado que se detectó una variación de niveles entre ambos períodos.

La conductancia en el lecho de los drenes, se han estimado en 100 m²/día para la zona de vegas, en 3000 m²/día para el río Aconcagua y en 12000 m²/día para el dren inferior. Todos estos valores fueron los determinados en la calibración del modelo base utilizado, cuyos resultados fueron asumidos pero extendidos para el período de simulación y que serán los iniciales para la calibración de este estudio.

g) Patrón de ajuste para la calibración del Modelo de Flujo, MOD 2

Niveles de pozos de observación

Para poder calibrar el modelo de flujo, se requiere poder contar con el registro de niveles históricos de pozos de observación de niveles de aguas subterráneas, y por otro lado, contar con el balance del modelo conceptual, que corresponden a los flujos y valores de contrastes ya señalados.

Para la zona en cuestión, se cuenta con 6 pozos de medición de niveles del agua subterránea, los cuales son medidos por la Dirección General de Aguas- DGA- periódicamente. Dichos pozos se indican en la tabla 49

Tabla 49: Nómina de Estaciones de Observación de Niveles-DGA

CODIGO POZO OBS	NOMBRE_registro DGA	COD BNA	COORDENADAS UTM	
			NORTE	ESTE
C1	FUNDO STA ADRIANA	05420006-4	6372799	328838
C2	HIJUELA PRINCIPAL	05420007-2	6374475	330934
C4	FUNDICION CHAGRES	05420008-0	6369344	316885
C8	A.P. LLAY LLAY (1)	05422003-0	6366010	314590
D2	FUNDO SAN ROQUE	05420009-9	6370494	325849
D3	ASENTAMIENTO ROMERAL	05423024-9	6366370	310590

Los Pozos, Cate 1, Cate 2, Cate 3 y Acn1, corresponden a pozos ficticios incluidos en la modelación, para tener referencias de los niveles en el valle una vez que se realiza la simulación.

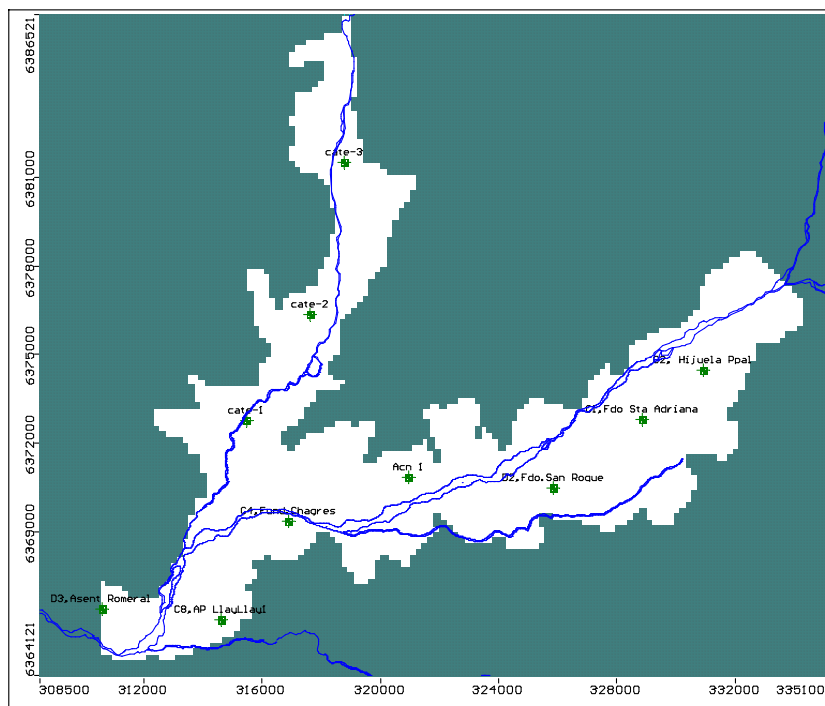


Figura 92: Ubicación Espacial de los Pozos de Observación de Niveles incluidos en la modelación.

Los valores de las mediciones para cada pozo, se encuentran implementados en el modelo hidrogeológico, relativos a la cota sobre el nivel del mar. Los valores de las profundidades se presentan en Anexo A-4.

Los gráficos presentados en la fig. 93, muestran la variación de niveles en el tiempo, los cuales se pueden destacar que no han sufrido variación brusca en los últimos 20 años, más bien, los niveles se presentan estables. A su vez, la tabla 50, presenta los valores de niveles en el formato en que se incorporaron al modelo de flujo- Mod 2.

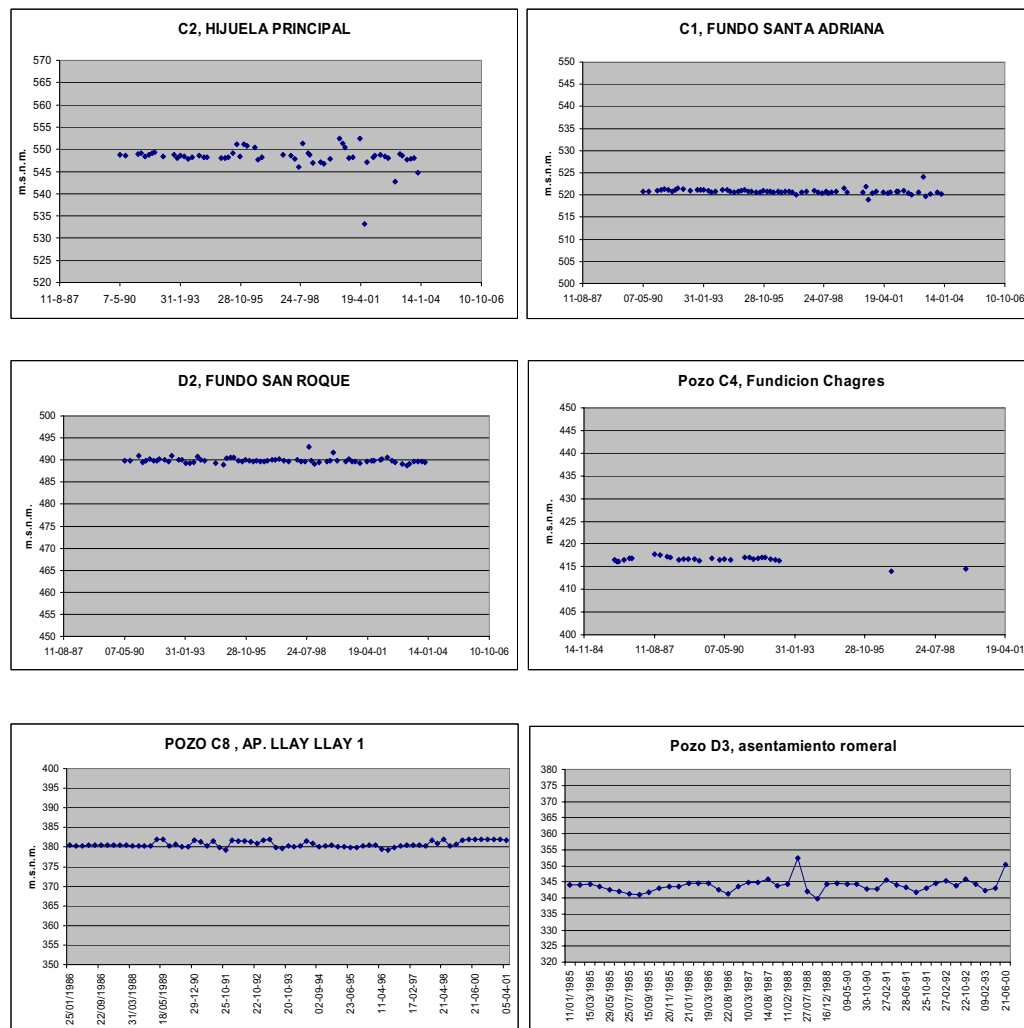


Figura 93: Gráficos de los pozos con registros de niveles de agua subterránea en el modelo sector 2, ACN-Las Vegas.

Tabla 50: Valores de niveles ingresados al modelo de flujo, MOD2

C8 Pozo AP LLAY		C1 Pozo Fundo		C2 Pozo Hijuela		C4 Pozo Fundicion		D2 Fundo San Roque		D3 Asentamiento	
DIA	COTA NIVEL OBS	DIA	COTA NIVEL OBS	DIA	COTA NIVEL OBS	DIA	COTA NIVEL OBS	DIA	COTA NIVEL OBS	DIA	COTA NIVEL OBS
39	380.33	39	520.73	39	548.74	39	416.6	39	489.81	39	344.35
129	380.47	129	520.76	129	548.61	129	416.48	129	489.89	129	344.35
272	381.94	269	521.02	332	548.99	332	416.96	269	491.02	212	342.89
332	381.68	332	521.17	390	549.09	390	417.07	332	489.43	272	342.78
390	380.53	390	521.27	453	548.31	453	416.6	390	489.9	332	345.46
453	381.75	453	521.06	515	548.8	515	416.8	453	490.31	390	344.16
515	380.24	515	520.78	571	549.15	572	417	515	489.81	453	343.2
572	379.62	571	521.14	613	549.32	613	416.99	571	489.89	516	341.87
613	382.01	610	521.42	759	548.37	697	416.7	613	490.23	572	343.07
697	381.93	697	521.25	935	548.8	759	416.47	697	489.97	614	344.53
759	381.84	814	520.89	989	548.03	814	416.39	759	489.71	697	345.41
814	381.67	935	521.14	1045	548.54	2420	413.9	814	490.99	815	343.74
935	381.17	989	521.22	1111	548.46	3475	414.45	935	489.97	935	345.73
989	382.05	1045	521.19	1173	547.75			989	490.09	991	344.38
1045	382.16	1118	520.89	1241	548.13			1045	489.28	1045	342.37
1111	380.09	1173	520.62	1355	548.61			1111	489.3	1110	342.97
1173	379.97	1241	520.77	1424	548.25			1173	489.53	3735	350.3
1298	380.52	1355	521.11	1488	548.21			1242	490.72		
1355	380.38	1424	521.09	1717	547.99			1298	489.96		
1424	380.58	1488	520.76	1787	548.1			1355	489.87		
1488	381.89	1543	520.68	1829	548.12			1543	489.29		
1543	381.31	1615	520.8	1909	549.1			1668	488.97		
1615	380.32	1668	520.88	1978	551.16			1717	490.47		
1668	380.65	1717	521.19	2027	548.33			1787	490.52		
1717	380.9	1787	520.85	2089	551.1			1829	490.65		
1787	380.41	1829	520.84	2151	550.7			1909	489.77		
1829	380.4	1909	520.63	2270	550.48			1978	489.63		
1909	380.14	1978	520.6	2334	547.69			2027	490.11		
1978	380.15	2027	520.93	2392	548.27			2089	489.8		
2027	380.55	2089	520.86	2749	548.77			2151	489.65		
2089	380.87	2151	520.81	2873	548.55			2202	489.77		
2151	380.75	2202	520.59	2943	547.75			2270	489.73		
2202	379.66	2270	520.77	3007	545.93			2334	489.66		
2270	379.53	2334	520.64	3069	551.28			2420	489.91		
2334	380.13	2420	520.86	3167	549.13			2460	490.08		
2420	380.45	2515	520.67	3236	548.83			2515	490.11		
2462	380.56	2579	520.09	3370	547.12			2579	490.15		
2515	380.58	2663	520.68	3426	546.8			2663	489.85		
2579	380.4	2740	520.76	3531	547.81			2740	489.76		
2663	380.35	2873	520.88	3678	552.5			2873	490.07		
2740	381.75	2943	520.6	3735	551.3			2943	489.7		
2872	380.94	3007	520.47	3775	550.44			3007	489.59		
2943	381.88	3069	520.69	3838	548.02			3069	493		
3069	380.2	3111	520.39	3904	548.17			3111	489.94		
3111	380.68	3167	520.63	4020	552.5			3167	489.08		
3184	381.83	3236	520.74	4104	533.2			3236	489.4		
3678	382	3370	521.43	4140	547.13			3370	489.7		
3735	382	3426	520.62	4240	548.25			3426	489.8		
3775	382	3678	520.64	4266	548.5			3475	491.7		
3806	381.93	3735	521.79	4357	548.8			3531	489.87		
3839	382	3775	519	4435	548.38			3678	489.76		
3904	382	3839	520.44	4485	548.11			3735	490.3		
4023	381.7	3904	520.77	4601	542.78			3775	489.7		
		4021	520.62	4686	548.88			3839	489.75		
		4104	520.42	4721	548.49			3904	489.27		
		4140	520.66	4805	547.64			4021	489.73		
								4104	489.83		

Laboratorio de Hidrología, Universidad Mayor

Para efectos de validar los balances generales del modelo de flujo, se mantuvieron las zonas de balance del modelo base utilizado, las cuales se muestran en la figura 94.

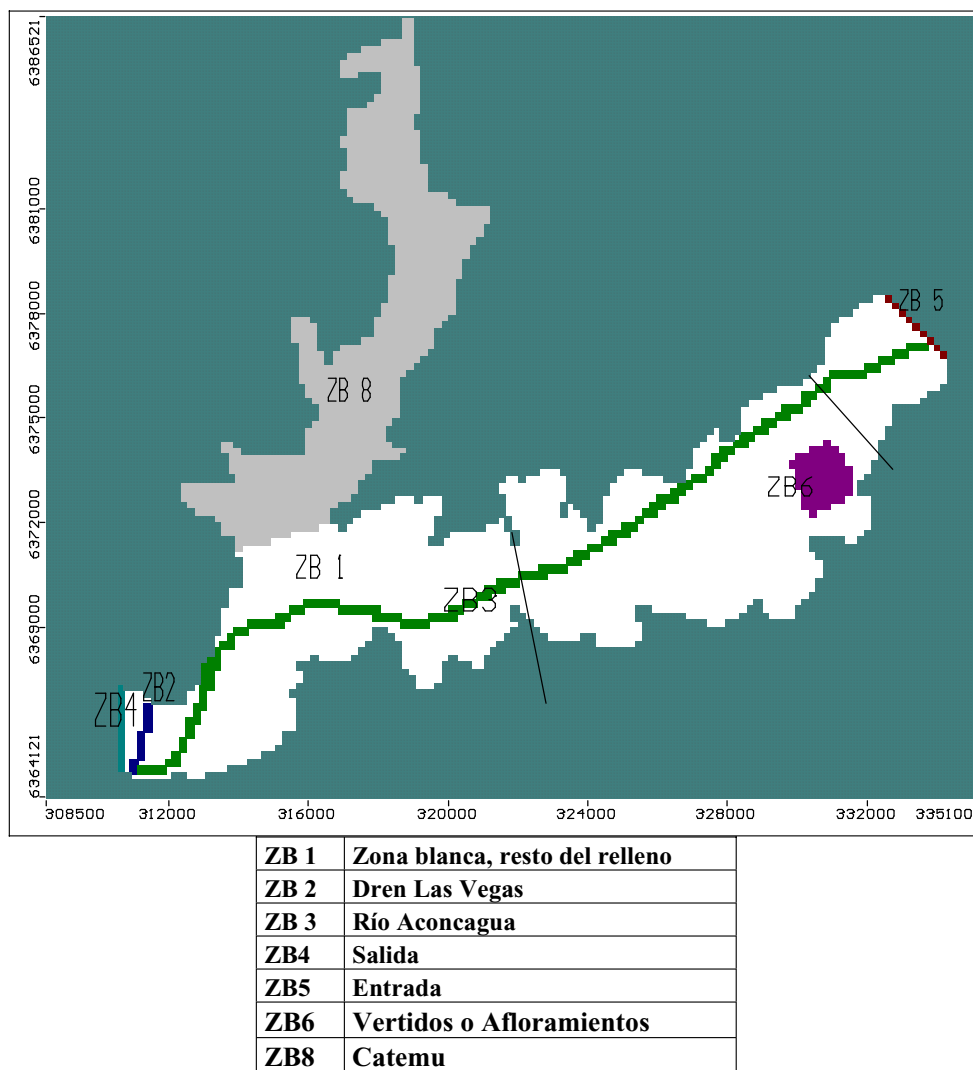


Figura 94: Zonas de Balance (ZB) utilizadas en el modelo de Flujo.

13.6.4 Implementación Modelos de Calidad Subterránea

13.6.4.1 Modelo de Calidad Subterránea: MOD 2/MT3D

a) Antecedentes para la Implementación y Calibración

En la zona bajo estudio, se decidió estudiar 5 contaminantes principales: Cobre, Manganeseo, Nitrato, Cloruros y Sulfatos.

Existe una serie de condiciones iniciales y de borde, asimismo como para el modelo de flujo, que condicionan y caracterizan el modelo de calidad, como por ejemplo, que el modelo de calidad, subrutina MT3D: Modelo Modular de Transporte Tridimensional, necesita las respuestas o resultados previos del modelo de flujo que caracterizarán las condiciones principalmente advectivas del sistema. Si se tiene por lo tanto, un modelo de flujo base bien implementado y calibrado, se debiera tener mayor confianza en la respuesta del sistema del punto de vista de sus calidades.

El primer paso para comenzar a implementar la subcomponente de calidad, es incorporar la ubicación y mediciones que se tengan de pozos de muestreo, para los contaminantes elegidos para la simulación.

Para los fines de este análisis, se realizaron 3 campañas de muestreo de los contaminantes conservativos, realizados por la Universidad Mayor en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2004.

En la Figura 95 se muestran las ubicaciones de los pozos de muestreo para el sector del Modelo 2 y en la tabla 51 la descripción de cada uno de los pozos, con sus coordenadas UTM.

La figura 96 muestra los pozos incorporados en el formato de Visual Modflow, en donde Cal 1, Cal 2, Cal 3 y Cal4 corresponden a pozos ficticios sólo para poder conocer la situación en la fase de simulación.

Las tablas 52 a y b, exponen los datos obtenidos en las campañas para cada uno de los contaminantes. Estos valores, fueron implementados en el modelo para los días 5290, 5350 y 5380 para las campañas 1 2 y 3, respectivamente. El formato de dicha se ha escogido así, para facilitar la comprensión posterior del análisis de calibración, donde los pozos se encuentran agrupados por sector y se puede evidenciar la aleatoriedad y variabilidad que siempre se tiene con las mediciones de calidad del agua subterránea, independiente de la forma y cautela de la medición.

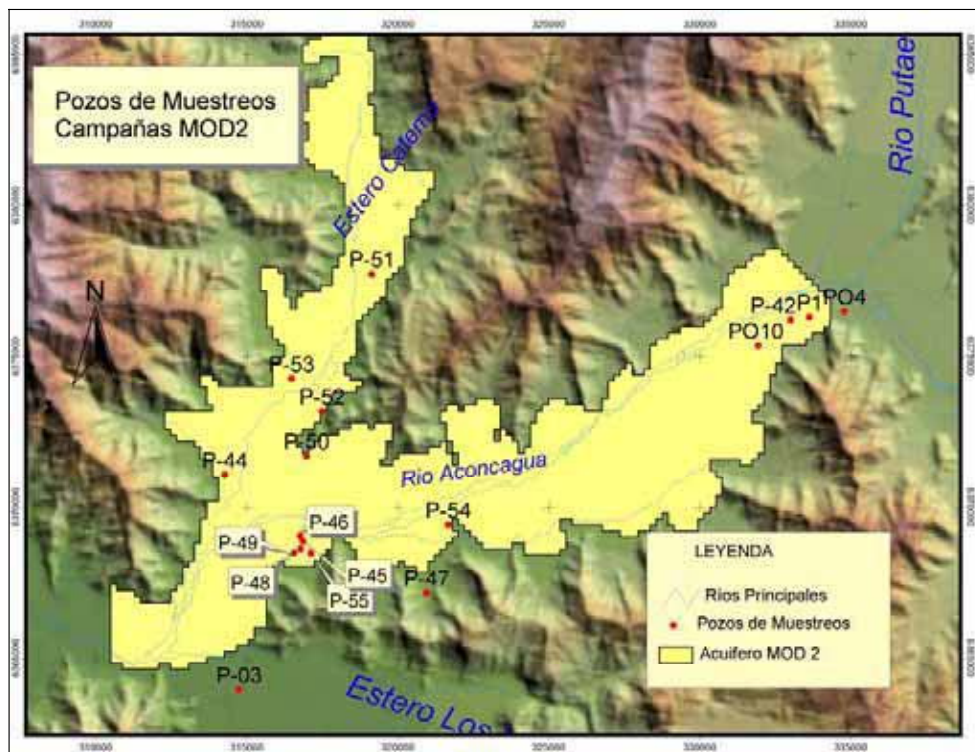


Figura 95: Pozos de Calidad muestreados en Sector ACN-Las Vegas

Tabla 51: Descripción de los pozos de muestreo de calidad subterránea.

Nro	CÓDIGO POZO	ESTE	NORTE	Descripción del Lugar	SECTOR_ MODELO
1	P1	333625	6376293	Las Tinajas. Panquehue.San Felipe.	Modelo 2
2	PO10	331926	6375352	Predio Rafael Hernández.	Modelo 2
3	P-42	333003	6376198	Comité de agua potable. El Escorial. Panq	Modelo 2
4	P-44	314260	6371073	Sociedad Agrícola San Antonio. Sta. Rosa	Modelo 2
5	P-45	316849	6368874	Fundición Chagres pozo I.	Modelo 2
6	P-46	316765	6369052	Fundición Chagres pozo II.	Modelo 2
7	P-48	316772	6368620	Chile tabaco. Chagres.	Modelo 2
8	P-49	316555	6368484	Población Chagres.	Modelo 2
9	P-50	316969	6371693	Fundo San Carlos.	Modelo 2
10	P-51	319131	6377729	Parcela 5. Lo Sala	Modelo 2
11	P-52	317353	6373211	Parcela El pimientto. Las Varillas.	Modelo 2
12	P-47	320528	6368280	Fundo Sta. Adela . Lo Campo	Modelo 2
13	P-53	316472	6374254	Parcela 53. La Calera. Catemu	Modelo 2
14	P-54	321669	6369411	Población 9 de octubre.Lo campo.	Modelo 2
15	P-55	317109	6368479	Lechería Santelices. Frente Fundición Cha	Modelo 2
16	PO4	334777	6376474	ISAF, condicion de entrada, borde	Modelo 2

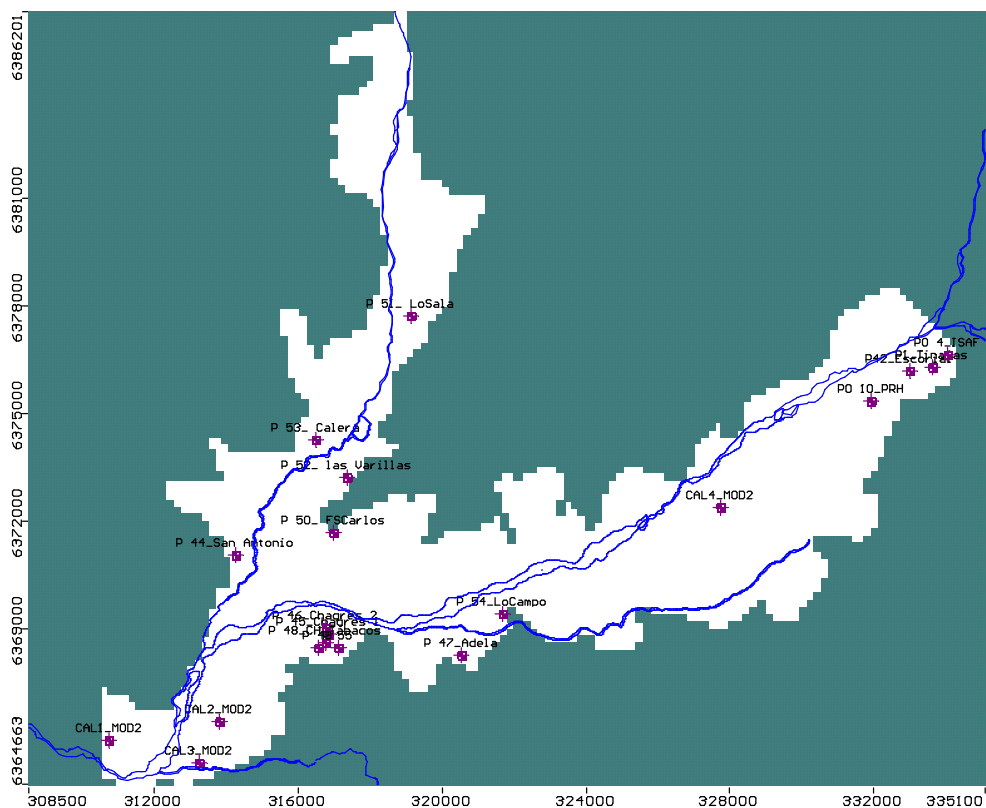


Figura 96: Pozos de Calidad ingresados en el modelo

Tabla 52a: Concentraciones obtenidas en las campañas para cada uno de los parámetros a modelar.

Pozo	Fecha Campaña	Cloruros mg/ L Cl	Nitrato mg/ L N-NO3	Sulfatos mg/ L SO ₄	Cobre mg/ L Cu	Manganeso mg/ L Mn
CATEMU						
P-51	14-10-2004	14.165	4.77	151	0.03	<0,01
P-51	15-11-2004	12.300	5.15	142	<,0,01	<,0,01
P-51	14-12-2004	11.400	4.39	86.4	<0,01	<0,01
P-53	14-10-2004	12.320	3.62	145	0.01	<0,01
P-53	15-11-2004	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
P-53	14-12-2004	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
P-52	14-10-2004	30.258	8.66	120	0.01	0.01
P-52	15-11-2004	29.600	8.74	255	0.03	0.01
P-52	14-12-2004	41.800	8.86	275	0.01	0.01
P-44	13-10-2004	13.767	2.9	106	0.05	0.06
P-44	15-11-2004	14.400	1.7	170	<,0,01	6.73
P-44	14-12-2004	15.600	0.33	53.9	0.02	0.92

S.I.: Sin Información. No se pudo medir.

Tabla 53b: Concentraciones obtenidas en las campañas para cada uno de los parámetros a modelar.
Continuación.

Pozo	Fecha Campaña	Cloruros mg/ L Cl	Nitrato mg/ L N-NO3	Sulfatos mg/ L SO ₄	Cobre mg/ L Cu	Manganeso mg/ L Mn
ANTES DE LA JUNTA ACN-CATEMU						
P-45	13-10-2004	13.912	2.56	92	0.06	<0,01
P-45	15-11-2004	15.200	2.64	111	<0,01	<0,01
P-45	14-12-2004	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
P-46	13-10-2004	14.574	2.9	94	0.05	<0,01
P-46	15-11-2004	16.700	2.67	181	<0,01	0.02
P-46	14-12-2004	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
P-48	14-10-2004	15.615	2.63	92	0.01	<0,01
P-48	30-11-2004	16.800	2.73	108	<0,01	<0,01
P-48	23-12-2004	11.300	2.36	147	0.01	0.003
P-49	14-10-2004	16.556	3.15	96	0.02	0.01
P-49	30-11-2004	17.900	3.69	109	<0,01	<0,01
P-49	15-12-2004	17.600	2.65	108	<0,01	<0,01
P-55	18-10-2004	17.926	4.63	93	0.06	0.01
P-55	30-11-2004	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
P-55	14-12-2004	16.500	3.92	122	0.01	0.01
P-50	14-10-2004	14.640	1.64	110	0.02	<0,01
P-50	30-11-2004	11.500	0.21	70.8	<0,01	<0,01
P-50	15-12-2004	12.100	0.014	76.1	<0,01	<0,01
ZONA MEDIA VALLE RIO ACONCAGUA						
P-54	18-10-2004	22.754	4.14	93	0.03	<0,01
P-54	30-11-2004	20.900	4.64	143	<0,01	<0,01
P-54	14-12-2004	21.700	3.26	239	0.01	0.01
P-47	13-10-2004	18.252	4.14	90	0.03	0.01
P-47	15-11-2004	18.800	3.61	142	<0,01	<0,01
P-47	14-12-2004	14.800	3.94	89.7	<0,01	<0,01
ZONA ENTRADA AL VALLE						
PO4	13-10-2004	20.486	6.67	150	0.05	0.01
PO4	30-11-2004	19.300	13.7	146	<0,01	<0,01
PO4	14-12-2004	17.100	5.59	97.5	<0,01	0.01
P1	13-10-2004	15.452	2.4	90	0.02	0.01
P1	15-11-2004	24.100	3.05	209	<0,01	<0,01
P1	15-12-2004	16.800	1.95	102	<0,01	<0,01

b) Concentraciones Iniciales

Para determinar la concentración inicial de simulación en la calibración, se optó por considerar tanto las tres campañas del 2004, como también las campañas anteriores realizadas por la Universidad, para el proyecto global, determinando concentraciones en promedio bajas. Así se determinaron zonas de isoconcentraciones para cada uno de los parámetros, cuya interpolación fue realizada por el software y que a manera de ejemplo, se muestran dos de estas superficies en las figuras 97 y 98.

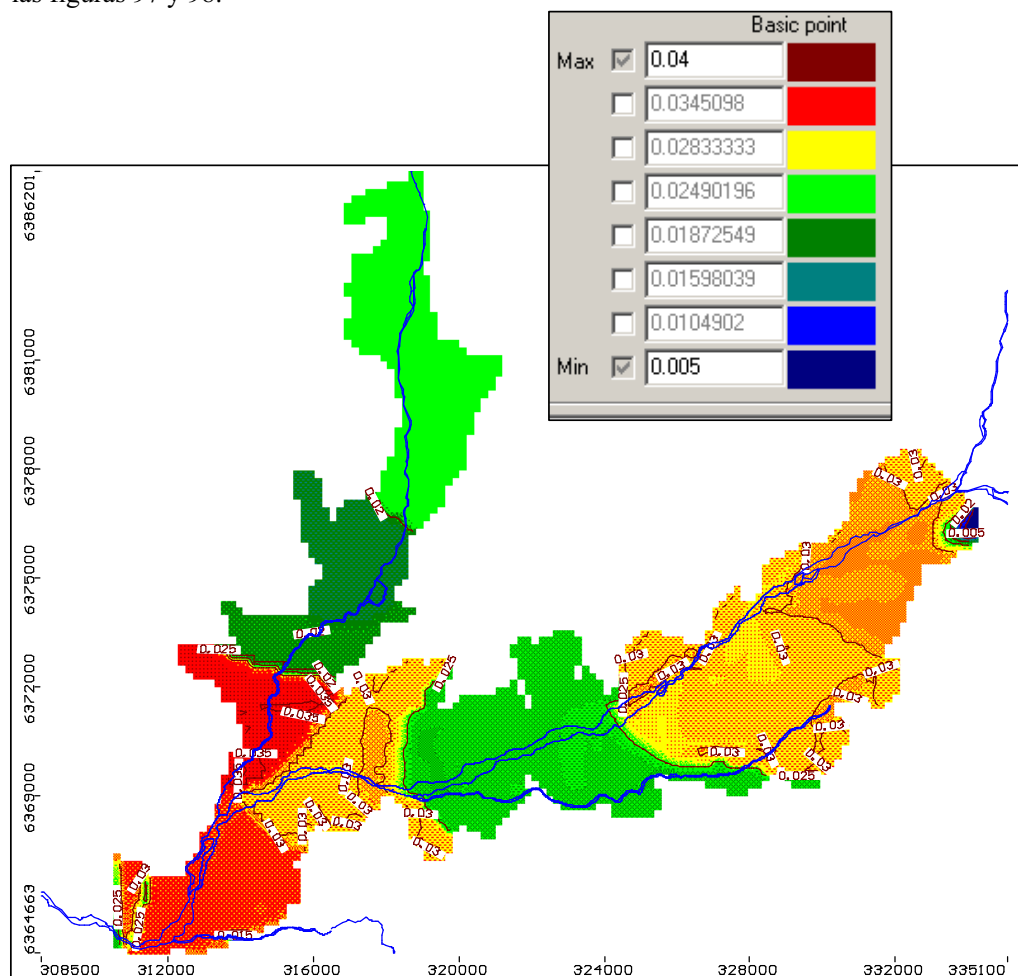


Figura 97: Isoconcentraciones iniciales de Cobre -Cu. (mg/L)

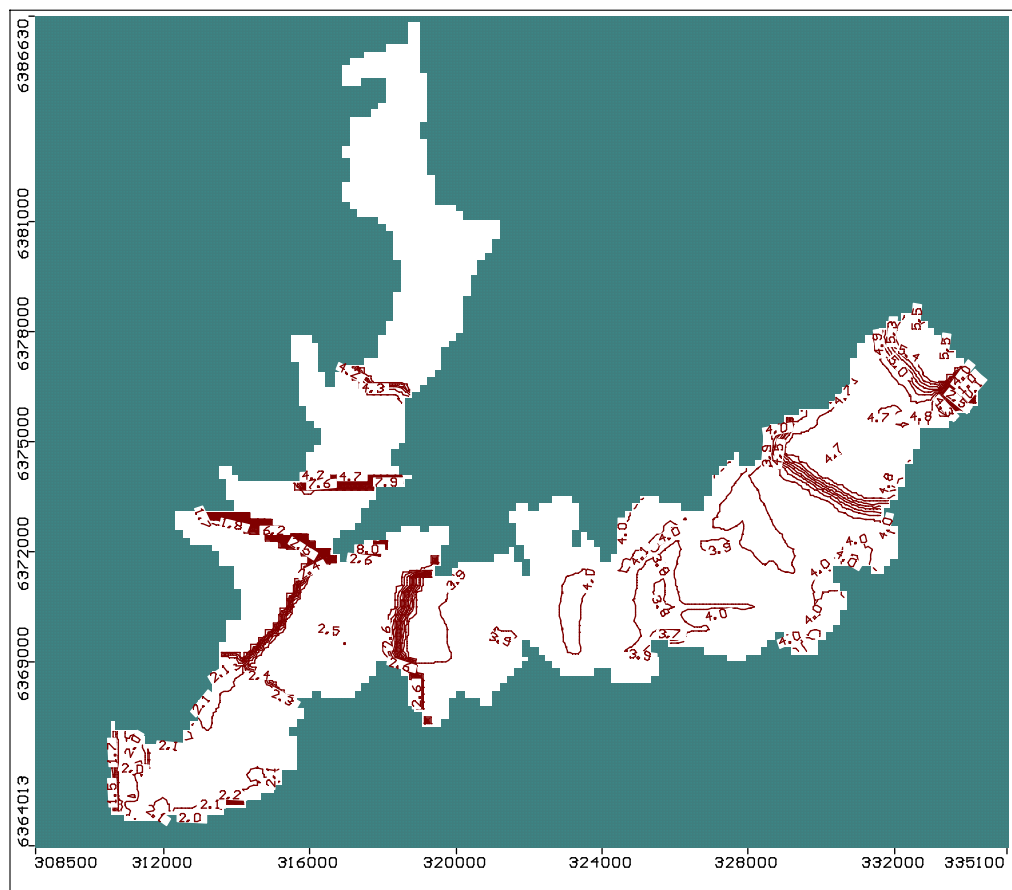


Figura 98: Isoconcentraciones iniciales de Nitrato-NO₃. (mg/L)

c) Dispersividad

El coeficiente de dispersividad longitudinal α_L (L) se determinó teniendo como referencia el comportamiento general de la cuenca del Aconcagua, en donde el termino advectivo y por ende, la velocidad advectiva tiene total importancia en relación con los demás términos de la ecuación de transporte descrita previamente.

Basados en estudios y pruebas de terreno anteriores a este estudio, se tiene la certeza que la velocidad subterránea del acuífero principal del Aconcagua es de un régimen principalmente advectivo y de rangos superiores a los 5 m/d. Para los fines de este estudio se realizó un escenario de prueba en donde se aplicó la herramienta Modpath o seguimiento de partículas, las cuales entregaron velocidades advectivas del orden de los 10 m/d en el acuífero principal (ACN _Las Vegas y de 0.5 m/d en la región de Catemu. Para la zona baja, confluencia del Catemu con

Aconcagua las velocidades se reducirían dando origen a los afloramientos ya conocidos como Dren Las Vegas.

La velocidad subterránea del agua, también tiene directa relación con las características físicas del suelo (porosidad, tortuosidad del medio, permeabilidad, etc.), lo que coincide totalmente con lo representado en la figura 99, con las permeabilidades del valle sector 2.

Así, debido a la falta de información respecto a la dispersividad del suelo, se adoptaron dispersividades longitudinales de 20, 10 y 2 (m) en la zona 2 del Aconcagua, lo que indicaría una primera aproximación al valor de las dispersividades longitudinales del medio. En la figura 87 se aprecia la zonificación implementada.

Para las dispersividades transversales y verticales, se adoptó la relación por defecto que se asume como $(\alpha_H/\alpha_L)=0.1$ y $(\alpha_T/\alpha_L)=0.01$.

El coeficiente de Difusión, se adoptó como cero, en base a las hipótesis de trabajo ya descritas.

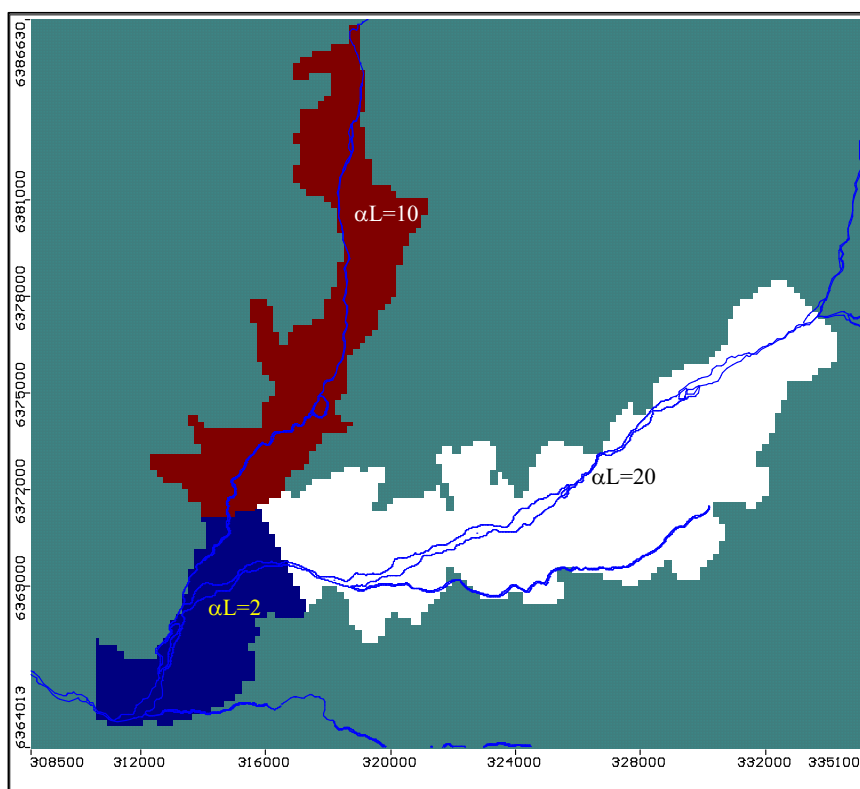


Figura 99: Dispersividades adoptadas en la calibración.

d) Condiciones de Borde

El MT3DMS (Modelo Modular de transporte tridimensional Multi-Especies), contiene cuatro tipos de condiciones de borde que pueden ser implementadas, éstas son las siguientes:

- Concentración constante
- Recarga constante (carga difusa)
- Carga puntual y
- Evapotranspiración de concentración.

Claramente, la condición de evapotranspiración de concentración se utiliza cuando se tienen mediciones exactas de esta componente, para cada uno de los parámetros y cuando además, se tienen incorporados en el modelo de flujo zonas de vegas o salares, lo cual no es el caso del presente estudio.

La condición de carga puntual, es exactamente eso, cuando en la región en análisis existen registros de descargas puntuales de contaminantes al acuífero. Para el Modelo 2 y según los antecedentes del estudio, no se cuenta con información de este tipo de condición.

Concentración constante

Mejor denominado *Concentración Específica*, ya que a pesar que las otras dos condiciones, reciben el apellido de constante, en realidad pueden ser variables, y consiste en indicar en los tiempos de simulación concentraciones que pueden o no variar en el tiempo, dependiendo de la información con que se cuente. La condición de concentración constante, se puede aplicar cuando se tiene la posibilidad de que algún punto esté periódicamente indicando una concentración similar en una cierta zona.

En el sector 2 de modelación, se optó por esta condición en el sector de entrada subterránea (Cond 1, figura 99), confluencia del río Aconcagua con Putaendo. Para ello, se contó con información del pozo PO4 Isaf y tomando en cuenta además, como referencia, las mediciones de la estación superficial A12. Los valores adoptados para esta condición se muestran en la tabla 54 y tuvieron que imponerse desde el día inicio al día final por la carencia de información durante todo el período de análisis.

La misma condición fue aplicada en la zona de entrada desde el sector de Llay Llay (Cond. 2, figura 88), tomando como referencia el pozo PO3 de las campañas anteriores realizadas durante la ejecución del proyecto.

Tabla 54: Condiciones de Concentración Constante.

Zona	Día inicio (día)	Día final (día)	Cu (mg/L)	Mn (mg/L)	NO3 (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)
(1) Entrada ACN	0	5389	0.03	0.009	5.5	18	150
(2) Entrada Llay Llay	0	5389	0.01	0.01	6.0	5.7	20

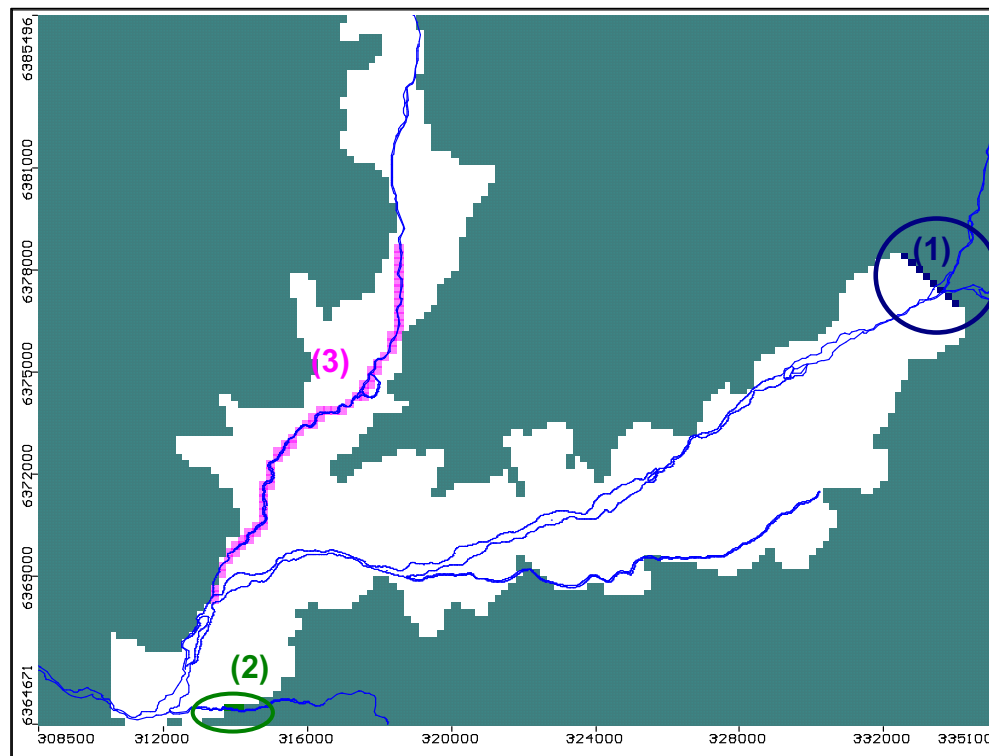


Figura 100: Condiciones de Borde de Concentración.

Recarga Constante

La condición de recarga constante o mejor denominado *Recarga Específica*, implica en palabras simples, que existe un proceso de retardo y/o disolución desde que se indica una concentración hasta el momento que llega al acuífero.

Esta condición se aplicó a la zona del río Catemu, básicamente en el lecho del río, tomando como referencia los datos obtenidos en las campañas de la estación superficial A14F, ubicada en el río Catemu, antes de la Junta con el río Aconcagua. Los datos adoptados se indican en la tabla 55.

Tabla 55: Condiciones de Recarga Constante.

Zona	Día inicio (día)	Día final (día)	Cu (mg/L)	Mn (mg/L)	NO3 (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)
(3) Río Catemu	0	5389	0.02	0.02	3	9	120

Es importante señalar y recordar que, para la zona de análisis modelo sector 2 Aconcagua –Las Vegas, el río Aconcagua se modela como una condición tipo dren, por lo tanto, es inútil aplicar algún tipo de recarga de concentración en el lecho del río Aconcagua, ya que todo lo que se indique, será totalmente anulado por el proceso de afloramiento desde el acuífero al río.

e) Patrón de ajuste para la calibración del Modelo de Calidad, MT3D-MOD 2

Para poder calibrar la fase de calidad subterránea, se cuenta con medición de las concentraciones de los cinco contaminantes seleccionados, con el objeto de contrastarlos con los valores simulados por el modelo.

Para lo anterior, se utilizaron los valores de las concentraciones obtenidas en las tres campañas de muestreo de los contaminantes conservativos, realizados en los meses de octubre, noviembre y diciembre del 2004. Dichas valores se presentan en el capítulo correspondiente a resultados de calidad de aguas subterráneas.

El proceso de calibración se basó en encontrar la sensibilidad del parámetro de dispersividad y jugar con el valor inicial de las concentraciones básicamente.

Para este estudio, no se contó con información de concentraciones descompuestas para cada uno de los parámetros simulados producto del riego, es decir, de las aplicaciones de los fertilizantes y otros productos. Esta información es vital para poder reproducir las variabilidades diarias o mensuales para un modelo de escala regional como éste. Debido a lo anterior, se intentará solamente reproducir un valor medio de concentraciones para cada uno de los parámetros, esperando que los futuros estudios de calidad, si contemplen campañas periódicas y que cubran todos las componentes en una misma escala de tiempo.

13.6.4.2 Modelo de Calidad Subterránea: MOD 3/MT3D

a) Antecedentes para la Implementación y Calibración

En la zona bajo estudio, se decidió estudiar 5 contaminantes principales: Cobre, Manganeseo, Nitrato, Cloruros y Sulfatos.

Existen una serie de condiciones iniciales y de borde, asimismo como para el modelo de flujo, que condicionan y caracterizan el modelo de calidad, como por ejemplo, que el modelo de calidad, subrutina MT3D: Mass Transport 3 Dimensions necesita las respuestas o resultados previos del modelo de flujo que caracterizarán las condiciones principalmente advectivas del sistema. Si se tiene por lo tanto, un modelo de flujo base bien implementado y calibrado, se debiera tener mayor confianza en la respuesta del sistema del punto de vista de sus calidades.

El primer paso para comenzar a implementar la subcomponente de calidad, es incorporar la ubicación y mediciones que se tengan de pozos de muestreo, con los contaminantes elegidos para la simulación.

Para los fines de este análisis, se realizaron 3 campañas de muestreo de los contaminantes conservativos, realizados por la Universidad Mayor en los meses de septiembre, noviembre y diciembre del año 2004.

En la Figura 101 se muestran las ubicaciones de los pozos de muestreo para el sector del Modelo 3 y en la tabla 56 la descripción de cada uno de los pozos, con sus coordenadas UTM.

La figura 102 muestra los pozos incorporados en el formato de Visual Modflow.

En la tabla se muestran los datos obtenidos en las campañas para cada uno de los contaminantes. Estos valores, fueron implementados en el modelo para los días 5290, 5350 y 5380 para las campañas 1, 2 y 3 respectivamente. El formato de la tabla 7.3.2.2 se ha escogido así para facilitar la comprensión posterior del análisis de calibración, en donde los pozos se encuentran agrupados por sector y se puede evidenciar la aleatoriedad y variabilidad que siempre se tiene con las mediciones de calidad del agua subterránea, independiente de la forma y cautela de la medición.

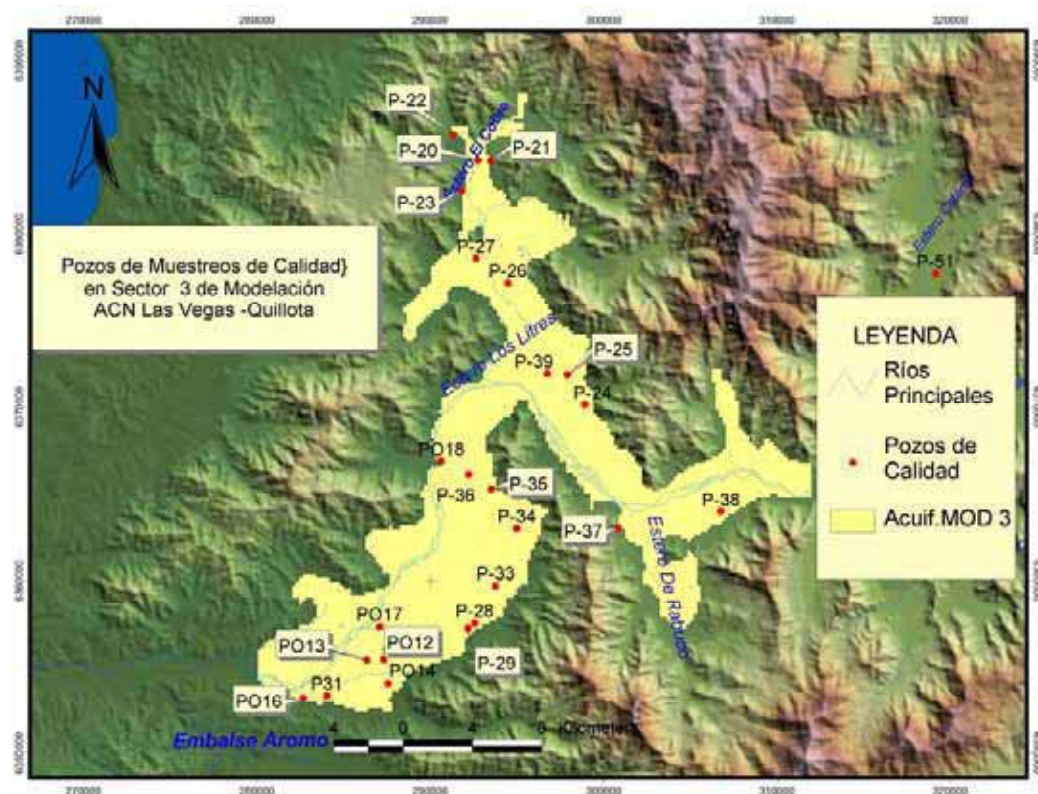


Figura 101: Pozos de Calidad muestreados en Sector ACN-Quillota

Tabla 56: Descripción de los pozos de muestreo de calidad subterránea.

Nro	CÓDIGO POZO	COORDENADAS UTM		DESCRIPCIÓN LUGAR	MODELO
		ESTE	NORTE		
1	PO14	287557	6354055	Fundo Sta. Rosa.San Pedro	MODELO 3
2	PO16	282666	6353206	Parcela 7. Ex Fundo El Palomar.San Isidro	MODELO 3
3	P-20	352812	6372954	Plantel de cerdos. Aguas Claras. Los Andes.	MODELO 3
4	P-21	348880	6359700	El Pedrero. Calle larga.Los Andes.	MODELO 3
5	P-22	339935	6363257	Las Bandurrias de Rinconada.Los Andes.	MODELO 3
6	P-23	291816	6382517	El Rungue. El Melón.	MODELO 3
7	P-24	298910	6370142	Jardín Las palmeras. Hijuelas	MODELO 3
8	P-25	297905	6371845	Predio El caqui. Parcela 10. La calera	MODELO 3
9	P-27	292638	6378619	Fruticola Nogales Ltda.	MODELO 3
10	P-28	292554	6357490	Pozo Cardenas.	MODELO 3
11	P 57	292180	6357183	Pozo soya	MODELO 3
12	P-33	293753	6359710	Inversiones Quintil s.a	MODELO 3
13	P-34	294980	6363006	Pocochay.	MODELO 3
14	P-35	293521	6365292	Parcela "A" La Verbena.	MODELO 3
15	P-36	292220	6366104	Fundo la Cruz.	MODELO 3
16	P-37	300804	6363008	Fundo La Leona. Rabuco.Ocoa.	MODELO 3

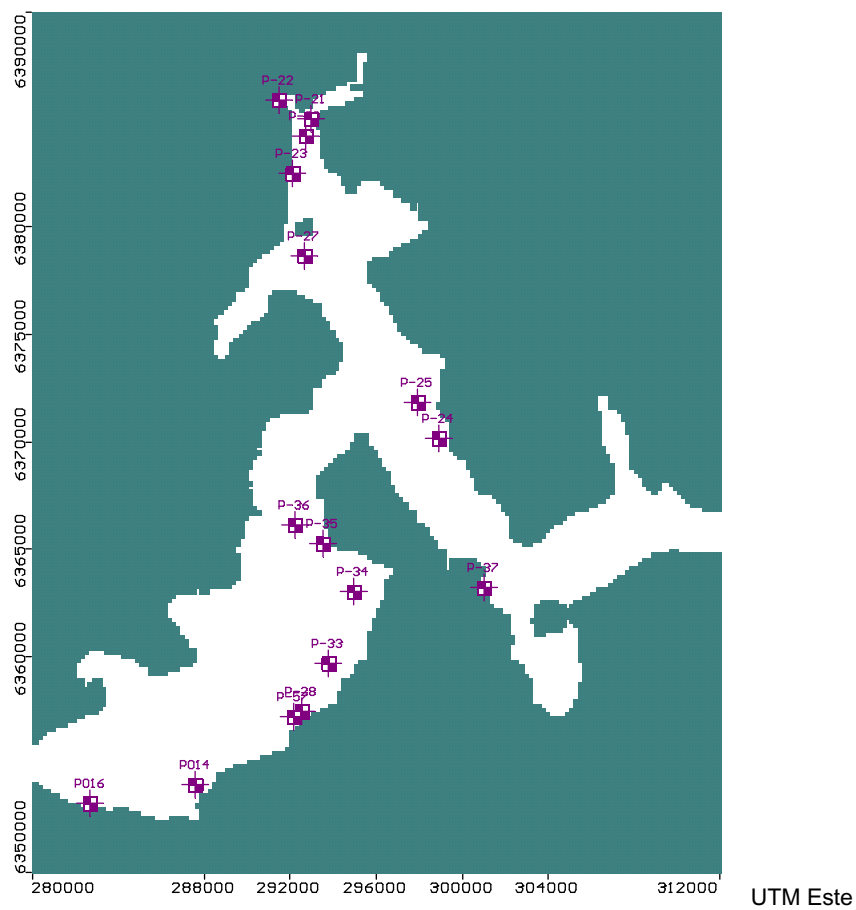


Figura 102: Pozos de Calidad ingresados en el modelo

Tabla 57: Concentraciones muestreadas de cada parámetro a modelar

Pozo	Fecha	Cloruros mg/ L Cl	Nitrato mg/ L N-NO3	Sulfatos mg/ L SO ₄	Cobre mg/ L Cu	Manganeso mg/ L Mn
PO14	15/09/2004	30.10	5.52	216.38	0.09	0.05
PO16	15/09/2004	83.50	0.18	285.88	<0,01	0.66
P-20	14/09/2004	26.90	2.09	210.01	0.01	0.00
P-21	14/09/2004	55.60	6.2	255.19	0.01	0.01
P-22	14/09/2004	18.30	3.81	99.38	0.00	0.01
P-23	14/09/2004	16.70	9.02	104.60	0.01	0.00
P-24	14/09/2004	11.20	5.41	142.53	0.00	0.004
P-25	14/09/2004	12.10	3.38	128.05	0.01	0.03
P-27	14/09/2004	13.90	0.1	116.47	0.00	0.09
P-28	15/09/2004	14.10	10.49	172.36	0.01	0.02
P 57	15/09/2004	15.20	7.87	177.00	0.01	0.01
P-33	15/09/2004	21.40	14.82	196.98	<0,01	0.01
P-34	15/09/2004	34.50	2.75	224.49	<0,01	0.02
P-35	15/09/2004	33.50	11.3	222.75	0.01	0.03
P-36	15/09/2004	22.70	4.57	200.45	0.01	0.02
P-37	27/09/2004	14.00	2.16	115.89	0.02	<0,01
PO14	23/11/2004	23.0	5.83	152	<,0,01	<,0,01
PO16	23/11/2004	132.0	0.18	200	0.01	0.41
P-20	22/11/2004	36.8	1.5	435	0.01	<,0,01
P-21	22/11/2004	48.3	8.93	265	<,0,01	<,0,01
P-22	22/11/2004	22.1	4.71	152	<,0,01	0.02
P-23	22/11/2004	23.9	9.83	164	<,0,01	<,0,01
P-24	22/11/2004	19.3	6.31	170	<,0,01	<,0,01
P-25	22/11/2004	14.9	4.03	172	<,0,01	<,0,01
P-27	22/11/2004	22.0	0.24	145	<,0,01	0.19
P-28	23/11/2004	26.4	14.4	173	0.02	<,0,01
P-57	23/11/2004	25.2	14.7	192	0.02	0.14
P-33	22/11/2004	23.6	2.36	205	<,0,01	<,0,01
P-34	24/11/2004	23.6	2.36	205	<,0,01	<,0,01
P-35	24/11/2004	29.4	4.47	234	0.02	<,0,01
P-36	24/11/2004	25.3	9.26	184	0.02	<,0,01
P-37	30/11/2004	23.6	5.29	221	0.02	<,0,01
PO14	22/12/2004	14.5	4.95	134	<0,01	<0,01
PO16	22/12/2004	96.7	<0,1	190	<0,01	0.36
P-20	21/12/2004	29.3	1.25	393	<0,01	<0,01
P-21	21/12/2004	43.7	6.33	237	<0,01	<0,01
P-22	21/12/2004	19.2	2.47	71.2	<0,01	0.01
P-23	21/12/2004	15.4	6.87	91.0	<0,01	<0,01
P-24	21/12/2004	16.4	5.5	79.4	<0,01	<0,01
P-25	21/12/2004	11.7	3.22	111	<0,01	<0,01
P-27	21/12/2004	17.3	0.1	94.3	0.02	0.13
P-28	22/12/2004	14.2	12.2	162	<0,01	<0,01
P_57	23/12/2004	14.8	4.98	164	0.01	0.1
P-33	23/12/2004	17.0	14.5	173	<0,01	<0,01
P-34	22/12/2004	21.4	4.19	205	<0,01	<0,01
P-35	22/12/2004	18.5	8.64	163	<0,01	<0,01
P-36	22/12/2004	16.9	4.59	134	<0,01	<0,01
P-37	23/12/2004	7.7	1.94	81	0.01	<0,01

b) Concentraciones Iniciales

Para determinar la concentración inicial de simulación en la calibración, se optó por considerar las tres campañas del 2004, y también las campañas anteriores realizadas por la Universidad Mayor, para el proyecto global, determinando concentraciones promedio. Así se determinaron zonas de isoconcentraciones para cada uno de los parámetros, cuya interpolación fue realizada por el software y que a manera de ejemplo se muestran 2 de estas superficies en las figuras 103 y 104.

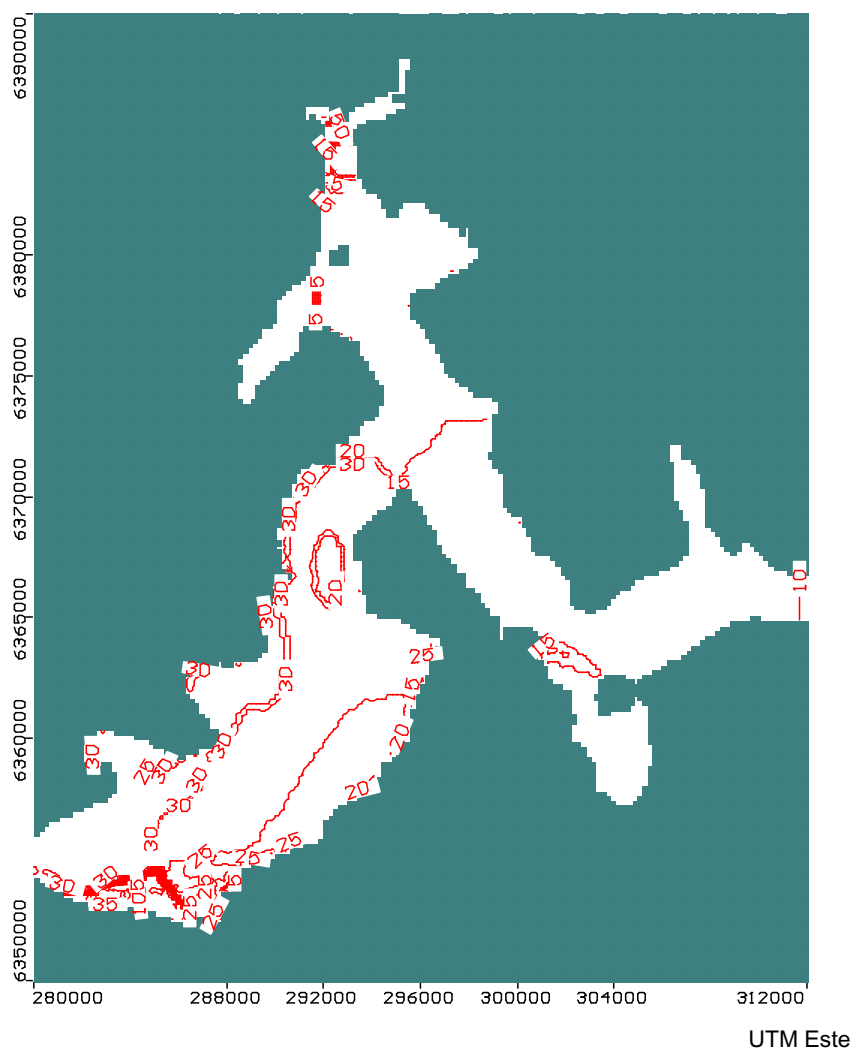


Figura 103: Isoconcentración Inicial de Cloruro (mg/L)

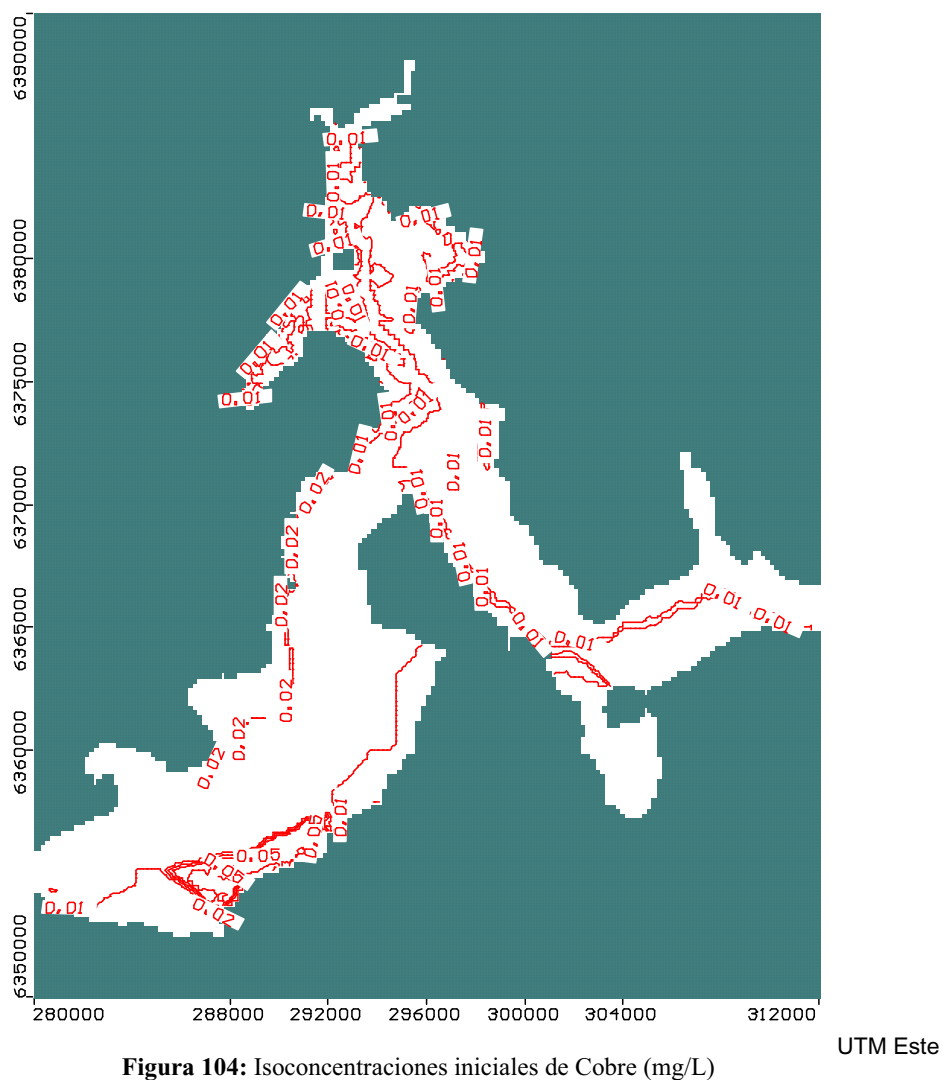


Figura 104: Isoconcentraciones iniciales de Cobre (mg/L)

c) Dispersividad

El coeficiente de dispersividad longitudinal α_L (L) se determinó teniendo como referencia el comportamiento general de la cuenca del Aconcagua, en donde el termino advectivo y por ende, la velocidad advectiva tiene total importancia en relación con los demás términos de la ecuación de transporte.

Basados en estudios y pruebas de terreno anteriores a este trabajo, se tiene la certeza que la velocidad subterránea del acuífero principal del Aconcagua es de un régimen principalmente advectivo y de rangos superiores a los 5 m/d. Para los fines de este estudio se realizó un escenario de prueba en donde se aplicó la herramienta Modpath o seguimiento de partículas, las cuales entregaron velocidades advectivas del orden de los 6-8 m/d en el acuífero principal (ACN _Quillota).

La velocidad subterránea del agua, también tiene directa relación con las características físicas del suelo (porosidad, tortuosidad del medio, permeabilidad, etc.), lo que coincide totalmente con lo representado en la figura 103, con las permeabilidades del valle sector 3.

Así, debido a la falta de información respecto a la dispersividad del suelo, se adoptó para las dispersividades longitudinales un valor de 10 (m) en la zona 3 del Aconcagua, lo que indicaría una primera aproximación al valor de las dispersividades longitudinales del medio.

Para las dispersividades transversales y verticales, se adoptó la relación por defecto que se asume como $(\alpha_H/\alpha_L)=0.1$ y $(\alpha_T/\alpha_L)=0.01$.

El coeficiente de Difusión, se adoptó como cero, en base a las hipótesis de trabajo ya explicadas.

d) Condiciones de Borde

El MT3DMS contiene 4 tipos de condiciones de borde que pueden ser implementadas, éstas son: Concentración constante, Recarga constante (carga difusa), Carga puntual y evapotranspiración de concentración.

Claramente, la condición de evapotranspiración de concentración se utiliza cuando se tienen mediciones exactas de esta componente para cada uno de los parámetros y cuando además, se tienen incorporados en el modelo de flujo zonas de vegas o salares, lo cual no es el caso de este estudio.

La condición de carga puntual, es exactamente eso, cuando en la región en análisis existen registros de descargas puntuales de contaminantes al acuífero. Para el Modelo 3 y según los antecedentes del estudio, no se cuenta con información de este tipo de condición.

Concentración Constante

Las otras dos condiciones, reciben el apellido de constante, pero en realidad pueden ser variables, y consiste en indicar en los tiempos de simulación concentraciones que pueden o no variar en el tiempo, dependiendo de la información con que se cuente. La condición de concentración constante, se puede aplicar cuando se tiene la posibilidad de que algún punto esté periódicamente indicando una concentración similar en una cierta zona. En el sector 3 de modelación, se optó por esta condición en siete sectores, los que se detallan en la tabla 58 con sus respectivos valores. El criterio utilizado para definir estos puntos recae en el hecho que en esos sectores los valores de concentración para a lo menos alguno de los parámetros se escapa de la media y en el caso de la

condición de entrada se debe a que son valores del orden de los que arrojó el modelo de calidad del sector inmediatamente aguas arriba (sector Las Vegas).

En la figura 105 se puede observar la distribución espacial de los zonas asignadas con condiciones de concentración constante.

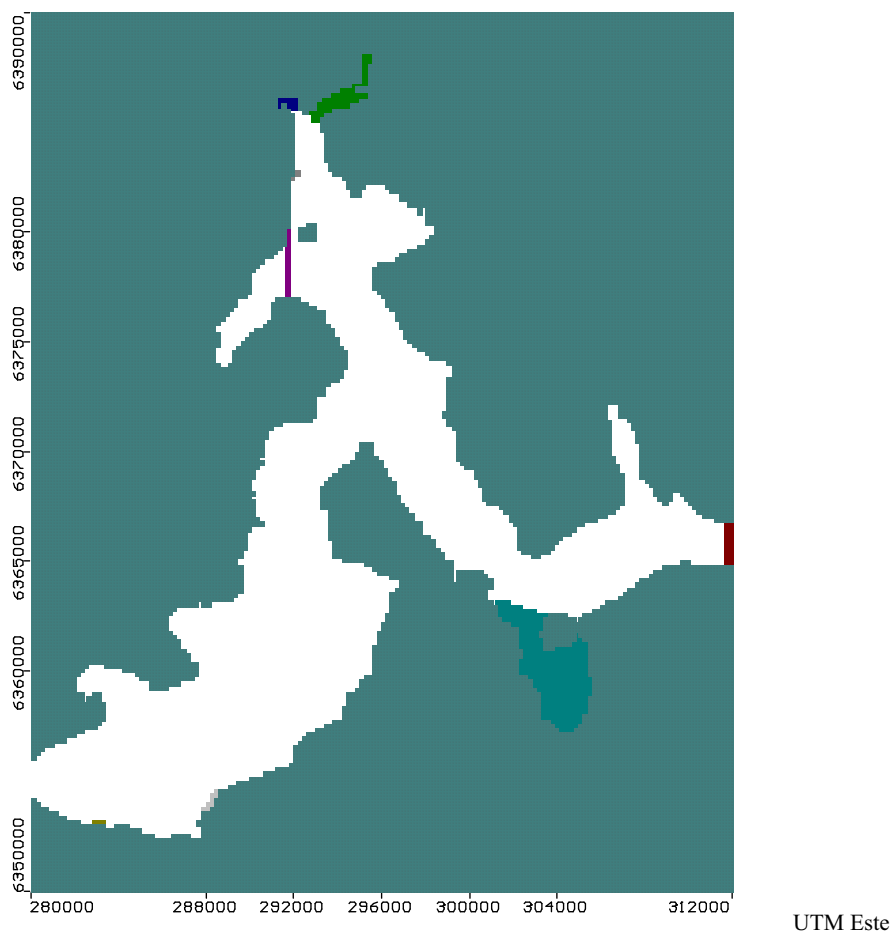


Figura 105: Condiciones de Borde de Concentración

Recarga Constante

La condición de recarga implica, en palabras simples, que existe un proceso de retardo y/o disolución desde que se indica una concentración hasta el momento que llega al acuífero.

Esta condición se aplicó a la zona del río Aconcagua, estero Los Litres y El Cobre, estero Rabuco y por último al estero San Isidro básicamente en el lecho de los cauces, tomando como referencia los datos obtenidos en las campañas de muestreo superficial. Así, para adoptar cifras conservadoras los valores asignados son una fracción de la calidad muestreada en los cauces superficiales.

La figura 106 muestra la distribución de condiciones de recarga constante asignadas al modelo 3 ACN-Quillota.

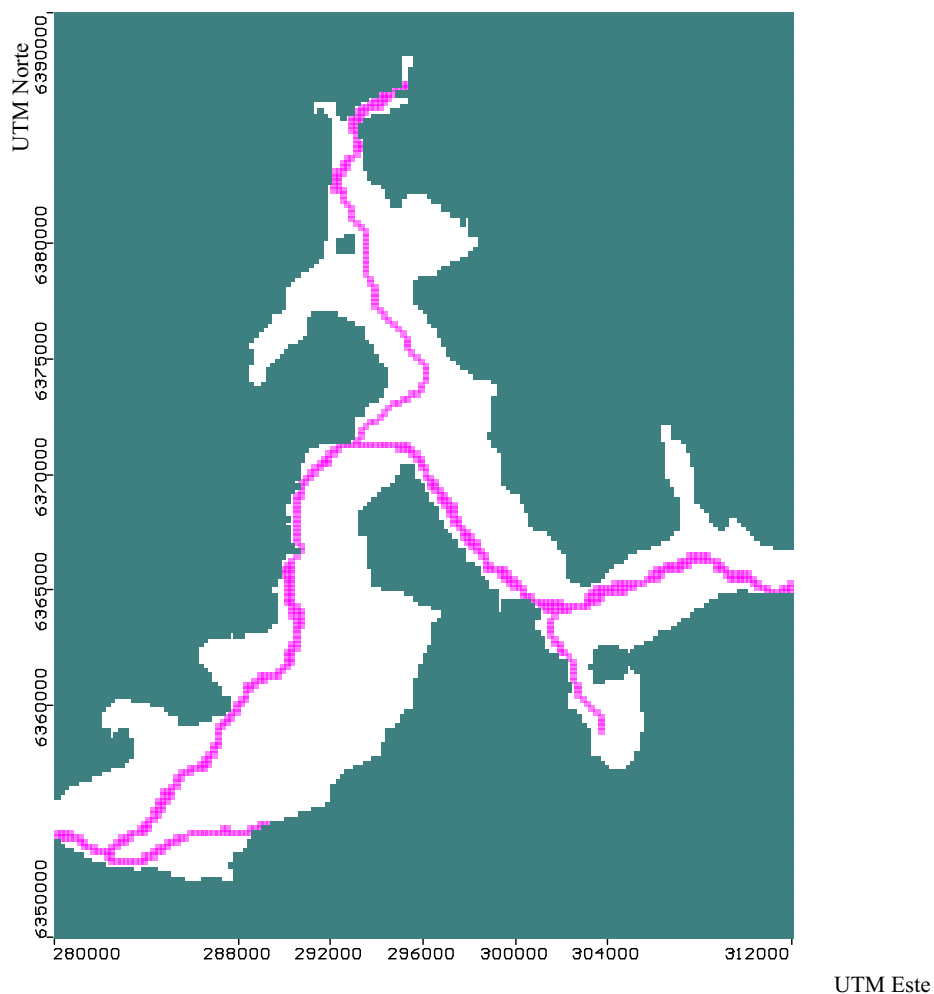


Figura 106: Distribución de Recarga de Concentraciones en el Modelo 3

e) Patrón de ajuste para la calibración del Modelo de Calidad, MT3D-MOD 3

Para poder calibrar la fase de calidad subterránea, se cuenta con medición de las concentraciones de los 5 tipos de contaminantes elegidos, con el objetivo de contrastarlos con los valores simulados por el modelo.

Para lo anterior, se utilizaron los valores de las concentraciones obtenidas en las 3 campañas de muestreo de los contaminantes conservativos, realizados por la Universidad Mayor en los meses de septiembre, noviembre y diciembre del 2004. Los valores se presentan en la tabla 57.

El proceso de calibración se sustenta en encontrar la sensibilidad del parámetro de dispersividad, cambios en la asignación de valores de concentraciones iniciales y en caso de ser necesario cambios en la permeabilidad del relleno, cuidando de no alterar, en forma abrupta el modelo de flujo.

Para este estudio, no se contó con información de concentraciones descompuestas para cada uno de los parámetros simulados producto del riego, es decir, de las aplicaciones de los fertilizantes y otros productos. Esta información es vital para poder reproducir las variabilidades diarias o mensuales para un modelo de escala regional como éste. Debido a lo anterior, se intentará solamente reproducir un valor medio de concentraciones para cada uno de los parámetros, esperando que los futuros estudios de calidad, si contemplen campañas periódicas y que cubran todos las componentes en una misma escala de tiempo.

13.7 REFERENCIAS

VARGAS, J. & MELLADO, M. 1994. "Modelos de Calidad de Agua Fluvial". Terceras Jornadas de Hidráulica Fco. Javier Domínguez.

ZAMBRANO, M. 1999. "Elaboración de un Programa Computacional para Modelación unidimensional de Calidad de Agua en Ríos". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción.