



UNIVERSIDAD MAYOR

GUÍA METODOLÓGICA

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, JULIO 2005

GUÍA METODOLÓGICA

1. INTRODUCCIÓN

La Guía metodológica que se presenta a continuación, tiene como objetivo facilitar el uso de la Metodología desarrollada, con el objeto de evaluar y mitigar la contaminación de aguas y suelos de una cuenca hidrográfica, la cual se encuentra descrita en detalle en el tomo I del informe final del proyecto: **“Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelo: Aplicación a la cuenca del río Aconcagua”**.

La presente Guía entrega una secuencia de los aspectos metodológicos ordenados por capítulos, en forma sintética, con el objeto de orientar al lector en la consulta del informe completo.

El desarrollo de la metodología consideró cumplir objetivos generales y específicos, mediante la ejecución de tres fases que se explican a continuación.

1.1 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 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 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 efectuar el análisis y procesamiento de la información, sobre la base de criterios espaciales, temporales y temáticos.

La metodología está descrita en 13 capítulos, los cuales se relacionan directamente con el cumplimiento de los objetivos específicos. Los resultados de la aplicación de la metodología, se entregan en los tomos IIA y IIB y finalmente en el tomo III se adjuntan los anexos correspondientes.

En la figura 1, se puede observar el diagrama de flujo de la metodología utilizada.

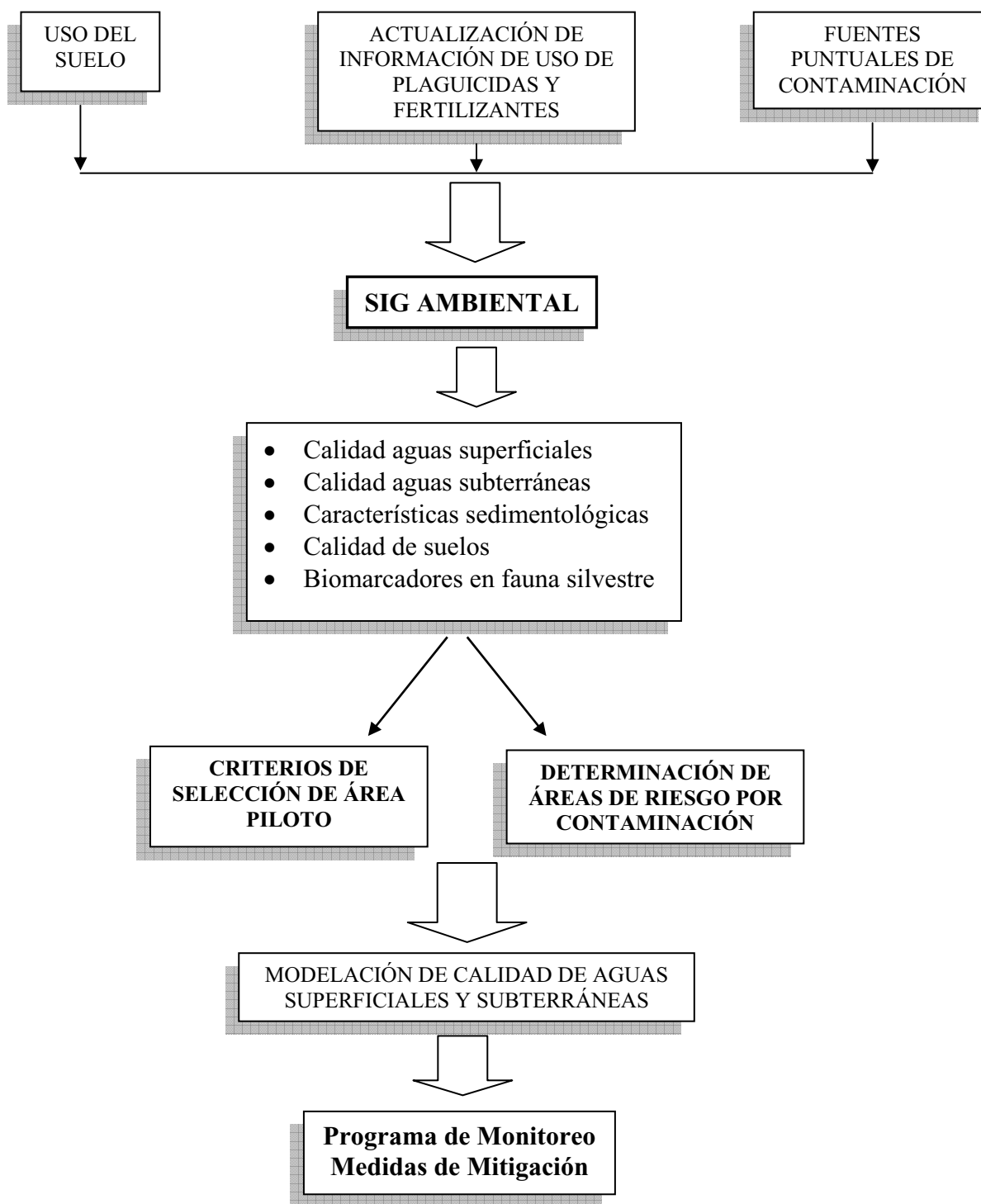


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada

2. DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS

2.1 CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL USO DEL SUELO

En la **Introducción del capítulo (2.1)**, se describen los objetivos y materiales necesarios para la confección de la carta de uso de suelos, la que es imprescindible para la evaluación del impacto que las actividades silvoagropecuarias tienen sobre el medio ambiente.

En el punto **2.2**, se describe la **Metodología**, presentándose nueve pasos a seguir para la confección de la carta de uso de suelo:

- Confección Mosaico para la Cuenca
- Fotointerpretación de sectores homogéneos
- Organización de los Terrenos
- Actividad de Terreno
- Actividad de Gabinete
- Clasificación de sectores no visitados en terreno
- Apoyo con el Catastro Frutícola
- Tabla no oficial
- Cobertura Final

En la **figura 2** se expone un diagrama de flujo que indica la metodología empleada para la Clasificación del Uso del Suelo.

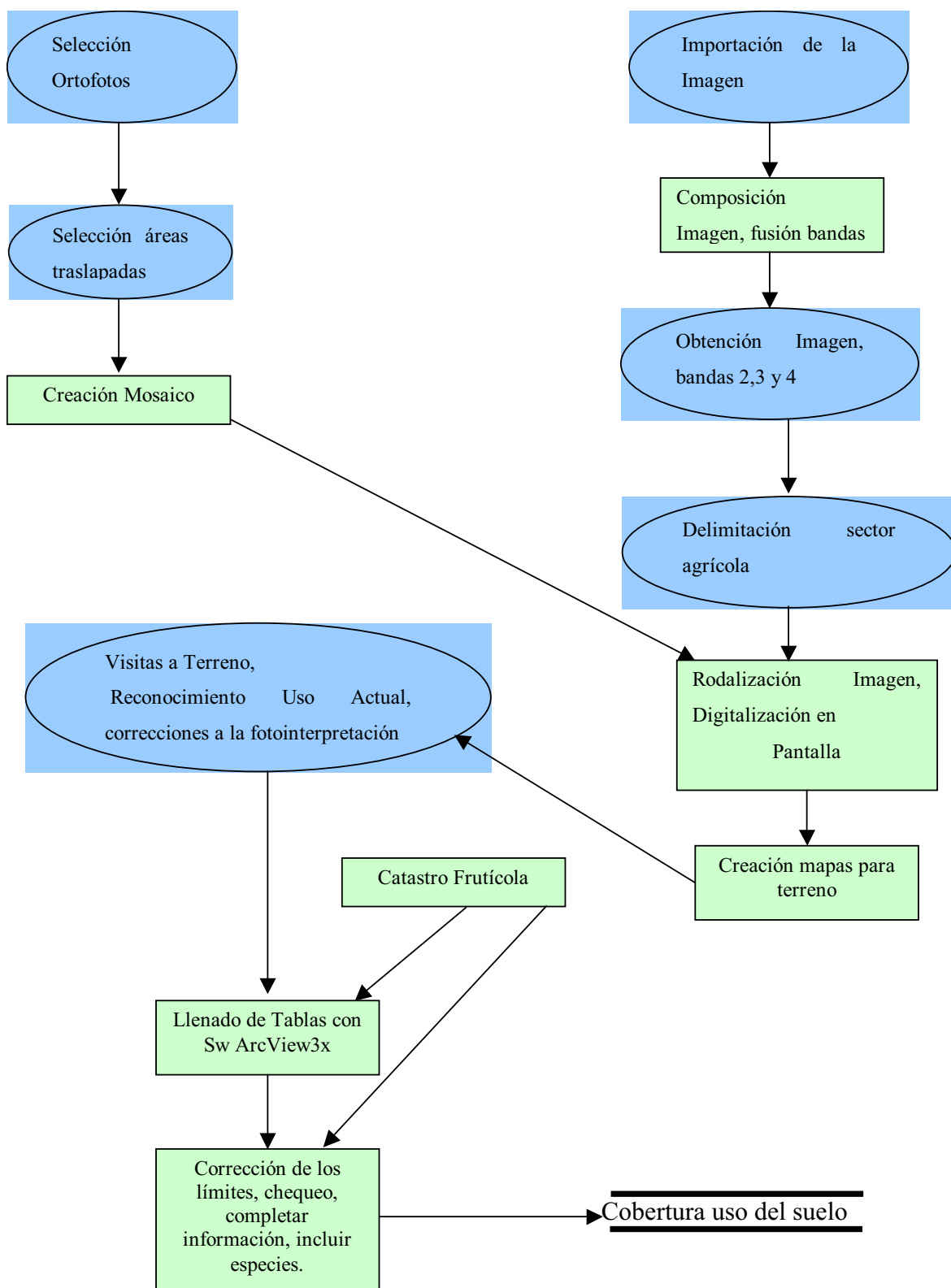


Figura 2: Metodología para la Clasificación del Uso del Suelo.

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

La actualización del uso de los plaguicidas y fertilizantes se realizó a través de la aplicación de una encuesta a los agricultores en un área de 28.000 ha.

Los criterios de selección del área encuestada se describen en el numeral **3.1 Metodología**. 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). Sobre estos tres estratos se aplicó un muestreo aleatorio de tipo estratificado (MAE).

El siguiente paso es determinar el tamaño de muestra para aplicar la encuesta, ésta se definió sobre la base de la fórmula de Tamaño muestral para realizar la prueba de Hipótesis de proporciones (Pagano y Gaubreau, 2001).

Para observar el formato de la encuesta, ver ANEXO C (**Tomo III: Anexos**) y consta de tres partes principales:

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

La **figura 3** muestra los componentes que se deben considerar en la confección de la encuesta.

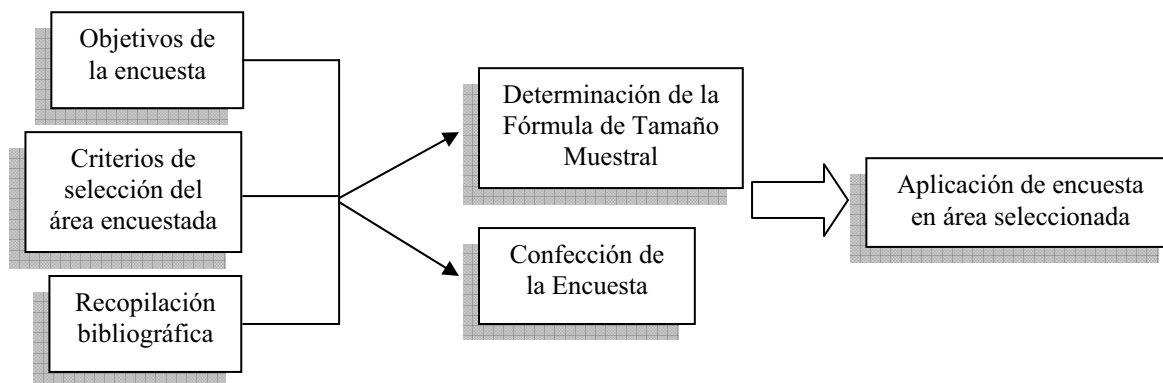


Figura 3: Componentes a considerar en la confección de la encuesta.

2.3 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

La identificación de las fuentes puntuales se efectuó con el objeto de determinar y evaluar los efectos de las descargas de dichas fuentes, sobre la calidad de los cuerpos de agua de la cuenca. De esta forma, se procedió a identificar los efluentes urbanos y aquellos derivados de la actividad productiva. Dicha información fue de vital importancia para seleccionar las estaciones de monitoreo de las aguas superficiales

Además se identificó a aquellas industrias que descargan al alcantarillado, al suelo, canales de riego, el mar y aquellas que eventualmente pueden contaminar los acuíferos. Finalmente, se determinaron 315 fuentes potenciales de contaminar.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Recopilación de antecedentes
- Análisis y evaluación de la información
- Levantamiento de información en terreno
- Georreferenciación de industrias y descargas

El diagrama conceptual que se confeccionó para llevar a cabo este objetivo se puede observar en la **figura 4**.

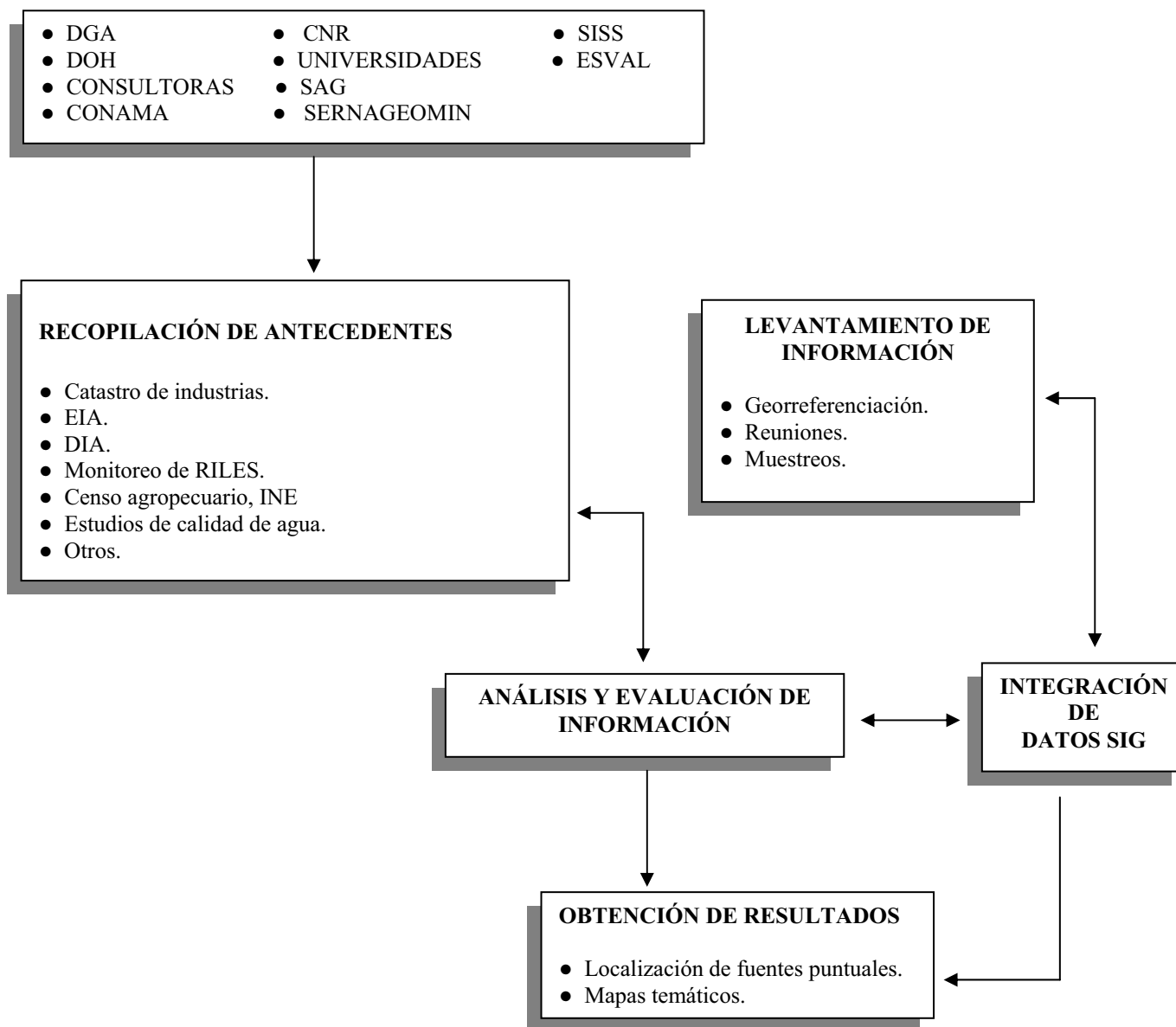


Figura 4: Diagrama conceptual para la determinación de las fuentes puntuales de contaminación.

2.4 CAPÍTULO 5: CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

La metodología para definir la calidad de las aguas superficiales se encuentra descrita en el numeral **5.2**, donde se describe en forma ordenada los pasos realizados para llevar a cabo el estudio. En la **figura 5** se expone el diagrama conceptual utilizado, considerando la siguiente secuencia:

a) Ubicación de Estaciones de toma de muestras (5.2.1), la cual se realizó tomando en cuenta los siguientes factores:

- Norma Chilena Oficial Nch 1333
- Guía CONAMA para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas
- El uso del suelo
- Las descargas urbanas e industriales
- La red hídrica
- La solicitud directa de los funcionarios del SAG
- La facilidad en los accesos

b) Monitoreo (5.2.2): En este punto se define la frecuencia de los muestreos y la logística.

c) Evaluación de la calidad del agua (5.2.3): Los parámetros medidos fueron evaluados considerando las siguientes normas:

- Norma Chilena Oficial NCh 1333
- Guía CONAMA para el establecimiento de “Normas de Calidad para la Protección de Aguas Continentales Superficiales”.

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.

d) Monitoreos específicos (5.2.4)

Se realizaron dos campañas de monitoreos en canales de riego, con el objeto de detectar la presencia de plaguicidas. Para esto se seleccionaron los plaguicidas obtenidos en las encuestas (ver Capítulo 3).

e) Ecotoxicología (5.2.5)

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 a las muestras de aguas obtenidas de todas las estaciones de monitoreo.

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, *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.

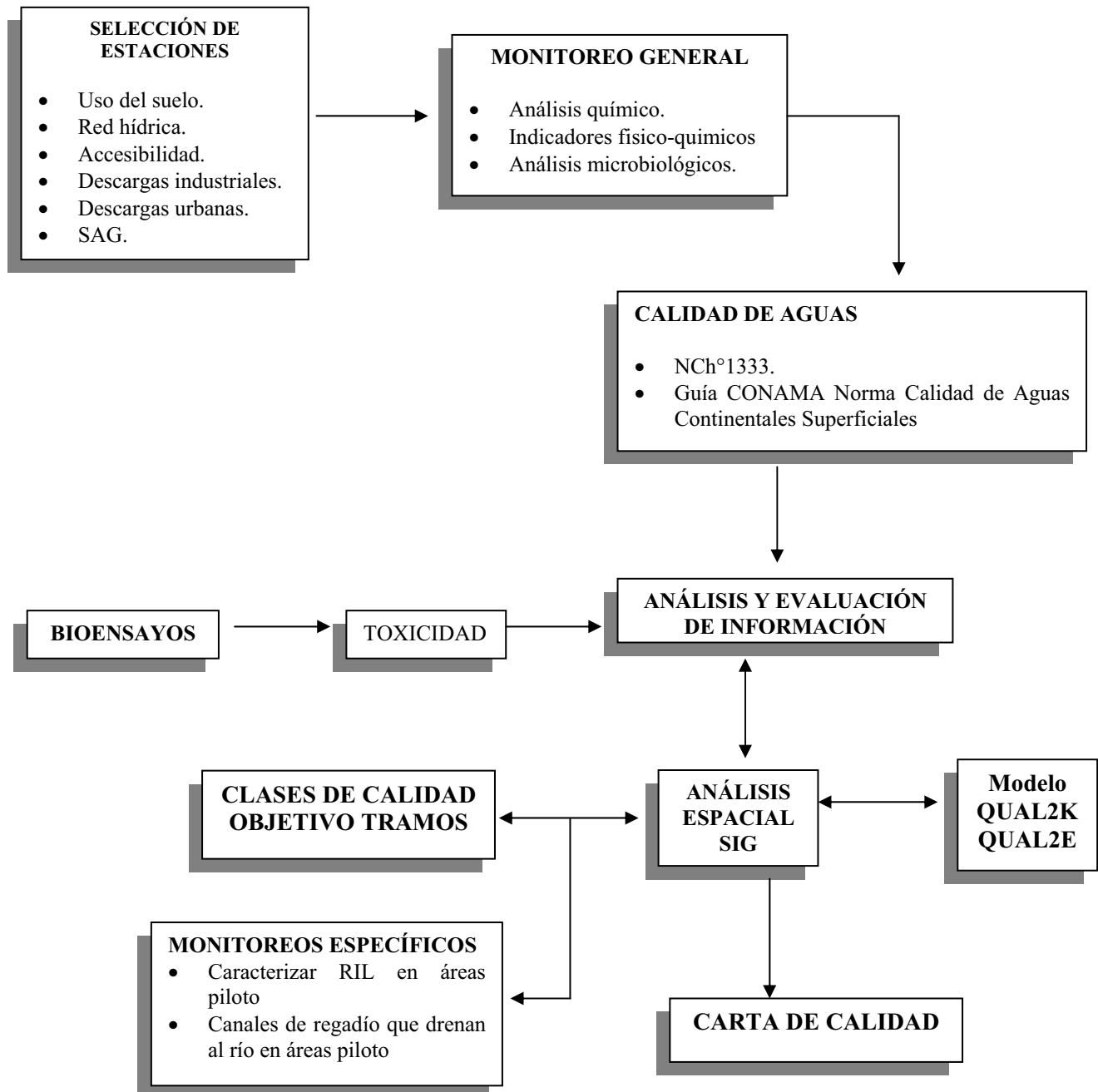


Figura 5: Diagrama conceptual de la matriz aguas superficiales

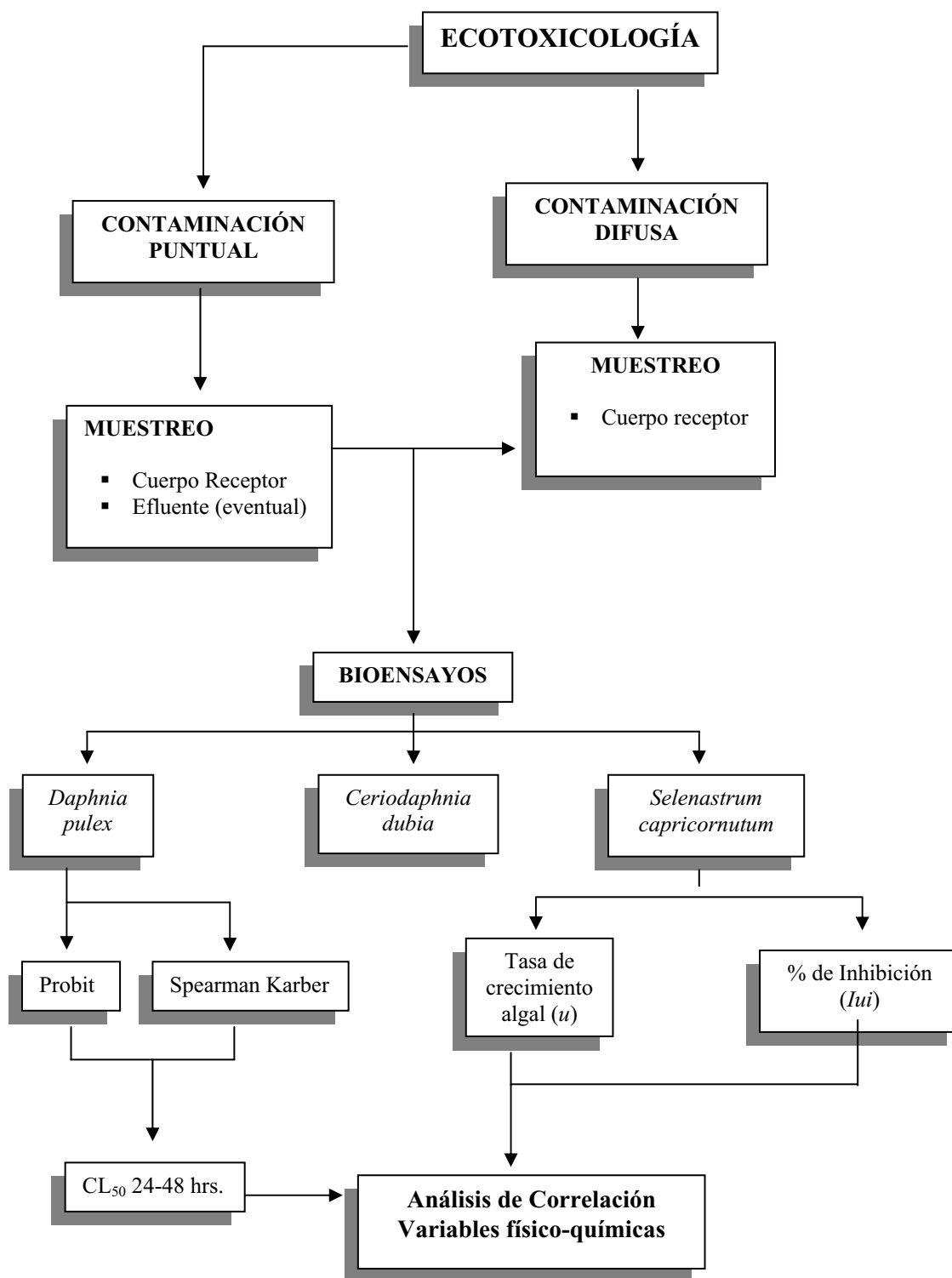


Figura 6: Diseño conceptual del estudio ecotoxicológico.

2.5 CAPÍTULO 6: CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para determinar la calidad de aguas subterráneas, inicialmente se circunscribió al monitoreo a 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.

Nuevo diseño de monitoreo de aguas subterráneas (6.2.1)

Una vez seleccionada el área de modelación, considerando las áreas de mayor riesgo ambiental, se diseñó un monitoreo específico de pozos en dicho sector, de acuerdo 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.

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.

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

El diagrama conceptual de la matriz aguas subterráneas se observa en la figura 7.

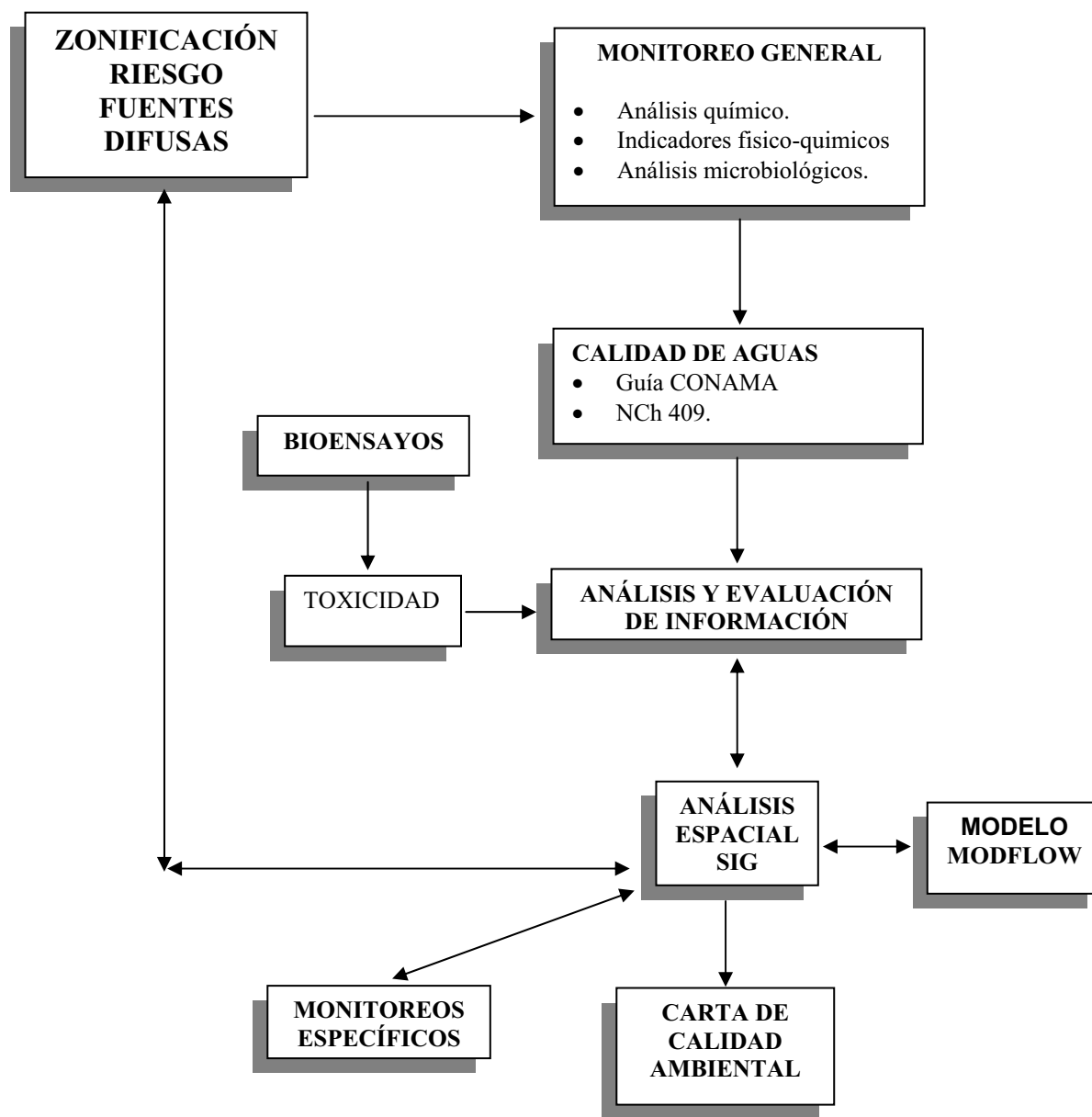


Figura 7: Diagrama conceptual de la matriz aguas subterráneas.

2.6 CAPÍTULO 7:

DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS DEL RÍO ACONCAGUA Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES

Las muestras de sedimentos fueron obtenidas en las estaciones de monitoreo de aguas superficiales. Los análisis realizados en el primer muestreo de 2001 y el primer muestreo de 2004, fueron metales y materia orgánica (arsénico, cadmio, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, plomo, zinc y materia orgánica). 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.

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.

2.7 CAPÍTULO 8:

DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO POR CONTAMINACIÓN DIFUSA

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.

Dentro de las variables más relevantes se consideraron las siguientes:

1. **Actualización del uso de plaguicidas y fertilizantes** de la cuenca del río Aconcagua.
2. **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.
3. **Modelo de Vulnerabilidad del acuífero**, que 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.
4. **Pendientes del terreno**, separadas en categorías adecuadas para relacionarlas con su capacidad de facilitar el escurrimiento o penetración al subsuelo.

El análisis de riesgo se compone de tres fases. Las primeras dos variables son necesarias para realizar las **Fases I y II**. Las variables 3 y 4 son capas de información que se cruzan

con el análisis de los datos previamente hecho. Éstas participan en la **Fase III** para la determinación de áreas de riesgo por contaminación difusa.

La metodología se describe en el numeral **8.2**, cuya síntesis se expone a continuación:

Fase I, descrita en el numeral 8.2.1 (ver figura 8)

- a) Determinación del Factor Integrado de Peligrosidad (FIP)
- b) Análisis Valor Carga Modificado (VCM)
- c) Determinación del Impacto Carga Equivalente por cultivo y temporada de aplicación
- d) Determinación del Valor Carga Equivalente por polígono de la carta de uso de suelo

Fase II, descrita en el numeral 8.2.2

- a) Delimitación de rangos de superficies
- b) Determinación de Riesgo por Carga Total

Fase III Análisis Espacial, descrita en el numeral 8.2.3

- a) Valoración de Riesgo Carga Total para el Análisis Espacial, ver **figura 9**
- b) Valoración de Riesgo para Aguas Subterráneas, ver **figura 10**
- c) Valoración de Riesgo para Aguas Superficiales, ver **figura 11**

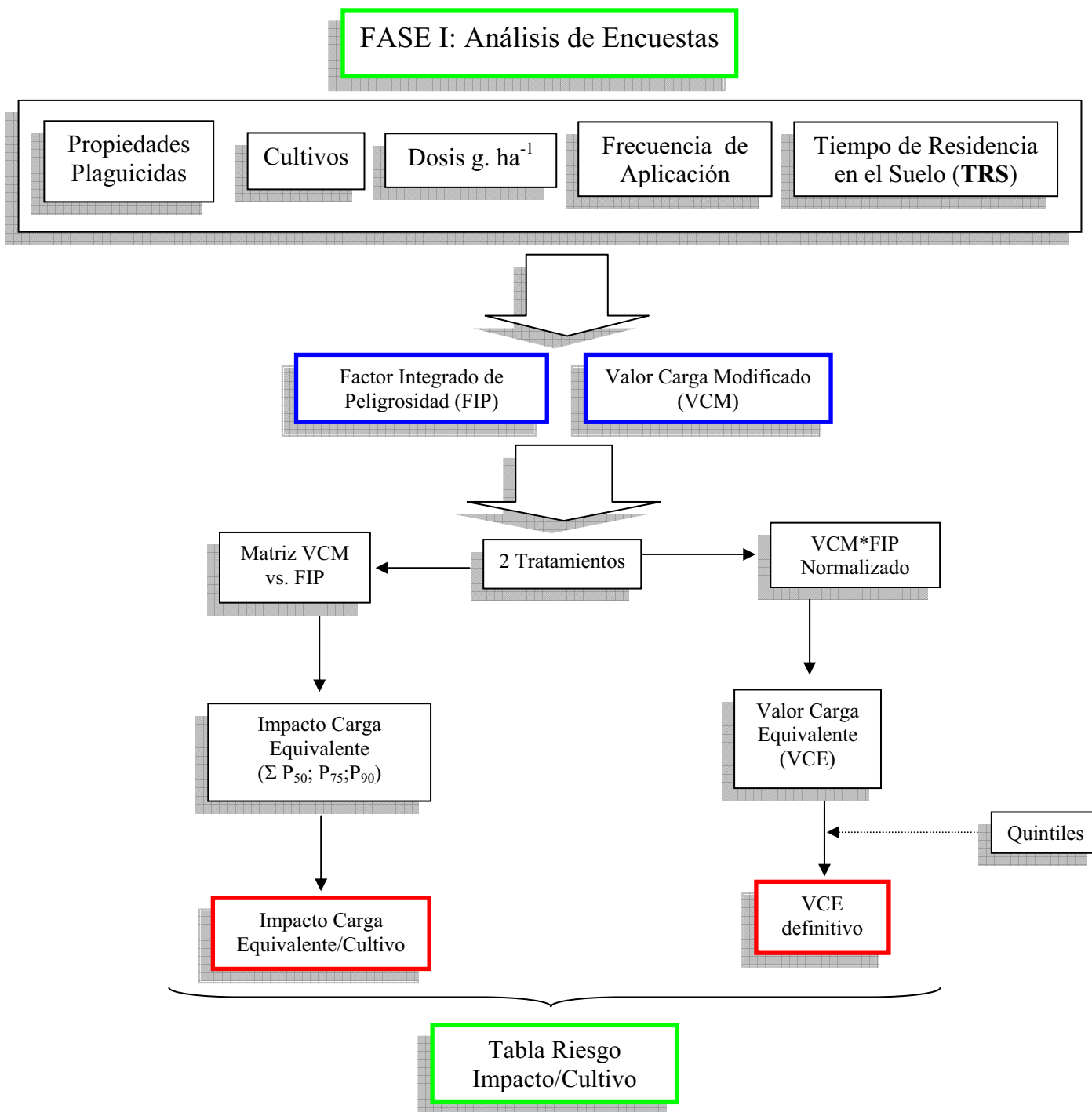


Figura 8: Diagrama de flujo de la Fase I

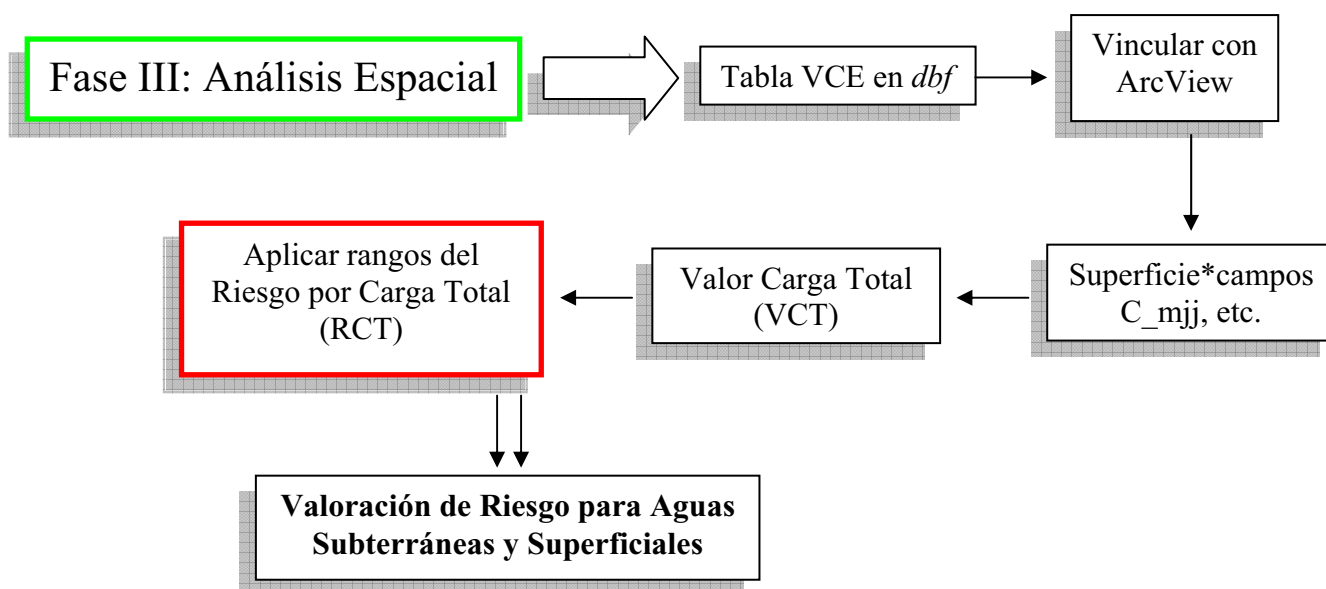


Figura 9: Diagrama de flujo de Valoración de Riesgo Carga Total para el Análisis Espacial en la Fase III

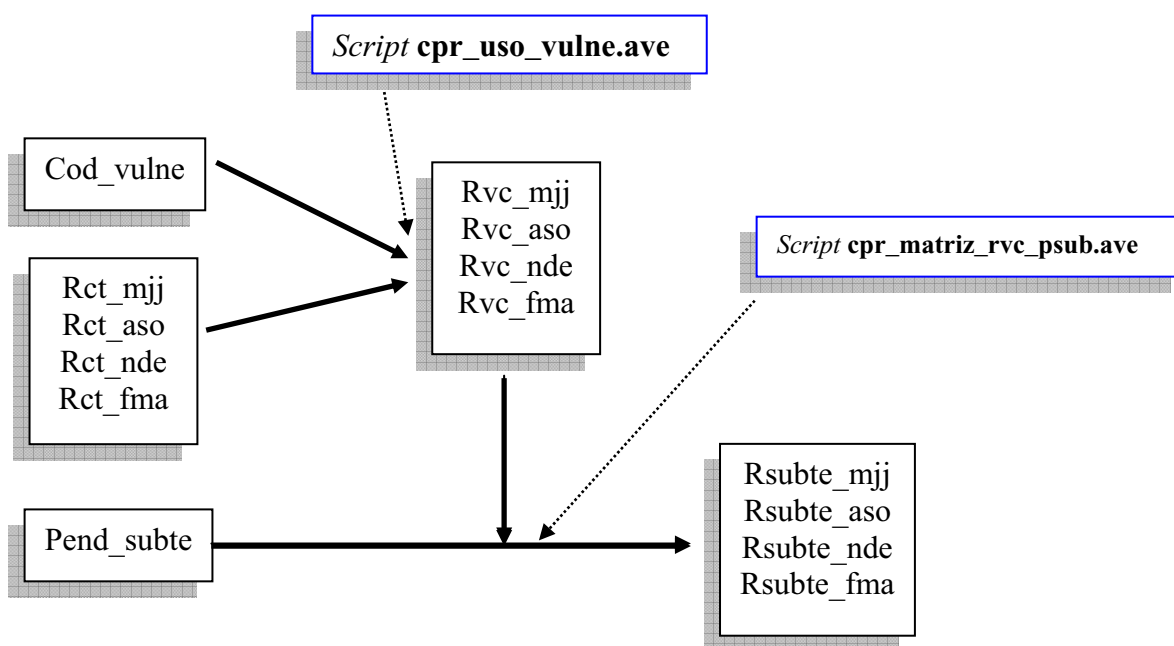


Figura 10: Diagrama de flujo para la Valoración de Riesgo para Aguas Subterráneas en la Fase III

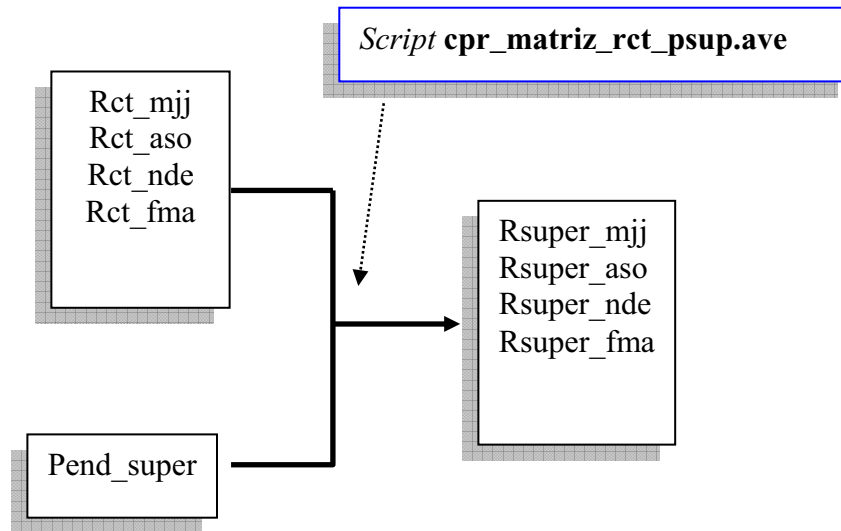


Figura 11: Diagrama de flujo de la Valoración de Riesgo para Aguas Superficiales en la Fase III

2.8 CAPÍTULO 9: CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ÁREA PILOTO

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 12** (Informe de avance noviembre de 2003).

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
- b) **Zonificación de riesgo por contaminación difusa**
- c) Integración de datos en **SIG** y representación espacial
- d) **Monitoreos** efectuados (metodologías descritas en capítulos 5 y 6)
 - Análisis químicos
 - Análisis microbiológicos
 - Bioensayos de toxicidad
 - Biomarcadores

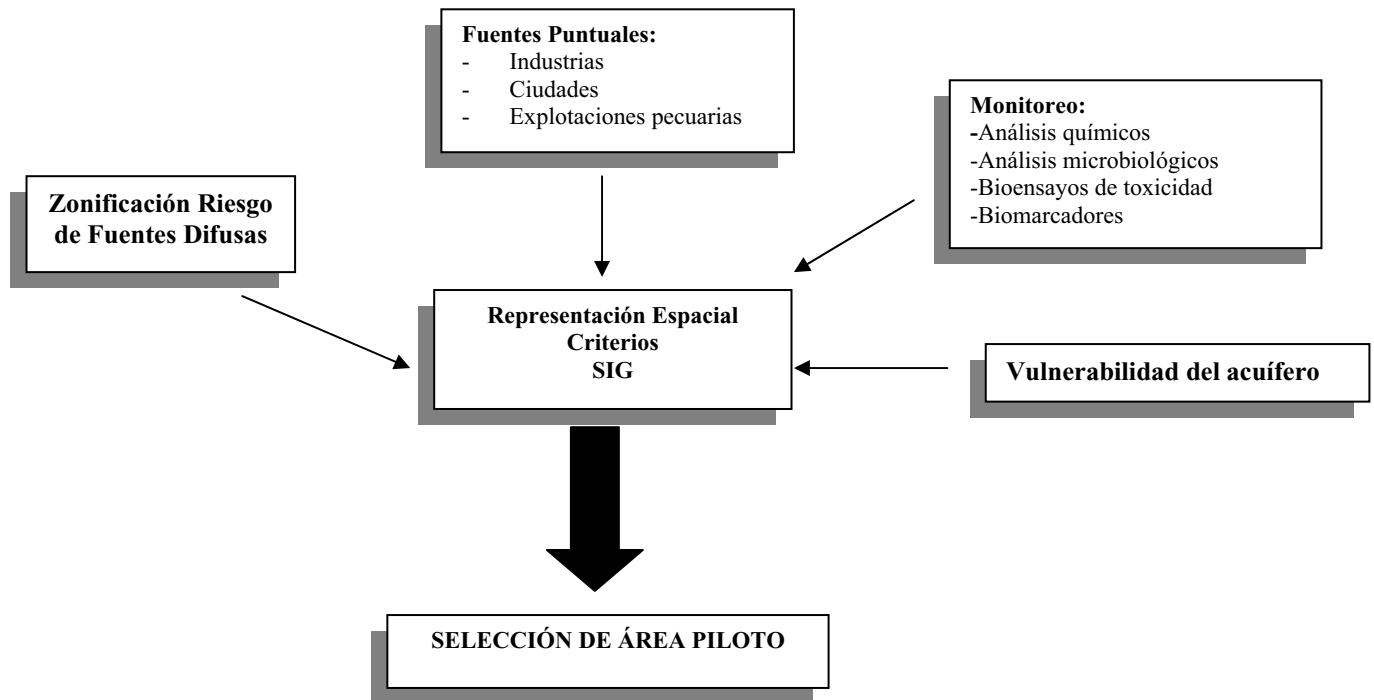


Figura 12: Diagrama conceptual para la selección del área piloto.

2.9 CAPÍTULO 10: CALIDAD DE SUELOS EN ZONAS DE USO AGROPECUARIO

Este trabajo tuvo como 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.

En el numeral **10.3** se describe la metodología utilizada, cuya síntesis se indica a continuación:

- Descripción de fuente de información utilizada **(10.3.1)**
- Digitalización de la Información Cartográfica **(10.3.2)**
- Criterios, diseño y selección de los suelos de muestreo **(10.3.3)**
- Suelos muestreados **(10.3.4)**
- Parámetros muestreados **(10.3.5)**
- Metodología Analítica y Laboratorio **(10.3.6)**

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

Se determinó 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.

Los pasos de la metodología fueron los siguientes:

- Muestreo (11.3)
- Optimización del diseño de muestreo original (11.3.1)
- Tamaños muestrales y métodos de captura (11.3.2)
- Medición de la actividad de la colinesterasa (11.4)
- Diseño estadístico (11.5)
- Análisis estadístico (11.5.1)

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

La implementación del Sistema de Información Geográfico (SIG) asociado al proyecto, está orientada a caracterizar ambientalmente la Cuenca del río Aconcagua y a 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:

- a) Cartografía Base
- b) Cartografía Temática
- c) Información Temática Derivada y Mapa de Síntesis

Integración de datos en el SIG (12.2)

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. Estas capas son las siguientes:

- a) Red hídrica
- b) División de Subcuencas y Subsubcuencas
- c) Modelo Digital de Terreno
- d) Vulnerabilidad del Acuífero

2.12 CAPÍTULO 13: MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

El objetivo principal de este trabajo fue 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.

La metodología se describe en el numeral **13.6**.

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