



Andean Geology

ISSN: 0718-7092

revgeologica@sernageomin.cl

Servicio Nacional de Geología y Minería  
Chile

González, Ljubow N.; González, Abraham; Mardones, María  
Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de  
Chile  
Andean Geology, vol. 30, núm. 1, julio, 2003, pp. 3-22  
Servicio Nacional de Geología y Minería  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173918529001>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile

Ljubow N. González

Abraham González

Maria Mardones

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción,  
Casilla 3-C, Concepción, Chile  
ljubow@udec.cl  
abgonzal@udec.cl  
mmardone@udec.cl

### RESUMEN

Se evaluó la vulnerabilidad natural del acuífero freático de la cuenca hidrográfica del río Laja, mediante la determinación de la resistencia hidráulica vertical, empleando la metodología de 'Aquifer Vulnerability Index' (AVI), que permite determinar la velocidad de infiltración de los contaminantes al pasar el flujo del agua por los distintos horizontes de suelos. El análisis de las tendencias de comportamiento de los contenidos de nitratos, fosfatos, cloruros, sulfatos y sólidos totales disueltos, en el agua subterránea permiten establecer una correlación entre AVI y la fuente-contaminación acuífera en las áreas de diferentes usos del suelo. El comportamiento de los diferentes solutos en el agua subterránea es semejante, con una tendencia de incremento desde la Precordillera Andina hacia la cordillera de la Costa. Las concentraciones mayores se presentan en el contacto de la depresión Central con la cordillera de la Costa, donde el riesgo de contaminación, según AVI es moderadamente alto a muy alto. Esto indica que los suelos arenosos de textura media-fina, con escaso contenidos de material arcilloso proporcionan un bajo grado de protección para el acuífero, puesto que tienen menores reservas de materia orgánica y sulfuro disponible para sorción de fosfatos y denitrificación; además, los niveles freáticos altos, reducen la capacidad de atenuación propia de dichos suelos y facilitan el transporte de los contaminantes de origen agrícola hacia las aguas subterráneas. Por el contrario, los contaminantes agrícolas están menos concentrados en el agua subterránea relacionada con los suelos arenosos de textura gruesa y media, con mayor contenido de material arcilloso, donde la capacidad para atenuar contaminantes está relacionada con los mayores contenidos de sulfuro disponible y materia orgánica sorbible/lábil, así como por la mayor profundidad del nivel del agua subterránea.

*Palabras clave:* Vulnerabilidad de aguas subterráneas, Acuífero freático, Contaminantes agrícolas.

### ABSTRACT

**Natural vulnerability evaluation of the the río Laja basin phreatic aquifer, central-southern Chile.** The natural vulnerability of the phreatic aquifer of the hydrographic basin of the Laja river was evaluated, by means of the determination of the vertical hydraulic resistance, using the 'Aquifer Vulnerability Index' (AVI) that allows to determine the infiltration speed from the pollutants when flowing through different soils horizons. The analysis of the tendencies of behavior of the contents of nitrates, phosphates, chlorides, sulfates and total dissolved solids, in the groundwater allows

to establish a correlation between AVI and source-aquifer contamination in the areas of different soil uses. The behavior of the different solutes in the groundwater is similar, with a tendency to increase from the Precordillera Andina towards the Cordillera de la Costa. The highest concentrations are found at the contact of the Depresión Central with the Cordillera de la Costa, where the risk of contamination, according to AVI is moderate to high and very high. This indicates that the sandy soils of medium-fine texture, with low content of clay material provide a low degree of protection for the aquifer, since they have lower reserves of organic matter and sulfur available for sorption of phosphates and denitrification. Also, a high water table reduces the attenuation capacity of these soils and it facilitates the transport of the pollutants of agricultural origin towards the groundwater. On the contrary, the agricultural pollutants are less concentrated in the groundwater linked to sandy soils of coarse and medium texture, with higher contents of clay, where the capacity to attenuate pollutants is related to larger contents of sulfur available and organic matter sorptive/labile, as well as by the greater depth of the groundwater level.

*Key words:* Groundwater vulnerability, Phreatic aquifer, Agricultural pollutants.

## INTRODUCCION

Para establecer una administración de los recursos hídricos ambientalmente segura, la mejor práctica es proteger este recurso contra la contaminación, porque la descontaminación es un proceso largo y costoso.

El uso del suelo, la cubierta vegetal y particularmente los bosques juegan un papel fundamental en la conservación del suelo y del agua.

La química natural del agua subterránea varía dependiendo de la naturaleza del subsuelo y de las rocas que atraviesa (Daly y Warren, 1994). Sin embargo, esto no garantiza la pureza del agua subterránea. Pueden surgir problemas debido a las condiciones naturales del terreno o la contaminación por las actividades humanas.

La intensidad de la agricultura en el mundo ha aumentado significativamente durante los últimos 30 años, incrementando los contaminantes de origen agrícola en las aguas subterráneas (Keeney 1986; Melian *et al.*, 1999; Rodvang y Simpkins, 2001), y según Hrkal (2001), y Allen y Chapman (2001) la forestación masiva desarrollada por la industria forestal (monofilética), no sólo impactará sobre el bosque nativo, bajo el cual se desarrolla abundante flora y fauna, sino que también afectará a los recursos de agua subterráneas y a su calidad.

Las modificaciones en el uso del suelo pueden tener efectos negativos en la química del agua. Los experimentos de Hubbard Brook, realizados en

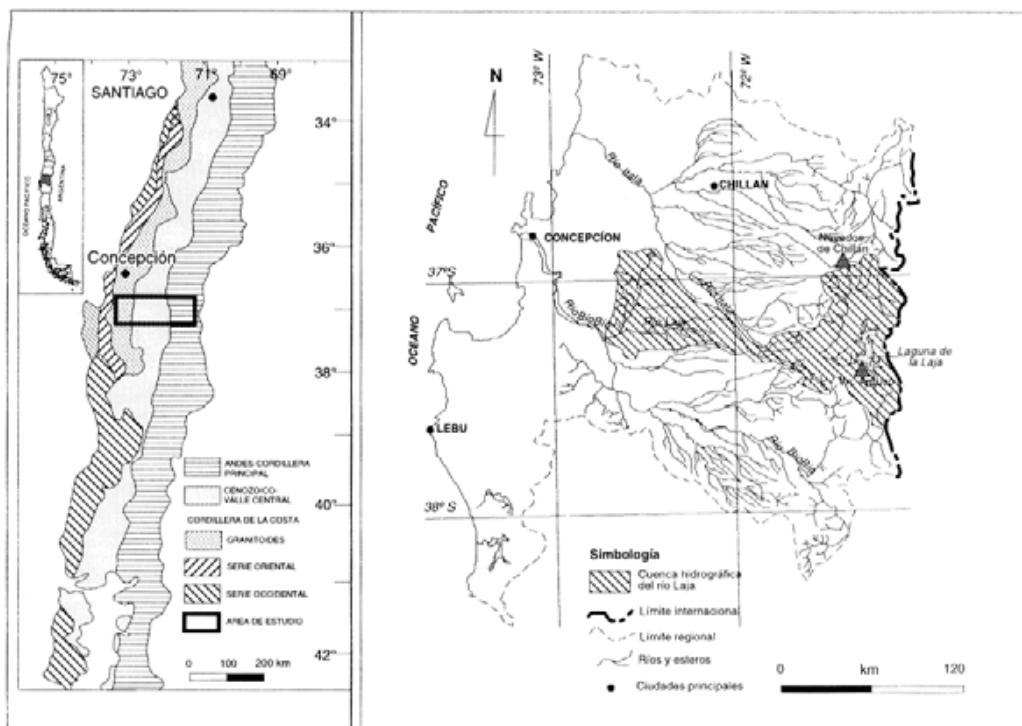
Estados Unidos, demostraron que el cambio por la forestación masiva con una sola especie en una subcuenca hidrográfica completa, dio alteraciones en toda la gama de parámetros químicos e hidrológicos (Likens, 1970).

Una faceta principal de los sistemas de producción agrícola es la gestión de nutrientes, principalmente el nitrógeno y el fósforo, los cuales son esenciales para todos los sistemas vivos y son los nutrientes más frecuentemente asociados con la agricultura como contaminantes del agua, y se registran concentraciones en aumento en muchos países desarrollados (McLaughlin *et al.*, 1985; L.R. Hall, S.J. Allen, P.T.W. Rosier, D.M. Smith, M.G. Hodnett, J.M. Roberts, R. Hopkins, H.N. Davies, D.G. Kinniburgh y D.C. Goody<sup>1</sup>; Zhang *et al.*, 1996; Kiely, 2001). Estudios demostraron que la concentración de nitratos en las aguas subterráneas es bajo en las áreas de los suelos de textura fina y la concentración alta es típica para los suelos arenosos de textura media a gruesa (B.C. Kross, G.R. Hallberg, D.R. Bruner, R.D. Libra, K.D. Rex, M.B. Weih, M.E. Vermace, L.F. Burmeister, N.H. Hall, K.L. Cherryholmes, J.K. Johnson, M.I. Selim, B.K. Nations, L.S. Seigley, D.J. Quade, A.G. Dudler, M.A. Sesker, C.F. Lynch, H.F. Nicholson y J.P. Hughes<sup>2</sup>; D.K. Mueller, P.A. Hamilton, D.R. Helsel, K.J. Hitt, B.C. Ruddy<sup>3</sup>; Nolan *et al.*, 1997; Tesoriero y Voss, 1997). La lixiviación del fósforo puede ser

<sup>1</sup> 1996. Hydrological effects of short rotation energy coppice. Report ETSU B/W5/00275 (Inédito), Institute of Hydrology, 204 p. Wallingford.

<sup>2</sup> 1990. Iowa State Well-Water Survey, Water quality data, initial analysis. Iowa Geological Technical Information Series Report, No. 19, p. 142.

<sup>3</sup> 1995. Nutrients in ground water and surface water of the United States-Analysis of data through 1992. Report 95-4031 (Inédito), U.S. Geological Survey Water Resources Investigations, 74 p.



vertical o lateral, dependiendo de la textura, granulometría y homogeneidad de los suelos (Bolland y Gilkes, 1998). La lixiviación lateral es más alta en los suelos finos con alto contenido de fracción arcillosa, que en los suelos arenosos, donde la lixiviación del fósforo es principalmente vertical. Esto se debe a que los suelos finos tienen una menor capacidad de infiltración y más probabilidad de generar escorrentía superficial, que los suelos arenosos (Culley y Bolton, 1983; Beauchemin *et al.*, 1998).

La cuenca del río Laja es una de las principales subcuenca del río Biobío, ubicada en VIII Región, centro-sur de Chile y abarca una superficie de aproximadamente 3.500 km<sup>2</sup>; su cabecera se emplaza en la cordillera Andina al este del volcán Antuco y al sur de los Nevados de Chillán, drena la laguna de La Laja y, luego de atravesar la depresión

Central, su río principal, confluye en el río Biobío (Fig. 1).

Las condiciones climáticas contrastan de un verano seco y cálido a un invierno lluvioso y fresco; con temperaturas medias anuales de 13 a 14°C. (J.L. Devynck)<sup>4</sup>. Las precipitaciones ocurren esencialmente como lluvias en la Cordillera de la Costa y Depresión Central, mientras que en el sector oriental de la cordillera Andina corresponden a nevazones. Las tasas pluviométricas medias anuales del período comprendido entre los años 1962 y 2000, registradas en las estaciones Tucapel y San Rosendo (Fig. 1) son de 1.628,3 mm/año y de 984,7 mm/año, respectivamente (D.G.A.). Los valores medios anuales de la evapotranspiración son de 1.034,6 mm/a en Tucapel y 1.637,5 mm/año en San Rosendo. En líneas generales, la precipitación media supera la evapotranspiración entre los meses

<sup>4</sup> 1970. Contribución al estudio de la circulación atmosférica en Chile y el clima de la Región del Biobío (Inédito), Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, p. 158.

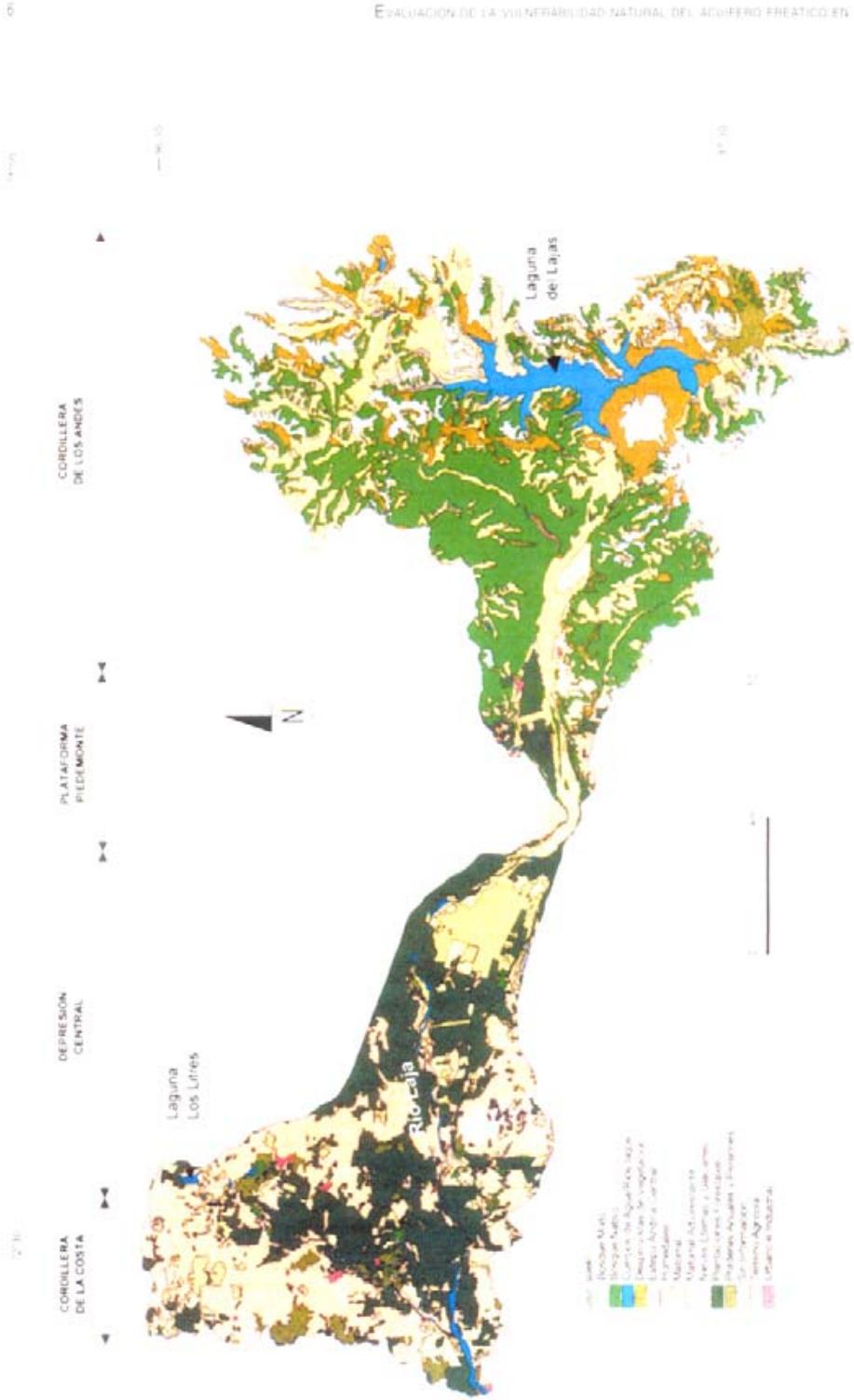


FIG. 2. Mapa del uso del suelo en la cuenca del río Lain (Mártires, en progreso).

de abril y septiembre (González *et al.*, 2001).

El principal sustento económico del sistema social de la cuenca del río Laja, es producto de las actividades forestales y agrícolas, que ocupan aproximadamente el 39 y 34% del área, respectivamente (Fig. 2), cuya mayor concentración está en el flanco oriental de la cordillera de la Costa y en la parte occidental de la depresión Central. Estas actividades intervienen sobre el sistema hídrico subterráneo.

El acuífero freático de la cuenca hidrográfica del río Laja está relacionado con los depósitos no consolidados, constituidos por arenas, gravas, depósitos glaciares, lacustres y aluvionales.

Un mapa de vulnerabilidad, basado en las características naturales del terreno, no sólo permitiría adoptar las medidas de protección del acuífero, de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, sino que debe contribuir a realizar una ocupación del suelo ambientalmente responsable; lo que significa establecer una actividad humana en

función de la capacidad que el medio posee para atenuar la carga contaminante que la misma genera. Esta es una forma de lograr realmente la convergencia de desarrollo humano y medio ambiente, en lo que se ha denominado desarrollo sustentable o sostenible.

Como las concentraciones normales de los nutrientes en aguas no contaminadas son bajas, el nitrato y el fosfato son buenos indicadores de la contaminación causada por las actividades antropogénicas (Downing y McCauley, 1992; Smith *et al.*, 1999).

Este trabajo consiste en la cuantificación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático, en las diferentes unidades hidrogeológicas de la cuenca hidrográfica del río Laja y en la evaluación de la calidad del agua subterránea, con el objetivo de identificar las zonas afectadas y/o aquellas más susceptibles de ser afectadas por el proceso contaminante relacionado con diferentes usos de suelo.

## METODOLOGIA

Para conocer cuán susceptibles son los sistemas acuíferos de incorporar solutos provenientes de fuentes potenciales y activas de contaminación localizadas en la superficie, lo que puede originar alteraciones en la calidad del agua subterránea, se utilizó el método Aquifer Vulnerability Index (AVI). Los resultados obtenidos con este método, permiten realizar una reconsideración sobre los usos de suelo de una manera integral, tomando en cuenta la preservación de la calidad del agua de los sistemas acuíferos regionales (Van Stempvoort *et al.*, 1993).

El AVI es un método para cuantificar la vulnerabilidad natural de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica vertical (CT) al pasar los flujos de agua por diferentes estratos de suelos que sobrepasan el acuífero.

La resistencia hidráulica es un factor que indica el tiempo aproximado de caudal del flujo vertical del agua que atraviesa la zona no saturada por unidad de gradiente de carga y se calcula por la expresión:

$$C_t = \sum_{i=1}^n d_i / K_{vi}$$

donde:

$C_t$  = resistencia hidráulica total (años)

$d_i$  = espesor de cada estrato del suelo sobre el acuífero (cm)

$K_{vi}$  = conductividad hidráulica vertical de cada estrato del suelo  $i$  (cm/h)

Esto da como resultado una zonificación de resistencias hidráulicas, las cuales están relacionadas con la vulnerabilidad: a mayor resistencia hidráulica, menor vulnerabilidad del sistema. El mapa de vulnerabilidad se elabora mediante la interpolación de los valores de resistencia hidráulica total en años (CT) en forma log CT.

## PROCEDIMIENTOS DE TERRENO

Se realizó un catastro de pozos y norias, lo que indicó la existencia de un acuífero freático. En los pozos se midieron el nivel estático y los parámetros físico-químicos (pH, temperatura, potencial redox (Eh) y conductividad eléctrica), usando un medidor de pH y conductivímetro modelo WD.35615 marca OAKTON. Se seleccionaron 46 pozos para análisis químicos del agua subterránea. Los análisis químicos se hicieron en la Facultad de Ciencias Químicas y Centro EULA de la Universidad de Concepción. Además, se tomaron 26 muestras de suelo en calicatas, seleccionadas de acuerdo al uso del suelo, para análisis físico-químicos. Estas fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Chillán. La conductividad hidráuli-

ca vertical ( $K_v$ ) de la zona no saturada se determinó en los mismos puntos de muestreo de suelos, empleando un permeametro Guelph Modelo 2800 KI. El método del permeametro Guelph (Reynolds y Elrick, 1985, 1986), es una técnica comprobada, sencilla y relativamente rápida, para medir la conductividad hidráulica y el potencial de flujo hasta una profundidad de 2 m con cargas hidráulicas de 5 y 10 cm (Dafonte *et al.*, 1999). Este método mide el flujo de recarga necesario para mantener una profundidad constante de agua en un pozo cilíndrico realizado por encima del nivel freático (Reynolds *et al.*, 1992). Con el principio de Mariotte se puede establecer el nivel de agua y medir la recarga correspondiente.

## TRATAMIENTOS DE LOS DATOS

Con los datos obtenidos, se elaboraron mapas de conductividad hidráulica vertical de suelos (Fig. 3) y vulnerabilidad del acuífero freático de la cuenca del río Laja (Fig. 4).

Para determinar la distribución de sulfatos, sólidos totales disueltos, cloruros, nitratos, fosfatos y potasio en el agua subterránea, solutos que son

indicadores de contaminación, se elaboraron mapas de isoconcentraciones con la ayuda del programa computacional Surfer (Fig. 5), con los cuales se realizó el análisis de las tendencias del comportamiento de éstos, a efecto de establecer una correlación fuente-contaminación del acuífero que valide el mapa de vulnerabilidad elaborado.

## CARACTERISTICAS GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS

Las unidades de mayor importancia hidrogeológica en la cuenca hidrográfica del río Laja corresponden a depósitos cuaternarios, los cuales conforman un gran abanico desde la plataforma piedemonte Andino hasta el extremo oeste, dentro de la depresión Central (Varela y Moreno, 1982; Moreno y Varela, 1985; Varela *et al.*, 1988). Estos depósitos de relleno están representados de techo a base por las siguientes unidades litoestratigráficas: arenas negras y gravas, con clastos de origen volcánico, con niveles limo-arcillosos, de espesor variable entre 4 y 25 m; le subyacen los depósitos de materiales representados por las facies mixtas

volcanoclásticas y sedimentarias integradas por dos unidades: una superior constituida por depósitos fluviales e intercalaciones volcanoclásticas distales y una inferior eminentemente volcanoclástica correspondiente a un conjunto de ignimbritas escoriáceas con intercalaciones de tobas, brechas y conglomerados consolidados (Thiele *et al.*, 1998). Esta última unidad volcanoclástica, por su muy baja permeabilidad, actúa como una barrera a la infiltración de aguas lluvias, generando importantes recursos de agua subterránea en los depósitos no consolidados en la depresión Central y la plataforma piedemonte andino.

<sup>2</sup> 1992. Descripciones del suelo y símbolos (Inédito), Centro de Investigación de Recursos Naturales-Corporación de Fomento de la Producción, 214 p. Chile.

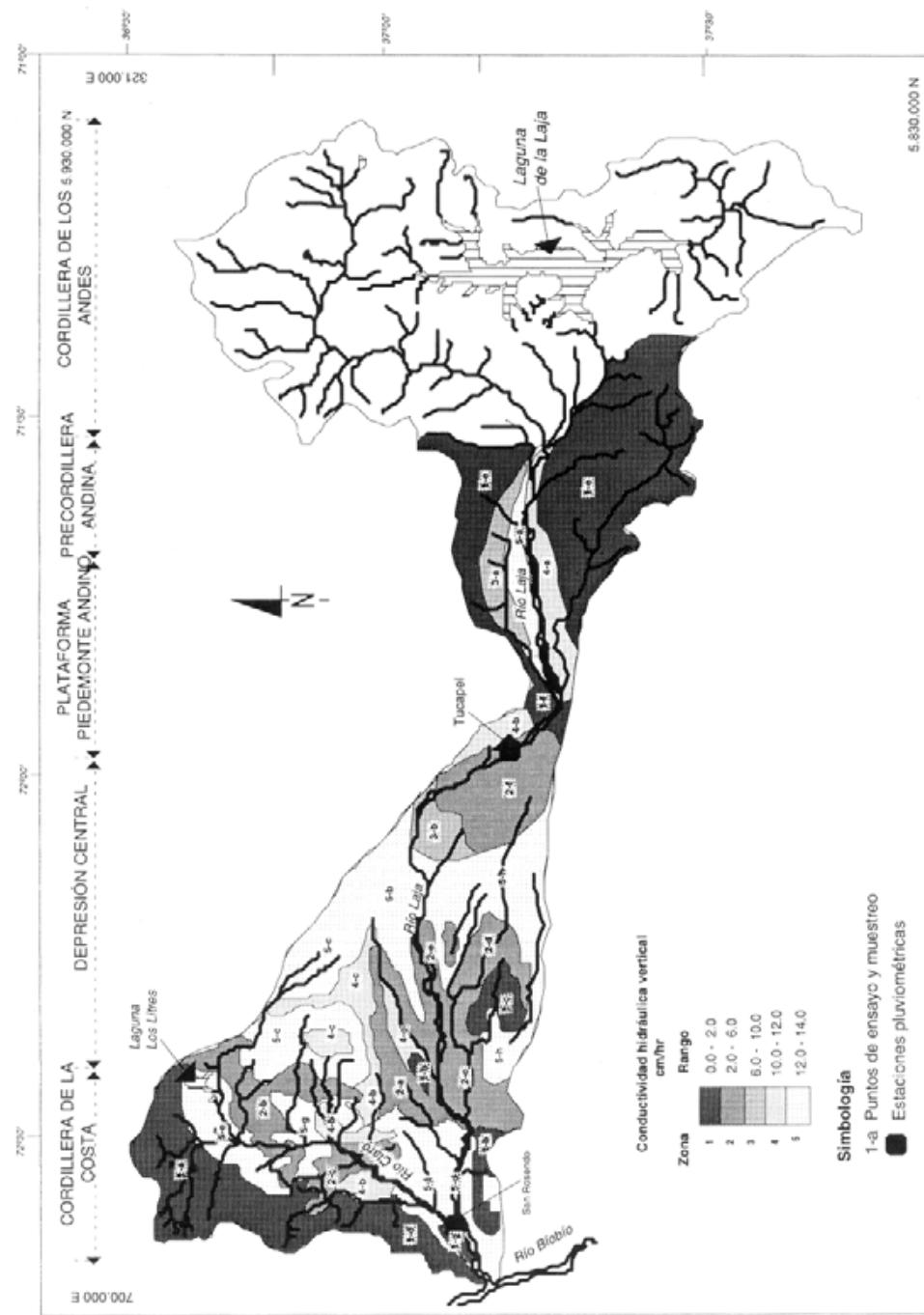


FIG. 3. Mapa de conductividad hidráulica vertical de los suelos.

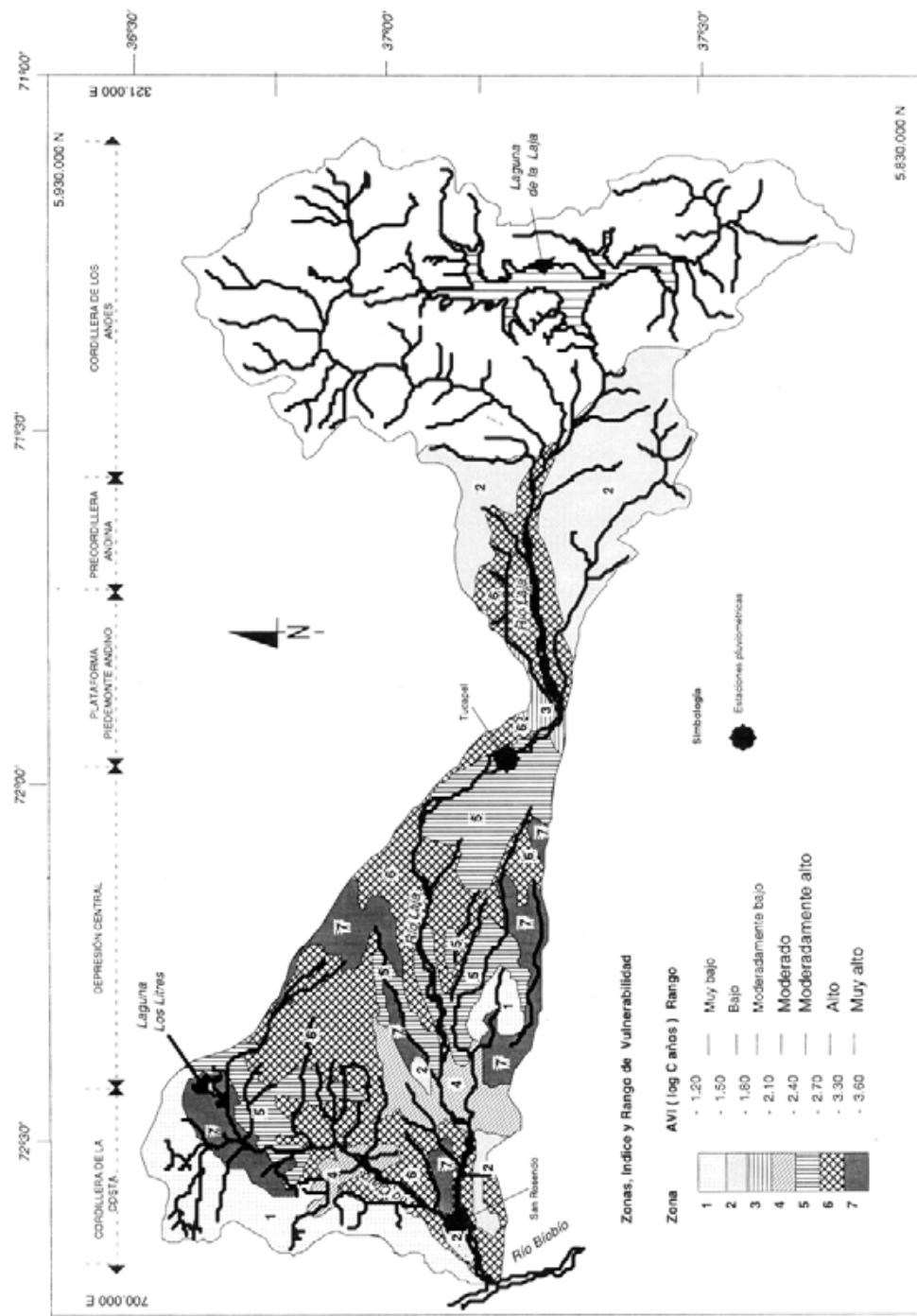


FIG. 4. Mapa de vulnerabilidad natural del acuífero freático.

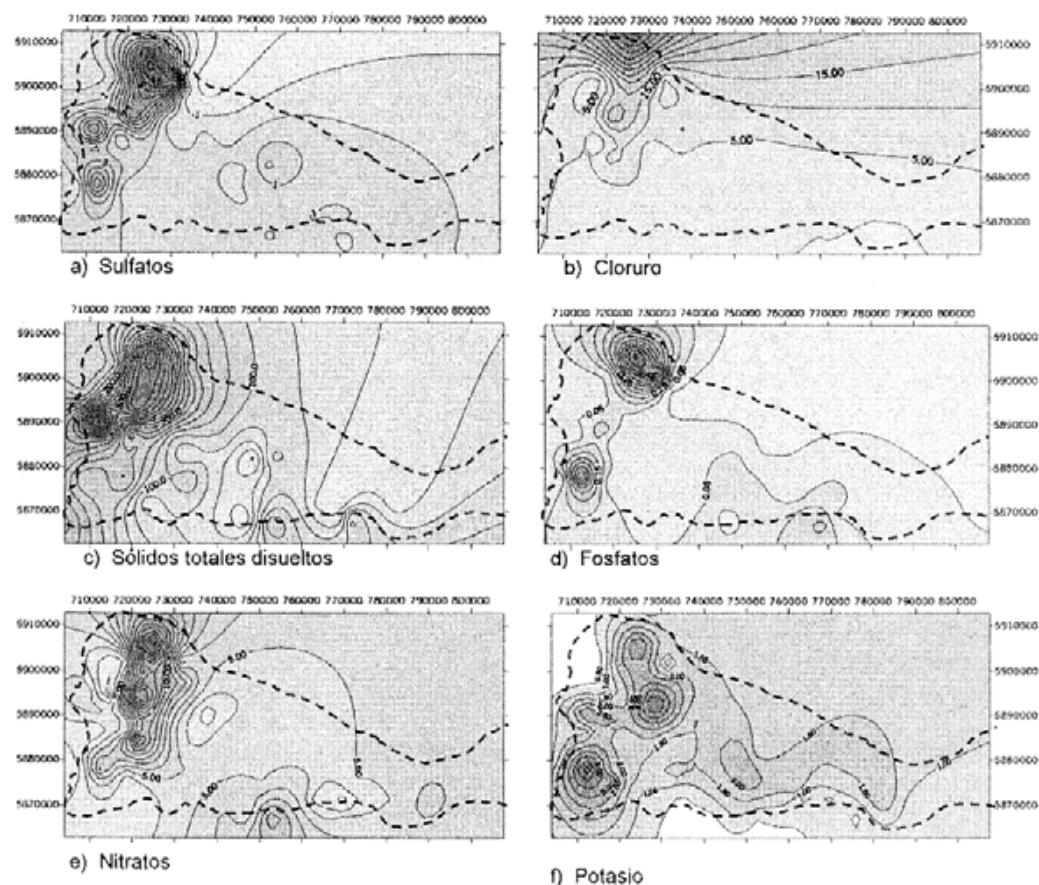


FIG. 5. Isolíneas de concentraciones (línea llenas) de sulfatos, cloruros, sólidos totales disueltos, fosfatos, nitratos y potasio en el agua subterránea. Márgenes de cuenca (líneas segmentadas).

La cordillera de la Costa, constituida por rocas graníticas, actúa como una barrera natural para el flujo regional del agua subterránea. Los intensos procesos de meteorización química, que han actuado sobre estas rocas graníticas, han permitido la formación *in situ* de un suelo residual profundo de espesor variable. Dicho suelo está compuesto por material arenoso-arcilloso con presencia de gravilla, arcillas y limos (CIREN-CORFO, 1992)<sup>2</sup>. Estos suelos permiten la infiltración y formación del flujo local de agua subterránea dirigido hacia la depresión Central (González *et al.*, 1999).

La profundidad del nivel estático del acuífero

freático en el área de estudio varía entre 1 y 30 m. Los niveles más profundos, entre 10 y 30 m, son característicos para la plataforma piedemonte andino, mientras que en la depresión Central éstos se encuentran, en general, entre 1 y 10 m (González *et al.*, 2001a).

La principal fuente de recarga del acuífero freático, es la infiltración de la precipitación directa caída sobre los materiales permeables presentes en el área de estudio, la cual disminuye desde la Precordillera Andina (233 mm/año) hacia la Cordillera de la Costa (101 mm/año) (González *et al.*, 2001).

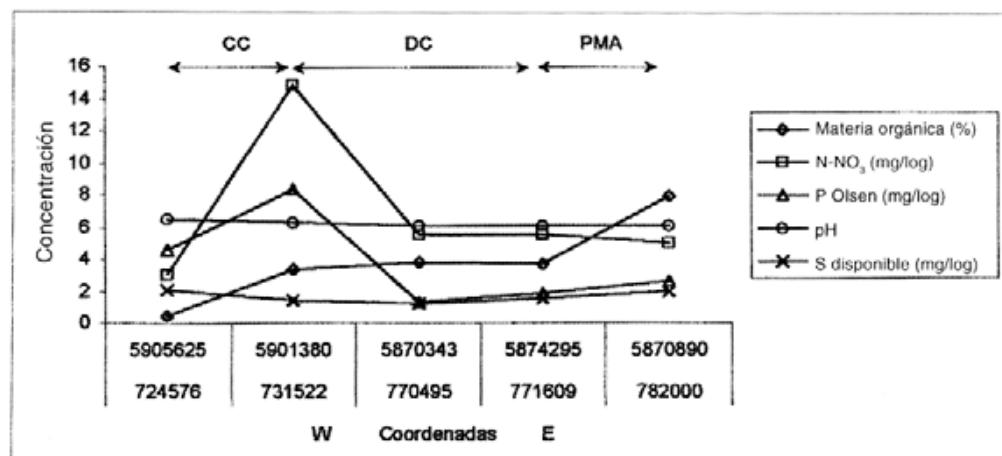


FIG. 6. Diagrama de variación de la concentración de elementos en los suelos de la cuenca del río Laja. CC: Cordillera de la Costa; DC: Depresión Central; PMA: Plataforma de Piedemonte Andino.

## RESULTADOS

### CARACTERÍSTICAS FISICO-QUÍMICAS DEL SUELO

La mayor parte del aporte de materia disuelta, tanto orgánica como inorgánica, en el agua subterránea, proviene del suelo sobreacente al acuífero freático. En consecuencia, la composición química de agua freática refleja los tipos de suelo que se drenan y los usos del mismo.

Los suelos de la cuenca hidrográfica del río Laja derivados de materiales volcánicos se extienden sobre la plataforma piedemonte andino y la depresión Central hasta su límite con la cordillera de la Costa. Son suelos estratificados, con texturas principalmente arenosas y franco-arenosas (Tabla 1), cuya granulometría varía desde gruesa a muy fina.

Sobre la base de los resultados de los análisis de 26 muestras de diferentes suelos (Tabla 1), se interpretó el comportamiento de la materia orgáni-

ca, nitratos, fosfatos y azufre disponible.

En la figura 6 se observa que el contenido de materia orgánica en los suelos disminuye desde la plataforma piedemonte andino hacia la cordillera de la Costa, mientras que la concentración de nitratos y fosfatos tiene la tendencia inversa.

La cantidad de materia orgánica está relacionada con la presencia de alofán (componente de naturaleza inorgánica, que corresponde a aluminosilicato que se presenta en suelos derivados de ceniza volcánica), con el pH bajo y, consecuentemente, con altos niveles de hidrógeno intercambiable. Los componentes activos en suelos con alofán determinan la baja disponibilidad de fósforo, por su alta capacidad de fijación de fósforo, y favorecen la alta capacidad total de intercambio de cationes, lo que da origen, entre otros factores, a un nivel alto de carbono orgánico (Zunino y Borie, 1985).

### CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

La infiltración de agua de lluvia tiene relación con la conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) de los suelos sobreyacentes al acuífero y depende de la textura de éstos. De acuerdo a los ensayos de permeabilidad y a la composición granulométrica

de los suelos estudiados, la conductividad hidráulica vertical media ( $K_v$ ) en el tramo plataforma piedemonte andino-cordillera de la Costa varía entre 0,24 y 14,33 cm/h (Tabla 1, Fig. 3).

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E HIDRAULICAS DE LOS SUELOS Y RANGO DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO LAJA.

Puntos	Profundidad (cm)	Espesor d <sub>i</sub> (cm)	CO (%)	RP (%)	pH	CIC	Composición granulométrica	Textura	K <sub>v</sub>	Resistencia hidráulica	AVI	Rango de vulnerabilidad	
							Arena Limo Arcilla	C (h)	C (d)	C <sub>t</sub> (a)	Log C <sub>t</sub>		
1-a	0-10	10	1,9	5,8	18,4	29	32	39	FA	0,23	43,48	1,81 0,0050	
	10-27	1,7	1,1	5,7	19	21,4	42,4	37,2	FA	0,3	57,67	2,36 0,0054	
	27-70	43	0,8	5,6	19,9	18	35,9	46,1	A	0,22	195,45	8,14 0,0223	
	70-115	45	0,4	5,5	27,1	12,8	26,6	64,4	A	0,21	214,29	8,93 0,0245	
1-b	0-14	14	3,3	5,3	35,4	13,7	40,7	45,7	AL	0,25	56,00	2,33 0,0054	
	14-50	36	1,7	5,4	29	7,8	21,3	71,6	A	0,35	102,86	4,29 0,0117	
	50-97	47	0,6	5,4	27,1	5,7	14,7	79,6	A	0,58	Bajo	-1,74 Bajo	
	97-135	38	0,4	5,6	27,8	11,8	27,6	64,4	A	0,25	128,00	5,33 0,0146	
	135-165	30	0,5	5,5	26,1	6,7	13,7	79,6	A	0,28	107,14	4,46 0,0122	
	165-175	10	0,85	28,0	7,6	20,4	19,4	47,6	FA	0,20	50,00	2,08 0,0057	
1-c	0-18	18	1,9	32,0	7,1	21,2	12,5	50,5	36,9	FAL	0,36	50,00	0,0057
	18-47	29	0,54	27,0	7,2	19,1	14,6	54,2	31,2	FAL	0,49	59,18	2,47 0,0058
	47-85	38	0,85	35,0	7,4	20,8	11,6	53,0	35,4	FAL	0,4	95,00	3,96 0,0108
	85-115	30	0,82	25,0	7,5	20,2	14,8	50,4	34,7	FAL	0,39	51,28	2,14 0,0059
	115-150	35	0,85	29,0	7,6	20,4	19,4	47,6	33,0	FA	0,4	87,50	3,65 0,0100
1-d	0-13	13	3,6	95,8	6,07	36,75	14	72,6	13,4	FL	0,82	15,85	0,66 0,0018
	13-20	7	3,07	97,6	6,41	40,88	11,9	79,3	8,8	FL	0,76	9,21	0,38 0,0011
	20-39	19	2,67	98,7	6,79	42,0	12,7	76,9	10,4	FL	0,73	26,03	1,08 0,0030
	39-69	30	4,0	99,0	6,99	41,25	10,2	81,0	8,8	FL	0,78	39,47	1,64 0,0045
	69-110	41	0,98	99,2	6,18	39,38	9,0	79,1	11,9	FL	0,64	64,06	2,67 0,0073
	110-157	47	0,68	99,4	7,18	39,38	10,3	78,7	11,0	FL	0,65	72,31	3,01 0,0082
	157-180	23	2,05	99,5	6,4	39,0	9,9	77,3	12,8	FL	0,60	38,33	1,60 0,0044
											0,71	0,0390	-1,52 Bajo

d = espesor de estratos de suelo; CO = Carbono orgánico; RP = Retención de fosforo; ClC = Capacidad total del intercambio; Textura: F = franco; A = arcilloso; L = limoso; a = arenoso; K<sub>v</sub> = Conductividad hidráulica vertical de los estratos, K<sub>v</sub> = Resistencia hidráulica media; C = Conductividad hidráulica mala; C<sub>t</sub> = Resistencia hidráulica mala; AVI (log C<sub>t</sub>) = Índice de vulnerabilidad del acuífero expresado como logarítmico de la resistencia hidráulica total..

Puntos	Profundidad (cm)	Espesor $d_i$ (cm)	CO (%)	RP (%)	pH	CIC (%)	Composición granulométrica			Textura	$K_v$	Resistencia hidráulica	AVI	Rango de vulnerabilidad
							Arena	Limo	Arcilla					
1-f	0-15	15	6,18	97,0	6,0	10,09	13,4	60,6	26,0	FL	0,75	20,00	0,83	0,0023
	15-32	17	2,9	100,0	5,9	9,6	9,9	62,1	28,0	FL	0,68	25,00	1,04	0,0029
	32-57	25	4,91	100,0	5,9	8,89	7,9	64,7	27,3	FL	0,75	46,67	1,94	0,0053
	57-96	39	3,26	100,0	5,9	6,27	12,9	66,8	20,3	FL	1,23	31,71	1,32	0,0036
	96-116	20	1,68	100,0	6,2	5,12	19,5	66,8	13,7	FL	2,14	9,35	0,39	0,0011
	1-g	0-13	13	3,44	50,0	6,1	6,38	56,8	32,6	Fal	2,44	5,33	0,22	0,0006
13-32		19	2,06	56,0	6,5	5,45	50,2	40,3	9,5	F	2,82	6,74	0,28	0,0008
32-50		18	3,03	72,0	6,6	7,47	34,9	48,6	16,4	F	1,36	13,24	0,55	0,0015
50-75		25	3,27	77,0	6,7	8,18	17,8	65,3	16,9	Fl	1,59	15,72	0,66	0,0018
75-118		43	1,21	48,0	7,0	14,21	10,7	56,9	32,3	FAL	0,50	86,00	3,58	0,0038
118-136		20	2,61	77,0	6,9	8,93	20,8	63,1	16,1	FL	1,65	12,12	0,51	0,0014
2-a		20	3,44	50,0	6,1	6,38	56,8	32,6	10,6	Fa	2,46	8,13	0,34	0,0009
20-70		50	2,06	56,0	6,5	5,45	47,3	46,2	6,4	Fa	5,05	9,90	0,41	0,0012
70-75		5	0,66	6,7	6,2	10,66	21,5	24,9	53,6	A	0,10	2,54	2,11	Moderado
2-b		0-17	17	3,44	50,0	6,1	6,38	41,1	51,5	F	3,57	4,76	0,20	0,0005
17-25		8	2,06	56,0	6,5	5,45	47,3	46,2	6,4	Fa	3,97	2,02	0,08	0,0002
25-48		23	3,03	72,0	6,6	7,47	33,6	56,9	9,5	FL	2,94	7,82	0,33	0,0009
48-64		16	3,27	77,0	6,7	8,18	26,5	62,4	11,1	FL	2,61	6,13	0,26	0,0007
64-84		20	1,21	48,0	7,0	14,21	33,1	57,0	9,9	FL	2,94	6,80	0,28	0,0008
84-100		16	2,61	77,0	6,9	8,93	32,7	57,3	10,0	FL	2,81	5,69	0,24	0,0007
2-c		17	3,44	50,0	6,1	6,38	41,1	51,5	7,4	F	3,14	0,0038	-2,42	Moder. alto
17-25		8	2,06	56,0	6,5	5,45	47,3	46,2	6,4	Fa	3,57	4,76	0,20	0,0005
25-48		23	3,03	72,0	6,6	7,47	33,6	56,9	9,5	FL	2,94	7,82	0,33	0,0009
48-64		16	3,27	77,0	6,7	8,18	26,5	62,4	11,1	FL	2,61	6,13	0,26	0,0007
64-84		20	1,21	48,0	7,0	14,21	33,1	57,0	9,9	FL	2,94	6,80	0,28	0,0008
84-100		16	2,61	77,0	6,9	8,93	32,7	57,3	10,0	FL	2,81	5,69	0,24	0,0007
100-135		35	1,21	48,0	7,0	14,21	33,1	50,4	6,5	FL	3,87	3,24	0,38	-2,32

$d_i$  = espesor de estratos de suelo; CO = Carbono orgánico; RP = Retención de losstio; CIC = Capacidad total del intercambio; Textura: F = franco; A = arcilloso; L = limoso; a = arenoso;  $K_v$  = Conductividad hidráulica vertical de los estratos;  $K_v$  = Conductividad hidráulica media; C = Resistencia hidráulica; AVI (log C) = Índice de vulnerabilidad del acuífero expresado como logaritmo de la resistencia total en años.

Puntos	Profundidad (cm)	Espesor <i>d<sub>i</sub></i> (cm)	CO (%)	RP (%)	pH	CIC (%)	Composición granulométrica			Textura	K <sub>v</sub> cm/h	Resistencia hidráulica C (h)	AVI	Rango de vulnerabilidad
							Arena	Limo	Arcilla					
2-d	0-20	20	1,68	100,0	6,2	5,12	19,5	66,8	13,7	FL	2,46	8,13	0,34	0,00096
	20-70	50	2,06	56,0	6,5	5,45	47,3	46,2	6,4	Fa	5,05	9,90	0,41	0,0011
2-e	0-23	23	1,68	100,0	6,2	5,12	19,5	66,8	13,7	FL	1,92	11,98	0,50	0,0014
	23-97	74	2,8	54,0	6,0	1,42	70	25,6	4,4	Fa	5,72	12,94	0,54	0,0014
2-f	0-23	23	2,06	56,0	6,5	5,45	47,3	46,2	6,4	Fa	3,92	5,87	0,24	0,0007
	23-97	74	2,8	54,0	6,0	1,42	70,0	25,6	4,4	Fa	5,72	12,94	0,54	0,0015
	97-113	16	2,8	54,0	6,0	1,42	70,0	25,6	4,4	Fa	5,72	2,80	0,12	0,0003
	113-150	37	0,99	14,0	6,2	2,35	95,6	4,4	0,0	a	7,0	5,29	0,22	0,0006
3-a	0-15	15	2,8	54,0	6,0	1,42	70,0	25,6	4,4	Fa	5,99	2,50	0,10	0,0003
	15-35	20	1,54	43,0	6,0	1,12	86,8	8,2	5,0	a	7,41	2,70	0,11	0,0003
3-b	0-23	23	1,21	48,0	7,0	14,21	33,1	57,0	9,9	FL	2,92	7,88	0,33	0,00096
	23-97	74	0,88	43,0	6,0	0,86	91,8	8,0	0,2	a	7,72	9,59	0,40	0,0011
	97-113	16	0,42	9,0	6,3	2,33	97,3	2,7	0,0	a	8,72	1,83	0,08	0,0002
	113-180	67	1,07	34,0	6,5	1,85	94,9	4,9	0,2	a	10	6,70	0,28	0,0008
4-a	0-15	15	2,47	35,0	5,8	1,62	69,7	27,7	2,6	Fa	6,73	7,34	0,00030	-2,53
	15-35	20	0,88	43,0	6,0	0,86	91,8	8,0	0,2	a	7,22	2,21	0,09	0,0003
	35-45	10	0,32	22,0	6,3	0,78	98,0	1,8	0,2	a	15,69	0,77	0,12	0,0003
	45-75	30	0,16	18,0	6,3	0,61	98,9	1,0	0,1	a	11,82	2,54	0,64	0,0001
											10,38		0,11	0,0002
4-b	0-20	20	0,16	18,0	6,3	0,61	98,9	1,0	0,1	a	12,02	1,66	0,07	0,0002
	20-50	30	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	12,03	2,49	0,10	0,0003
	50-100	50	1,07	34,0	6,5	1,85	94,9	4,9	0,2	a	10,0	5,00	0,21	0,0006
	100-150	50	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	13,0	3,85	0,16	0,0004
											11,77	0,0015	-2,83	Alto

d = espesor de estratos de suelo; CO = Carbono orgánico; RP = Retención del intercambio; Textura: F = franco; A = arcilloso; L = limoso; a = arenoso; Kv = Conductividad hidráulica vertical de los estratos; CIC = Capacidad total del intercambio; C = Conductividad hidráulica media; C<sub>r</sub> = Resistencia hidráulica media; AVI (log C<sub>r</sub>) = Índice de vulnerabilidad del acuífero expresado como logaritmo de la resistencia hidráulica total en años.

Puntos Profundidad (cm)	Espesor d <sub>i</sub> (cm)	CO (%)	RP (%)	pH	CIC	Composición granulométrica Arena Limo Arcilla	Textura	K <sub>v</sub> <sub>i</sub> cm/h	Resistencia hidráulica C (h)	AVI C <sub>T</sub> (a)	Log C <sub>T</sub>	Rango de vulnerabilidad
4-c 0-17 17-36 36-56 56-80 80-100	1.7	0.99	14.0	6.2	2.36	95.6	4.4	0.0	a	6.41	2.65	0.11
	1.9	0.111	13.0	6.4	1.08	100.0	0.0	0.0	a	14.31	1.33	0.06
	2.0	0.16	12.0	6.4	1.15	99.6	0.4	0.0	a	13.51	1.48	0.06
	2.4	0.24	12.0	6.3	1.48	99.4	0.6	0.0	a	13.0	1.85	0.08
	2.0	0.111	10.0	6.4	1.95	99.3	0.7	0.0	a	12.75	1.57	0.07
5-a 0-18 18-30 30-50	5.0	0.07	5.0	6.4	2.21	98.6	1.4	0.0	a	11.16	4.48	0.19
	1.8	2.25	5.6	1.72	83.2	16.8	0.0	aF		11.86	1.93	0.08
	1.2	0.28	6.0	1.01	99.5	0.5	0.0	a		13.25	0.91	0.04
5-b 0-15 15-28 28-43 43 - 87 87-108	2.0	0.1	6.1	0.64	100.0	0.0	0.0	a		14.31	1.40	0.06
	1.5	1.83	31.0	6.5	3.67	89.4	9.5	1.1	a	13.07	1.15	0.05
	1.3	1.07	34.0	6.5	1.85	94.9	4.9	0.2	a	10.56	1.23	0.05
	1.5	0.94	40.0	6.4	2.06	95.0	4.6	0.4	a	15.07	1.00	0.04
	0.41	32.0	6.5	2.15	98.2	1.8	0.0	a		10.35	4.25	0.18
5-c 0 - 11 11 - 30 30 - 40 40 - 70 70 - 90 90 - 150	0.13	16.0	6.4	1.53	99.9	0.1	0.0	a		14.31	1.47	0.06
	1.1	1.35	27.0	6.1	5.21	91.5	7.4	1.1	a	14.61	0.75	0.03
	1.14	14.0	6.1	4.35	92.3	6.3	1.4	a		15.17	1.25	0.05
	0.42	9.0	6.3	2.33	97.3	2.7	0.0	a		8.75	1.14	0.05
	0.04	8.0	6.5	2.38	100.0	0.0	0.0	a		14.31	2.10	0.09
5-d 0 - 20 20 - 50 50 - 70 70 - 100	0.01	6.0	6.6	1.99	99.3	0.7	0.0	a		12.75	1.57	0.07
	0.07	17.0	6.6	2.32	98.7	1.3	0.0	a		11.33	5.27	0.22
	0.16	6.3	0.61	98.9	1.0	0.1	0.1	a		12.83	0.014	-2.86
	0.16	18.0	6.4	1.15	99.6	0.4	0.0	a		12.03	1.66	0.07
	0.16	12.0	6.1	0.64	100.0	0.0	0.0	a		14.33	2.64	0.11
5-e 0 - 20 20 - 50 50 - 70 70 - 100	0.1	6.1	0.64	100.0	0.0	0.0	0.0	a		14.21	2.11	0.09
	0.1	30	6.1	0.64	100.0	0.0	0.0	a		12.98	0.009	-3.05

d<sub>i</sub> = espesor de estratos de suelo; CO = Carbono orgánico; RP = Retención de fósforo; CIC = Capacidad total del intercambio; Textura: F = franco; A = arcilloso; L = limoso; a = arenoso; Kv<sub>i</sub> = Conductividad hidráulica vertical de los estratos; K<sub>v</sub><sub>i</sub> = Resistencia hidráulica media; C = Conductividad hidráulica media; AVI (log C<sub>T</sub>) = Índice de vulnerabilidad del acuífero expresado como logaritmo de la resistencia hidráulica total en años.

Puntos Profun- didad (cm)	Espesor $d_i$ (cm)	CO (%)	RP (%)	pH	CIC	Composición granulométrica	Textura	$K_v$	Resistencia hidráulica	AVI	Rango de vulnerabilidad
						Arena	Limo Arcilla	cm/h	C (h)	$C_r$ (a)	$\log C_r$
5-e	0 - 20	20	0,16	18,0	6,3	0,61	98,9	1,0	0,1	a	12,03
	20 - 50	30	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	12,03
	50 - 70	20	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,33
	70 - 80	10	0,1		6,1	0,64	100,0	0,0	0,0	a	14,0
5-f	0 - 20	20	0,11	10,0	6,4	1,95	99,3	0,7	0,0	a	13,10
	20 - 50	30	0,15	11,9	6,4	1,20	99,5	0,5	0,0	a	12,75
	50 - 70	20	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,33
	70 - 80	10	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	14,0
	80-100	20	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,2
	100-150	50	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	13,7
	150-180	30	0,11	10,0	6,4	1,95	99,3	0,7	0,0	a	12,75
5-g	0 - 20	20	0,16	18,0	6,3	0,61	98,9	1,0	0,1	a	13,39
	20 - 50	30	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	12,03
	50 - 70	20	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,33
	70 - 80	10	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,0
	80-100	20	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,2
	100-150	50	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	13,7
5-h	0 - 20	20	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	13,38
	20 - 50	30	0,32	22,0	6,3	0,78	98,0	1,8	0,2	a	13,53
	50 - 70	20	0,13	16,0	6,4	1,53	99,9	0,1	0,0	a	14,53
	70 - 80	10	0,1		6,1	0,64	100,0	0,0	0,0	a	14,5
	80-100	20	0,16	12,0	6,4	1,15	99,6	0,4	0,0	a	13,8
											14,33
											0,0008
											-3,10
											Muy alto

$d_i$  = espesor de estratos de suelo; CO = Carbono orgánico; RP = Retención de fosfato; CIC = Capacidad total del intercambio; Textura: F = franco; A = arcilloso; L = limoso; a = arenoso;  $K_v$  = Conductividad hidráulica vertical de los estratos,  $K_v$  = Resistencia hidráulica media; C = Conductividad hidráulica media;  $C_r$  = Resistencia hidráulica media;  $\log C_r$  = Índice de vulnerabilidad expresado como logaritmo de la resistencia hidráulica total en años.

TABLA 2. ZONAS Y RANGO DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO FREÁTICO DE LA CUENCA DEL RÍO LAJA.

Zona	Puntos	Espesor del suelo (cm) $\Sigma d_i$	Conductividad hidráulica vertical (cm/h) K	Resistencia hidráulica total (años) C <sub>T</sub>	AVI	Rango de vulnerabilidad
				Log C <sub>T</sub>		
1	1-C	175	0,32	0,0599	-1,22	Muy bajo
	1-A	115	0,24	0,0582	-1,24	
	1-D	150	0,41	0,0392	-1,41	
2	1-E	180	0,71	0,0300	-1,52	Bajo
	1-B	50	0,30	0,0181	-1,74	
	1-G	138	1,73	0,0159	-180	
3	1-F	116	1,11	0,0152	-1,82	Moderadamente bajo
4	2-A	75	2,54	0,0078	-2,11	Moderado
	2-C	135	3,24	0,0048	-2,32	
5	2-B	100	3,14	0,0038	-2,42	Moderadamente alto
	2-F	150	5,59	0,0031	-2,51	
	3-B	180	7,34	0,0030	-2,53	
	2-E	97	3,82	0,0028	-2,55	
	2-D	70	3,76	0,0021	-2,69	
6	5-F	180	13,39	0,0016	-2,81	Alto
	4-C	150	11,86	0,0015	-2,82	
	4-B	150	11,77	0,0015	-2,83	
	5-C	150	12,83	0,0014	-2,86	
	5-G	150	13,38	0,0013	-2,89	
	5-B	108	12,67	0,0010	-2,98	
7	3-A	35	6,70	0,0006	-3,22	Muy alto
	5-A	50	12,30	0,0005	-3,33	
	4-A	75	10,38	0,0009	-3,03	
	5-D	100	12,98	0,0009	-3,05	
	5-H	100	14,33	0,0008	-3,10	
	5-E	80	13,10	0,0007	-3,15	

## MAPA DE VULNERABILIDAD

Vulnerabilidad es un término utilizado para representar las características geológicas e hidrogeológicas intrínsecas que determinan la facilidad con la que el agua subterránea puede contaminarse por la actividad humana desde la superficie (Daly y Warren, 1994).

En base de los resultados de la conductividad hidráulica vertical de los suelos y a su espesor,

aplicando la metodología AVI, se elaboró para el área de estudio una escala de vulnerabilidad, en la cual se identificaron siete niveles de acuerdo al riesgo de contaminación del acuífero freático, cuyos rangos varían de muy bajo a muy alto (Tabla 2). al considerar estos niveles, se trazó el mapa de vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca hidrográfica del río Laja (Fig. 4).

TABLA 3. RESUMEN DE ANALISIS QUIMICOS DE AGUA SUBTERRANEA DE LA CUENCA DEL RIO LAJA.

Elementos	No. de muestras	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación estándar	Moda
STD, mg/l	46	394,0	10,0	127,6	88,0	66,0
CE, mmhos/cm	46	509,0	10,0	147,5	98,0	110,0
pH	46	8,12	5,88	7,03	0,52	7,08
Na, mg/l	46	53,4	2,35	9,4	8,66	4,6
K, mg/l	46	5,0	0,14	1,53	1,23	1,52
Ca, mg/l	46	33,0	1,94	7,87	6,39	2,21
Mg, mg/l	46	38,0	2,35	9,39	8,66	4,6
Cl, mg/l	46	68,8	0,03	6,71	13,28	0,1
SO <sub>4</sub> , mg/l	46	20,0	1,0	5,99	3,95	5,0
HCO <sub>3</sub> , mg/l	46	140,0	18,3	71,0	31,0	40,0
Fe, mg/l	46	2,55	0,0	0,26	0,63	0,003
NO <sub>3</sub> , mg/l	46	13,8	0,0005	1,55	3,44	0,02
PO, mg/l	23	0,45	0,002	0,07	0,1	0,02

## CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA

Al considerar el impacto de la actividad humana sobre el agua subterránea, es necesario tener en cuenta la calidad del agua natural como base. Normalmente, se parte de la premisa que el agua subterránea es pura y segura para beber, ya que durante el proceso de infiltración a través de la zona no saturada que representa la primera y más importante defensa natural contra la contaminación de las aguas subterráneas (Matthes *et al.*, 1985; Foster, 1985a), no solamente por su posición estratégica entre la superficie y el nivel freático sino también porque su ambiente es generalmente más favorable para la atenuación y eliminación de los contaminantes, condiciones que no tienen las aguas superficiales.

El agua subterránea de la cuenca del río Laja es bicarbonatada (Tabla 3), y presenta el cambio de tipo cárlico por tipo mixto y magnésico desde la plataforma piedemonte Andino hacia el contacto de

la Depresión Central con la cordillera de la Costa (González *et al.*, 2001b).

Los suelos de la cuenca del río Laja son apropiados para la agricultura y plantaciones forestales. Los nutrientes que proceden de los fertilizantes artificiales, derivados de la materia orgánica de los suelos o de los residuos no utilizados por las plantas, pueden fugarse de los sistemas de producción agrícola hacia las aguas subterráneas o hacia las aguas superficiales (Kiely, 2001).

Las isolíneas de las concentraciones de nitratos, cloruros, sulfatos, fosfatos, potasio y sólidos totales disueltos en el agua subterránea en el área de estudio, demuestran una tendencia de incremento de estos elementos, desde la plataforma piedemonte Andino hacia el oeste de la Depresión Central (Fig. 5). Las mayores concentraciones fueron detectadas en la zona del contacto de la depresión Central con la cordillera de la Costa.

## DISCUSION

Estudios de la contaminación en acuíferos relacionados con los depósitos glacio-fluviales y glaciolacustres cuaternarios en el sur de Canadá y Norte de Estados Unidos (Rodvang y Simpkins, 2001) demostraron que los contaminantes agrícolas son

más habituales en las aguas subterráneas relacionadas con suelos arenosos que en los arcillosos. De acuerdo a Gross *et al.* (1998), solamente el 7% de los pozos en suelos arcillosos de Ontario (Canadá) presentaron contaminación por nitratos, en com-

paración con 27% de pozos ubicados en suelos arenosos y de grava.

Sin embargo, en la cuenca hidrográfica del río Laja, se detectó una mayor concentración de nutrientes en el agua freática relacionada a los suelos de granulometría fina (Depresión Central), que en el agua de los suelos de textura gruesa (Plataforma Piedemonte Andino).

Esto se debe a que los suelos de la cuenca hidrográfica del río Laja, constituidos por materiales arenosos más finos, contienen un bajo porcentaje de arcilla y, por lo tanto, la conductividad hidráulica

vertical es elevada, lo que proporciona un menor grado de protección al acuífero subyacente; además poseen menores reservas de materia orgánica para sorción y denitrificación, y el nivel freático es poco profundo. Por el contrario, los suelos de granulometría gruesa, con un elevado porcentaje de arcilla y que tienen baja conductividad hidráulica vertical, proporcionan un grado mayor de protección al acuífero subyacente. Además el contenido de materia orgánica es alto (producto de la presencia de alofán) y el nivel freático está a mayor profundidad.

## CONCLUSIONES

Las mayores concentraciones de nitratos, cloruros, sulfatos y fosfatos en el agua subterránea, fueron detectadas en el área de contacto entre la Depresión Central y la Cordillera de la Costa. Estas concentraciones se pueden atribuir a la mayor actividad agrícola de la zona y al aporte de nutrientes por la escorrentía superficial de la Cordillera de la Costa, constituida por suelos de textura franco limosa y arcillosa, con conductividad hidráulica vertical baja, lo que probablemente generaría una mayor lixiviación lateral, dirigida hacia la Depresión Central.

La vulnerabilidad de los acuíferos relacionados con sedimentos fluvio-volcanoclásticos es función de la resistencia hidráulica (CT) de la zona no saturada a la penetración de contaminantes, así

como de la capacidad de dicha zona de atenuar o reducir la acción del o de los agentes contaminantes, por lo tanto, la capacidad de resistencia hidráulica de la zona no saturada depende del espesor (Sdi) y de la conductividad hidráulica vertical (K) de ésta. Por otra parte, la capacidad de atenuación se relaciona con la composición granulométrica, textura, porcentaje de materia orgánica, características geomorfológicas y uso del suelo.

Por último, se puede concluir que el acuífero freático de la cuenca hidrográfica del río Laja, constituido por depósitos principalmente arenosos, ubicados en la Depresión Central, presenta un promedio de vulnerabilidad natural alta, la que fluctúa entre los rangos de moderadamente alto a muy alto, predominando el rango alto (Tabla 2).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto DIUC No. 99.25.13-1 y Proyecto FONDECYT No. 1000526.

Los autores expresan sus agradecimientos a la Dirección General de Aguas, ESSBIO, Centro EULA-Chile y Universidad de Concepción, por su colaboración y por haber facilitado el acceso a sus archi-

vos y datos. Además agradecen, de manera especial, al Dr. B. Keller (Andalué Consultores Ambientales Ltda.), Dr. San Sansar Singh (Geotécnica Consultores S.A.), Sr. P. Bevacqua (Aquaconsult Cia. Ltda.) y Dr. A. Quinzio (Universidad de Concepción), quienes con sus comentarios contribuyeron efectivamente a mejorar la versión original.

## REFERENCIAS

- Allen, A.; Chapman, D. 2001. Impacts of afforestation on groundwater resources and quality. *Hydrogeology Journal*, Vol. 9, p. 390-400.
- Beauchemin, S.; Simard, R.R.; Cluis, D. 1998. Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile drained soil. *Journal Environ Qual*, No. 27, p. 721-728.
- Bolland, M.P.A.; Gilkes, R.J. 1998. The relative effectiveness of superphosphate and rock phosphate for soil where vertical and lateral leaching of phosphate occurs. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, No. 51, p. 139-153.
- Culley, J.L.B.; Bolton, E.F. 1983. Suspended solids and phosphorus loads from a clay soil: II. Watershed study. *Journal of Environmental Quality*, No. 12, Vol. 4, p. 498-503.
- Dafonte, D.J.; Valcásel, A.M.; Neira, X.X.; Paz, A. 1999. Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permeámetro Guelph. In Estudios de la Zona No Saturada del Suelo (Muñoz-Carpena, R.; Ritter, A.; Tascón, C.: editores). Libro, p. 5-10.
- Daly, D.; Warren, W.P. 1994. Mapping groundwater vulnerability to pollution: Geological Survey of Ireland guidelines. *The Geological Survey of Ireland Groundwater Newsletter*, No. 25, p. 10-15.
- Downing, J.A.; McCauley, E. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Journal of Limnology and Oceanography*, No. 37, p. 936-945.
- Foster, S.D. 1985. Groundwater pollution protection in developing countries. *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 6, p. 167-200.
- González, L.; Mardones, M.; Silva, A.; Campos, E. 1999. Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región del Biobío, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 26, No. 2, p. 145-157.
- González, L.N.; González, A.; Tume, P. 2001a. Aspectos geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos de la cuenca del río Laja, Región del Biobío, Chile. In *Congreso Las Caras del Agua Subterránea*, Vol. 2, p. 713-720. Madrid, España.
- González, L.N.; González, A.; Tume, P.; Silva, A. 2001b. Hydrogeochemistry and behaviour of groundwater in the río Laja basin, Bío-Bío Región, Chile. In *International Conference on Environmental Science and Technology*, No. 7, Vol. A, p. 268-274. Ermoupolis, Syros, Greece.
- Gross, M.J.; Barry, D.A.J.; Rudolph, D.L. 1998. Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture. *Journal Contamination Hydrology*, No. 32, Vol. 3-4, p. 63-90.
- Hrkal, Z. 2001. Vulnerability of groundwater to acid deposition, Jizerské Mountains, Northern Czech Republic: construction and reliability of a GIS-based vulnerability map. *Hydrogeology Journal*, No. 4, Vol. 9, p. 348-357.
- Keeney, D.R. 1986. Sources of nitrate to ground water. *Criteries Review Environmental Control*, Vol. 16, No. 3, p. 257-304.
- Kiely, G. 2001. Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Editorial McGraw-Hill, 1309 p. Madrid.
- Likens, G.E. 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed ecosystem. *Ecological Monographs*, No. 40, p. 23-47.
- Mardones, M. (En prensa). Uso del suelo y grado de antropización de las subcuencas de la hoya del Laja y sus efectos sobre el sistema geográfico. *Instituto Geográfico Militar, Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, No. 48, p. 15.
- Matthess, G.; Pekdeger, A.; Shrötter, J. 1985. Behaviour of contaminants in groundwater. Theoretical background, hydrogeology and practice of groundwater protection zone. *Editorial Heise*, Vol. 6, p. 1-86.
- McLaughlin, R.A.; Pope, P.E.; Hansen, E.A. 1985. Nitrogen fertilization and groundcover in a hybrid poplar plantation. *Journal of Environmental Quality*, No. 14, p. 241-145.
- Melian, R.; Myrlan, N.; Gouriev, A.; Moraru, C.; Radstake, F. 1999. Groundwater quality and rural drinking-water supplies in the Republic of Moldova. *Hydrogeology Journal*, No. 2, Vol. 7, p. 188-196.
- Moreno, H.; Varela, J. 1985. Geología, volcánismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la Región Central y Sur de Chile. In *Suelos volcánicos de Chile* (Tosso, J.; editor). *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, Capítulo 6, p. 491-526. Santiago.
- Nolan, B.T.; Ruddy, B.C.; Helsel, D.R. 1997. Risk of nitrate in groundwaters of the United States-a national perspective. *Environmental Science and Technology*, No. 31, p. 2229-2236.
- Reynolds, W.D.; Elrick, D.E. 1985. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the 'Guelph permeameter'. *Soil Science*, No. 133, p. 61-64.
- Reynolds, W.D.; Elrick, D.E. 1986. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and conductivity pressure-head relationship. *Ground Water Monitoring Review*, No. 6, No. 1, p. 84-95.
- Reynolds, W.D.; Vieira, S.R.; Topp, G.C. 1992. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. *Canadian Journal of Soil Science*, No. 72, p. 489-501.

- Rodvang, S.J.; Simpkins, W.W. 2001. Agricultural contaminants in Quaternary aquitards: A review of occurrence and fate in North America. *Hydrogeology Journal*, No. 1, Vol. 9, p. 44-59.
- Smith, V.H.; Tilman, G.D.; Necola, J.C. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environment Pollution*, No. 100, No. 1-3, p. 179-196.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar, L. 1993. Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 18, No. 1, p 25-37.
- Varela, J.; Moreno, H. 1982. Los Depósitos de Relleno de la Depresión Central de Chile entre los ríos Lontué y Bío-Bío. In *Congreso Geológico Chileno, No. 3, Actas*, Vol. 2, p. F280-F306. Concepción.
- Varela, J.; Moreno, H.; Lahsen, A.; Vergara, M. 1988. Los depósitos de relleno cuaternario del curso superior del río Laja (VIII Región). In *Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 2, p D159-D177. Santiago.
- Tesoriero, A.J.; Voss, F.D. 1997. Predicting the probability of elevated nitrate concentrations in the Puget Sound Basin: implications for aquifer susceptibility and vulnerability. *Ground Water*, No. 35, Vol. 6, p. 1029-1039.
- Thiele, R.; Moreno, H.; Elqueta, S.; Lahsen, A.; Rebollo, S.; Petit-Breuilh, M.E. 1998. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 25, No. 2, p. 229-255.
- Zhang, W.L.; Tian, Z.X.; Zhang, N.; Li, X.Q. 1996. Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agriculture, Ecosystems And Environment*. Vol. 59, No. 3, p. 223-231.
- Zunino, H.; Borie, F. 1982. Materia Orgánica y procesos en suelos alofánicos. In suelos volcánicos de Chile. In *suelos volcánicos de Chile* (Tosso, J.; editor). *Ministerio de Agricultura, Edición del Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, Capítulo 5, p. 435-490. Santiago.

Manuscrito recibido: Febrero 28, 2002; aceptado: Enero 7, 2003.