SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EVALUAR VULNERABILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS A ESCALA PREDIAL.

JOSÉ LUIS ARUMÍ [1]
JOSÉ MARÍA PERALTA[2]

RESUMEN

Utilizando dos predios ubicados en la VI y VIII regiones de Chile, se compararon tres metodologías para el análisis de vulnerabilidad a escala predial: GODS, AVI y BGR-DGA. Para esto se utilizó información directamente obtenida de terreno y desde cartografía temática.

El uso del método GODS a escala predial está muy sujeto al criterio del evaluador y por ello sus resultados son subjetivos y además es muy difícil diferenciar niveles de vulnerabilidad dentro del predio. El método AVI incorpora muy poca información, sin embargo está basado solamente en variables obtenidas del terreno, por lo que presenta la ventaja de eliminar la subjetividad y diferenciar mejor los resultados sobre el terreno. El método BGR-DGA también elimina la subjetividad e incorpora elementos como la recarga y la existencia de confinamiento. Sin embargo este método resulta demasiado conservador y genera resultados similares para diferentes zonas de los predios. Lo anterior se debe a que castiga fuertemente la presencia de niveles freáticos cercanos a la superficie, en relación con las otras propiedades que afectan la vulnerabilidad.

Si bien es cierto el método BGR-DGA tiene carácter de oficial en Chile, es recomendable su uso en conjunto con el método AVI, pues este último permite obtener una mejor distribución de la vulnerabilidad en el predio y entrega criterios para reducir el sesgo conservador del método BGR-DGA.

[1] Ingeniero Civil Ph.D., Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción. mail: jarumi@udec.cl
[2] Ingeniero Agrónomo Ph.D., Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, INIA, mail: jperalta@inia.cl

1. INTRODUCCIÓN

La motivación de este estudio se origina en la necesidad de evaluar las herramientas existentes para la adopción de la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas. Esta normativa establece la necesidad de realizar análisis de vulnerabilidad a los sistemas de aguas subterráneas que puedan ser impactados por la emisión de residuos líquidos, y establece límites máximos de contaminantes en las descargas dependiendo de la vulnerabilidad detectada.

Se define la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación como la facilidad relativa con la que un contaminante, aplicado sobre la superficie, puede emigrar hasta el agua subterránea. En la literatura especializada es posible encontrar múltiples metodologías para evaluar la vulnerabilidad de un sistema de aguas subterráneas (Espinoza y Ramirez, 2002). Sin embargo, la mayor parte de estas metodologías apuntan a evaluaciones de vulnerabilidad realizadas sobre una escala regional y no entregan información detallada a escala local.

El problema que enfrenta la aplicación de la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas es que el impacto provocado por la infiltración de un RIL en un acuífero es de carácter local. Además de lo anterior, se debe agregar el problema de que las diferentes metodologías para evaluar vulnerabilidad no necesariamente entregan resultados similares (Coello y Galárraga, 2002). Por lo anterior fue necesaria la implementación de una metodología oficial, labor que realizó la Dirección General de Aguas (DGA) mediante el desarrollo del Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos en la Norma de Emisión a Aguas Subterráneas, Decreto Supremo Nº 46 de 2002.

La propuesta de la DGA, consiste en aplicar la metodología BGR, desarrollada por el Instituto Federal para las Geociencias y los Recursos Naturales de Alemania (Espinoza y Ramirez, 2002). Esta propuesta tiene carácter oficial y es mandatoria para la evaluación de vulnerabilidad en un sistema de aguas subterránea. No obstante lo anterior, se planteó la conveniencia de comparar la aplicación de la metodología propuesta por la DGA con otras dos metodologías factibles de ser usadas para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a escala local. Para seleccionar estas dos metodologías de comparación se hizo una consulta a diferentes expertos, que trabajan en el tema de vulnerabilidad de aguas subterráneas, tanto en Chile como en el extranjero. Del resultado de estas consultas se seleccionaron los Métodos GODS y AVI, para ser comparados con el método BGR-DGA.

2. METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

2.1 Método GODS

Este método fue propuesto inicialmente por Foster e Hirata (1988) y consiste en la creación de un índice de vulnerabilidad especialmente desarrollado para zonas con escasa información. Inicialmente el índice se calculaba mediante la multiplicación de tres parámetros (ecuación 1):

$$I = G \cdot O \cdot D \tag{1}$$

Donde:

- G (Groundwater ocurrance) — Corresponde a un parámetro que representa el tipo de acuífero que es evaluado
- O (Overlying lithology) — Representa la litología de la zona no saturada
- D (Depth to groundwater) — Representa la profundidad del agua subterránea

Para la aplicación de este método se debe utilizar la Figura 1 (Foster e Hirata, 1998)

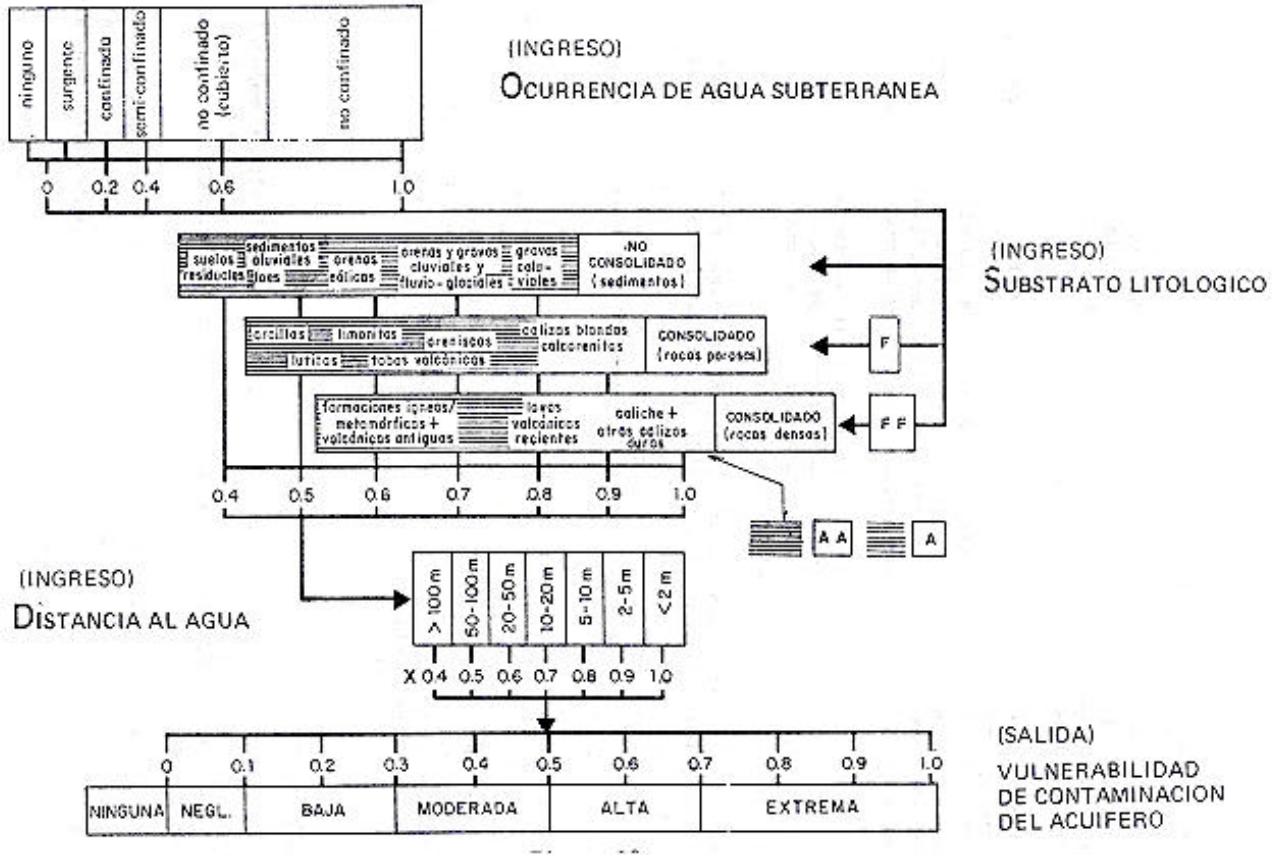

Figura 1. Diagrama de flujo para la aplicación del Método GOD (Foster e Hirata 1988)

Con el propósito de incluir el efecto que tiene el primer horizonte del suelo sobre la protección del sistema de aguas subterráneas se incorpora el parámetro S, que representa las características del suelo en donde debe infiltrar un contaminante (Coello y Galárraga, 2002; González y González 2003). El parámetro se evalúa utilizando el criterio indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Estimación del factor de suelo (parámetro S) del método GODS

Textura	Factor del suelo (S)
Franco Arcillosa	0,6
Franco arcillosa – arenosa	0,7
Franco arenosa	0,8

Finalmente el índice de vulnerabilidad es definido por el producto de los cuatro parámetros (ecuación 2):

$$I = G \cdot O \cdot D \cdot S \tag{2}$$

2.2 Método AVI

Este método consiste simplemente en una estimación del tiempo de residencia de un contaminante en la zona no saturada, bajo el supuesto de que este viaja en forma vertical (Coello y Galárraga, 2002; Espinoza y Ramirez, 2002). Para esto se estima un parámetro llamado Resistencia Hidráulica (C) mediante la siguiente expresión:

$$C = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{K_i} \tag{3}$$

Donde**:**

N : Número de estratos identificados en la zona no saturada.
Di : Espesor del estrato i-ésimo.
Ki : Conductividad hidráulica saturada del estrato i-ésimo.

2.3 Método BGR según manual DGA

Para la aplicación del Método BGR, de acuerdo a las instrucciones de la DGA, se debe medir el nivel freático en la zona a evaluar durante la primavera. Lo anterior se debe al hecho de que durante dicha estación el nivel freático es más superficial. Además se deben realizar una serie de calicatas que permitan caracterizar la composición y los perfiles estratigráficos del suelo no saturado en la zona en estudio.

Para aplicar este método se deben evaluar cinco parámetros:

1. Capacidad de Campo efectiva del primer metro de la columna de suelo no saturado ubicada sobre el nivel freático. Este parámetro se obtiene a partir de exploraciones realizadas en calicatas (Parámetro S).

2. Tasa de percolación, se debe evaluar tanto la recarga natural como la recarga artificial que percola al acuífero (Parámetro W).

3. Composición de la zona no saturada y el suelo orgánico (Parámetro Ru).

4. Espesor de la zona no saturada (Parámetro T).

5. Condiciones de acuíferos artesianos (Parámetro Hp)

A cada parámetro se le asigna un puntaje de acuerdo a tablas de referencia publicadas en el Manual de la DGA. La suma de los puntajes entrega el índice de vulnerabilidad que se clasifica en los siguientes rangos: Alta, Media y Baja.

2.4 Evaluación de la vulnerabilidad

En la Tabla 2 se presenta una uniformización de los índices de vulnerabilidad agrupados de acuerdo al criterio de definir vulnerabilidades altas, media y bajas.

Tabla 2. Evaluación de vulnerabilidad

Vulnerabilidad	GODS	AVI	BGR - DGA
Despreciable	0 – 0,16	> 10.0000	> 4.000
Baja	0,16 – 0,32	1.000-10.000	2.000 – 4.000
Moderada	0,32 – 0,48	100-1.000	1.000 – 1.999
Alta	0,48 – 0,64	10-100	500 – 999
Extrema	0,64 – 0,80	< 10	< 500

3. APLICACIÓN DE LAS METODOGÍAS

Para evaluar la aplicación de estas metodologías a escala predial, se utilizaron dos predios ubicados en zonas de alta producción agrícola, pero con características hidrogeológicas diferentes.

3.1 Predio en Cato

El primer predio en estudio se encuentra ubicado en la ribera sur del río Cato, inmediatamente aguas arriba de su confluencia con el río Ñuble. Administrativamente el predio se encuentra ubicado en la Comuna de Chillán, Octava Región.

Geológicamente el predio está ubicado en el límite norte de un relleno aluvial formado por el río Chillán. Este relleno tiene como características principales el estar constituido por un material gravo-arenoso, de un espesor de hasta 100 metros y de una pendiente muy suave (Pro Itata, 1992).

En general, en la zona de emplazamiento del predio se puede esperar la existencia de un acuífero superior, con una profundidad del nivel freático de entre 1 a 3 metros, semi-confinado por una capa de 20 centímetros de material consolidado de origen volcánico

(Tosca). Pruebas realizadas en terreno demostraron que le presión hidráulica que el acuífero ejerce sobre la capa semi confinante no es significativa.

A escala regional, la dirección general del flujo de aguas subterráneas tiende a ser paralela a la red de drenaje superficial definida por el río Ñuble. Sin embargo a la escala local, correspondiente al predio, el acuífero superficial drena hacia el río Cato.

Durante el mes de Noviembre del año 2003 se realizó una campaña de terreno en la que se realizaron 6 calicatas distribuidas en el predio. En cada calicata se describió el perfil estratigráfico encontrado y se midió la profundidad del nivel freático (Tablas 3 y 4).

En la Tabla 5 se presentan los valores de conductividad hidráulica saturada (Ks), capacidad de campo (CC) y densidad efectiva de sedimentación para cada tipo de suelo encontrado en las calicatas.

Tabla 3. Ubicación calicatas y profundidad del nivel freático medido en octubre 2003

Calicata	Coordenadas UTM, Huso 18, PSAD 56		Profundidad nivel freático metros
	Este	Norte	
1	762.896	5.950.074	2,0
2	762.677	5.949.732	3,3
3	762.707	5.950.358	1,1
4	762.384	5.949.840	3,1
5	762.320	5.950.888	2,0
6	763.381	5.950.077	1,1

Tabla 4. Granulometría para cada horizonte encontrado en las calicatas

Calicata	Horizonte	Profundidad cm	Porcentaje			Textura
			Arcilla	Limo	Arena y grava	
1	1	0-55	24	35	41	Franco
1	2	55-65	9	39	52	Franco arenoso
1	3	65-180	12	25	63	Franco arenoso
1	4	180-210	18	45	37	Franco
2	1	0-50	7	64	29	Franco limoso
2	2	50-100	26	33	40	Franco
2	3	100-120	8	15	77	Arena
3	1	0-30	23	46	31	Franco
3	2	30-70	9	23	68	Franco arenoso
3	3	70-130	4	19	77	Arena
4	1	0-50	51	33	16	arcilla
4	2	50-110	19	20	62	Franco arenoso
4	3	110-150	10	52	38	Franco limoso
4	4	150-330	5	12	83	Arena
5	1	0-30	29	38	32	Franco arcilloso
5	2	30-110	4	37	59	Franco arenoso
5	3	110-400	3	17	80	Arena
6	1	0-30	32	31	38	Franco arcilloso
6	2	30-75	21	43	36	franco
6	3	75-100	9	49	41	Franco limoso
6	4	100-140	4	31	65	Franco arenoso
6	5	140-	4	27	70	Arena

Tabla 5. Parámetros hídricos de los suelos, predio de Cato. Donde: Ks es la conductividad hidráulica saturada; CC es la capacidad de campo y Da la densidad efectiva de sedimentación

Calicata	Horizonte	Parámetros hídricos		
		Ks [cm/hr]	CC %	Da [gr/cm^3]
1	1	0,48	27,0	1,40
	2	2,60	21,6	1,56
	3	1,74	20,0	1,54
	4	0,94	26,0	1,43
3	1	0,61	28,4	1,38
	2	2,72	18,3	1,59
	3	5,40	15,2	1,70
4	1	0,18	44,3	1,23
	2	0,69	22,2	1,47
	3	2,29	24,7	1,52
	4	6,14	14,0	1,71
5	1	0,35	30,5	1,35
	2	4,15	19,6	1,66
	3	5,78	14,6	1,21
6	1	0,26	30,6	1,34
	2	0,69	26,9	1,40
	3	2,54	24,1	1,54
	4	4,49	18,1	1,68
	5	4,80	16,8	1,69

3.2 Análisis de vulnerabilidad

El análisis se realizó evaluando la vulnerabilidad en las cinco calicatas que representan los suelos existentes en el predio. La calicata número dos fue desechada, pues su estratigrafía no es representativa, ya que fue construida en una zona que presentó alteraciones antrópicas (rellenos).

3.3 Método GODS

Usando la Figura 1, el índice G (groundwater occurrence) fue evaluado como el correspondiente a la existencia de un acuífero libre (G=0,9). El índice O, correspondiente al tipo de sustrato litológico ubicado sobre el acuífero fue evaluado considerando que es un relleno aluvial y fluvioglacial (O=0,7). La profundidad del nivel freático y la textura del primer horizonte de suelo fueron medidas y caracterizadas respectivamente para cada calicata.

Tabla 6. Aplicación del índice GODS

Calicata	G (Tipo de acuífero)	O Sustrato litológico	D Profundidad Nivel freático	S Tipo de Suelo	GODS	Vulnerabilidad
1	0,9	0,7	1,0	0,7	0,44	Moderada
3	0,9	0,7	1,0	0,7	0,44	Moderada
4	0,9	0,7	0,9	0,6	0,34	Moderada
5	0,9	0,7	1,0	0,6	0,38	Moderada
6	0,9	0,7	1,0	0,6	0,38	Moderada

3.3 Método AVI

Para calcular el índice de vulnerabilidad usando el método AVI, se calculó la conductividad hidráulica para cada horizonte identificado en las calicatas:

Tabla 7. Aplicación del índice AVI

Calicata	Profundidad [cm]	$\frac{d_i}{K_i}$	AVI	Vulnerabilidad
1	55	114,58		
	10	3,85		
	115	66,09		
	30	31,91	216,44	moderada
3	30	49,18		
	40	14,71		
	60	11,11	75,00	alta
4	50	277,78		
	60	86,96		
	40	17,47		
	180	29,32	411,52	Moderada
5	30	85,71		
	80	19,28		
	390	67,47	172,47	moderada
6	30	115,38		
	45	65,22		
	25	353,07		
	40	8,91		
	100	20,83	563,41	moderada

3.4 Método BGR – DGA

En la Tabla 8 se presenta el cálculo del índice de vulnerabilidad BGR para cada calicata considerada. En la Tabla 9, se presenta una comparación de los resultados de vulnerabilidad obtenidos para cada calicata.

Tabla 8. Aplicación Método BGR-DGA

Calicata	Horizonte	Parámetros BGR-DGA				P1 = S·W	P2 = Ru·T	Indice P1+P2
		S	W	Ru	T			
1	1		0,75	150	0,55	375,00	74,81	449,81
1	2			50	0,10			
1	3	**500**		35	0,35			
1	4			130				
3	1		0,75	140	0,30	375,00	52,13	427,13
3	2			50	0,40			
3	3	**500**		25	0,30			
4	1		0,75	270	0,50	562,50	182,25	744,75
4	2			50	0,60			
4	3	**750**		120	0,40			
4	4			20	1,50			
5	1		0,75	150	0,30	375,00	77,25	452,25
5	2			50	0,80			
5	3	**500**		20	0,90			
6	1		0,75	150	0,30	562,50	99,75	662,25
6	2			140	0,45			
6	3	**750**		100	0,25			
6	4			35				
6	5			20				

Tabla 9. Comparación de vulnerabilidad estimada con los tres métodos para cada calicata del Predio en Cato

Calicata	Valor de Vulnerabilidad		
	GODS	AVI	BGR-DGA
1	Moderada	Moderada	Alta
3	Moderada	Alta	Alta
4	Moderada	Moderada	Alta
5	Moderada	Moderada	Alta
6	Moderada	Moderada	Alta

4. APLICACIÓN AL PREDIO DE PICHIDEGUA

El segundo predio estudiado se encuentra ubicado en la comuna de Pichidegua, Provincia de Cachapoal, VI Región. Desde el punto de vista del drenaje de las aguas superficiales, el predio está inserto en la red de drenaje del río Tingiririca. El predio es cruzado por una red de canales de riego, muchos de los cuales son de antigua data. La forma de la red de drenaje permite inferir que el sector norte del predio drena hacia río Tingiririca.

El predio está ubicado en un valle de la Cordillera de la Costa. La parte norte corresponde a laderas de cerros pertenecientes a esta unidad y la parte sur a un valle formado por rellenos cuaternarios.

En general, en las zonas planas del predio, que coinciden con los depósitos cuaternarios, es posible esperar las formaciones acuíferas típicas de la Cordillera de la Costa: acuíferos formados por material arenoso limoso, de permeabilidad media a baja y con una profundidad del nivel freático cercana a la superficie.

Durante el mes de Noviembre del año 2003 se realizó una campaña de terreno en la que se realizaron 6 calicatas distribuidas en el predio. En cada calicata se describió el perfil estratigráfico encontrado y se midió la profundidad del nivel freático (Tablas 10 y 11) y se determinaron las propiedades hídricas (Tabla 12).

Tabla 10. Ubicación calicatas y profundidad del nivel freático medido en Octubre 2003

Calicata	Coordenadas UTM, Huso 18, PSAD 56		Profundidad nivel freático metros
	Este	Norte	
CP1	282.684	6.191.398	1,15
CP2	283.066	6.192.613	> 1,50
CP3	281.920	6.193.793	0,85
CP4	282.203	6.192.291	1,05
SP1	282.077	6.193.992	0,48
SP2	283.686	6.191.656	1,11

Tabla 11. Granulometría para cada horizonte encontrado en las calicatas

Calicata	Horizonte	Profundidad cm	Porcentaje			Textura
			Arcilla	Limo	Arena y grava	
CP2	1	0 – 15	13,0	28,9	58,1	Franco Arenoso
CP2	2	15 – 35	16,9	17,0	66,1	Franco Arenoso
CP2	3	35 – 90	9,5	52,2	58,3	Franco Arenoso
SP1	1	0 – 20	18,2	44,9	36,9	Franco Limoso
SP1	2	20 – 60	29,4	60,3	10,3	Franco Limoso
SP1	3	60 – 85	27,1	45,9	27,0	Franco Limoso
CP1	1	150 – 300	16,7	24,3	59,0	Franco Arenoso
CP1	2	0 – 25	35,6	57,1	29,3	Franco Arcilloso
CP1	3	25 – 70	27,8	45,6	26,6	Franco
CP1	4	70 – 115	17,7	35,1	47,2	Franco
CP3	1	0 – 20	9,80	39,9	50,3	Franco
CP3	2	20 – 38	1,80	14,1	84,1	Arena Franco
CP3	3	38 – 60	5,30	33,9	60,8	Franco Arenoso
CP3	4	60 – X	22,5	67,2	10,3	Franco Limoso
CP4	1	0 – 20	26,6	52,2	21,2	Franco Limoso
CP4	2	20 – 48	32,2	43,1	24,7	Franco Arcilloso
SP2	1	0 – 25	27,8	42,4	29,8	Franco Arcilloso
SP2	3	25 – 50	30,6	45,1	24,3	Franco Arcilloso
SP2	4	50 – 75	34,5	41,7	23,8	Franco Arcilloso
SP2	5	75 – 100	26,0	42,1	31,9	Franco

Tabla 12. Parámetros hídricos de los suelos, predio de Pichidegua. Donde: Ks es la conductividad hidráulica saturada; CC es la capacidad de campo y Da la densidad efectiva de sedimentación

Identificación Muestra	Parámetros hídricos		
	Ks [cm/hr]	CC %	Bd [gr/cm^3]
CP2 0 – 15	0,19	48,4	1,21
CP2 15 – 35	0,17	48,6	1,21
CP2 35 – 90	0,20	48,9	1,20
SP1 0 – 20	0,27	36,6	1,28
SP1 20 – 60	2,38	43,3	1,50
SP1 60 – 85	0,45	30,5	1,35
CP1 150 – 300	0,17	48,1	1,21
CP1 0 – 25	0,33	29,8	1,36
CP1 25 – 70	0,45	30,3	1,35
CP1 70 – 115	0,18	41,9	1,25
CP3 0 – 20	0,21	44,7	1,22
CP3 20 – 38	0,23	50,0	1,19
CP3 38 – 60	0,23	50,0	1,19
CP3 60 – X	2,49	27,5	1,49
CP4 0 – 20	0,78	28,4	1,39
CP4 20 – 48	0,50	28,9	1,37
SP2 0 – 25	0,35	31,6	1,34
SP2 25 – 50	0,55	26,7	1,37
SP2 50 – 75	0,52	28,0	1,38
SP2 75 – 100	0,31	32,8	1,32

4.1 Análisis de vulnerabilidad

El análisis se realizó evaluando la vulnerabilidad, en las seis calicatas que representan los suelos existentes en el predio.

4.2 Método GODS

Usando la Figura 1, el índice G (groundwater occurrence) fue evaluado como el correspondiente a la existencia de un acuífero libre (G = 0,9). El índice O, correspondiente al tipo de sustrato litológico ubicado sobre el acuífero fue evaluado considerando que es un relleno aluvial (O = 0,7). La profundidad del nivel freático y la textura del primer horizonte de suelo fueron medidas y caracterizadas respectivamente para cada calicata (Tabla 13).

Tabla 13. Aplicación del índice GODS

Calicata	G (Tipo de acuífero)	O Sustrato litológico	D Profundidad Nivel freático	S Tipo de Suelo	GODS	Vulnerabilidad
CP2	0,9	0,7	1	0,8	0,504	Alta
SP1	0,9	0,7	1	0,8	0,504	
CP1	0,9	0,7	1	0,8	0,504	
CP3	0,9	0,7	1	0,8	0,504	
CP4	0,9	0,7	1	0,8	0,504	
SP2	0,9	0,7	1	0,8	0,504	

4.3 Método AVI

Para calcular el índice de vulnerabilidad usando el método AVI, se calculó la conductividad hidráulica para cada horizonte identificado en las calicatas (Tabla 14):

Tabla 14. Aplicación del índice AVI

Calicata	Profundidad [cm]	$\frac{d_i}{K_i}$	AVI	Vulnerabilidad
CP2	15	78,95		
	20	117,65		
	55	275,00	471,59	Moderada
SP1	20	74,07		
	40	16,81		
	25	55,56	146,44	Moderada
CP1	150	882,35		
	25	75,76		
	45	100,00		
	45	250,00	1.308,11	Baja
CP3	20	95,24		
	18	78,26		
	22	95,65		
	55	22,09	291,24	Moderada
CP4	20	25,64		
	28	56,00	81,64	Alta
SP2	25	71,43		
	25	45,45		
	25	48,08		
	36	116,13	281,09	Moderada

4.4 Método BGR – DGA

En la Tabla 15 se presenta el cálculo del índice de vulnerabilidad BGR para cada calicata considerada.

Tabla 15. Aplicación Método BGR-DGA

Calicata	Horizonte	Parámetros BGR-DGA				P1 = S·W	P2 = Ru·T	Indice P1+P2
		S	W	Ru	T			
CP2	1	750	0,75	300	0,15	562,5	204	767
	2			310	0,2			Alta
	3			300	0,55			
SP1	1	750	0,75	180	0,2	562,5	98,06	660
	2			140	0,4			Alta
	3			155	0,25			
CP1	4		0,75	300	1,5	562,5	464,25	1027
	1	750		100	0,25			Moderada
	2			120	0,45			
	4			200	0,45			
CP3	1	750	0,75	270	0,2	562,5	154,2	717
	2			320	0,18			Alta
	3			300	0,22			
	4			140	0,2			
CP4	1	750	0,75	160	0,3	93,75	66,45	160
	2			145	0,28			Extrema
SP2	1	750	0,75	160	0,25	562,5	127,57	690
	2			150	0,25			Alta
	3			140	0,25			
	4			160	0,36			

En la Tabla 16, se presenta una comparación de los resultados de vulnerabilidad obtenidos para cada calicata.

Tabla 16. Comparación de vulnerabilidad estimada con los tres métodos para cada calicata del Predio en Pichidegua

Calicata	Valor de Vulnerabilidad		
	GODS	AVI	BGR-DGA
CP2	Alta	Moderada	Alta
SP1	Alta	Moderada	Alta
CP1	Alta	Baja	Moderada
CP3	Alta	Moderada	Alta
CP4	Alta	Alta	Extrema
SP2	Alta	Moderada	Alta

5. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

El método GODS fue desarrollado para el análisis de vulnerabilidad de un sistema acuífero a escala regional. El uso del método a escala predial esta muy sujeto al criterio del evaluador y por ello sus resultados son subjetivos y además es muy difícil diferenciar niveles de vulnerabilidad diferentes dentro del predio. Por lo anterior, no se recomienda el uso de este método para el análisis de vulnerabilidad a escala predial.

El método AVI incorpora muy poca información, sin embargo está basado solamente en variables medidas en terreno, por lo que presenta la ventaja de eliminar la subjetividad y diferencia mejor los resultados entre las distintas calicatas efectuadas.

El método BGR-DGA también elimina la subjetividad e incorpora elementos como la recarga y la existencia de confinamiento. Sin embargo este método resulta demasiado conservador y genera resultados similares en las calicatas. Lo anterior se debe a que castiga fuertemente la presencia de niveles freáticos cercanos a la superficie.

Si bien es cierto el método BGR-DGA tiene carácter de oficial, es recomendable su uso conjunto con el método AVI, pues éste permite obtener una mejor distribución de la vulnerabilidad en el predio y entrega criterios para reducir el sesgo conservador del método BGR-DGA.

REFERENCIAS

Espinoza, C., J. Ramírez. 2002. Análisis comparativo de técnicas de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos. Aplicación a la zona norte de la ciudad de Santiago. II Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: caracterización y evaluación. La Habana, Cuba, Abril 2002.

CNR, Comisión Nacional de Riego. 1987. Estudio de suelos, proyecto Itata, Etapas 1 y 2. Consorcio Agrolog Chile S.A.- R&Q Ingenieros.

Coello R. X., R. H. Galárraga, 2002. Metodologías para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos en medios urbanos, el caso de Quito, Ecuador. En Groundwater And Human Development. Bocanegra, E - Martínez, D - Massone, H (Eds.) 2002 - ISBN 987-544-063-9.

González. L.N., y A. E. González. Vulnerabilidad de los acuíferos semiconfinados multicapas en el Valle Central, Centro Sur de Chile. II Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: caracterización y evaluación. La Habana, Cuba, Abril 2002.

Foster S., Hirata R., 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. Organización Panamericana de la Salud, CEPIS, Perú, 74 pp.

Proitata 1992. Proyecto Itata, Estudio Hidrológico y Situación Actual Agropecuaria. Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile.