

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO NORTE DE QUITO

Xavier Coello Rubio¹ & Remigio Galárraga Sánchez²

RESUMEN - El estudio de vulnerabilidad del acuífero norte de Quito, se desarrolló sobre la base de información hidrometeorológica existente en la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q), el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y en la Escuela Politécnica Nacional (EPN), utilizando datos químicos, isotópicos, geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos. El área de estudio se halla delimitada desde el sector de El Labrador al sur hasta la población de San Antonio de Pichincha al norte, al este se halla definido por el Horst que separa el Valle de Quito con el de Guayllabamba y al Oeste por las partes bajas de los volcanes Pichincha y Casitagua.

Para comprender la dinámica del acuífero, se modelaron las características físicas del mismo y de esa forma sentar las bases sobre las cuales se desarrollarán los futuros modelos de transporte de contaminantes, indispensable para el estudio de Análisis de Riesgo a la contaminación que deberá realizarse posteriormente.

Sobre la base de la información recopilada y del modelo matemático desarrollado, se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad por medio de tres índices: DRASTIC, GODS y AVI, con la ayuda del análisis espacial y del álgebra de mapas, para lo cual se utilizó el SIG ArcView®, y la herramienta Spatial Analyst®, para efectos de compararlos entre sí y seleccionar el mejor método para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos ubicados en zonas urbanas. Se desprende que la metodología DRASTIC es el más adecuado para ambientes urbanos.

ABSTRACT - The vulnerability study of the Quito Northern Aquifer was developed based on the existing hydrometeorological information at the Quito Metropolitan Sewer and Potable Water Authority (EMAAP-Q), the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) and at Escuela Politécnica Nacional (EPN), using chemical, isotope, geological, hydrogeological and

¹ ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - Centro de Investigaciones y Estudios para la Prevención de Desastres Hidrogeodinámicos y Antrópicos - HIGEODES
Ladrón de Guevara E11-253
Teléfonos: 593-2-2238033 / 2286298
Fax: 593-2-2536077

E-mail: xcoello@server.epn.edu.ec

² ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL AGUA
Ladrón de Guevara E11-253
Teléfonos: 593-2-2228113
Fax: 593-2-2536077
E-mail: remigala@server.epn.edu.ec

hydrologic information. The study area is delimited from the sector of El Labrador to the south up to the town of San Antonio de Pichincha to the north. Towards east it is defined by the Horst that separates the Valley of Quito with that of Guayllabamba, and on the west on the lower parts of the Pichincha and Casitagua volcanoes.

In order to understand the dynamics of the aquifer, the physical characteristics were modelled, and therefore to set up the bases on which future models of transport of pollutants will be developed, indispensably for the study of Risk Analysis of the pollution that will have to be done later on.

Based on the compiled information and on the mathematical model developed, the maps of vulnerability were obtained by means of three hydrogeology indexes: DRASTIC, GODS and AVI, with the help of space analysis and on the topology of maps, therefore the SIG Arc View®, and the tool Spatial Analyst® were used to compare among them and to determine the best method to evaluate the vulnerability of the aquifer located in urban areas. It is clear that the DRASTIC index is most appropriate for urban environments.

Palabras clave: Modelación, contaminantes, vulnerabilidad, DRASTIC, GODS, AVI, GIS.

Keywords: Modelling, pollutants, vulnerability, DRASTIC, GODS, AVI, SIG.

1. INTRODUCCIÓN

El interés que la comunidad científica mundial ha puesto en los recursos hídricos subterráneos, tiene su origen en la creciente demanda del agua a escala mundial, acompañado de la disminución de su disponibilidad como consecuencia directa de la desigual distribución tempoespacial de la precipitación, la contaminación de las fuentes, y quizá a la influencia de los cambios globales.

La importancia del Acuífero Norte de Quito (ANQ), está en que es una fuente potencial y relativamente segura con que cuenta la ciudad, y podría proveer de agua, que actualmente es abastecida por los proyectos Papallacta y La Mica Quito-Sur, para el caso en que estos dejen de funcionar o sean insuficientes de acuerdo con el crecimiento poblacional. El ANQ se deterioró debido a la sobreexplotación que fue sometido en la década de los 80; sin embargo, a partir de los años 90, el acuífero ha estado sometido a un proceso de recarga natural, y a la potencial contaminación debido, especialmente, al mal funcionamiento del sistema de alcantarillado y a las descargas puntuales de contaminantes en los sectores industriales, por lo que se torna indispensable el evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y así tener una fuente alternativa segura para la ciudad.

Para la consecución de este proyecto se modeló el flujo en el acuífero con la ayuda del sistema de modelación VISUAL MODFLOW, el cual contiene varios módulos e interfases, como el Modflow y Flowpath, lo que permitió determinar los flujos preferenciales de contaminación, así como el mapeo tridimensional del acuífero.

Por otro lado y siendo el insumo más importante de este estudio, se determinaron los grados de vulnerabilidad por tres métodos diferentes, para lo cual se utilizaron los sistemas de información geográfica, el análisis de la topología y de los atributos no espaciales, específicos de la zona de estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar varias metodologías de vulnerabilidad aplicadas al Acuífero Norte de Quito (ANQ), que subyace a una zona urbana importante, y de esta manera determinar la susceptibilidad del mismo a la contaminación.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- i) Sobre la base de un análisis comparativo, determinar el índice de vulnerabilidad más adecuado para acuíferos en zonas urbanas.
- ii) Obtener un mapa de vulnerabilidad del Acuífero Norte de Quito, que proporcione las condiciones de calidad del agua existentes.
- iii) Coadyuvar al conocimiento de las metodologías existentes, aplicarlas a casos urbanos y fortalecer este campo en el contexto Iberoamericano.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Quito, es una cuenca sedimentaria alargada en dirección general Sur-Norte. Se halla ubicada a lo largo de un valle limitado por las Laderas del Pichincha al **Oeste** y por el graben (una serie de elevaciones de origen tectónico) que dividen la ciudad de los valles de Los Chillos y de Tumbaco al **Este**, y de **Norte** a **Sur** la franja longitudinal que se forma entre los barrios de Cotocollao y Guamaní respectivamente, lo que la califica como un conjunto de cubetas por estar interrumpida en el centro de la cuenca por el Panecillo (de origen volcánico) y otros levantamientos del terreno en la parte central de la ciudad.

La zona de estudio se encuentra en la ciudad de Quito, capital de la República del Ecuador. La ciudad está localizada en la parte central de la Cordillera de los Andes y se caracteriza principalmente por estar rodeada por cinco volcanes. La figura N° 1 indica la ubicación tanto del acuífero como de la ciudad respecto al Ecuador y a América del Sur.

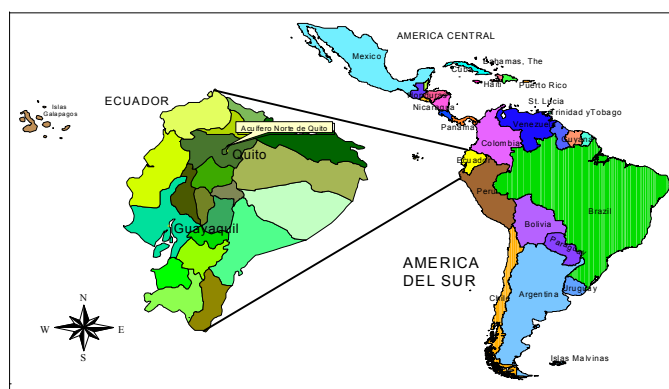


Figura N° 1 Localización de la zona de estudio.

3.1 HIDROMETEOROLOGÍA

3.1.1 Meteorología

La red meteorológica de la ciudad de Quito, dispone de un buen número de estaciones de larga y mediana duración, de las que se puede observar que el gradiente de precipitación se incrementa fuertemente de norte a sur.

Las estaciones más representativas de la zona de estudio son las enunciadas en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1 Estaciones meteorológicas del área de estudio.

ESTACIÓN	CÓDIGO	REGISTRO PRECIPITACIÓN	
IZOBAMBA	M003	1962	2000
INAMHI-IÑAQUITO	M024	1975	2000
QUITO-OBSERVATORIO	M054	1891	1989
AEROPUERTO-DAC	M055	1947	1989
UYUMBICHO	M113	1962	2000
CHIRIBOGA	M116	1962	2000
COTOCOLLAO	M342	1963	1983
GRANJA-ALOAG	M350	1963	1994
QUITO-U.CENTRAL	M606	1964	1973

En la zona de estudio es posible distinguir dos tipos de climas Proaño, Montalvo, (1999):

- El "clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo", el más frecuente en la zona andina, en el rango de elevaciones menores a los 3200 msnm.
 - La cantidad de lluvia anual, distribuida en las dos estaciones lluviosas está comprendida entre los 500mm y 2600mm.
 - La temperatura media se sitúa entre los 11 y 14°C.

- El clima ecuatorial de alta montaña, está localizado sobre los 3200 m.s.n.m.
 - La cantidad de lluvia anual está comprendida entre 500 y 2400 mm.
 - La temperatura media es de 8°C con registros máximos de 20°C y mínimos cercanos a 0°C.

En la zona norte de Quito la humedad relativa está en el rango comprendido entre el 70% y el 80%, observándose un aumento de la humedad en las noches y los más bajos durante el medio día. Así mismo, la velocidad del viento se ubica entre los 2.6 a 2.8 m/s en el período seco. La dirección del viento predominante es en sentido Norte.

3.1.2 Hidrometría

El principal eje hidrográfico está constituido por el río Monjas, el cual drena el norte de la ciudad. Este nace en las Laderas del Volcán Rucu Pichincha y se extiende hasta la confluencia del Río Guayllabamba.

En el límite norte del acuífero, es decir en la población de San Antonio de Pichincha, el caudal medio anual es de 1.5 m³/s, el cual es usado básicamente para riego y generación hidroeléctrica. La cobertura vegetal es pobre, con pastizales y bosques en la zona de las Laderas del Pichincha. También se puede manifestar que el porcentaje de urbanización es del 50 al 60%, según lo expresado por Proaño y Montalvo (1999).

3.2 GEOLOGÍA

Las formaciones geológicas regionalmente identificadas por el INAMHI-EMAAPQ-CEEA (2000) son las siguientes:

- Paquete cretácico el cual contiene lavas del tipo básico-intermedio.
- Paquete terciario, identificado por un período volcánico difundido y prolongado, de composición intermedia-ácida
- Paquete cuaternario, formaciones volcánicas de origen explosivo que constituyen los depósitos superficiales.

Por otro lado y de acuerdo al estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Quito, (EPN, 2001), se desprende que la geología de la zona de estudio está caracterizada principalmente por:

- Materiales de origen volcánico: lavas, depósitos de avalancha, caídas de ceniza y volcansedimentos, con edades entre Plioceno - Pleistoceno a Pleistoceno superior.
- Rocas detríticas, que retransportaron y transportaron rocas volcánicas antiguas y las depositaron en la parte central de la cuenca de Quito y como relleno del Valle de los

Chillos, estos depósitos corresponden a volcano-sedimentos, depósitos fluviales, depósitos de cono aluvial, cangahua y flujos de lodo.

- La cangahua se encuentra muy distribuida en el área de estudio y se compone de material volcánico meteorizado *in situ* o (transportado) en períodos donde la actividad volcánica fue mínima o inexistente.

El resumen de las cotas de los diferentes estratos se presenta en la Tabla N° 2 y en el mapa N° 1 del anexo.

Tabla N° 2 Profundidades de los diferentes componentes ANQ.

Well ID	x-coord (m)	y-coord (m)	Ground Surface (m)	Top of Sand/Gravel (m)	Top of Bedrock (m)
13	501345	9986557	2798,10	2722,26	2705,44
15	500871	9985741	2817,45	2768,68	2704,45
22	501901	9984802	2825,00	2744,54	2722,70
23	501119	9986843	2793,26	2749,98	2683,26
26	501840	9983750	2795,94	2732,94	2681,22
28	501612	9985768	2810,84	2720,84	2684,44
29	501732	9985200	2804,47	2731,47	2677,57
30	502822	9983358	2792,41	2742,41	2739,00
38	500608	9984933	2830,71	2734,02	2692,78
40	501435	9989171	2815,00	2724,00	2652,05
42	501465	9989494	2810,00	2703,00	2592,73
45	500619	9985760	2822,24	2735,00	2650,00
49	501390	9987575	2768,45	2729,55	2653,75
50	501415	9987875	2780,00	2730,00	2665,30
58	501665	9989625	2670,00	2632,00	2589,34
64	500293	9988780	2745,33	2689,00	2629,00
65	501468	9989992	2677,66	2601,46	2580,12
69	501644	9988465	2755,54	2683,54	2627,54
72	499870	9989164	2752,64	2683,99	2644,79
73	499868	9987188	2793,21	2717,21	2656,21
82	502840	9985450	2855,86	2841,58	2827,37
84	503076	9983751	2810,26	2741,26	2664,26
85	503541	9984857	2857,64	2843,35	2829,14
109	501805	9990546	2650,68	2592,78	2499,68
110	501105	9988800	2870,00	2829,60	2813,14
130	502665	9983330	2790,00	2722,60	2664,34
133	500363	9985402	2790,00	2754,00	2692,00
SAP2**	507166	9997669	2415,00	2387,56	2344,88
SAP3**	507166	9997669	2410,00	2383,50	2330,00
SAP4*	505657	9999592	2440,00	2364,73	2327,00

* Fuente EMAAP-Q

** Junta de Aguas

3.3 HIDROGEOLOGÍA

De acuerdo al INAMHI-EMAAPQ-CEEA (2000), la unidad norte del acuífero de Quito, está localizada en la cuenca superior del Río Monjas, su área superficial alcanza los 45 km². Se encuentra limitada de la siguiente manera:

- **Al Norte:** a la altura de San Antonio de Pichincha,
- **Al Sur:** se extiende hasta el sector de El Labrador (Límite hidrogeológico),
- **Al Occidente:** alcanza hasta las partes bajas del volcán Casitagua, y

- **Al Oriente:** constituye el Horst que separa el Graben del Guayllabamba.

Según la información proporcionada por el INAMHI y EMAAP-Q, en el área de estudio (ANQ) existen 33 pozos monitoreados por la EMAAP-Q y 3 pozos monitoreados por el INAMHI, los cuales son comunes, estos pozos son: 13, 15 y 22.

El detalle del inventario de los pozos existentes se encuentra en la tabla N° 3.

Tabla N° 3 Inventario de los pozos existentes

POZO	LOCALIZACION	Institución responsable	COORDENADAS		PROF.-NF. m
			LATITUD	LONGITUD	
13	TYARCO Y LUIS TUFÍÑO	INAMHI	9986475	779625	41,9
15	LA PRENSA Y FERNANDEZ S.	EMAAP/INAMHI	9985625	779150	54,9
21	GUARDERAS Y CAPITAN RAMOS	BMAAP-Q	9983800	780425	34,6
22	R. BORJA URB. BAKER II	INAMHI	9984725	780175	42,0
23	AV DEL MAESTRO Y QUITUMBE	BMAAP-Q	9986725	779425	42,3
26	CAP. RAMOS RAFAEL	BMAAP-Q	9983750	780125	36,6
28	RAFAEL AULESTIA	BMAAP-Q	9985600	779900	56,6
29	M. ZAMBRANO Y C. BORJA	BMAAP-Q	9985150	780025	48,8
31	OLIVA Y CHIRIBOGA (PARQUE LA CONCEPCIÓN)	BMAAP-Q	9983750	779575	44,2
32	AV. 6 DE DICIEMBRE Y RÍO COCA	BMAAP-Q	9982275	781300	32,0
35	NAVARRETE Y CHIRIBOGA	BMAAP-Q	9987850	779250	26,8
36	AV. LA PRENSA Y ECHEVERRIA	BMAAP-Q	9982100	790960	29,1
37	AV. EL INCA Y LOS NOGALES	BMAAP-Q	9983250	781675	41,8
38	GONZALO GALLO Y MACHALA	BMAAP-Q	9984825	778900	74,3
48	VICENTE ANDA Y MENDOZA	BMAAP-Q	9985750	778625	22,1
50	AGUA CLARA	BMAAP-Q	9987875	779700	18,8
57	TRAS FCA. ADAMS	BMAAP-Q	9989575	779950	7,3
58	TRAS FCA. ADAMS (ANTIGUO)	BMAAP-Q	9989625	779950	4,0
69	SECTOR AV DE VASQUEZ FRENTE ESTADIO LIGA	BMAAP-Q	9988900	779350	22,0
72	CONDADO 2 EN URB. CONDADO	BMAAP-Q	9989150	778350	19,0
73	PARQUE DE COTOCOLLAO	BMAAP-Q	9987650	778750	59,9
84	LIZARZABURU Y SUMAITA (CDLA. DAMMER)	BMAAP-Q	9983900	781375	59,6
109	FRENTE COLEGIO MILITAR NUEVO	BMAAP-Q	9990546	780090	47,0
110	AV. OCCIDENTAL - QUEBRADA RUMIHURCO	BMAAP-Q	9988800	779390	18,8
111	JUNTO CUARTEL VENCEDORES (PINTEX)	BMAAP-Q	9985310	779236	74,4
115	HOSPITAL PABLO ARTURO SUAREZ	BMAAP-Q	9986201	778834	70,5
130	LAS MAGNOLIAS Y CHAUPICRUZ (COCA COLA - NO)	BMAAP-Q	9983330	780950	43,7

3.4 HIDROQUÍMICA

Los resultados obtenidos en los análisis físico químico y bacteriológicos realizados por el INAMHI (1999), en su Estudio Hidroquímico del Acuífero de Quito, y en los resultados obtenido por el INAMHI-EMAAPQ-CEEA (2000), de cada pozo del acuífero de Quito, indican que los Pozos Urico I y El Peaje, no presentaron problemas con el contenido permitido de metales, sin embargo se evidencian la presencia de coliformes totales.

4. MODELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ACUÍFERO

El desarrollo del modelo conceptual y la modelación de las características físicas del acuífero se desarrollaron con la ayuda del programa VISUAL MODFLOW 2.8.2, a partir del cual se obtuvieron los valores de velocidades máximas, direcciones predominantes de flujo, líneas equipotenciales.

Para la calibración se desarrollaron 5 escenarios, variando la conductividad hidráulica de la zona vadosa y las áreas de recarga.

4.1 MODELO CONCEPTUAL DEL ANQ

4.1.1 MODELO TEORICO.

Un modelo conceptual es una simplificación de las condiciones reales tanto geológicas como hidrogeológicas en la que se incluyen aspectos esenciales del sistema hidrogeológico con relación a interrogantes que deben ser respondidas

El modelo conceptual, al que denominaremos “teórico” indica las principales capas hidrogeológicas, zonas preferenciales de recarga, direcciones de flujo y las condiciones de frontera propias de un modelo.

En la Figura N° 2 se presenta el modelo conceptual teórico del ANQ.

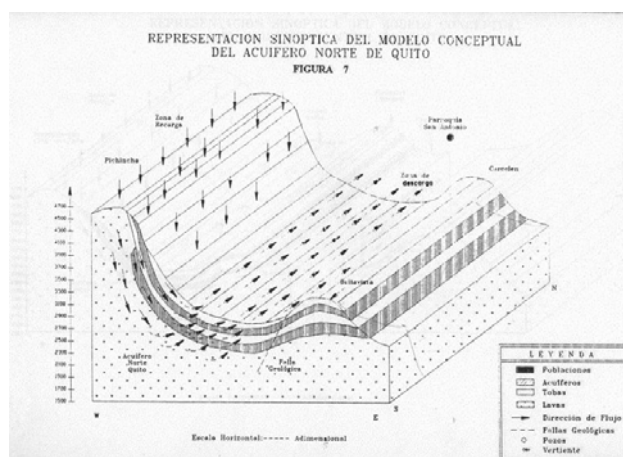


Figura N° 2 Modelo Conceptual Teórico del ANQ Tomado de EMAAPQ, INAMHI, CEEA, 2000

4.1.2 MODELO EXPERIMENTAL.

Para la definición del modelo conceptual del Acuífero Norte de Quito, se toma como medio de desarrollo de éste, el sistema VISUAL MODFLOW[®], apoyados en herramientas como el paquete SURFER[®], que permite trabajar en entornos definidos por mallas, el cual procesó los resultados del modelo y del 3-D Analyst componente del sistema de información geográfica ArcView 3.2[®].

En la Figura N° 3 se presenta el modelo experimental desarrollado en el presente estudio.

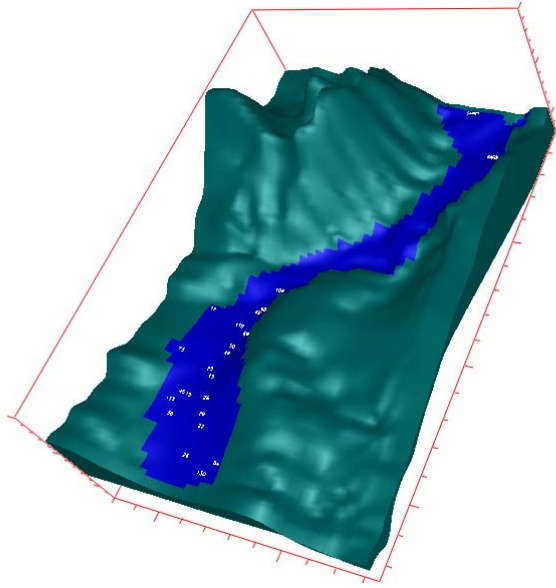


Figura N° 3 Modelo Conceptual Experimental del ANQ

4.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

De la modelación desarrollada se desprende que la dirección predominante del flujo se halla dividido por tramos, en la dirección sur-norte, desde el Labrador hasta la confluencia del acuífero con el río Carcelén, en este tramo se presenta un aporte del acuífero al río. En la zona del callejón de Parcayacu, el flujo subterráneo se acelera por el estrechamiento geográfico e hidrogeológico que el acuífero sufre.

A partir de este punto y hasta llegar a San Antonio de Pichincha, las líneas equipotenciales son más profundas, es decir definen el flujo de aguas subterráneas con un gradiente fuerte en dirección a la estación S2. En las Figuras N° 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos:

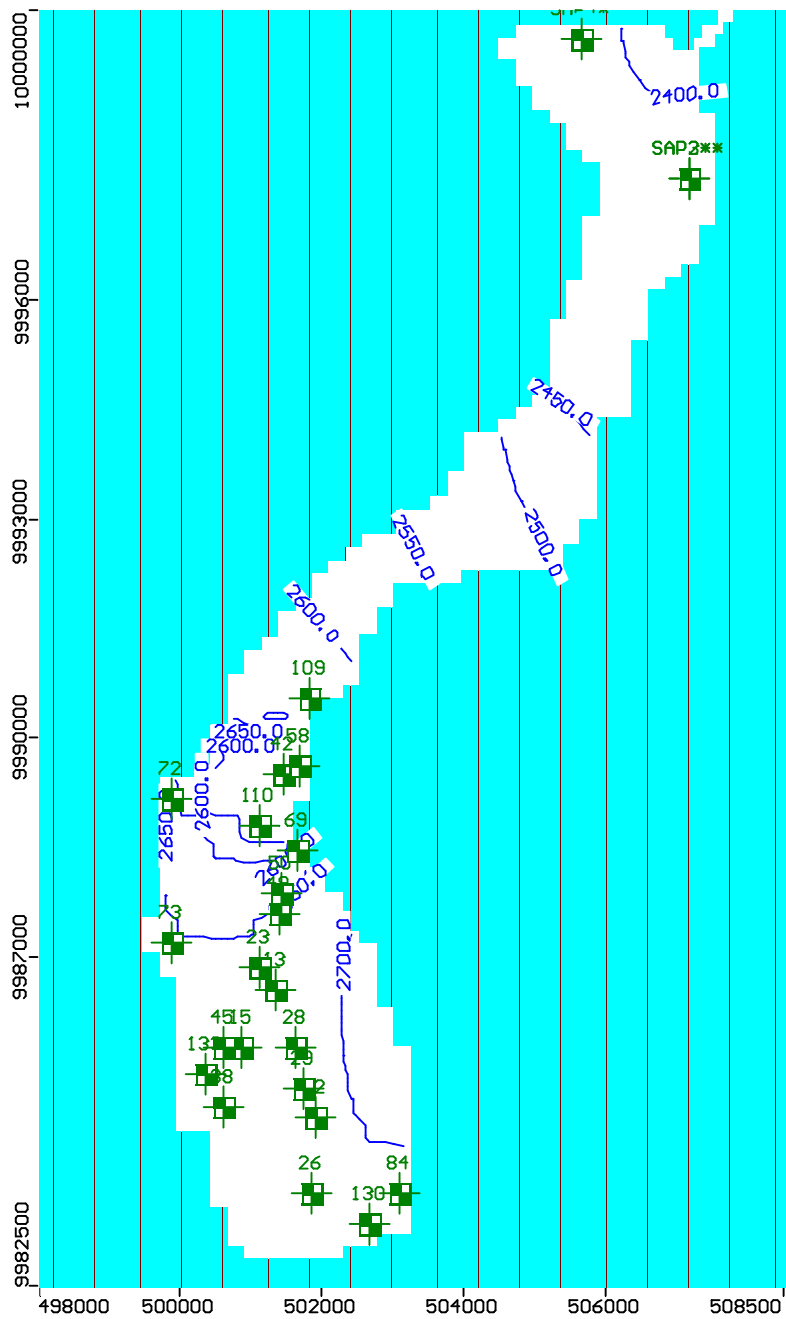


Figura N° 4 Líneas equipotenciales obtenidas para el escenario calibrado.

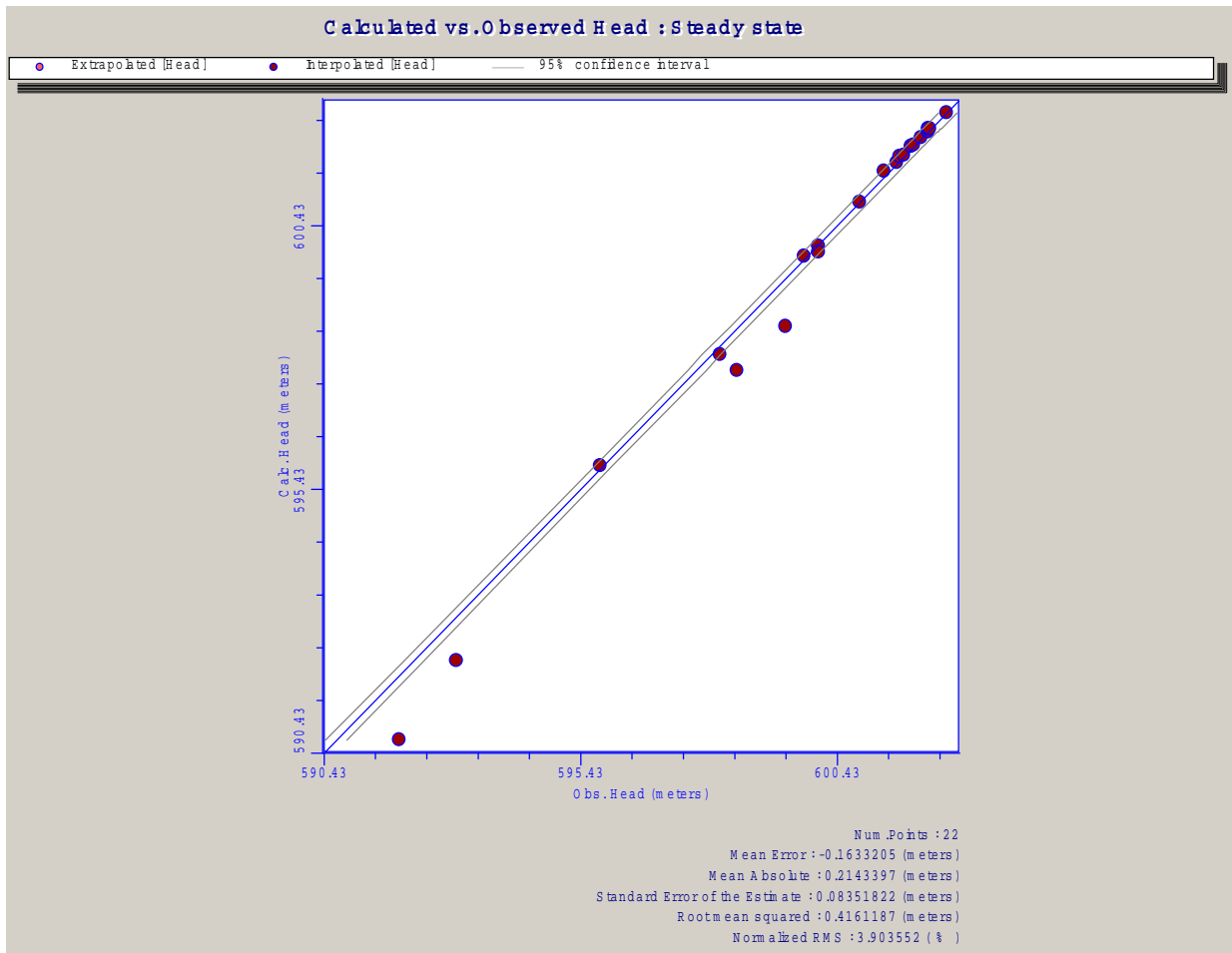


Figura Nº 5 Valores observados vs. Valores calculados, obtenidos para el escenario calibrado.
 $e = 3.96\%$

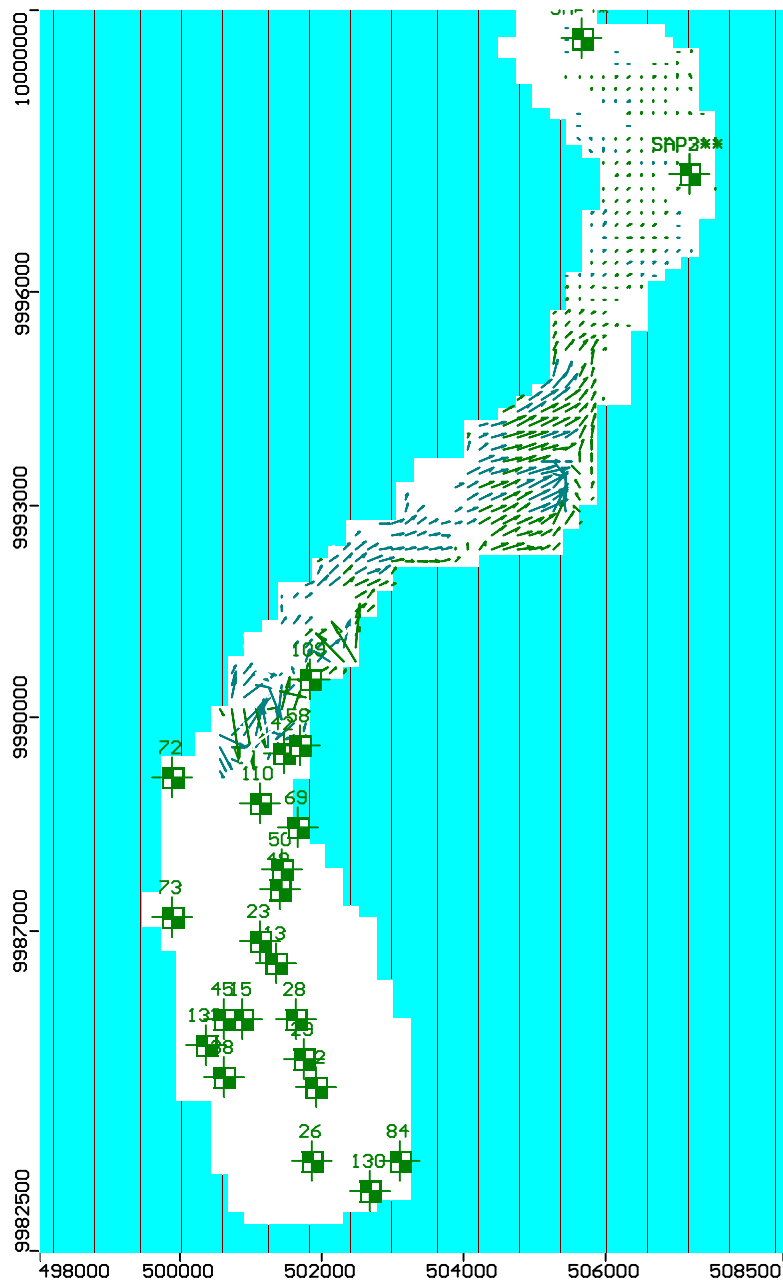


Figura N° 6 Vectores de velocidad obtenidos para el escenario calibrado.

5. APLICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VULNERABILIDAD.

Cada una de las tres metodologías dio como resultado un mapa de vulnerabilidad que fue desarrollado en función de las condiciones reales. Esta, es la herramienta que la presente investigación aporta a la ciudad y a la conservación de los recursos hídricos, especialmente los subterráneos.

5.1 INDICE DRASTIC

Es uno de los métodos paramétricos más conocidos y aplicados, ya que relaciona los parámetros que directamente se involucran con el transporte de contaminantes dentro del medio acuífero.

El índice DRASTIC permite encontrar un valor numérico para cada punto del área de trabajo mediante la siguiente ecuación:

$$D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W = \text{Índice de vulnerabilidad}$$

donde los subíndices R y W son el puntaje (**Rating**) y el peso de ponderación (**Weight**) respectivamente.

Esta suma expresa la conjunción de las valoraciones de cada propiedad, aportadas por el método, y el conocimiento del acuífero particular del que se trata por parte de quienes lo aplican.

Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo se definen en función de la aplicación. Para el caso de la vulnerabilidad del acuífero Norte de Quito, se establecen los rangos de vulnerabilidad, enunciados en la Tabla N° 2

Tabla N° 4 Rangos para la clasificación de la vulnerabilidad para el método DRASTIC.

Valor del índice	Clasificación de la vulnerabilidad
<100	Despreciable
101-119	Muy baja
120-139	Baja
140-159	Moderada
160-179	Alta
180-199	Muy alta
>200	Extrema

La valoración de los parámetros permite acotar los intervalos de vulnerabilidad a la contaminación y delimitar áreas de mayor riesgo frente a un contaminante potencial a lo largo de la zona de interés. Un primer paso para la evaluación será la estimación de las áreas totales de vulnerabilidad de acuerdo a la reclasificación hecha en ArcView® con los siguientes rangos:

Tabla N° 5 Reclasificación de los valores de vulnerabilidad para el Índice DRASTIC.

Rango de clasificación		Tipo de Vulnerabilidad	Grado
De	A		
90	119	BAJA	1
120	159	MEDIA	2
160	202	ALTA	3

A cada uno de los siete parámetros considerados por este método se les asigna un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos. Además, al valor de cada parámetro se aplica un peso entre 1-5 que cuantifica la importancia relativa entre ellos, y que puede modificarse en función del contaminante y del criterio profesional.

Para aplicar este método debe asumirse que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio poroso que en el agua, que se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la infiltración desde las zonas de recarga. A cada uno de los siete parámetros considerados por este método se les asigna un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos.

Los valores asumidos se muestran en la Tabla N° 6. Los valores que se han tomado para cuantificar los parámetros son los expresados en la Tabla N° 7, estos parámetros serán explicados a continuación.

Tabla N° 6 Pesos asignados a los parámetros del índice DRASTIC.

Parámetro	Peso (W)
D	5
R	4
A	3
S	3
T	1
I	5
C	3

Tabla N° 8 Valores para la estimación del Índice DRASTIC

D.- PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO		R.- RECARGA NETA	
RANGO (m)	VALOR	RANGO (mm)	VALOR
< 1.5	10	0-50	1
1.5-5.0	9	50-100	3
5.0-10.0	7	100-180	6
10.0-20.0	5	180-255	8
20.0-30.0	2	>255	9
> 30.0	1		

A.- NATURALEZA DEL ACUÍFERO		
DESCRIPCIÓN	RANGO (m)	VALOR
a) Arcillas, limos, margas	1-3	2
b) Rocas ígneas, metamórficas	2-5	3
c) Rocas ígneas, metamórficas alteradas	3-5	4
d) Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	5-9	6
e) Areniscas masivas	4-9	6
f) Calizas masivas	4-9	6
g) Arenas, gravas y conglomerados	4-9	8
h) Volcánico	2-10	9
i) Calizas carstificadas.	9-10	10

S.- NATURALEZA DEL SUELO		T.- TOPOGRAFÍA	
TIPO DE SUELO	VALOR	RANGO (%)	VALOR
Arcilla No expansiva y agregada	1	0-2	10
Suelo orgánico	2	2-6	9
Marga arcillosa	3	6-12	5
Marga limosa	4	12-18	3
Marga	5	> 18	1
Marga arenosa	6		
Arcilla expansiva y/o agregada	7		
Turba	8		
Arena	9		
Grava	10		
Delgada o ausente	10		

I.- IMPACTO DE LA ZONA VADOSA			C.- PERMEABILIDAD	
DESCRIPCIÓN	RANGO (m)	VALOR	RANGO (m/día)	VALOR
Arcilla, limo, marga	1-2	1	< 4	1
Esquitos, pizarras	2-5	3	4-12	2
Calizas	2-7	6	12-28	4
Areniscos	4-8	6	28-40	6
Alternancias: calizas, areniscos y arcillas	4-8	6	40-80	8
Arenas y gravas arcillosas	4-8	6	> 80	10
Rocas: ígneas, metamórficas	2-8	4		
Arenas, gravas	6-9	8		
Volcánica	2-10	9		
Calizas carstificadas	8-10	10		

5.1.1 PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO (D)

Sobre la base de la información existente en el INAMHI y en la EMAAP-Q se utilizaron los datos puntuales de la campaña de monitoreo que estas dos instituciones llevaron a cabo en el año 1995, debido a que en este año se monitorearon 20 pozos en la zona de estudio. Se excluyeron los datos de la campaña del año 2000 porque el número de pozos monitoreados no superaban los 5, a esto hay que añadir que desde la zona de Parcayacu hasta San Antonio de Pichincha, no existen datos, por lo que se recurrió a las carpetas de dos pozos existentes en el complejo LDU y al informe de perforaciones realizadas en San Antonio de Pichincha por la EMAAP-Q para suministrar agua potable a esa población en el año 2001.

Los datos de los niveles utilizados se indican en la tabla N° 3. El procedimiento que se siguió fue realizar una interpolación por el método de Krigging para toda la zona de estudio. Se creó una

imagen raster con celdas de $\Delta x = \Delta y = 50$ metros, que de acuerdo a esto y a la extensión de la zona de estudio, se obtuvieron 55257 celdas, de las cuales 14080 celdas corresponden al área de estudio, la diferencia se debe a la forma angular de la cuenca hidrogeológica de la zona de estudio. El resultado de la malla interpolada y multiplicada por el peso se encuentra en la Figura N° 8.

5.1.2 RECARGA NETA (R)

El valor de la recarga neta encontrada por Proaño (1999) para todo el acuífero de Quito, y distribuida en el presente estudio para el Acuífero Norte de Quito es de 550 (mm/año). Este valor al distribuirlo como tal, mayoraba el componente de recarga del Índice Drástico en alrededor de 100%, ante lo cual, se distribuyó este valor mediante la generación de polígonos de Thiessen como se puede apreciar en la Figura N° 8.

5.1.3 NATURALEZA DEL ACUÍFERO (A)

Debido a la diversidad litológica encontrada en la zona de estudio y para efectos de simplificar la naturaleza del acuífero, se tomó en cuenta la simplificación realizada por el Proyecto Arcal (2000) y que se visualiza en la Figura N° 7 en la cual el acuífero propiamente dicho se encuentra en la zona de depósitos detríticos, es decir, la matriz predominante es de gravas, arenas y limos, en este orden de cuantificación.

El complejo subterráneo del acuífero de Quito está limitado en la parte superficial por depósitos eólicos, es decir depósitos arrastrados por el viento. En el fondo se halla limitada por la presencia de depósitos volcánicos y por la formación Macuchi, es decir roca ígnea sólida.

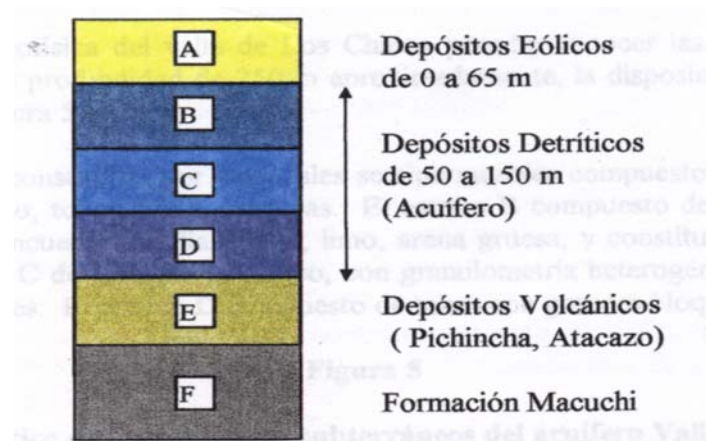


Figura N° 7 Corte esquemático del Acuífero Norte de Quito

5.1.4 NATURALEZA DEL SUELO (S)

Se introdujo los valores referentes a la textura de suelo y los límites se tomaron de acuerdo al estudio geológico del proyecto de Microzonificación Sísmica de Quito (2001). En la Figura N° 8 se presenta la malla de tipo del suelo generada para la evaluación del componente suelo.

5.1.5 TOPOGRAFÍA (T)

Para obtener el mapa de pendientes (SLOPES), se recurrió al mapa base digital entregado por la EMAAP-Q con curvas de nivel cada 50 metros y complementado con el existente en la Unidad de Inteligencia Artificial y Sistemas de Información Geográfica (UNISIG-EPN), dando como resultado un mapa base con curvas de nivel cada 20 m.

A partir de este primer resultado, se convirtieron de archivos *.dwg a *.shp, con la ayuda de los paquetes AUTOCAD e IDRISI[®], con el objeto de poder generar redes de triángulos irregulares en el paquete ARCVIEW[®], los cuales generan el mapa de pendientes y reclasifica los rangos de salidas del parámetro en porcentajes conocidos en función de la Tabla 4. El resultado de este procedimiento, se complementó con la transformación del mapa de pendientes a una malla de $\Delta x = \Delta y = 50$ m en el área de dominio del modelo. En la Figura N° 8 se incluye el mapa de pendientes en una malla, con los valores del componente de Topografía para la determinación del índice DRASTIC.

5.1.6 IMPACTO EN LA ZONA VADOSA (I)

Se procedió de la misma manera que la seguida para determinar la malla del numeral 5.1.4, con la variante de que la zona vadosa representa un horizonte no saturado y en términos normales no existen variaciones de la geología en esta zona. El resultado se incluye en la Figura N° 8

5.1.7 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA. (C)

En la zona de estudio, la limitada cantidad de puntos de muestro hacen que, al momento de generar isolíneas de conductividad hidráulica, se utilicen los polígonos de Thiessen con la ayuda de la extensión thiessen.avx. Se generó una malla con el resultado anterior basado en el atributo no espacial de la valoración del componente conductividad hidráulica para la determinación del índice DRASTIC. Finalmente se reclasificó para efectos de poder sectorizar los resultados obtenidos en la rasterización.

En la Figura N° 8 se incluye el resultado de este procedimiento.

El mapa de vulnerabilidad obtenido se presenta en el mapa N° 2, del anexo.

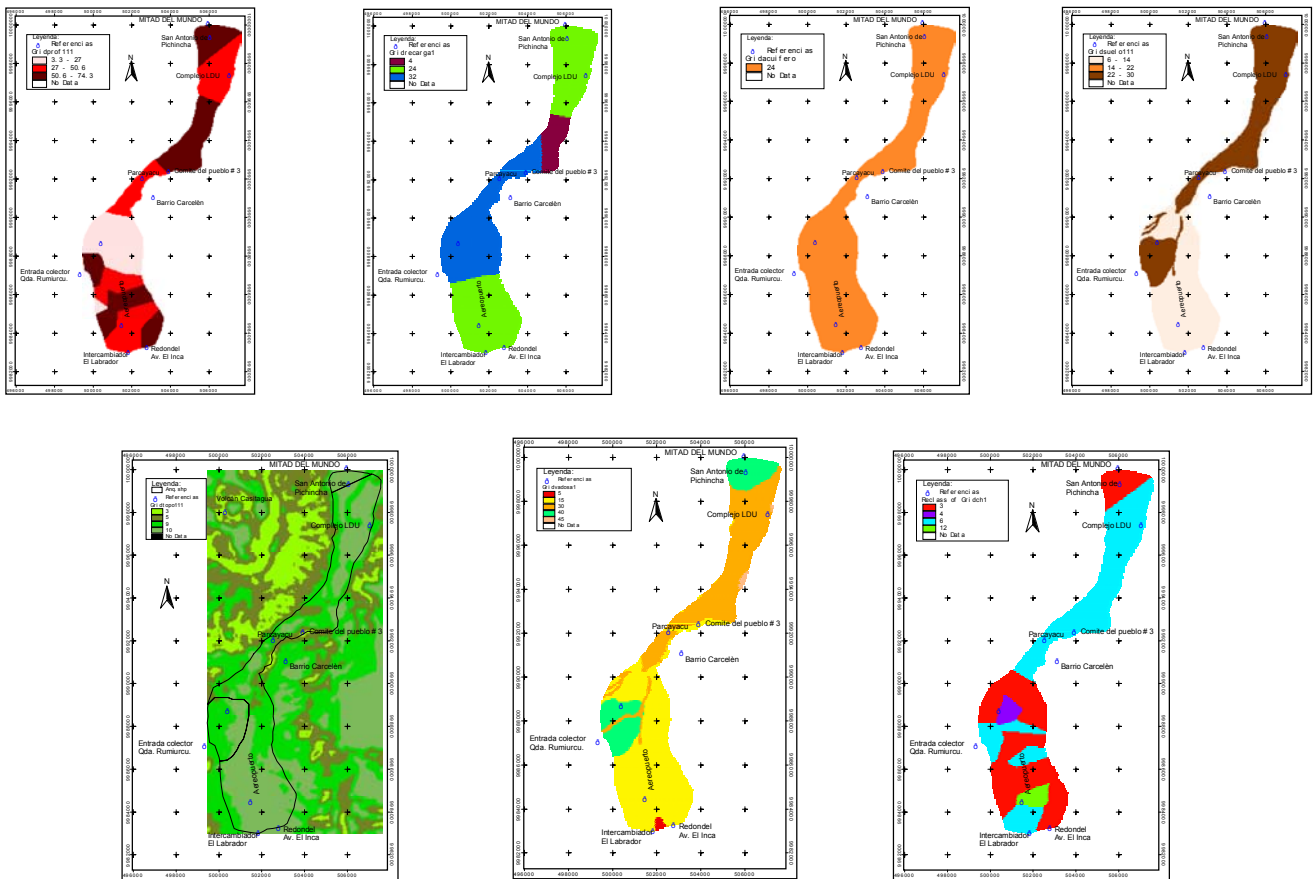


Figura N° 7 Imágenes raster de los componentes del Índice DRASTIC.

5.2. ÍNDICE GODS

El método G.O.D. estima la vulnerabilidad de un acuífero, multiplicando tres parámetros que representan tres tipos de información espacial con el rango de índice determinado (Verba y Zaporozec, 1994).

G (Groundwater occurrence) - tipo de acuífero (de 0 a 1.0)

O (Overlying lithology) - litología de la zona no saturada (de 0.4 a 1.0)

D (Depth to Groundwater) - profundidad del agua subterránea (de 0.4 a 1.0).

El producto de estos tres componentes es un índice de vulnerabilidad que puede variar entre 0 y 1, caracterizando la vulnerabilidad desde despreciable hasta extrema.

El factor de suelo es un parámetro esencial que considera la capacidad de atenuación y el grado de fisuración del suelo.

Para la evaluación de este parámetro se considerará principalmente la textura del suelo:

Textura Franco arcillosa (FA)

Textura Franco arcillosa arenosa (FAa)

Textura Franco arenosa (Fa)

Los índices de vulnerabilidad de los acuíferos semiconfinados multicapas en el área de estudio se determinarán incorporando el factor suelo:

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = G * O * D * S$$

La vulnerabilidad del acuífero puede ser caracterizada por factores naturales como, el acceso de la zona saturada a la penetración de contaminantes y capacidad de atenuación, resultante de la retención físico-química de elementos contaminantes. En la figura N° 9 se presenta las imágenes raster generadas para la determinación del índice GODS. De la misma manera, en el Mapa N° 3 del anexo, se presenta el mapa de vulnerabilidad desarrollado por medio de este índice.

Para la determinación de este índice, se tomó la información base que se utilizó para el cálculo del Índice DRASTIC, afectados por supuesto por los factores definidos por Foster (1987).

El valor 1 representa la vulnerabilidad más elevada, 0.016 la más baja y 0 la no existencia de un acuífero o de vulnerabilidad insignificante. Para efectos de comparación se desarrollo el índice de vulnerabilidad GOD y se lo comparó con el índice GODS, es decir se realizaron dos escenarios: uno tomando en cuenta las características del suelo (cobertura) y otro sin tomarlo en cuenta.

5.2.1 TIPO DE ACUÍFERO

Para la definición del tipo de acuífero se tomó en consideración que éste se puede considerar como mixto, debido a que en los sectores en donde el material era aluvial, el acuífero se comporta como semiconfinado y en las zonas restantes, como confinado. En la Figura No. 9 se incluye la imagen raster del tipo de acuífero valorada de acuerdo a las consideraciones realizadas por Foster (1987).

5.2.2 LITOLÓGIA

Este parámetro se desarrolló tomando en cuenta los aspectos indicados en el numeral 5.1.4 y valorado con las consideraciones realizadas por Foster (1987) y por lo recomendado por González (2001). La imagen raster de este componente se incluye en la Figura N° 9.

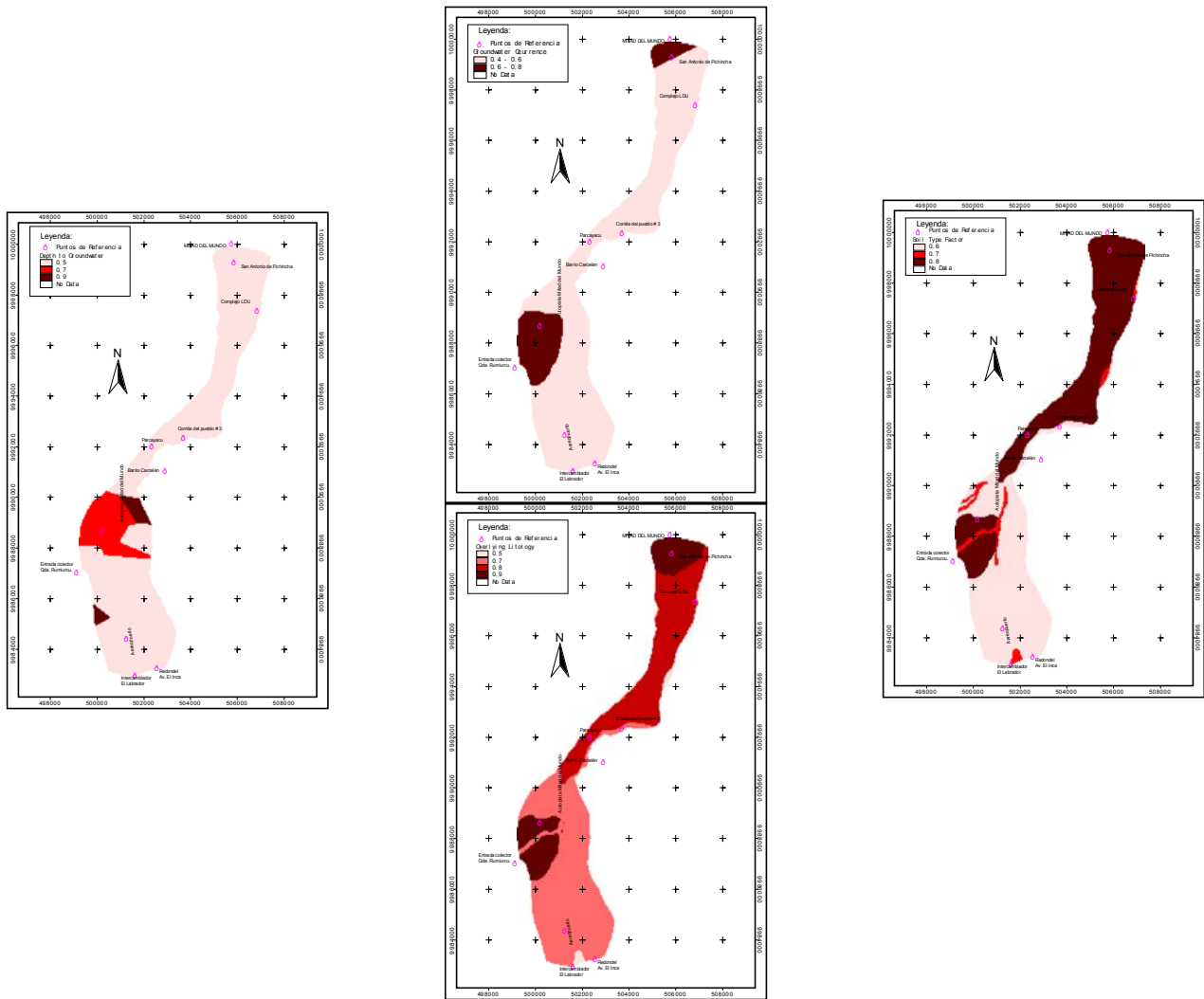


Figura N° 9 Componentes del índice de vulnerabilidad para los índices GOD(S).

5.2.3 PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO

Se reclasificaron y se valoraron los resultados obtenidos en el numeral 5.1.1, de acuerdo a las recomendaciones realizadas por Foster (1987), para lo cual se introdujo en la tabla de atributos no-espaciales las valoraciones para este componente. Esta imagen se rasterizó y se reclasificó en cuatro grupos de datos.

5.2.4 TIPO DE SUELO

Se consideró una distribución no uniforme del tipo de suelo limitada por las consideraciones realizadas en el mapa de geología (ver mapa N° 1). A partir de esto, el material oscila entre: Franco Arcilloso Arenoso y Franco Arenoso

De la misma manera los resultados de los dos índices se presentan en los mapas N° 3 y 4 del Anexo.

5.3 ÍNDICE AVI

El índice AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos para cuantificar la vulnerabilidad, ya que tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua.

Es un índice que permite cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero, por medio de la resistencia hidráulica "c" al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero (Van Stempvoort, *et al.*, 1992).

La resistencia hidráulica "c" se calcula por la expresión:

$$c = \sum b_i / K_i \text{ para las capas } 1, 2, 3, \dots, i$$

donde:

b_i : es el espesor de cada capa del acuífero,

K_i : es la conductividad hidráulica de cada capa, y

c : es la resistencia hidráulica total por metro de profundidad (inverso de K_i , [tiempo]), e indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero.

A mayor resistencia hidráulica c, menor vulnerabilidad.

Para construir el mapa de vulnerabilidad se necesitan las coordenadas del pozo bajo análisis y se utiliza el **log c** para cada pozo. Luego se interpolan los valores de **log c**, esto da como resultado la zonificación de resistencias hidráulicas, las cuales están directamente relacionadas con la vulnerabilidad por su carácter representativo.

La zonificación relativa de la vulnerabilidad puede obtenerse mediante el índice AVI (Aquifer Vulnerability Index) que puede permitir, además, 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.

Para la elaboración de los mapas de vulnerabilidad se trabajó en la integración de la base de datos con la localización georeferenciada, de los 23 monitoreados en el año 1995. La información piezométrica seleccionada fue la obtenida en el estudio del Proyecto Acuífero de Quito y en el Proyecto Arcal que corresponde al comportamiento del nivel estático de 1995.

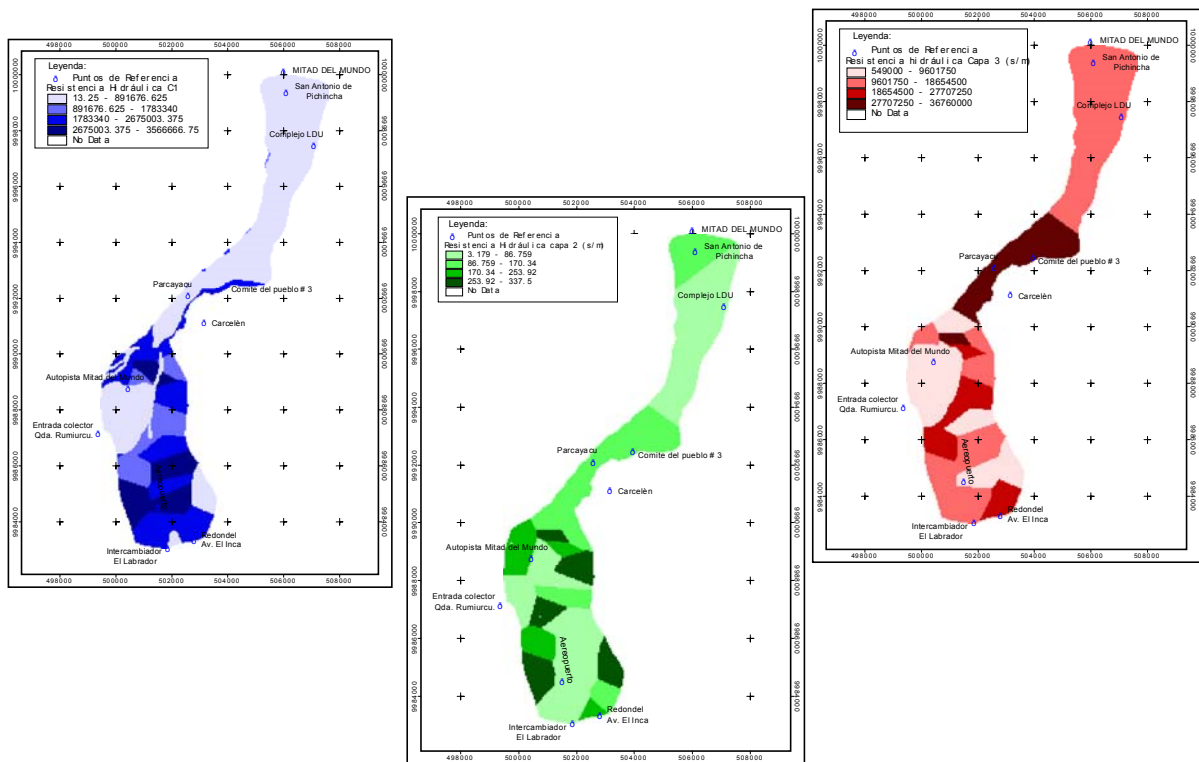


Figura N° 10 Componentes del índice de vulnerabilidad para el índice AVI

6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En general el índice DRASTIC, por la cantidad de parámetros directos e indirectos que usa para su determinación, presenta una discretización mayor a los tres índices restantes, caracterizando a las diferentes áreas determinados parámetros que en función del peso asignado, demuestran su intensidad o grado de vulnerabilidad, así:

Grado de Vulnerabilidad	Factor determinante		
	DRASTIC	GODS	AVI
Baja	Pendiente Tipo de suelo, zona vadosa.	Tipo de acuífero, Sustrato litológico, distancia al agua tipo de suelo.	Conductividad hidráulica, espesor de la capa i
Media	Recarga, conductividad hidráulica, Profundidad del nivel		
Alta	Tipo de suelo, Pendiente, zona vadosa, profundidad del nivel freático.		

Tabla N° 9 Factores determinantes observados en los índices de vulnerabilidad aplicados.

La diferencia radica en que el índice DRASTIC, comparado con el índice GODS, involucra parámetros importantes como por ejemplo la recarga, condición intrínseca de una zona en particular. También, si tomamos en cuenta, por ejemplo, la pendiente del terreno, factor que es importante porque involucra el encharcamiento del agua de lluvia como medio de transporte de los contaminantes y como condición directa de la infiltración.

En la tabla N° 9 se puede apreciar que en los métodos GOD(S) y AVI, los factores determinantes son fijos, en cambio se observa la interacción entre los diferentes factores en cada grado de vulnerabilidad. Sin embargo de que el índice DRASTIC toma en cuenta parámetros importantes, deja de lado otros; por ejemplo, la capacidad de resistencia de un punto o celda definida en el dominio del acuífero en particular, involucra la conductividad hidráulica para la zona saturada, toma en cuenta el impacto en la zona vadosa, pero no toma en cuenta directamente la conductividad o la resistencia hidráulica en la zona vadosa y en las capas de menor conductividad de la zona saturada.

Ahora si comparamos el Índice GODS, con los restantes aplicados por otros métodos, la diferencia fundamental está en que se incluye el factor del tipo de acuífero. Bajo esta premisa se evalúa la coincidencia de áreas, observándose que en la zona de depósito de la Qda. Rumiurcu, el grado de vulnerabilidad coincide en 12% aproximadamente; sin embargo en el índice GODS, en el sector del Condado el área de vulnerabilidad alta, es para el índice DRASTIC de grado mediano. El área restante difiere en un alto porcentaje, como ya se explicó por los 7 parámetros que utiliza.

Al comparar entre los índices DRASTIC y AVI, se observa que el grado de comparación es similar al del expresado en el párrafo anterior, difiriendo únicamente en la zona del pozo 133 donde, para el Índice Drastic, existe una moderada vulnerabilidad mientras que para el Índice GODS existe baja vulnerabilidad.

Las áreas comunes de baja vulnerabilidad entre los diferentes métodos fueron comparadas mediante transparencias y lo extraído se indica en la tabla N° 10, de lo que se concluye que para la vulnerabilidad baja el porcentaje de coincidencia es del 40 al 60%, para la vulnerabilidad media, el grado de coincidencia es 12 al 31% y para vulnerabilidad alta la coincidencia entre métodos es relativamente nula.

Comparando los escenarios propuestos para el índice GOD/S, se puede observar que al incluir el factor suelo, la vulnerabilidad disminuye un 40%, lo cual nos indica y nos recuerda la capacidad de atenuación natural que tienen los suelos, especialmente en la zona vadosa. Indirectamente está involucrada la presencia de material orgánico (raíces, etc.) que ayudan a la auto-recuperación de los suelos componentes de la zona vadosa. Físicamente las áreas son semejantes, por esto, desde este punto de vista no se puede establecer un criterio de diferencia entre los índices.

Vulnerabilidad Baja			
% coincidencia			
Indice	DRASTIC	GODS	AVI
DRASTIC	100	40	60
GODS	40	100	72
AVI	60	72	100

Vulnerabilidad Media			
% coincidencia			
Indice	DRASTIC	GODS	AVI
DRASTIC	100	12	52
GODS	12	100	31
AVI	52	31	100

Vulnerabilidad Alta			
% coincidencia			
Indice	DRASTIC	GODS	AVI
DRASTIC	100	5	0
GODS	5	100	80
AVI	0	80	100

Tabla N°10 Porcentajes de coincidencia entre los métodos

Finalmente tomando los resultados de los mapas de vulnerabilidad, el índice de vulnerabilidad ideal será aquel que combine el Índice DRASTIC con el Índice AVI, quedando abierta la posibilidad de desarrollar un método nuevo resultante de añadir o modificar la forma de valorar la componente conductividad hidráulica comparándola con la resistividad hidráulica en cada capa componente del sistema acuífero.

Compilando los criterios vertidos en este capítulo, el índice de vulnerabilidad más apropiado para la evaluación de la vulnerabilidad en medios urbanos es el índice DRASTIC, pues considera la mayoría de los aspectos directos e indirectos que se relacionan con los procesos que se producen en el sistema de aguas subterráneas, lo que produce una consecuencia directa. Desde el punto de vista económico, la determinación del índice DRASTIC, requiere el desarrollo de estudios hidrológicos (Recarga), geológicos (Impacto en la zona No saturada y cartográficos (topografía) con un buen grado de detalle, por lo que el costo involucrado para su estimación es mayor. Consecuentemente el índice más económico es el índice AVI, pues requiere únicamente de dos parámetros.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

1. El desarrollo y ejecución de infraestructura (obras civiles, de desarrollo económico como plantaciones, centros turísticos, oleoductos) causan un impacto en el ambiente que los rodea. Este se evalúa mediante Estudios de Impacto Ambiental, que en la actualidad no toman en cuenta la afectación al recurso hídrico subterráneo. Por lo tanto, los índices de vulnerabilidad analizados en este trabajo, se constituyen en una herramienta decisiva para los auditores ambientales.

2. De la misma manera los índices de vulnerabilidad sirven como herramienta en la gestión, manejo y ordenamiento territorial, ayudando a la definición de sitios aptos para la implantación de zonas industriales, pudiendo ser estos los sitios de vulnerabilidad media a baja.
3. La zonificación de los diferentes índices de vulnerabilidad con pocos parámetros (GODS, AVI) es en general simple y dependen de todos sus factores en conjunto, el índice DRASTIC presenta mayores valores de discretización por lo tanto más refinada.
4. La recarga y la pendiente del terreno son parámetros decisivos y determinantes al momento de evaluar la vulnerabilidad del acuífero, factores que directamente no se toman en cuenta en los índices de pocos parámetros.
5. Los parámetros que el índice DRASTIC toma en consideración (7), se podrían decir que casi son suficientes para definir la vulnerabilidad. Sin embargo, deja de lado, por ejemplo, la resistencia hidráulica de un punto o celda, definida en el dominio del acuífero en particular. Involucra la conductividad hidráulica para la zona saturada, el impacto en la zona vadosa; pero no toma en cuenta directamente la conductividad o la resistencia hidráulica en la zona vadosa y en las capas de menor conductividad de la zona saturada.
6. Comparando el Índice GODS, con los restantes aplicados, la diferencia fundamental está en que se incluye el factor del tipo de acuífero en el cual indirectamente se está involucrando la capacidad de auto-recuperación del medio.
7. El porcentaje de área de una alta vulnerabilidad es del 42% del total, según el Índice DRASTIC, 4 % para el Índice GODS y 5.6% para el AVI. La razón fundamental está en la cantidad de parámetros que utiliza cada uno de los métodos y la manera de aplicarlos a las condiciones reales del acuífero.
8. De la comparación multicriterio se observa que para la vulnerabilidad baja el porcentaje de coincidencia es del orden del 50%. Para vulnerabilidad media el grado de coincidencia es de alrededor del 15% y para vulnerabilidad alta la coincidencia entre métodos es relativamente nula. La interrelación entre los métodos se puede pensar como válida entre las zonas de mediana y baja vulnerabilidad por el grado de exactitud que por definición se maneja en este tipo de mapas; sin embargo, para las zonas de alta vulnerabilidad la distancia de la media esperada entre los dos métodos se da como válida por tratarse de datos cualitativos, para valorar cada variable.
9. El índice DRASTIC debe aplicarse a los sectores semiconfinados de un acuífero, siempre y cuando la parte semiconfinada forme parte de un acuífero libre o confinado, tomando en cuenta que deben valorarse de manera que puedan adaptarse a uno de los tipos definidos.

10. De lo expuesto en las conclusiones anteriores el índice de vulnerabilidad más apropiado para la evaluación de la vulnerabilidad en medios urbanos es el índice DRASTIC, como se observa en los resultados obtenidos. La discretización que se obtiene con el índice DRASTIC nos asegura un mayor refinamiento de los resultados; sin embargo la capacidad predictiva o de prevención de los métodos GODS y AVI nos dan una visión rápida de la vulnerabilidad de la zona.
11. La dirección predominante del flujo se halla dividido por tramos, en la dirección sur-norte, desde el labrador hasta la confluencia del acuífero con el río Carcelén, en este tramo se presenta un aporte del acuífero al río, En la zona del callejón de Parcayacu, el flujo subterráneo se acelera por el estrechamiento geográfico e hidrogeológico que el acuífero sufre. A partir de ahí y hasta llegar a San Antonio de Pichincha, las líneas equipotenciales son más profundas, es decir definen el flujo de aguas subterráneas con un gradiente fuerte en dirección a la estación S2.
12. Al sobreponer el mapa de vulnerabilidad según el índice DRASTIC con los valores de corrosividad, se observa que 4 de los pozos están ubicados sobre una zona de alta vulnerabilidad, lo que nos indica que la zona afectada ya no es únicamente una zona vulnerable sino de riesgo. También vemos que 8 pozos están en la zona de vulnerabilidad media, y 4 pozos en la zona de vulnerabilidad baja es decir el mismo porcentaje que los de alta vulnerabilidad. Tomando los criterios de determinación del riesgo propuesto por Foster (1987), se observa que no existe relación directa entre la vulnerabilidad y el riesgo, en función de la carga contaminante
13. Se observa que los 5 pozos que exceden la norma de dureza permitida en el agua, están ubicados en la zona de vulnerabilidad media, pudiendo convertirse estas zonas en zonas de riesgo medio-alto, en función del grado de amenaza que sobreyace a estas zonas.

7.2. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un refinamiento o ampliación de los estudios geológicos, estratigráficos, de determinación de parámetros hidrogeológicos y de la evolución de niveles piezométricos. De la misma manera se debe contar con una restitución aerofotogramétrica a escala 1:5000 para que el factor topográfico tenga una mejor aproximación.
2. Se recomienda establecer una zona industrial en el área correspondiente al límite sur de Parcayacu, porque el índice de vulnerabilidad es bajo (110), en la que podrían implantarse industrias que no viertan contaminantes peligrosos, como por ejemplo metales pesados, entre otros.

3. En función del índice de vulnerabilidad calculado para la zona de San Antonio de Pichincha se recomienda no autorizar el emplazamiento de industrias u otros agentes, por ejemplo: gasolineras, curtiembres, talleres de mantenimiento, industrias químicas, las cuales potencialmente pueden contaminar el sistema de aguas subterráneas y por consiguiente algunos de los componentes del ciclo hidrológico (caudal base, por ejemplo) del sector, aún si considerásemos la capacidad auto-depuradora de los componentes del sistema. Esto, tomando como premisa importante que se está iniciando la explotación de este recurso para suministro de agua potable por parte de la EMAAP-Q.
4. Como aporte para la determinación de la vulnerabilidad en zonas urbanas se recomienda el uso del ÍNDICE DRASTIC, con la premisa de que la recarga sea baja en las zonas netamente urbanas por la impermeabilización que ha sufrido.
5. Se recomienda realizar el ANÁLISIS DE RIESGO POR CONTAMINACIÓN, del Acuífero Norte de Quito, el cual tendrá como base las zonas vulnerables obtenidas en el presente estudio. Este estudio deberá realizar investigaciones de campo para el levantamiento de información real sobre fuentes contaminantes, acompañado de un modelo de transporte de contaminantes en la zona; esta modelación tendrá como objetivo la determinación de las zonas en riesgo y su zonificación.
6. El monitoreo que conjuntamente vienen realizando la EMAAP-Q con el INAMHI, no debe centrarse únicamente a los pozos 13 y 22, los cuales se encuentran a 300 metros el uno del otro, deben monitorearse todos los pozos que no estén tapados, estos datos son importantes para futuros estudios en los que se intenten desarrollar modelaciones de flujo o de transporte de contaminantes. La calidad del agua debe efectuarse por lo menos una vez al mes para poder establecer posibles correlaciones entre estos doce eventos y el comportamiento del sistema de aguas subterráneas del ANQ.
7. Se recomienda ampliar el estudio a las zonas Centro, Sur, Cumbayá y Tumbaco, para efectos de desarrollar un mapa de vulnerabilidad de todo el Distrito Metropolitano de Quito.
8. Existen muchas incertidumbres que deben ser absueltas por medio de estudios isotópicos y por modelación hidrogeológica por ejemplo:
 - a. El acuífero de Calacalí es parte del ANQ?
 - b. El Acuífero de Calderón es parte del ANQ?
9. En el sector del callejón de Parcayacu, hasta el complejo de LDU, se recomienda realizar cortes estratigráficos longitudinales y transversales, así como un seguimiento a las vertientes existentes en el sector, como se expresó en el capítulo 4 en este sector no

existen datos registrados de ninguna naturaleza, lo que serviría para afinar los resultados de la modelación y de los índices de vulnerabilidad en ese sector.

10. Para efectos de divulgación se recomienda desarrollar un sistema de información del acuífero de Quito, el cual estará conformado de la siguiente manera:

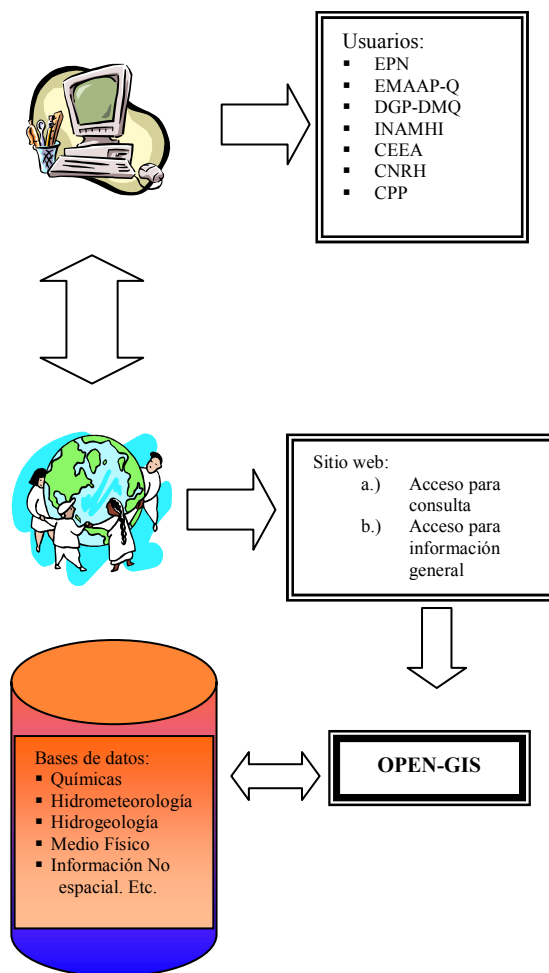


Figura N° 7.3 Esquema del sistema de información del Acuífero Norte

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Alulema, Rafael; “Estudios Hidrogeológicos en la Parroquia de San Antonio para la explotación del agua subterránea”, EMAAP-Q, Quito, 2001.

CODIGEN-DHA/UNDRO, “Peligrosidad de terrenos Inestables en Quito Detección y Mitigación”, Quito, 1993

Echeverri, Gloria; “Aspectos Teóricos sobre el fenómeno de Contaminación de Aguas subterráneas”, *Revista Universidad EAFIT*, Chile 1998

Escuela Politécnica Nacional, Dirección General de Planificación; Microzonificación Sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de Quito, Quito, 2001.

- Escuela Politécnica Nacional, Geohazards International, Ilustre Municipio de Quito, Orstom, Oyo Corporation ", The Quito - Ecuador, Earthquake Risk Management Project", Geohazards International Publication, Quito, 1994
- Escuela Politecnica Nacional, Geohazards International (GHI), Ilustre Municipio de Quito, ORSTOM, OYO CORPORATION "The Quito - Ecuador, Earthquake Risk Management Project an Overview", Geohazards International Publication, Quito, 1994
- Escuela Politécnica Nacional-VVOB, Ciclos de Cursos sobre aplicaciones Computacionales en Aguas Subterráneas, Modulos I, II, III y IV; Quito, 1999.
- Foster, Stephen; Ricardo Hirata, "Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes", OPS-CEPIS, 1987.
- Galárraga, Remigio; Giovanni Taco, " Aportación de los GIS a la Protección de acuíferos", Quito-Ecuador 2001
- Hoyos,Fabián, "Geotécnica-Diccionario Básico" Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2001
- IGM-IPGH-IRD, Atlas Infográfico de Quito, Quito-Ecuador, 1992
- INAMHI-EMAAP-Q-CEEA, Proyecto Arcal "Estudio Hidrológico-Isotópico del Acuífero de Quito", Quito-Ecuador, 2000.
- INAMHI-EMAAP-Q, Boletín Semestral: Variación de niveles estáticos del acuífero de Quito" Julio-Diciembre-1995; Julio Diciembre-2000
- INAMHI, "Estudio Hidroquímico: Unidades Acuíferas del distrito Metropolitano de Quito", Diciembre-1999.
- Jaroslav, Verba; Alexande, Zaporotec, "Guide book on Mapping Groundwater Vulnerability", Vol. 16 y 17, Ed. Heise, Alemania, 1994
- Layedra, Heliria, "Modelo Hidrodinámico del Acuífero de Pujilí con el uso del Sistema de Modelización GMS", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1998.
- Lecaro Manuel, "Zonificación de la ciudad de Quito", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1987.
- MAG-PRONAREG-INAMHI-INERHI-ORSTOM, "Informe Final del proyecto Acuífero de Quito", Quito-Ecuador,1985.
- Martínez, M / Delgado, P; "Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación de riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal" Madrid, 1998.
- Proaño, Roberto; Franklin, Montalvo; "Estimación de la recarga del Acuífero Centro Norte de Quito Mediante el estudio de la Hidrología superficial Aplicando un Sistema de Información Geográfica" UCE, Quito, 1999.
- Robalino, Jaime; Estudio Geológico de la zona de Quito, EPN, 1976.

Salazar, Carlos; "El alcantarillado de la ciudad de Quito, sus problemas y soluciones", EMAAP-Q. 2001.

Taco, Luis; "Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Río Cutuchi, Aguas Arriba de la estación hidrométrica Cutuchi A.J. Yanayacu", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2000.

Torres, Juan; "Estudio de la respuesta dinámica de un perfil de subsuelo de la ciudad de Quito", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1990.

Valcarce, Rosa; Hazle, Carrasco, Sigifredo, Jiménez, "Aplicación de la Metodología GOD MODIFICADA, para el estudio de la vulnerabilidad del acuífero cárstico Cuenca sur de la Habana" CYTED-RED XVII-A, Toluca, 2001

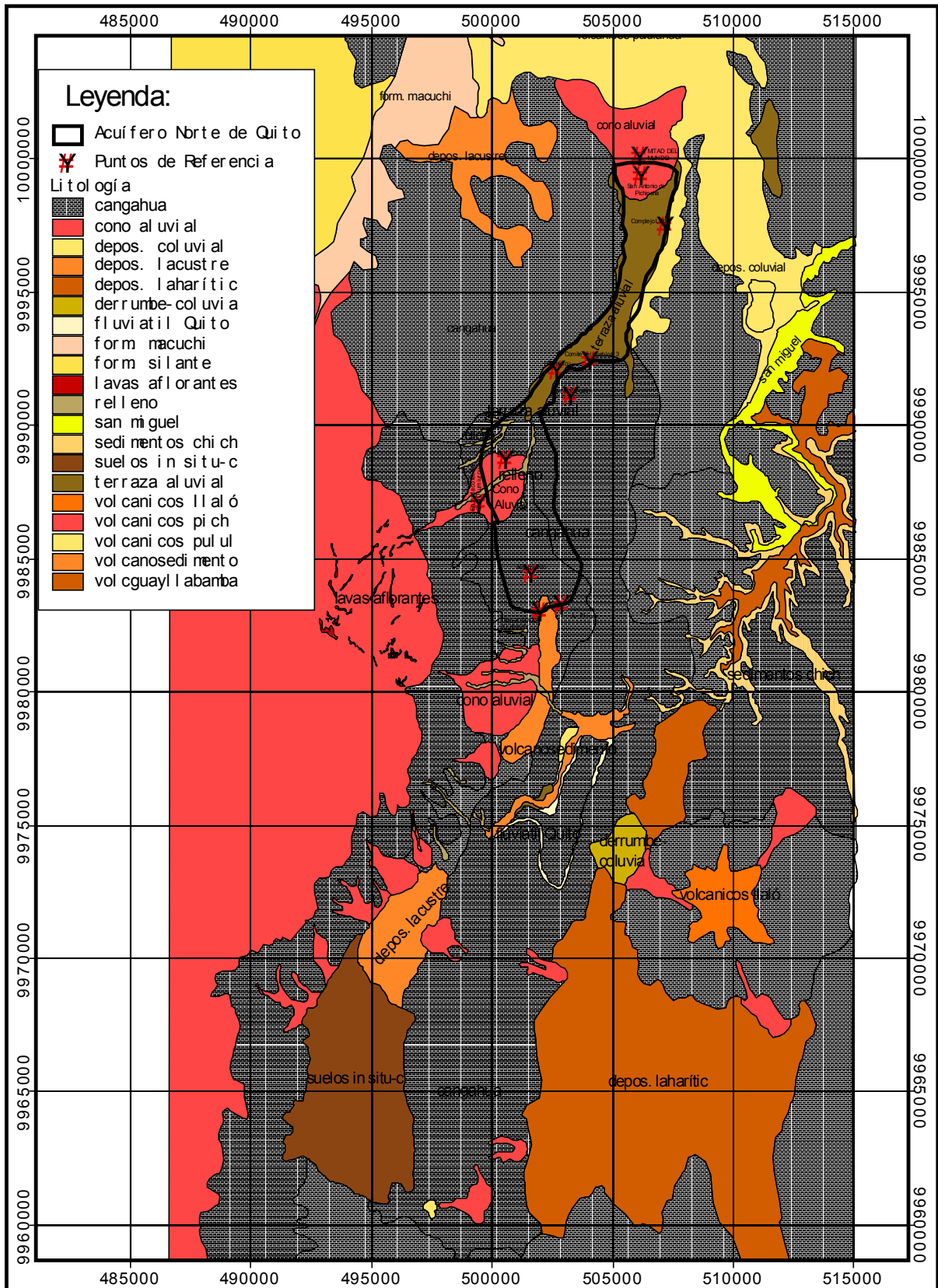
Waterloo Hydrogeologic, "Visual Modflow Tutorial", Ontario, 2001.


Waterloo Hydrogeologic, "Ejercicios para Visual Modflow", Toluca, 2001.

Reconocimientos:

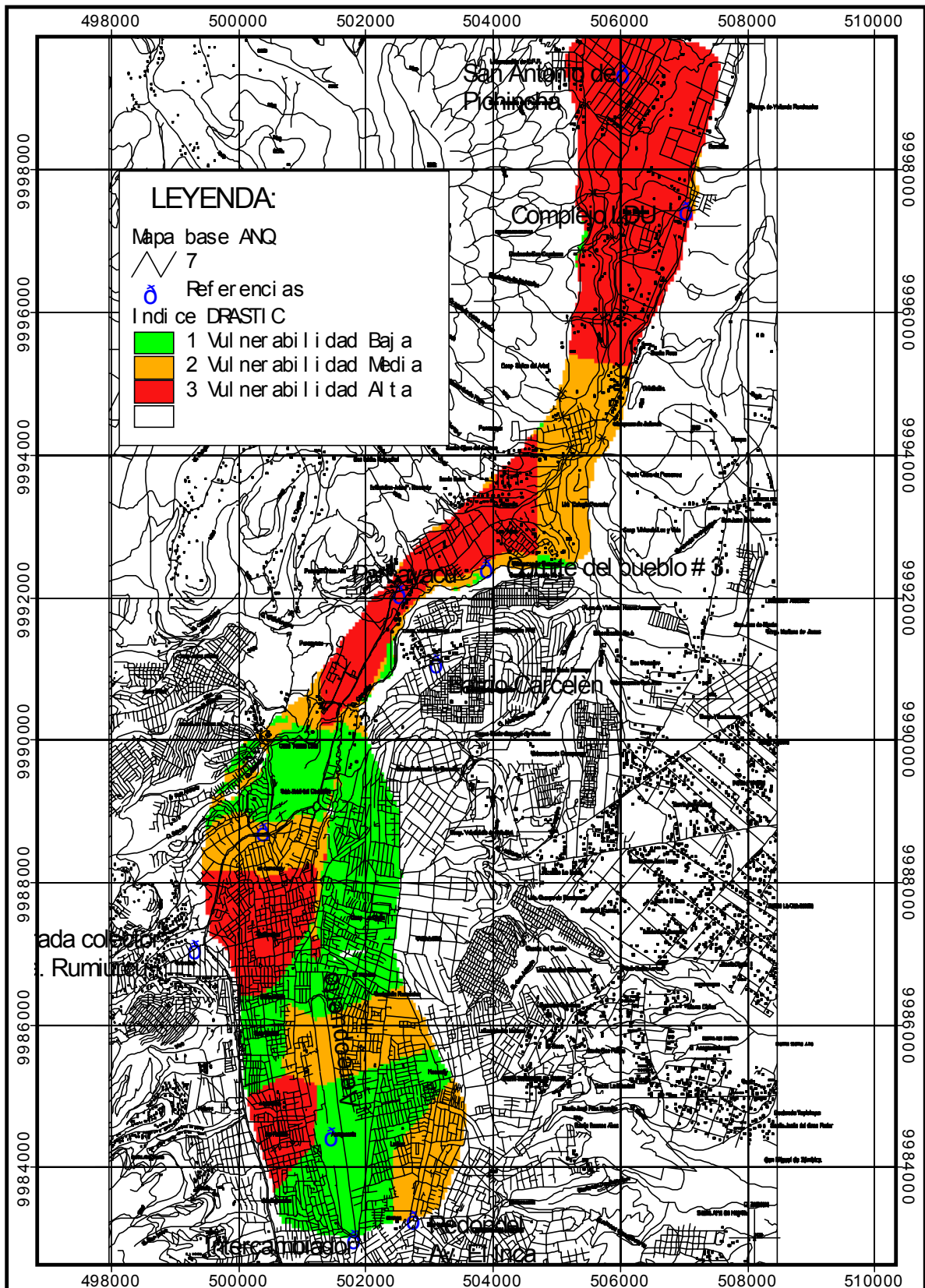
Esta investigación fue realizada gracias al apoyo financiero parcial del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO; al Subprograma XVII del CYTED, y a la Red de Vulnerabilidad de Acuíferos; a la Universidad Autónoma del Estado de México y a la Escuela Politécnica Nacional.


ANEXOS

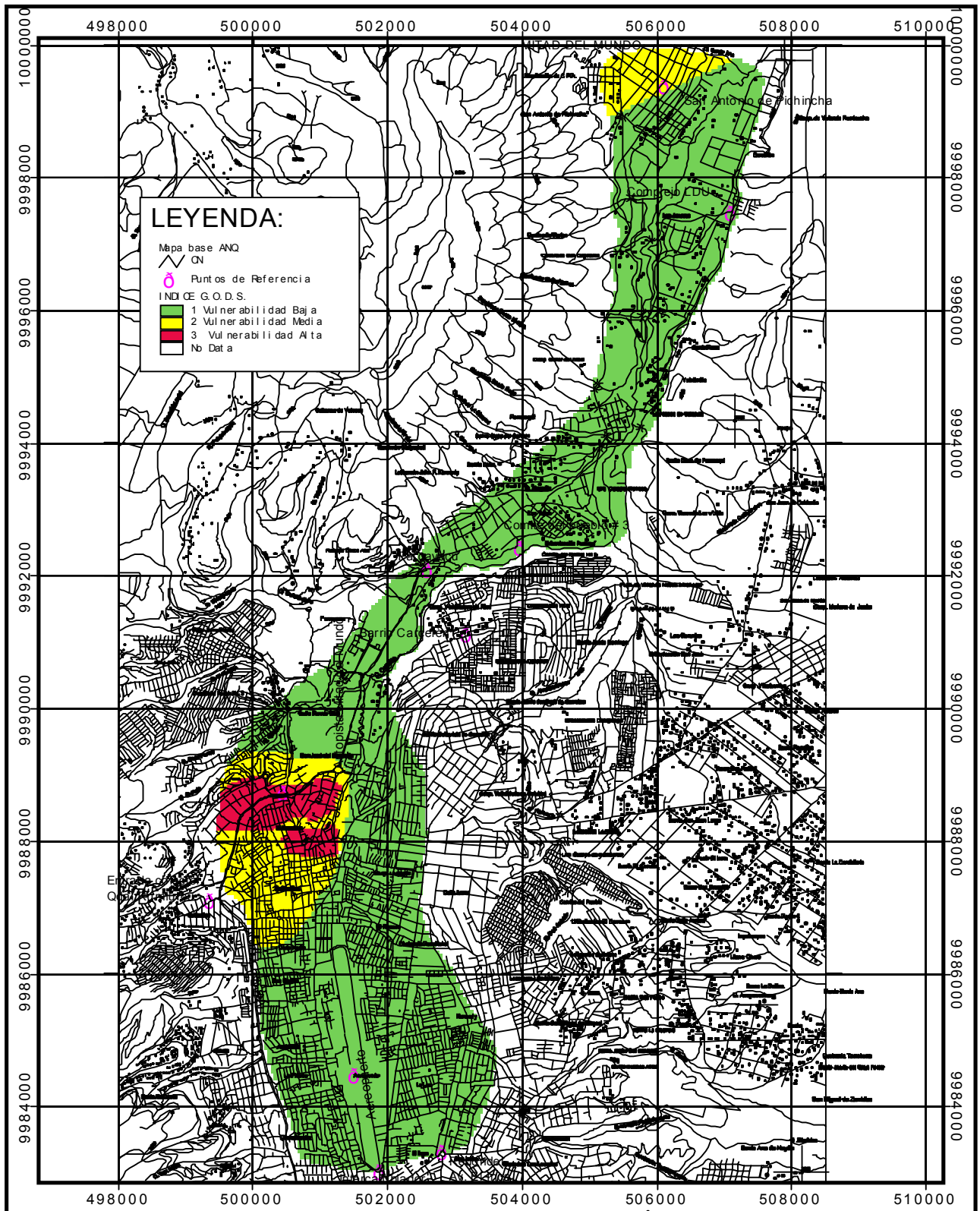



	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		Quito, DM, Marzo -2002	
	Litología Regional y Local de la zona de estudio		Dibujó: Xavier Coello R.	Revisó: Remigio Galárraga
Fuente: EPN-DGP		Escala: Gráfica	Mapa N° 01	

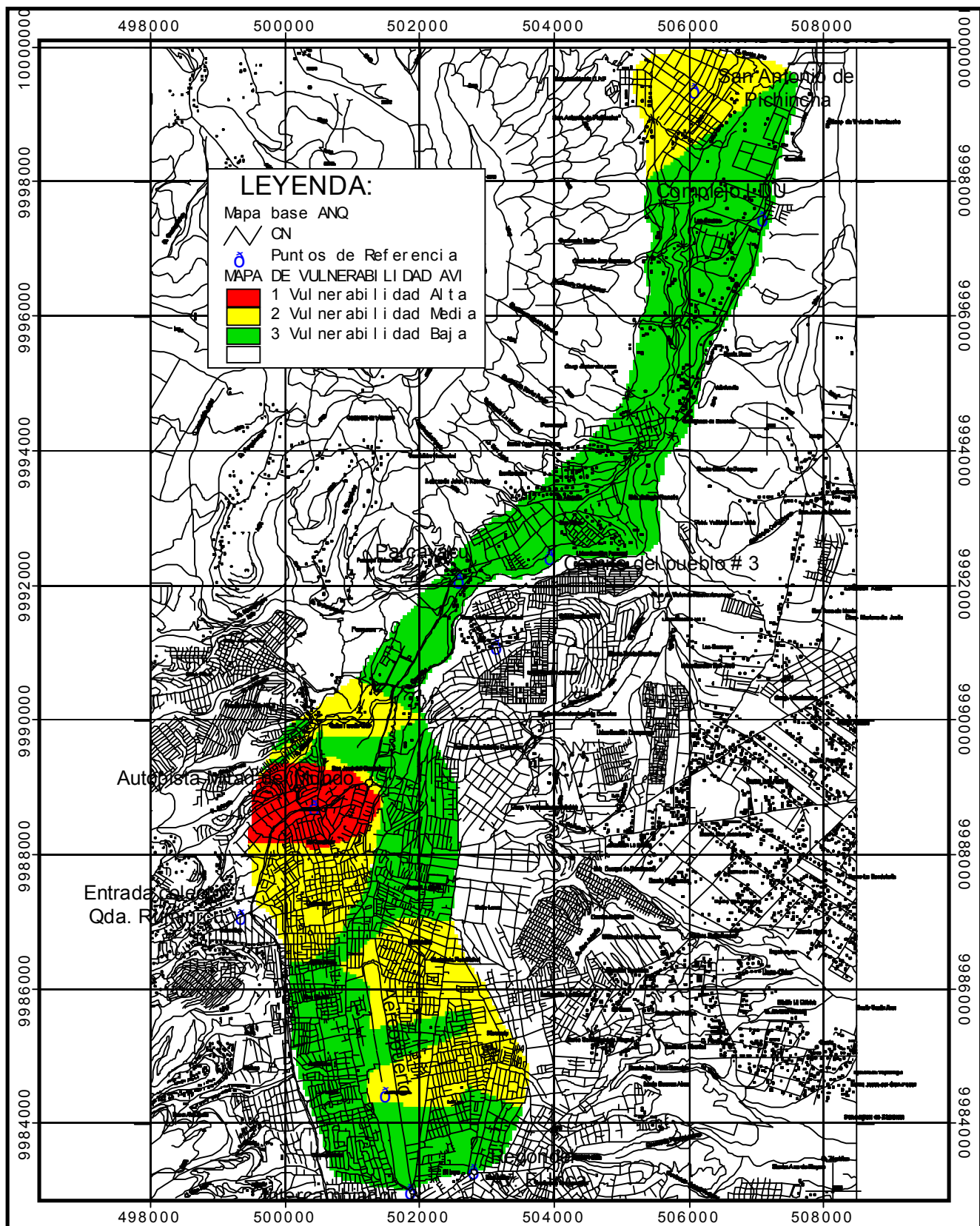
Análisis Comparativo de la Vulnerabilidad del Acuífero Norte de Quito




	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		Quito, DM, Marzo -2002	
	MAPA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO NORTE DE QUITO. Índice: DRASTIC		Dibujó: Xavier Coello R.	Revisó: Remigio Galárraga
Análisis Comparativo de la Vulnerabilidad del Acuífero Norte de Quito			Escala: 1: 75000	Mapa N° 02



	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		Quito, DM, Marzo -2002	
	MAPA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO NORTE DE QUITO Índice: GODS		Dibujó: Xavier Coello R.	Revisó: Remigio Galárraga
Análisis Comparativo de la Vulnerabilidad del Acuífero Norte de Quito			Escala: Gráfica	Mapa N° 03



	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		Quito, DM, Marzo -2002	
	MAPA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO NORTE DE QUITO. Índice AVI		Dibujó: Xavier Coello R.	Revisó: Remigio Galárraga
Análisis Comparativo de la Vulnerabilidad del Acuífero Norte de Quito			Escala: Gráfica	Mapa N° 05