

UNIVERSIDAD MILITAR

NUEVA GRANADA



**ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA
EN EL DISTRITO CAPITAL POR EL MÉTODO DRASTIC**

Ingeniera Diana Maritza Cujabán García

Artículo para publicación

Director

Ingeniero Geólogo, Especialista en Hidrología Subterránea y MSc. En Ciencias
Ambientales: Jairo Alfredo Veloza Franco

Asesor

Ingeniero Ambiental y Sanitario: Álvaro José Gómez Elorza

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

BOGOTÁ

2013

ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL DISTRITO CAPITAL POR EL MÉTODO DRASTIC

Diana Maritza Cujabán García
Ing. Catastral y Geodesta. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Universidad Militar Nueva Granada
diana.cujaban@ambientebogota.gov.co
diacuj84@gmail.com

RESUMEN:

La vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, se usa para definir las propiedades intrínsecas que determinan el riesgo de un acuífero a ser afectado por una carga contaminante. Uno de los métodos de índice y superposición más utilizado es el DRASTIC, el cual se basa en el análisis de tres factores y siete parámetros hidrogeológicos, que reflejan las condiciones naturales del medio; metodología que genera salidas gráficas (mapas) de zonas diferenciadas por grados de vulnerabilidad, que se convierten en herramientas de planificación y control. Para el Distrito Capital el principal interés es evaluar la vulnerabilidad general a la contaminación del agua subterránea, utilizando diferentes metodologías, en esta oportunidad por medio del método DRASTIC, inferir las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación para así tomar las acciones a las que haya lugar. El valor promedio obtenido en el presente estudio, para la zona de interés en temporada de alta y de baja precipitación es de 68,64 y 69,39 respectivamente, correspondiente a una clasificación de vulnerabilidad baja, la que representa el mayor porcentaje del área estudiada; con unos rangos extremos de 142 y 147 (vulnerabilidad moderada) para cada temporada, ubicados hacia el oriente en la zona de recarga y parte sur de la ciudad de Bogotá D.C., lo que conlleva a plantear una mayor y mejor administración y gestión del recurso hídrico subterráneo en estas regiones. Así mismo se evidencia que los cambios entre una temporada y la otra no son representativos y por tanto se considera relevante realizar el promedio de las dos temporadas de precipitación y plantear solo un mapa de vulnerabilidad para la planeación estratégica del recurso.

Palabras Clave: Vulnerabilidad. Contaminación. Agua Subterránea. DRASTIC.

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos el ser humano ha deseado advertir con precisión el comportamiento de los fenómenos naturales y más aún conocer su interacción y la cantidad de los diferentes recursos disponibles para el desarrollo de sus diversas actividades, buscando en estos que sean económicamente explotables, por tal motivo se ha ideado variados métodos para comprender lo que sucede en su entorno, algo que se facilita cuando se visualizan los recursos naturales (ríos, bosques, agricultura, agua superficial, etc.), pero aquellos que no se encuentran a simple vista como el petróleo, la minería y el agua subterránea, se vuelven de mayor interés y estudio para determinar su cantidad, calidad y comportamiento a través del tiempo.

Uno de los principales recursos es el “agua”, ya que es el fomento de la vida y a ha permitido el desarrollo de sociedades en su entorno, y es la contaminación a este recurso, lo que ha prendido las alarmas para su adecuada gestión, regulación y protección; sin embargo, la deficiente tecnología implementada en el manejo de los recursos hídricos conllevan a una inadecuada explotación de estos en el suelo y subsuelo colombiano, ya que para conocer y determinar lo que realmente poseemos es necesario implementar herramientas más precisas de búsqueda y análisis. [1 - 2]

Es así que en el Distrito Capital la Secretaría Distrital de Ambiente - SDA, es la entidad que administra dicho recurso, y entre sus diversas funciones, está la de promover, impulsar y coordinar la ejecución acciones que se requieran para la prevención, control, corrección y manejo de problemas de degradación y deterioro ambiental [3], por tal razón se presenta la necesidad de comprender de forma precisa y detallada el comportamiento del agua subterránea, debido a que es un recurso fundamental para el desarrollo vital de la comunidad albergada en su jurisdicción, es por esto que se encuentra desarrollando el Sistema de Modelamiento Hidrogeológico, como insumo para el Modelo Matemático, el cual servirá para representar por medio de escenarios simulados, el comportamiento del agua subterránea en diferentes contextos físicos y ambientales, y con ello realizar una mejor gestión del recurso hídrico subterráneo en el Distrito Capital.

Este Sistema de Modelamiento Hidrogeológico, se desarrolla por etapas, en las cuales se contempla la identificación de la vulnerabilidad del agua subterránea por contaminación; propósito final del presente documento, ya que se ha de realizar la zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en el Distrito Capital, utilizando la metodología DRASTIC para dos periodos climáticos (temporada de alta y baja precipitación), regionalizando la información asociada e identificando zonas de interés por grados de vulnerabilidad, por medio de datos confiables (en áreas como la geología, hidrología, meteorología, hidrogeología, etc.) adquiridos a lo largo del tiempo en su jurisdicción[4], generando herramientas de análisis y alternativas de estudio e investigación del recurso hídrico subterráneo, por medio de la planificación precisa y el perfeccionamiento de la gestión de los recursos naturales en el Distrito Capital.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación se ha desarrollado ampliamente por metodologías de simulación, de estadísticos, de índices y de superposición o de ambientes hidrogeológicos; pero los más desarrollados por su practicidad, son los de índices y superposición (GOD, DRASTIC, GALDIT, etc.) de estos el más conocido y utilizado es el método DRASTIC, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de EEUU, el cual se genera a través de la información de las características intrínsecas del acuífero y la información de siete variables que se deben analizar con datos recopilados del área de estudio y que están claramente diferenciadas e identificadas; adicionalmente esta metodología realiza una clara clasificación del tipo de contaminante a evaluar (pesticida, no pesticida), lo que lleva una mejor aproximación de la realidad. [5]

En el norte de la provincia de Buenos Aires (Argentina) se puso en práctica la metodología DRASTIC en 2005, debido entre otros criterios, a que la zona es predominantemente agrícola, pero con el crecimiento de la demanda de alimentos, cambio con el tiempo el esquema de producción y paso de sistemas productivos mixtos a grandes superficies bajo siembra directa y continua, generando una alta presión al cultivo de soya y el incremento de fertilizantes y plaguicidas principalmente. [6]

La zona de estudio abarca 1.800.000ha, el relieve es suavemente ondulado con pendientes que no superan el 3%, cuenta con una alta retención de humedad, su textura es variable de acuerdo al tipo de suelo; el clima oscila entre valores de 10° y 12°C en invierno y 23° y 25°C en verano; su precipitación media anual es de 1000mm en el Este y 800mm en el Oeste, la geología de la región es uniforme y los sedimentos pampeanos, loess (sedimentos ligeros, poco compactos por la presencia de guijarros), tienen espesores hasta de 100 metros. [6]

Para esta metodología se utilizaron mapas a escala 1:500.000; información detallada desde 1989 de 79 pozos profundos, como lo fue la determinación de la profundidad de la capa freática, la litología del acuífero y las características de la zona no saturada; el balance hídrico se estimó con datos de las Cartas de Suelos de la República de Argentina de INTA (1974) y precipitaciones promedio, así como para la variable de Suelos y Topografía, y para la Conductividad Hidráulica se tomó el valor de la tabla loess.

El valor promedio obtenido por el método DRASTIC, para la región norte de la provincia de Buenos Aires, fue de 117, lo que corresponde a vulnerabilidad moderada, en toda el área y para el periodo estudiado no se hallaron valores de vulnerabilidad alta; esto se debe principalmente al tipo de suelo y la topografía de la zona, pero un inconveniente encontrado es la actualización de la información para el estudio, ya que no se tuvo en cuenta el cambio en el suelo inducido por el manejo y se sugirió incorporar otra variable que represente el tipo de actividad que realiza el hombre {Secunda et al. 1998}. [6]

Finalmente al realizar una comparación con información de los datos pluviométricos de la época más lluviosa (año 2001), en la zona catalogada como pampa ondulada alta, los datos se acercaron a la categorización de vulnerabilidad alta y junto con la actividad agrícola generó un mayor riesgo de contaminación, lo que conllevó a un señalamiento como: zona de elevado riesgo hídrico ante eventos hidrogeológicos extremos y actualmente esta zona presenta valores elevados de nitritos de origen agrícola en las aguas subterráneas. Esto también determinó que el método DRASTIC es altamente sensible a cambios de mediano plazo como variaciones en el régimen hídrico o alteraciones sustanciales en el nivel freático. [6]

Otro caso de éxito es el elaborado en la ciudad de Oaxaca de Juárez (México), ubicada geográficamente en el Valle de Etna; la principal preocupación en la zona son las aguas servidas que se descargan al cuerpo receptor Río Atoyac, siendo este el principal sistema de drenaje que atraviesa todo el valle, lo que origina la preocupación a la susceptibilidad de que el sistema acuífero se contamine por actividades domésticas, comerciales, agrícolas o industriales, ya que el área se compone por un acuífero libre (o no confinado, aquel que presentan una superficie libre y en contacto directo con la atmósfera, sometido por consiguiente a la presión atmosférica). [7]

La zona de estudio presenta un área de 290km²; cuenta con información de 3 manantiales y 36 pozos profundos, el nivel freático oscila entre 1,5 y 4,5 m, presenta una pendiente de 2%. Al determinar la vulnerabilidad por el método DRASTIC, se concluye que la zona presenta una vulnerabilidad media a alta, principalmente donde se ubican los pozos profundos, en la ciudad de Oaxaca y en la parte central, zonas relevantes para el tema de abastecimiento hídrico, pero también donde se ubica la mayor cantidad de población. Este estudio alertó a las entidades ambientales en el tema de planeación del recurso hídrico subterráneo, lo que llevó a tomar medidas de protección y seguimiento en el desarrollo de la zona, con el propósito de proteger, no solo la zona de recarga del acuífero, sino que también tener en cuenta el riesgo de contaminación por descargas de aguas residuales. [7]

1.1 MATERIALES USADOS

El volumen del agua que se encuentra en el planeta Tierra, se ha conservado en sus diferentes estados (sólido, líquido y gaseoso) y se encuentra presente en la atmósfera, en la superficie terrestre y en el subsuelo; donde el conjunto de procesos físicos que regulan y determinan la circulación del agua en el planeta se denomina *Ciclo Hidrológico* [8]. Por lo anterior el volumen de agua es el mismo, la contaminación de esta, por las diferentes actividades humanas (vertimientos a fuentes hídricas, riego con químicos, deforestación, minería, etc.), en concentraciones que superen los valores guía de la Organización Mundial de la Salud – OMS {Foster 2002}, es lo que hace que la cantidad útil se aminore, de ahí la importancia de racionalizar y planificar su uso.

Según los datos publicados por Gleick (1996), el volumen total del agua que participa en el ciclo hidrológico son de aproximadamente 1338 millones de Km^3 . Alrededor de un 97% es agua salada; del agua dulce 2,14% está confinada en glaciares y nieve, un 0,61% se encuentra en el subsuelo y las corrientes superficiales de agua dulce, corresponden al 0,009%, siendo esta última, la principal fuente de abastecimiento hídrico en el mundo [8]. Es por tanto que la próxima fuente directa de abastecimiento hídrico a tener en cuenta para la población, es aquella que se encuentra en el subsuelo: el agua subterránea almacenada en formaciones geológicas que tienen poros o vacíos; la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un material se define como porosidad total, y la porosidad eficaz no es más que una porción, a menudo pequeña de la porosidad total (m), además la porosidad eficaz (m_e), está afectada por la distribución de los granos, y por la presencia de arcilla y su estado de hidratación. La manera como estos vacíos están conectados determinan la facilidad con que un fluido puede moverse entre ellos. Esta facilidad conocida con el nombre de permeabilidad, se denomina Conductividad Hidráulica (K) en la literatura especializada. [8 - 9]

Por otra parte el término “*vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas*” fue introducido por el hidrogeólogo francés J. Margat, explicando que el concepto se basa en que el medio geológico y la cubierta edafológica, proporcionan un grado de protección a las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen natural como de actividades antrópicas. Dicha vulnerabilidad se usa para representar las características intrínsecas que determinan el riesgo del agua subterránea de ser afectada por una carga contaminante (Forest & Hidrata, 1991). [5], [8]

Por lo tanto se hace necesario conocer los grados de vulnerabilidad a la contaminación por medio de sistemas generalizados y regionalizados, como lo son los mapas de zonificación, los cuales caracterizan el territorio con aspectos de interés ambiental homogéneo, teniendo como referencia sus condiciones físicas, químicas y biológicas; siendo estas salidas gráficas, herramientas para la ordenación de las cuencas hidrográficas y del territorio, permitiendo identificar acciones preventivas contra la contaminación y elaboración de planes manejo de acuíferos. [8]

Para el desarrollo de tales sistemas regionalizados, se hace necesario utilizar herramientas informáticas e implementación de metodologías, ya desarrolladas y aplicadas en casos de estudio similares al que nos atañe en el presente documento; como lo es el método de índice y superposición conocido como DRASTIC, el cual recopila información de siete variables (características intrínsecas del acuífero) y las unifica, determinando la vulnerabilidad a una carga contaminante puesta en superficie (flujos verticales descendentes); esta metodología fue desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de EEUU y determina la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea a través de tres factores principales: *i)* capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona no saturada y en la zona saturada; *ii)* resistencia o inaccesibilidad, en el sentido hidráulico, a la penetración de los contaminantes; y *iii)* factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes [5]. Información con la que cuenta la Secretaría Distrital de Ambiente, desde el año de 1999 a la fecha y con la que se ejecuta el presente proyecto.

El área de interés es Bogotá D.C., capital de la República de Colombia, la cual cuenta con más de siete millones de habitantes y está situada en la cordillera oriental de Los Andes a 2.550 metros de altura sobre el nivel del mar, a 4° 35' Norte y 74° 04' Oeste. El área de investigación, objeto de este documento es de 540km² aproximadamente y viene definido por límites naturales de la zona, los cuales se definen así: al norte limita con la falla de la Floresta, al oriente con los Cerros Orientales, al sur con los Cerros del Sur y un sistema de fallamiento del Mochuelo y Terreros y al occidente con el Río Bogotá; además comprende una parte de la cuenca hidrográfica de la Cuenca del Río Bogotá. El uso del agua subterránea proviene de acuíferos poco profundos y de origen cuaternario, existen aproximadamente 7.000 pozos profundos en la Sabana de Bogotá y la tasa de utilización del agua subterránea es de 3.7 m³/seg. Una gran porción es utilizada en irrigación agrícola y en la industria. De acuerdo al inventario de pozos profundos realizado por entidades como INGEOMINAS, CAR y SDA, el principal acuífero explotado pertenece al Cuaternario, soporta el 93% de todos los pozos profundos y el 78% del volumen total de agua extraída. [4]

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo final de este documento será determinar la zonificación por áreas homogéneas y grados de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, frente a factores que puedan inducir a situaciones indeseables del entorno natural del acuífero, teniendo como referencia las condiciones actuales del Distrito Capital, por el método DRASTIC.

1.2 MÉTODOS

Para el presente proyecto se pretende determinar el grado de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en el Distrito Capital, para lo cual se utilizará la metodología DRASTIC, ajustando los rangos de cada una de las variables a la zona de interés y tomando como referencia principalmente la geología y la información primaria multitemporal de la Secretaria Distrital de Ambiente - SDA. [4]

El concepto de vulnerabilidad se define como una medida cualitativa o cuantitativa de la mayor o menor facilidad con la que se puede causar un perjuicio (daño, deterioro o degradación) [9], por lo tanto lo que se pretende es determinar la susceptibilidad que tiene un medio natural (o recurso) a ser afectado por un perjuicio potencial definido; específicamente para la SDA es de vital importancia conocer la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, que es un factor relevante en la toma de decisiones, tanto para la gestión como para la protección del recurso hídrico subterráneo y por tanto se desarrolla esta metodología, la cual cuenta con 3 factores y 7 variables a saber [4]:

1.2.1 Capacidad de atenuación de la carga contaminante (2 variables):

- **Suelo**, es la parte más superficial de la zona no saturada, con espesores hasta 2 metros y su importancia radica en la capacidad de atenuación de la carga contaminante.
- **Zona no saturada**, es el espesor comprendido entre la superficie y el nivel freático y es considerado la primera defensa del acuífero, debido al retraso que puede generar en el tránsito del contaminante y generar procesos de atenuación.

1.2.2 Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico (3 variables):

- **Régimen hidráulico del acuífero**, es el grado de confinamiento de las aguas que contienen y de acuerdo al tipo de acuífero (libre, confinado y semi-confinado).
- **Profundidad del agua subterránea**, es la profundidad a la cual se encuentra el agua subterránea, para los acuíferos libres es el nivel freático.
- **Características litológicas**, son la definición específica del material que contiene la zona no saturada y las capas confinantes, teniendo en cuenta el grado de consolidación y el tipo de litología.

1.2.3 Transporte de contaminantes (2 variables):

- **Topografía**, es un factor relevante en la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos, dado que las variaciones de la superficie pueden permitir la evacuación de los contaminantes.
- **Recarga neta**, es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un periodo de tiempo.

El método DRASTIC (su nombre viene del inglés por cada una de las variables utilizadas en la metodología), para determinar la vulnerabilidad intrínseca, se definen así cada variable:[4]

D: Profundidad del agua subterránea

R: Recarga neta

A: Litología del acuífero

S: Tipo de suelo

T: Topografía

I: Impacto en el acuífero, naturaleza de la zona no saturada

C: Conductividad hidráulica

$$iV = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

iV: Índice de vulnerabilidad

r: Factor de clasificación o valoración

w: Factor de ponderación

Durante el proceso realizado en la Secretaría Distrital de Ambiente, para el desarrollo del *Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital*, se determinaron algunas de las variables de la metodología, con información desde el año 1999 a 2012, lo cual permitió ejecutar el presente proyecto a una escala adecuada.

En el siguiente gráfico se presenta la relación de las variables y los diferentes procesos que se ejecutaron para la obtención de las mismas.

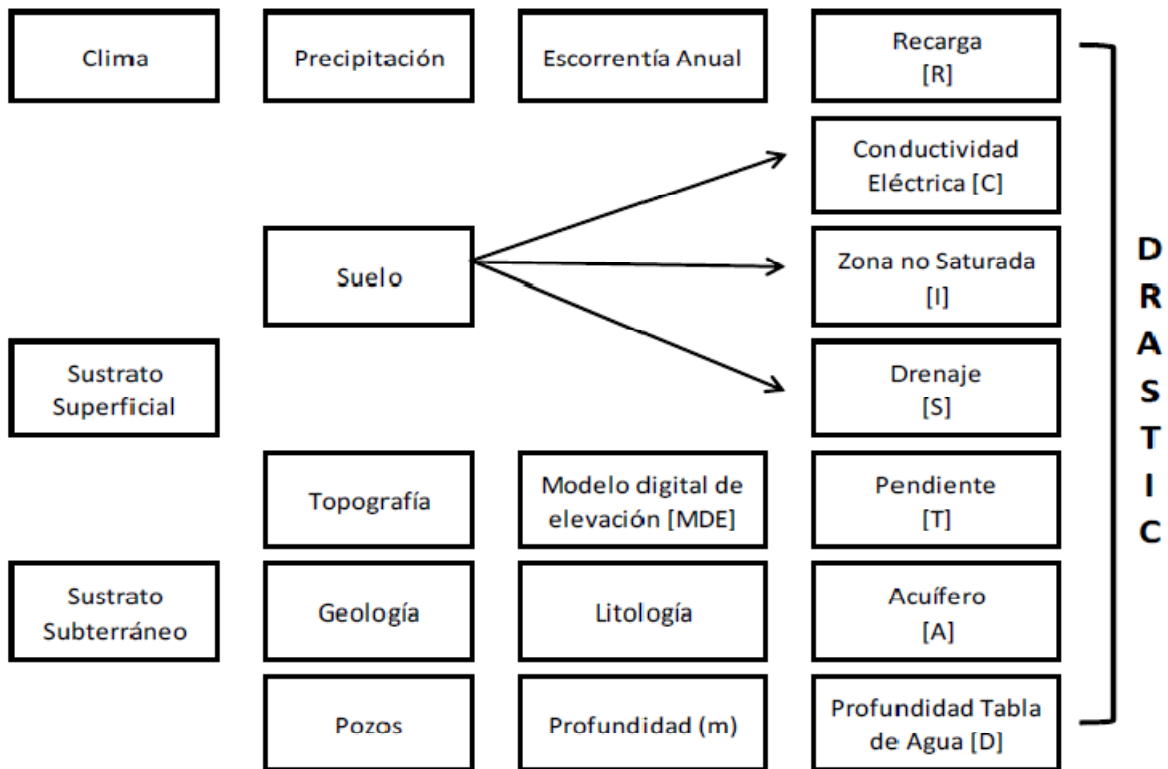


Figura 1: Variables de evaluación de la Metodología DRASTIC
Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

1.2.4 La elaboración del proyecto

El presente proyecto se elaboró en tres etapas a saber:

➤ **Depuración de la información:**

Se adquirieron los datos de 236 pozos profundos y 2154 registros de niveles estáticos por año desde 1999 al 2012 y caracterizados por época de alta y baja precipitación, registros almacenados en la bases de la SDA en la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo; los cuales se procedieron a depurar y discriminar por pozo, por año y por época, promediando la información de los pozos profundos para el mismo año e igual época, encontrando rangos de información que van desde 22 registros para el año 2010 hasta 195 para el año 2003 en temporada de baja precipitación (o seca) y 16 registros para el año 2012 hasta 159 para el año 2003 en temporada de alta precipitación (o lluviosa) y distribuidos a lo largo de la zona de estudio.[4]

➤ **Generación gráfica de variables:**

En esta segunda fase se utilizó el software ArcGis, para la generación y estructuración de coberturas de cada una de las variables, elaborando un shape en formato raster, tomando como referencia principal, el límite del modelo

hidrogeológico de la SDA; así mismo se determinaron los rangos y las valoraciones de los parámetros de la metodología, de acuerdo al conocimiento de la zona de estudio. A continuación se presenta el proceso realizado por cada una de las variables de la metodología DRASTIC: [4]

D: Profundidad (m)

Inicialmente se analizó y determinó el método de interpolación más adecuado para el área de interés, comparando las diferentes metodologías de interpolación de datos usadas en ArcGis (kriging, natural neighbor, spline e IDW), siendo el IDW el más adecuado para el análisis de datos de profundidad (niveles estáticos) por época climática vs año, generando shapes de puntos, los cuales se procedieron, de forma individual, a interpolar por este método, generando capas tipo raster (con tamaños de celdas de 30metros), las cuales finalmente se promediaron por temporada, con datos máximos de profundidad del nivel estático de 83.9m y 78,1m para la temporada de alta y baja precipitación respectivamente y valores mínimos de 4,96m y 3,38m igualmente; lo que generó dos principales coberturas llamadas: prom_lluvia_Dr y prom_seca_Dr, siendo estas las primeras variables de la metodología a desarrollar.

Los rangos a utilizar para esta variable de acuerdo al método empleado, se describen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Factor de valoración de la variable profundidad

D: PROFUNDIDAD (m)	Dr
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

R: Recarga (mm)

Para esta variable se adecuaron los rangos, de acuerdo a la zona de estudio y a la experiencia desarrollada por la SDA, en la elaboración del Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital, calculando una recarga potencial en formato raster, con valores negativos de -202,5mm hasta 700mm; por lo tanto en el siguiente cuadro se especifican los valores y los rangos para el área de interés:

Tabla 2: Factor de valoración de la variable recarga potencial

R: RECARGA POTENCIAL (mm)	Rr
< -200	4
-199 a -100	3

R: RECARGA POTENCIAL (mm)	Rr
-100 a 0	1
0 a 100	2
100 a 200	3
200 a 300	4
300 a 400	5
400 a 500	6
500 a 600	7
> 600	8

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente.

Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital. 2012

A: Litología del Acuífero

Para esta variable también se adecuaron los valores típicos, de acuerdo los rangos de la metodología, a la zona de estudio y a la experiencia desarrollada por la SDA, en la elaboración del Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital, partiendo de la geología desarrollada a escala 1:25.000 y generando una cobertura tipo raster; por lo tanto en el siguiente cuadro se especifican los valores y los rangos para el área de interés:

Tabla 3: Factor de valoración de la variable litología del acuífero

A: LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO	Ar
Lutita masiva	1 - 3
Arenas y gravas de origen glaciar	4 - 6
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9
Arenisca masiva	4 - 9
Arena o grava	4 - 9

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

S: Tipo de Suelo

Se tuvieron en cuenta los valores y las descripciones de la variable tipo de suelo, de acuerdo a la metodología DRASTIC y al área de estudio para generar una cobertura tipo raster; valores que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4: Factor de valoración de la variable tipo de suelo

S: TIPO DE SUELO	Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compacto	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4

S: TIPO DE SUELO	Sr
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compacta y no agregada	1

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

T: Pendiente (%)

Es la pendiente del terreno en forma porcentual, de acuerdo a la topografía de la zona, temando en cuenta la valoración asignada en la metodología, lo que generó una cobertura tipo raster con una pendiente predominantemente del 2%; rangos y valores que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5: Factor de valoración de la variable tipo de suelo

T: PENDIENTE (%)	Tr
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
> 18	1

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

I: Naturaleza de la Zona No Saturada

Para esta variable se adecuaron los valores típicos de los rangos según la metodología, de acuerdo a la zona de estudio y a la experiencia desarrollada por la SDA, en la elaboración del Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital, partiendo de la geología desarrollada a escala 1:25.000 y generando una cobertura tipo raster; por lo tanto en el siguiente cuadro se especifican los valores y los rangos para el área de interés:

Tabla 6: Factor de valoración de la variable naturaleza de la zona no saturada

I: NATURALEZA DE ZONA NO SATURADA	Ir
Capa confinante	1
Arcilla - limos	2 - 6
Lutita	2 - 5
Liditas	2 - 6
Arenisca	4 - 8
Secuencia de arenas y arcillas	2 - 6
Arena o grava	4 - 8
Secuencia de areniscas, arcillolitas y lutitas	4 - 8

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente.
Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital. 2012

C: Conductividad Hidráulica (m/día)

Se tomaron en cuenta los valores y los rangos de la variable: conductividad hidráulica, de acuerdo a la metodología planteada y al área de estudio, generando una cobertura tipo raster, pero teniendo en cuenta la experiencia adquirida en el desarrollo del Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital, se considera que existe una sobreestimación de este parámetro dentro de la metodología y se sugiere seguirlo analizando; los valores se describen en la siguiente tabla:

Tabla 7: Factor de valoración de la variable conductividad hidráulica

C: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/día)	Cr
0,04 - 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 - 28,55	3
28,55 - 40,75	6
40,75 - 81,49	8
> 81,49	10

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

➤ **Desarrollo de la Metodología DRASTIC:**

Posterior a regionalizar cada una de las variables en el software ArcGis, generando un total de 8 coberturas tipo raster, se sabe que la metodología plantea 7 variables pero para el presente estudio se estimó la variable profundidad dos veces, una para la temporada de alta precipitación y la otra para la temporada de baja precipitación, por lo tanto se procede a plantear la ecuación del método DRASTIC, que viene definida por:

$$iV = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

Para los factores de ponderación según la metodología, se tomaron los datos para el tipo de contaminante no pesticida, según el comportamiento del área de estudio, los cuales vienen definidos en la siguiente tabla:

Tabla 8: Factores de ponderación para el método DRASTIC

FACTORES DE PONDERACIÓN							
TIPO DE CONTAMINANTE	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	I_w	C_w
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

Determinando así dos planos a escala 1:50.000, con datos estadísticos para las temporadas de alta y baja precipitación, a saber:

Tabla 9: Estadísticas de la variable profundidad por temporada de precipitación

TEMPORADA DE ALTA PRECIPITACIÓN		TEMPORADA DE BAJA PRECIPITACIÓN	
ESTADÍSTICO	VALOR	ESTADÍSTICO	VALOR
Valor Mínimo	34	Valor Mínimo	34
Valor Máximo	142	Valor Máximo	147
Media	68,64	Media	69,39
Desviación Estándar	17,332	Desviación Estándar	17,948

Fuente: El Estudio. 2012

Lo que conlleva a establecer que para el área de interés, el valor máximo de vulnerabilidad es de 147, lo que considera la metodología, por los grados de vulnerabilidad planteados, una zona de vulnerabilidad moderada, por tanto se establece que para el Distrito Capital se cuentan con tres grados de vulnerabilidad según la presenta tabla:

Tabla 10: Grados de Vulnerabilidad - Método DRASTIC

VULNERABILIDAD GENERAL	
GRADO	VULNERABILIDAD
Muy Bajo	23 - 64
Bajo	65 - 105
Moderado	106 - 146
Alto	147 - 187
Muy Alto	188 - 230

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

1.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

1.3.1 Temporada de alta precipitación

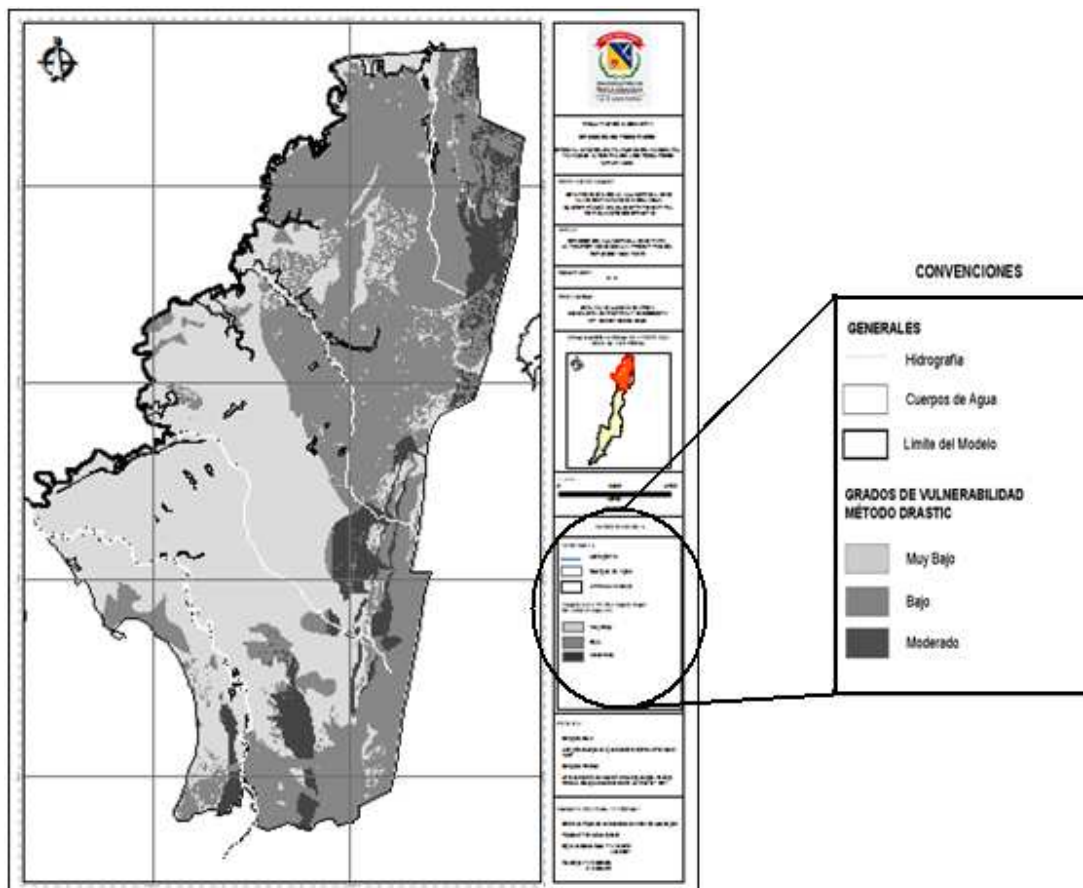


Figura 2: Mapa escala 1:50.000, zonificación por grados de vulnerabilidad Temporada de alta precipitación para el Distrito Capital

Fuente: El Estudio. 2012

Como se visualiza en el mapa de zonificación para la temporada de alta precipitación, se determinaron tres grados de vulnerabilidad en el área de estudio, los cuales vienen definidos por: vulnerabilidad muy baja (valores de 23-64), identificada principalmente en la zona sur-occidental del Distrito Capital, que comprende en totalidad las localidades de Fontibón, Puente Aranda, Kennedy, Bosa, Antonio Nariño y Tunjuelito; y parte importante de las localidades de Rafael Uribe Uribe, Los Mártires y Teusaquillo. Con una vulnerabilidad baja (valores de 65-105) en la zona nor-occidental y parte sur-oriental, donde se encuentran las localidades de Suba y Barrios Unidos, parte de Engativá, Usaquén, Teusaquillo, Santa Fe y San Cristóbal; y con una vulnerabilidad moderada (valores de 106-147) distribuida en las zonas nor-oriental y sur oriental, donde se encuentra la localidad de Candelaria y en pequeños porcentajes las localidades de Usaquén, Los Mártires, Teusaquillo, Usme y Ciudad Bolívar, estas últimas zonas son las que se deben plantear como prioritarias en la

gestión a realizar en el programa de Evaluación, control y seguimiento que realiza la Secretaria Distrital de Ambiente en su jurisdicción.[3], [10] y[11]

1.3.2 Temporada de baja precipitación

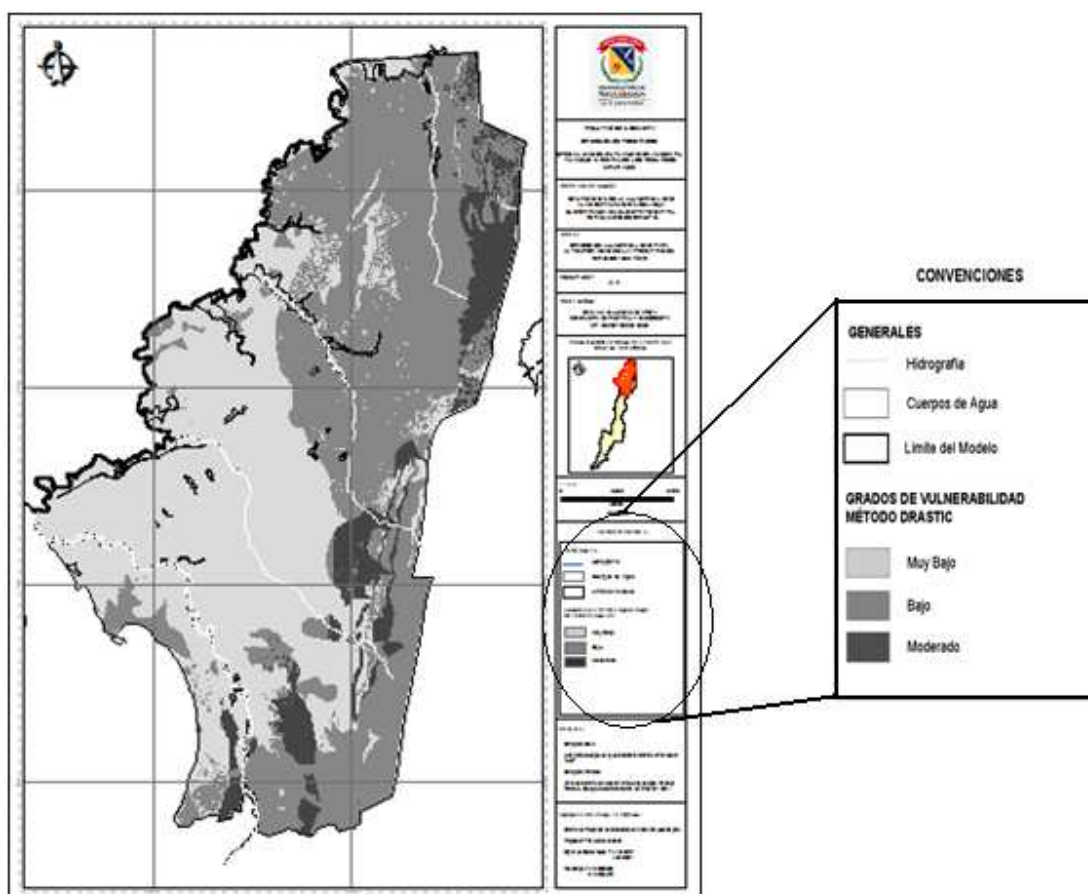


Figura 3: Mapa escala 1:50.000, zonificación por grados de vulnerabilidad Temporada de baja precipitación para el Distrito Capital

Fuente: El Estudio. 2012

Equivalente al mapa anterior, se presenta la zonificación para la temporada de baja precipitación, determinando tres grados de vulnerabilidad en el área de estudio, iguales a las definidas anteriormente: muy baja (valores de 23-64), donde las localidades identificadas son las mismas que en la temporada de alta precipitación, con una pequeña ampliación en la localidad de Engativá hacia el nor-occidente; una vulnerabilidad baja (valores de 65-105), donde se identifican las mismas localidades del mapa anterior; y con una vulnerabilidad moderada (valores de 106-147) se encuentra la localidad de Candelaria y los porcentajes de la localidad de Usaquén aumentan hacia el nor-oriente del Distrito Capital, siendo estas últimas zonas las que se deben plantear como prioritarias en la gestión a realizar por la Secretaria Distrital de Ambiente en su jurisdicción.[3], [10] y[11]

2. CONCLUSIONES

- Se determinó que a nivel regional existe una vulnerabilidad moderada en el Distrito Capital hacia los cerros orientales, considerados como zona de recarga de los acuíferos en el Distrito Capital.
- La vulnerabilidad más baja, se presenta en la zona industrial del Distrito Capital, lo que traduce que el acuífero se encuentra protegido por barreras naturales, pero en el caso hipotético de presentarse una contaminación puntual sería más complejo remediarlo.[6]
- De acuerdo a la experiencia desarrollada en el área de estudio, se considera necesario revisar los valores de conductividad hidráulica, ya que se presumen sobreestimados para el Distrito Capital.[4]
- Esta metodología es muy sensible a los cambios de mediano plazo, con las variaciones en el régimen hídrico o alteraciones sustanciales en el nivel freático, por tanto es relevante que en el instante en el que se cuente con la recarga neta del área de estudio, desarrollar nuevamente la metodología, para determinar la vulnerabilidad.[6]
- La vulnerabilidad general sirve para la planificación regional del recurso hídrico subterráneo, pero si se adiciona al estudio la carga contaminante se obtendría el mapa de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.
- Debido a que los resultados obtenidos en la metodología para las dos temporadas de precipitación, tienen un comportamiento significativamente similar, se puede considerar promediarlos y dejar un solo mapa para la zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en el Distrito Capital.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaria Distrital de Ambiente, especialmente a la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo, en cabeza del Dr. Giovanni José Herrera Carrascal, por suministrar la información necesaria para la elaboración del presente documento.

Se agradece en especial medida al Ingeniero Geólogo, Especialista en Hidrología Subterránea y MSc. En Ciencias Ambientales (manejo y gestión ambiental del recurso hídrico) Jairo Alfredo Veloza Franco, por su dirección e incondicional apoyo, paciencia y compartir sin restricciones sus conocimientos en el campo de la hidrogeología para el desarrollo del proyecto.

Se agradece al Ingeniero Ambiental y Sanitario Álvaro José Gómez Elorza, por su aporte tecnológico, enseñanzas y constante colaboración e interés en la ejecución de este proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Rodríguez N. Cesar O. (2009). El agua subterráneas, un tesoro enterrado. Consultada en diciembre de 2012. En: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/el-agua-subterranea-un-tesoro-enterrado.html>
- [2]. Guarín Rodríguez K. y Cujabán García D. M. (2004). Zonificación del comportamiento de los niveles estático-dinámicos de pozos de agua subterránea extraída dentro del perímetro urbano del Distrito Capital; Bogotá, 157 p. Trabajo de grado (Ingeniería Catastral y Geodesia). Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [3]. Concejo del Distrito Especial de Bogotá; (1990). Acuerdo 9 del 10 de Mayo de 1990, por el cual se crea el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente – DAMA.
- [4]. Secretaria Distrital de Ambiente, Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo; (2012). Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital. Bogotá D.C., SDA - SRHS.
- [5]. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT; (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Bogotá D.C., MAVDT.
- [6]. L. Reinoso, C. Sasal y S. Portela. (2005) Vulnerabilidad del acuífero pampeano a la contaminación en el norte de la provincia de Buenos Aires: aplicación de la metodología DRASTIC. ISSN 1669-2314, número 001, Vol. 34.
- [7]. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental; (2000). Determinación de la Vulnerabilidad de Acuíferos con los métodos AVI, GOD Y DRASTIC; En <http://www.bvsde.paho.org>, Vol. 094, 4 p.
- [8]. Universidad Nacional de Colombia e INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería; (2011). LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, Un enfoque práctico. Colección Guías y Manuales. Bogotá D.C.
- [9]. Emilio Custodio, Ramón Llamas. (1994). Hidrología Subterránea. [ed.] Omega. Vol. II.
- [10]. Banco Mundial; (2007). Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y autoridades ambientales. 2 ed. Washington, D.C.

- [11]. Banco Mundial; (2002). Parte B: Guía Técnica –Propuestas Metodológicas para la Protección del Agua Subterránea; En Serie de notas informativas. 6 p. Washington, D.C.
- [12]. PHI-UNESCO. Programa Hidrológico Internacional (PHI) – UNESCO; (2010). Guía para Educación Básica sobre Protección de Aguas Subterráneas. Consultada en diciembre del 2012. En: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/guiasubterranea/principal/inicio.htm>.
- [13]. Aller, L., y otros; (1985). DRASTIC: A standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Ada. Oklahoma :U.S. Environmental Protection Agency.
- [14]. Corporación Autónoma de Urabá; (2010). Mapa de Vulnerabilidad a los Agroquímicos por el Método DRASTIC. Antioquia. Corpouraba.
- [15]. Lawrence Ng; (1989). A DRASTIC Approach to Controlling Groundwater Pollution. En: The Yale Law Journal Vol. 98, No. 4. pp. 773-791. En: <http://www.jstor.org/stable/796732>
- [16]. Presidencia de la República de Colombia; (1974). Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974, Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C.