

# 40

Fecha de presentación: octubre, 2018

Fecha de aceptación: diciembre, 2018

Fecha de publicación: febrero, 2019

## VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS ANTE LA PERCOLACIÓN DE AGROQUÍMICOS EN EL CANTÓN GRAL. ANTONIO ELIZALDE

### **VULNERABILITY OF AQUIFERS TO THE PERCOLATION OF AGROCHEMICALS IN THE CANTON GRAL. ANTONIO ELIZALDE**

Ángela Cristina Loor Bruno<sup>1</sup>

E-mail: [angela.loorb@ug.edu.ec](mailto:angela.loorb@ug.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1061-5001>

Rodrigo Aníbal Carrión Rodríguez<sup>1</sup>

E-mail: [rcarrion@espol.edu.ec](mailto:rcarrion@espol.edu.ec)

Gianella Victoria Mantilla Campaña<sup>1</sup>

E-mail: [gianella.mantillac@ug.edu.ec](mailto:gianella.mantillac@ug.edu.ec)

<sup>1</sup>Universidad de Guayaquil. Ecuador.

#### Cita sugerida (APA, sexta edición)

Loor Bruno, Á., Carrión Rodríguez, R. A., & Mantilla Campaña, G. V. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el Cantón Gral. Antonio Elizalde. *Universidad y Sociedad*, 11(2), 263-269. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

#### RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar las condiciones morfológicas e intrínsecas del acuífero ubicado en el cantón Gral. Antonio Elizalde (Bucay), provincia del Guayas, Ecuador, para determinar su vulnerabilidad ante los efectos de la percolación de agroquímicos, vertidos en actividades agrícolas del sector, para ello se realizó un estudio cuantitativo de orden transversal, que empleó la metodología DRASTIC, para determinar el índice de vulnerabilidad ante el uso de sustancias persistentes; presentando como resultado, la necesidad de tomar políticas de buenas prácticas agrarias y preservación de este cuerpo de agua subterránea, ante el elevado grado de vulnerabilidad calculado.

**Palabras clave:** Acuíferos, vulnerabilidad, agroquímicos, método DRASTIC.

#### ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the morphological and intrinsic conditions of the aquifer located in Gral. Antonio Elizalde (Bucay) city, province of Guayas, Ecuador, to determine its vulnerability to the effects of the percolation of agrochemicals, discharges into agricultural activities of the sector. Thus a quantitative cross-sectional study was carried out, using the DRASTIC methodology, to determine the index of vulnerability to the use of persistent substances. As a result, the need to adopt policies of good agricultural practices and the preservation of this body of groundwater, given the high degree of vulnerability.

**Keywords:** Aquifers, vulnerability, agrochemicals, DRASTIC method.

## INTRODUCCIÓN

Las principales fuentes de agua potable de muchas regiones del país se encuentran constituidas por las aguas subterráneas es por ello que son un recurso importante siendo necesario su conservación. La química natural del agua subterránea es determinada por la naturaleza del subsuelo y de las rocas que lo atraviesan. Sin embargo, esto no garantiza la pureza de líquido, ya que puede sufrir problemas de contaminación atribuida a las actividades humanas.

En las zonas de gran actividad agrícola y ganadera, como es el caso del cantón Gral. Antonio Elizalde mejor conocido como Bucay se puede generar contaminación por el uso frecuente de sustancias persistentes (fertilizantes y pesticidas) y por la descomposición de residuos orgánicos, lo que puede ocasionar un deterioro de los acuíferos que pueden resultar irreversible o altamente costoso de sanear. Este problema se agrava por la escasa o nula percepción que tiene la población acerca del tema y la despreocupación que existe por la protección de las aguas subterráneas (Reynoso, Sasal, Portela & Andriulo, 2014).

Por lo expuesto la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es un tema actual en la gestión de recursos hídricos, y su evaluación tiene como objetivo la protección del agua subterránea mediante la prevención de la contaminación y el mantenimiento de la calidad del agua subterránea no contaminada. La vulnerabilidad es descrita por Van Stempvoort (1993), como “una propiedad intrínseca que establece su susceptibilidad a ser afectado adversamente por una carga contaminante, independientemente de la presencia del contaminante”, este concepto se basa en el supuesto de que el entorno físico puede proporcionar un cierto grado de protección contra los impactos de los contaminantes, consecuentemente unas áreas son más vulnerables que otras.

Los productos agrícolas con mayores hectáreas de cultivos en Bucay son cacao, maracuyá, caña de azúcar, frutas de ciclo corto como sandías, papayas, entre otras. La actividad agrícola han determinado la necesidad de utilizar herbicidas, pesticidas y abonos, especialmente la úrea, existiendo prácticamente una cultura de utilización de ciertos productos agroquímicos que genera una serie de impactos ambientales, entre los que destacan la pérdida de suelo por erosión, salinización del suelo, por drenaje insuficiente, deterioro del agua de drenaje y retorno de riegos, contaminación por movilización de elementos tóxicos y contaminación puntual y difusa por agroquímicos (Avilés, 2015).

Tabla 1. Resumen de implicaciones ambientales por actividades agrícolas.

Problemas derivados de las actividades agrícolas	Origen	Impacto
Enriquecimiento de nutrientes	Alimentación, uso de suelo, fertilizantes	Presencia de nitratos, acidificación del suelo, eutrofización
Salinidad	Riego y drenaje insuficiente, intrusión marina, infiltración salina	Aumento de sólidos disueltos (cloruro, sulfatos)
Elementos	Riego y drenaje	Presencia de B, Se, As, Mo, Cu
Calidad Sanitaria	Alimentación, residuos, pastos	Microorganismo patógenos
Tóxico	Uso de suelo	
Plaguicidas	Aplicación de cultivos almacenamiento	Contaminación difusa de plaguicidas

Fuente: España. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (2015).

En la investigación actual no ha sido posible determinar en forma cuantitativa el efecto que podrían tener dichos productos en el subsuelo, sin embargo se puede asegurar que existe infiltración en diferentes magnitudes, lo cual depende del espesor de suelos arcillosos, que están cubriendo las capas gravo arenosas existentes en toda esa gran terraza que se incluye en la zona estudiada, también se puede asegurar que la siembra de producto corto es la que más genera procesos contaminantes, sobre todo por la frecuencia con la que los agroquímicos son vertidos sobre la capa de suelos de cultivo.

## DESARROLLO

El continuo aumento de las concentraciones de fertilizantes y pesticidas se atribuye al uso progresivo de las cantidades utilizadas y, sobre todo, al prolongado tiempo de migración, de manera que las concentraciones actuales son sólo el resultado de los fertilizantes utilizados durante años, por otra parte, la recuperación natural de los acuíferos ante la contaminación de agroquímicos dada su naturaleza difusa, es lenta y al igual que la tasa de renovación de las reservas acuíferas. Los fertilizantes son elaborados con compuestos nitrogenados altamente contaminantes, los medios por los cuales las concentraciones de compuestos nitrogenados llegan a los estratos comprendidos por las zonas no saturada y saturada del suelo son diversas, en la figura 1 se representa el ciclo del nitrógeno en los suelos.

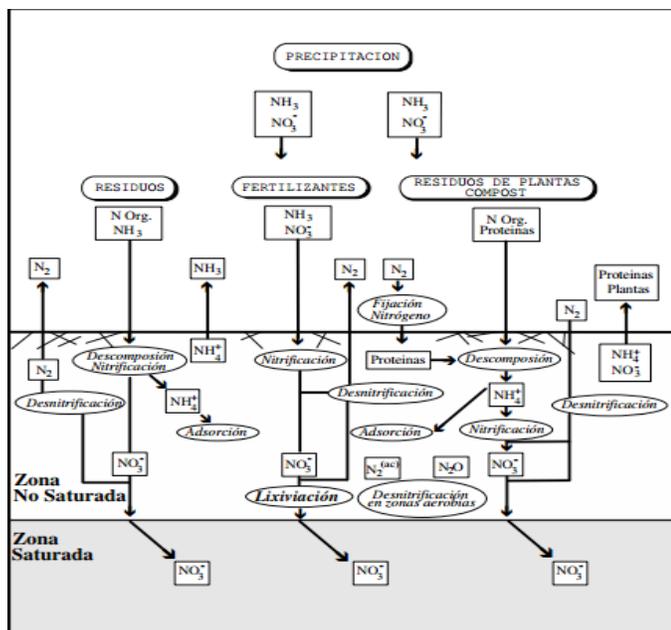


Figura 1. Ciclo del nitrógeno en el suelo.

Fuente: España. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (2015).

Entre las etapas que pueden causar la contaminación de los estratos superficiales y profundos de las zonas no saturada y saturada se identifican las siguientes: Adsorción y fijación del amonio, inmovilización por microorganismos, mineralización, nitrificación y lixiviación, en esta última etapa se da la migración del nitrógeno inorgánico hacia los horizontes más profundos del suelo y hacia el acuífero. Toda vez que los nitratos llegaren alcanzar el acuífero, los factores que influyen en su distribución son: difusión y dispersión, la permeabilidad, el tipo de flujo (dirección, sentido y velocidad), la anisotropía del acuífero y la distribución de las entradas de agua y nitratos.

En cuanto a los Plaguicidas, son definidos por la Organización Mundial para la Alimentación y la Agricultura (FAO), como *“cualquier sustancia o mezcla de ellas utilizada para prevenir o controlar plantas o animales indeseables e incluso aquellas otras destinadas a utilizarse como regulador del crecimiento de la planta, defoliante o desecante”*. (Ongley, 1997)

Las características más importantes que controlan la migración de plaguicidas en aguas y suelos, son su movilidad y persistencia, ya que deben ser suficientemente móviles como para alcanzar sus fines, pueden ser clasificados como: Herbicidas, Fungicidas e Insecticidas y acaricidas. Al igual que el que los compuestos nitrogenados, los plaguicidas sufren procesos de degradación y transformación, total o parcial, lo que conlleva a la formación de nuevos productos, que llegan a ser más móviles,

persistentes y peligrosos que los compuestos de partida (figura 2).

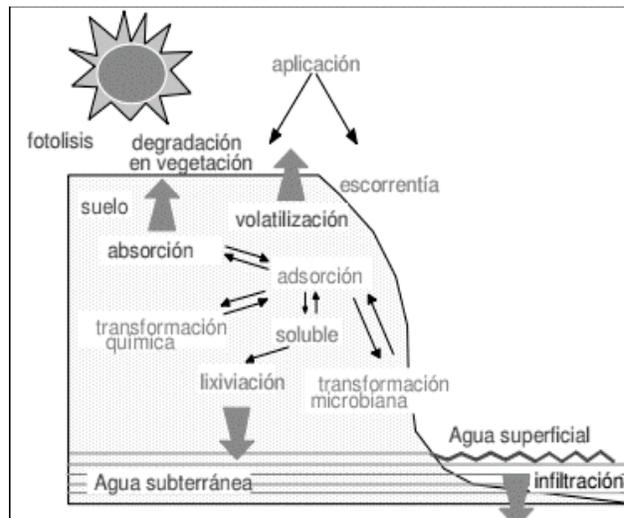


Figura 2. Ciclo de los plaguicidas en el suelo, migración a los acuíferos.

Fuente: España. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (2015).

La propagación de los plaguicidas, al igual que los fertilizantes, una vez ingresado a la zona no saturada, presentan movimiento errático en su viaje a los mantos acuíferos, dependiendo en gran medida de las características de las capas del suelo por el cual viajan. La migración del lixiviado de plaguicidas hacia el acuífero es un fenómeno complejo en el que intervienen numerosos procesos que se da tanto en la capa edáfica, donde ocurre gran actividad biológica, como en la zona no saturada.

Por otro lado, es importante destacar que en el caso de estudio las capas de suelo arcilloso, donde se cultiva, pueden variar entre 30cm y 1m de espesor, los sectores más afectados serán aquellos donde se tiene las capas de suelo más delgadas. Un gran porcentaje de los suelos de Bucay son arcillosos o limo arcilloso, los cuales poseen una permeabilidad baja. Para estimar el grado de infiltración que puede darse incluyendo productos químicos es necesario partir de la permeabilidad vertical de los mencionados suelos cuyos valores son inferiores a  $1.5 \times 10^{-6}$  cm/s, esto implica que para que una partícula líquida se traslade en una distancia de 1 metros (espesor de la capa más gruesa), se requerirá un tiempo aproximado de 2 años, mientras que en espesores de 30 cm el tiempo necesario será de 8 meses.

Braitman (1991), define a los métodos paramétricos como *“aquellos que emplean un grupo de ecuaciones matemáticas asociadas, en el que escenarios alternativos son*

definidos mediante la variación de los valores asumidos en un grupo de coeficientes fijos (parámetros); para identificar la vulnerabilidad de los acuíferos se identificaron los siguientes métodos:

- Métodos de matriz: utilizan parámetros muy seleccionados y sólo tienen aplicabilidad local.
- Métodos de puntuación (RS): cada parámetro está dividido en clases a las que se le atribuye una puntuación, la más destacada de este grupo es la metodología GOD (González, González & Mardones, 2003).
- Métodos de relaciones analógicas: utilizan expresiones matemáticas que relacionan parámetros claves como un indicador del índice de vulnerabilidad como el AVI (Lobo, 2014)
- Métodos de puntuación y ponderación (PCSM): en los que además de asignar una puntuación, cada parámetro es multiplicado por un factor ponderador, en este grupo destaca la metodología DRASTIC.

La presente investigación se desarrolló en las estribaciones de la cordillera occidental de Los Andes, en un área que políticamente pertenece al cantón Gral. Antonio Elizalde, provincia del Guayas. El área de estudio se ubica a pocos kilómetros de la ciudad de Bucay, el terreno forma una planicie con una suave pendiente en dirección al noroeste. Dadas las características geológicas y geotécnicas de los depósitos aluviales que conforman la gran planicie, bajo la cual se albergan los mantos acuíferos caracterizados, la posible infiltración de elementos y compuestos contaminantes es un hecho (Pindo, 2013).

Con el propósito de determinar herramientas que permitan gestionar y ayudar a la toma de decisiones en cuanto al manejo sostenible y sustentable de prácticas agrícolas en esta área, se plantea el estimar cuantitativamente el o los riesgos por la contaminación de sustancias vertidas sobre la superficie, para ello se estableciendo indicar el Índice de Vulnerabilidad del Acuífero empleando el método DRASTIC desarrollado por Aller, Bennett, Lehr, Petty & Hackett (1987).

Este método es usado actualmente tanto para la cualificación como para la cartografía y se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) hasta 10 (máxima vulnerabilidad), los factores que analiza el DRASTIC, comprenden:

- Depth: Profundidad del agua subterránea.
- Recharge: Recarga neta.
- Aquifer: Litología del acuífero.
- Soil: Tipo de suelo.
- Topography: Topografía.

- Impact: Naturaleza de la zona no saturada.
- C hydraulic conductivity: Conductividad hidráulica del acuífero.

Dependiendo del tipo de contaminante que se llegue a hacer referencia el método DRASTIC, valorará en una escala del 1 al 5, la vulnerabilidad ante dicha sustancia, la metodología multiplica y suma los productos de cada parámetro analizado, de acuerdo como lo indica la siguiente expresión:

$$DRASTIC = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Lr \cdot Lw) + (Cr \cdot Cw)$$

En donde:

- r: indica factor de clasificación o valoración.
- w: indica factor de ponderación.

Los valores de cada ítem se obtienen de las tablas adjuntas:

Tabla 2. Valoración de parámetros para el método DRASTIC.

FACTORES DE VALORACIÓN			
VARIABLE D (PROFUNDIDAD, m)	Valor Dr	VARIABLE R (RECARGAS, mm)	Valor Rr
0 – 1,5	10	0 – 50	1
1,5 – 4,6	9	50 – 103	3
4,6 – 9,1	7	103 – 178	6
9,1 – 15,2	5	178 – 254	8
15,2 – 22,9	3	> 254	9
22,9 – 30,5	2		
> 30,5	1		

VARIABLE A (LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO)	VALORACIÓN Ar	VALOR TÍPICO Ar
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glaciar	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8

Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 – 10	10

VARIABLE S (TIPO DE SUELO)	Valor Sr	VARIABLE T (PENDIENTE, %)	Valor Tr
Delgado o ausente	10	0 – 2	10
Grava	10	2 – 6	9
Arena	9	6 – 12	5
Agregado arcilloso o compactado	7	12 – 18	3
Arenisca margosa	6	>18	1
Marga	5		
Limo margoso	4		
Arcilla margosa	3		
Estiércol-cieno	2		
Arcilla no compactada y no agreg.	1		

VARIABLE I (NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA)	VALORACIÓN Ir	VALOR TÍPICO Ir
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significancia	4 – 8	6
Metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Grava y arena	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

VARIABLE C (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA)	Valor Cr	
m/día	cm/s	
0,04 – 4,08	$4,6 \cdot 10^{-5}$ – $4,7 \cdot 10^{-3}$	1
4,08 – 12,22	$4,7 \cdot 10^{-3}$ – $1,4 \cdot 10^{-2}$	2
12,22 – 28,55	$1,4 \cdot 10^{-2}$ – $3,4 \cdot 10^{-2}$	3

28,55 – 40,75	$3,4 \cdot 10^{-5}$ – $4,7 \cdot 10^{-2}$	6
40,75 – 81,49	$4,7 \cdot 10^{-2}$ – $9,5 \cdot 10^{-2}$	8
> 81,49	$> 9,5 \cdot 10^{-2}$	10

Fuente: Aller, et al. (1987).

Tabla 3. Factores de ponderación para el método DRASTIC.

FACTORES DE PONDERACIÓN							
TIPO DE CONTAMINANTE	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Pesticida (DRASTIC-P)	5	4	3	5	3	4	2
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Fuente: Aller, et al. (1987).

Finalmente, al ejecutar la operación de la suma de los 7 parámetros se compara el resultado y dependiendo del valor alcanzado se determina el índice de vulnerabilidad del acuífero (IVA) ante la presencia de pesticidas, así como la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

Tabla 4. Grados de vulnerabilidad método DRASTIC.

GRADOS DE VULNERABILIDAD – D R A S T I C			
VULNERABILIDAD GENERAL		VULNERABILIDAD PESTICIDAS	
GRADO	VULNERABILIDAD	GRADO	VULNERABILIDAD
Muy bajo	23 – 64	Muy bajo	26 – 73
Bajo	65 – 105	Bajo	74 – 120
Moderado	106 – 146	Moderado	121 – 167
Alto	147 – 187	Alto	168 – 214
Muy alto	188 – 230	Muy alto	215 – 260

Fuente: Aller, et al. (1987).

En función de las características de los parámetros físicos que se han sido determinados con ayuda de los resultados de laboratorio, observaciones topográficas, geológicas y geofísicas, se establecieron los diferentes valores que el procedimiento exige; a continuación se detallan:

(D) profundidad: se estimó que el evento más desfavorable ocurriría cuando el nivel de la capa saturada

coincidiera con la capa freática, determinándose una profundidad promedio del 1.5m, con una valoración  $D_r = 10$ .

(R) recarga: de acuerdo a las datos pluviométricos, características geológicas y condiciones de recarga, el estudio hidrogeológico determinó que tendría una recarga superior a los 250mm; por consiguiente se evaluó este parámetro con  $R_r = 9$ .

(A) litología: con ayuda del estudio geotécnico se determinó el tipo de materiales que componen la capa no saturada, inferior a la capa edáfica, identificándose aluviones de arena y grava; por consiguiente se evaluó un  $A_r = 8$ .

(S) tipo de suelo: al igual que la litología se hizo uso del estudio geotécnico, estableciendo que la matriz de suelo estaba constituida por arenisca margosa, valorándose al  $S_r = 6$ .

(T) pendiente: identificando las zonas de recarga del acuífero (puntos más altos), hasta las zonas más bajas, se estableció una pendiente promedio mayor al 2%, con ello un valor  $T_r = 9$ .

(I) composición de la zona no saturada: el aluvión que constituye el acuífero está conformado principalmente por areniscas y gravas, la formación rocosa no es un manto calcáreo, así que es de naturaleza "arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo", por consiguiente se escoge un valor  $I_r = 6$ .

(C) conductividad hidráulica: las evaluaciones del caso, con ayuda de los sondeos eléctricos verticales, y los estudios geotécnicos, ayudaron a identificar la conductancia y transmisividad acuífera, se determinó que la conductividad hidráulica está dentro del rango  $3,4 \times 10^{-5}$  a  $4,7 \times 10^{-2}$  cm/s, estimándose un valor de  $C_r = 6$ .

Tabla 5. Resultados del Índice de Vulnerabilidad pesticidas, método DRASTIC.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD PESTICIDAS								
Factor	D	R	A	S	T	I	C	
w	5	4	3	5	3	4	2	total
r	10	9	8	6	9	6	6	
IVA	50	36	24	30	27	24	12	203

Tabla 6. Resultados del Índice de Vulnerabilidad intrínseca (general), método DRASTIC.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA								
Factor	D	R	A	S	T	I	C	
w	5	4	3	2	1	5	3	total
r	10	9	8	6	9	6	6	
IVA	50	36	24	12	9	30	18	179

Por consiguiente, se puede observar que el índice de vulnerabilidad (IVA), que presenta la planicie aluvial de Bucay frente al futuro o probable uso de agroquímicos, es igual a 203; por lo tanto posee un riesgo Alto, conforme los indica la tabla 4.

En cuanto a la vulnerabilidad que presenta a otro tipo de contaminantes menos persistentes, (contaminación por asentamientos humanos), el índice de vulnerabilidad (IVA), es igual 179, que de acuerdo a la tabla 4, posee un riesgo Alto. Con ello se establece que para las actividades de desarrollo agrícola, la gestión y la toma de decisiones deberán ir sujetas a determinar los medios más favorables, para evitar daños persistentes en el cuerpo acuífero y la degradación de los suelos.

## CONCLUSIONES

Las capas de suelo que cubren el manto Acuífero del cantón Gral. Antonio Elizalde presentan espesores relativamente delgados, exponiendo el cuerpo acuífero ante la emitente percolación de sustancias persistentes, ya que las características intrínsecas de la litología de la zona no saturada están constituida por grava arenosa, cuyos intersticios permiten una excelente transmisividad del agua a través de la zona saturada. Gracias al método DRASTIC se pudo evaluar cuantitativamente los Índice de vulnerabilidad (IVA), que el acuífero posee en condiciones generales ( $IVA = 179$ ) y ante la presencia de pesticidas ( $IVA=203$ ), ambas correspondientes a la escala de valores altos.

Este particular nos muestra, que pese no existir un desarrollo de actividades agrarias u otras capaces de verter sustancias químicas, con propiedades tóxicas o degenerativas del suelo, la facilidad de contaminación o daño que pueda ocasionarse hacia el acuífero son altas, lo que implica que el desarrollo de actividades similares a la extracción o explotación del acuífero como fuente agua, constituye un riesgo eminente para la afectación del agua subterránea almacenada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/. Recuperado de [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=68001](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=68001)
- Avilés, H. (2015). *Proyecto de Mejoramiento en la red de canales de riego y drenaje del Cantón Bucay*. Guayaquil: GAD de la provincia del Guayas.

- Braitman, L. (1991). *Confidence intervals asses both clinical significance and statistical significance*. Oxford: Ann Intern Med.
- España. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas. (2015). *Grupo de Investigación de Recursos Hídricos*. Castellón: Unive I.
- González, L. N., González, A., & Mardones, M. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Revista geológica de Chile*, 30(1), 3-22. Recuperado de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0716-02082003000100001](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02082003000100001)
- Lobo, J. (2014). *More complex distribution models*. Biodiversity Informatics, 4, 37-42. Recuperado de <https://www.jcel-pub.org/index.php/jbi/article/download/40/1550>
- Ongley, E. (1997). *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. Burlington: FAO.
- Pindo, J. (2013). *Perfil Territorial con Enfoque de Gestión de Riesgos del Cantón Gral. Antonio Elizalde - Bucay*. Guayaquil: CADS-ESPOL.
- Reynoso, L., Sasal, C., Portela, S., & Andriulo, A. (2014). Vulnerabilidad del acuífero Pampeano a la contaminación en el norte de la provincia de Buenos Aires, aplicación de la metodología Drastic. *RIA*, 34 (1), 85-99. Recuperado de <https://www.redalyc.org/html/864/86434107/>
- Van Stempvoort, D. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1), 25-37. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4296/cwrj1801025>