



Aplicación del método DRASTIC-LQ para estimar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero costero Manglaralto

Application of the DRASTIC-LQ method to estimate the intrinsic vulnerability of the Manglaralto coastal aquifer

Aplicação do método DRASTIC-LQ para estimar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero costeiro de Manglaralto

Marco Antonio Arévalo-Ulloa^I
maau1978@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0494-9435>

Víctor Manuel Reyes^{II}
vreyes@untumbes.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-8336-0444>

Paúl Carrión-Mero^{III}
pcarrion@espol.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3581-5774>

Carlos Alberto Deza-Navarrete^{IV}
cdezan@untumbes.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-3324-3741>

Correspondencia: vreyes@untumbes.edu.pe

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de septiembre de 2022 * **Aceptado:** 9 de octubre de 2022 * **Publicado:** 16 de noviembre de 2022

- I. Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes, Perú.
- II. Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes, Perú.
- III. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- IV. Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes, Perú.

Resumen

Se determinó la vulnerabilidad del acuífero de Manglaralto a través del método DRASTIC-LQ, a partir del examen de 10 pozos que abastecen de agua a la localidad. Se calcularon índices de vulnerabilidad para la temporada lluviosa y la temporada seca. Se realizó un contraste de hipótesis (test de Wilcoxon; α : 0.05) para determinar las diferencias estacionales de la vulnerabilidad (2019-2021). Los índices de vulnerabilidad variaron de bajos y muy altos. Se observó una variabilidad estacional propia de las oscilaciones de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, propia de la dinámica pluviométrica. El método DRASTIC-LQ permite confirmar la existencia de condiciones de vulnerabilidad y resulta ser más sensible en la estimación en la temporada lluviosa (p -valor ≤ 0.05). El método resulta útil pero debe seguir validándose. Al presentarse una serie de registros tan corta, la aplicación del método puede estar influida por oscilaciones pluviométricas que pueden incrementar el error del mismo.

Palabras Clave: Acuíferos; Vulnerabilidad en acuíferos; Método DRASTIC-LQ.

Abstract

The vulnerability of the Manglaralto aquifer was determined using the DRASTIC-LQ method, based on the examination of 10 wells that supply water to the locality. Vulnerability indices were calculated for the rainy and dry seasons. Hypothesis testing (Wilcoxon test; α : 0.05) was performed to determine seasonal differences in vulnerability (2019-2021). Vulnerability indices ranged from low to very high. A seasonal variability proper to the oscillations of water table levels and runoff over the system, proper to the pluviometric dynamics, was observed. The DRASTIC-LQ method allows confirming the existence of vulnerability conditions and proves to be more sensitive in the estimation in the rainy season (p -value ≤ 0.05). The method is useful but needs to be further validated. Since the series of records is so short, the application of the method can be influenced by pluviometric oscillations that can increase the error of the method.

Key words: Aquifers; Aquifer vulnerability; DRASTIC-LQ method.

Resumo

A vulnerabilidade do aquífero Manglaralto foi determinada usando o método DRASTIC-LQ, com base no exame de 10 poços que fornecem água para a localidade. Os índices de

vulnerabilidade foram calculados para as épocas de chuva e seca. Um teste de hipóteses (teste Wilcoxon; α : 0,05) foi conduzido para determinar as diferenças sazonais de vulnerabilidade (2019-2021). Os índices de vulnerabilidade variavam de baixo a muito alto. A variabilidade sazonal foi observada devido às oscilações do lençol freático e do escoamento sobre o sistema, devido à dinâmica das chuvas. O método DRASTIC-LQ confirma a existência de condições de vulnerabilidade e é mais sensível na estimativa na estação chuvosa (p -valor $\leq 0,05$). O método é útil, mas precisa de mais validação. Com uma série tão curta de registros, a aplicação do método pode ser influenciada por oscilações pluviométricas que podem aumentar o erro do método.

Palavras-chave: Aquíferos; Vulnerabilidade do aquífero; Método DRASTIC-LQ.

Introducción

Los acuíferos como cuerpos almacenadores de agua han sido objeto de estudios en cuanto a su vulnerabilidad, producto de la presión mundial por la disponibilidad de este recurso (Aller et al., 1987; Carrión-Mero et al., 2018; 2021). La vulnerabilidad se concibe como una propiedad intrínseca de carácter multicriterio que muestra la sensibilidad del cuerpo de agua a ser influido negativamente por un elemento interno o externo (Foster, 1987; 2002). Su determinación es relativa puesto que parte de una apreciación aún en examen de un conjunto de parámetros.

Se ha distinguido en la literatura una categorización de la vulnerabilidad. Se denomina intrínseca cuando se limita al estudio y valoración de los parámetros hidrogeológicos de la zona del acuífero (Aller et al., 1987), y es específica si en la evaluación se incorpora la valoración de factores externos propios de la pluviometría local o si se analiza la influencia de elementos químicos que pueden comportarse como contaminantes (Hoekstra, 2016; Nasri et al., 2021). El estudio de los acuíferos tiene relevancia mundial (Hansen & Thorling, 2018), abordándose estudios sobre el componente intrínseco (Asfaw & Mengistu, 2020; Giambastiani et al. 2021), y el específico (Naturstyrelsen, 2014; Voutchkova, 2021).

Existe un inventario amplio de métodos para evaluarla, sin embargo, el método DRASTIC (Aller et al., 1987), es el que cuenta con mayor aplicación (Martínez et al., 1998; Carrión Mero et al., 2021). Aller et al. (1987) plantearon el método DRASTIC para clasificar y ponderar parámetros o atributos intrínsecos, que reflejaran las condiciones del medio, considerando como parámetros: “D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad)”

Martínez et al. (1998, p. 415).

A pesar de su aceptación mundial, el método ha sido ampliado por otros autores, presentándose modificaciones donde se integran al modelo DRASTIC aplicaciones basadas en Sistemas de Información Geográfica (Bera et al. 2021), incorporación de parámetros como los nitratos (Voutchkova, 2021) y la suma de evaluaciones de analizaron la vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos (Loor et al. 2019).

DRASTIC-LQ es una propuesta de Carrión Mero et al. (2021) que aún está en fase de evaluación. El aporte al método convencional de DRASTIC, consiste en el incremento de dos parámetros adicionales, los cuales pueden estar presentes en distintos sistemas acuíferos, y se deberían tomar en cuenta en estudios relacionados con la vulnerabilidad. Estos son: la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), obteniendo el método DRASTIC-LQ.

Para la correcta aplicación de la metodología, se asigna un peso (w) y rangos (r), para los nuevos parámetros. La recarga lateral, o también conocida como *recarga de borde*, representa una parte significativa en el aporte del agua subterránea, que se origina mediante la escorrentía en las precipitaciones, especialmente en los meses de lluvia. Tomando en cuenta que el método convencional ya considera una recarga, al sumar este nuevo parámetro se le ha asignará un peso (w), para indicar que se ha considerado esta fuente. Los rangos para el parámetro $L(r)$, dependerán de la temporada que se está analizando. Se considerará que, independientemente del año, si el análisis es en temporada de lluvia (si hay escorrentía), y si es en temporada seca (no existe escorrentía superficial) (Carrión Mero et al., 2021).

El dique es considerado debido a su importante aplicación en la recarga superficial del acuífero, el cual puede influir en su contaminación, ya que se encarga de almacenar el agua y mantener su permanencia durante más tiempo, que a su vez es un beneficio, ya que logra acaparar el agua en temporada seca. Para la asignación de los rangos $Q(r)$, se establecerá una relación entre el nivel de agua en temporada de lluvia y el nivel en temporada seca de un mismo año. Para ello, se restan estos dos niveles, y esa diferencia, indicará la aportación del dique en la recarga superficial.

Es importante señalar, que varias capas que se van a mantener constantes para el cálculo de la vulnerabilidad en cualquier año o temporada (húmeda o seca), debido a que dependen de las características de la zona de estudio, lo cual no va a variar. Estas capas serán denominadas como “generales”, las cuales son: Naturaleza del acuífero, tipo de suelo, pendiente, naturaleza de la

zona vadosa, y conductividad hidráulica. Por otro lado, se toman en cuenta otro tipo de capas, las cuales dependen de las condiciones pluviométricas de cada año, ue son: la recarga y el dique. También se consideran capas según la temporada específica en cada año, la cual está representada por el nivel del agua y recarga lateral.

Este artículo se centra en la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de las aguas del acuífero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ. Este acuífero localizado en la costa de la parroquia de Santa Elena, en Ecuador, donde el servicio público de agua potable depende de 14 pozos perforados del sector (Gricelda et al., 2018).

Metodología

El estudio es de tipo técnico cuantitativo en el área de la ingeniería sanitaria y ambiental (García, 2009). Se seleccionaron 10 pozos activos distribuidos en la zona del acuífero costero de Manglaralto. Se realizó un muestreo estacional donde se contrastan los dos periodos pluviométricos ecuatorianos. Para la temporada de lluvia, se tuvo como mes de referencia a febrero. Para la temporada seca se consideró al mes de julio. El muestreo consideró mediciones con repetición (3) de la vulnerabilidad entre 2019 y 2021.

Se contempló la metodología DRASTIC-LQ de Carrión Mero et al. (2021), que parte del modelo de base DRASTIC de Aller et al. (1987) (ver tabla 1). La Ecuación 1 resume el modelo DRASTIC (modificado de Aller et al., 1987).

$$\begin{aligned} \mathbf{DRASTIC} = & (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) \\ & + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w) \end{aligned} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

r: representa un valor dentro de un rango determinado de cada parámetro.

w: representa un valor que es considerado el peso del parámetro y no varía.

D: Nivel al que se encuentra el agua subterránea (w: 5).

R: Recarga neta del acuífero (w: 4).

A: Litología del acuífero (w: 3).

S: Tipo de suelo (w: 2).

T: Pendiente de la zona de estudio (w: 1).

I: Naturaleza de la zona no saturada, o zona vadosa (w: 5).

C: Conductividad hidráulica presente en todo el acuífero (w: 3)

Una vez incorporados los parámetros L y Q, la estimación del grado de vulnerabilidad se realizó mediante la categorización presente en la tabla 1.

Figura 1: Índices, rangos y grado de vulnerabilidad del modelo DRASTIC.

| Índice | Grado de vulnerabilidad | Color |
|-----------|-------------------------|--------------|
| < 79 | Despreciable | Violeta |
| 88 - 99 | Extremadamente baja | Azul oscuro |
| 100 - 119 | Baja | Azul claro |
| 120 - 139 | Media | Verde oscuro |
| 140 - 159 | Alta | Verde claro |
| 160 - 179 | Muy alta | Amarillo |
| 180 - 199 | Extremadamente alta | Anaranjado |
| > 200 | Supremamente alta | Rojo |

Fuente: modificado de Aller et al. (1987).

Fase de recopilación de datos

Se realizó un muestro estacional por repetición entre el año 2019 hasta el 2021, considerando los meses de referencia para los meses de febrero y julio. La base de datos obtenida estuvo constituida por:

- Niveles piezométricos de los pozos (3 muestreos por pozo).
- La recarga del acuífero se calculó con el programa “*Easy Balance*”, considerándose las precipitaciones reportadas por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NOAA).
- La conductividad hidráulica se determinó con el método electrométrico (Carrión-Mero et al., 2021).
- La clasificación del tipo de suelo se estableció con base en la fracción textural.
- Mediante imágenes satelitales que se procesaron con el paquete ArcGis 10.5, se realizó la valoración de la topografía y la pendiente del sector.
- La geología se valoró a partir de cartografía geológica y muestreo *in situ*.

Fase de contraste de hipótesis: Con el apoyo del paquete del software SPSS.V.24 se compararon (test de rangos con signo de Wilcoxon) los índices de vulnerabilidad (IV) estacional [(temporada húmeda: febrero) / temporada seca: julio]. La hipótesis nula (H_0) fue: Los IV-DRASTIC-LQ *estacional* no se diferencian significativamente; Hipótesis alternativa (H_1): Los IV-DRASTIC-LQ *estacional* si se diferencian significativamente ($\alpha \leq 0.05$ se rechaza H_0).

Resultados

Resumen para el año 2019: temporadas lluviosa y seca

Se determinó un Índice promedio de vulnerabilidad DRASTIC-LQ para la temporada lluviosa IV-DRASTIC-LQ: *vulnerabilidad media* (125.2 ± 6.2 ; Mín: 117 – Máx: 135). En la temporada seca (julio) se registró un IV-DRASTIC-LQ propio de *vulnerabilidad muy alta* (160.5 ± 14.2 ; Mín: 137 – Máx: 185) (ver tabla 2). El Test de Wilcoxon muestra diferencias significativas entre los dos índices (Wilcoxon: 5.326; p-valor: $0.000 \leq 0.05$; se rechaza la H_0). Esto indica que la magnitud de las diferencias resulta influida por los mayores promedios obtenidos con el IV-DRASTIC-LQ de la temporada seca (ver tabla 2).

Figura 2: Índices de vulnerabilidad DRASTIC-LQ para el año 2019

| | Media | DS | Mínimo | Máximo | Grado de vulnerabilidad | de Wilcoxon ¹ Z | p-valor |
|--|-------|------|--------|--------|-------------------------|-------------------------------|---------|
| Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - febrero 2019 | 125.2 | 6.2 | 117 | 135 | Media | 5.32 | 0.000** |
| Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - julio 2019 | 160.5 | 14.2 | 139 | 187 | Muy alta | 6 | |

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05; **p-valor significativo al 0.01.

Resumen para el año 2020: temporadas lluviosa y seca

Se determinó un promedio de vulnerabilidad IV-DRASTIC-LQ para la temporada lluviosa que se ajusta a una *vulnerabilidad media* (124.4 ± 4.5 ; Mín: 115 – Máx: 133). Para el mes de julio se calculó un IV-DRASTIC-LQ ajustado también a una *vulnerabilidad media* (121.4 ± 4.2 ; Mín:

114 – Máx: 126) (ver tabla 3). El Test de Wilcoxon muestra diferencias significativas entre los dos índices (Wilcoxon: 2.235; p-valor: $0.041 \leq 0.05$; se rechaza la H_0). Esto indica que las diferencias resultaron influidas por los mayores promedios obtenidos con el IV-DRASTIC-LQ de la temporada lluviosa, situación que contrasta con el año anterior (ver tabla 3).

Figura 3: Índices de vulnerabilidad DRASTIC-LQ para el año 2020

| | Media | DS | Mínimo | Máximo | Grado de vulnerabilidad | de Wilcoxon ¹ Z | p-valor |
|--|-------|-----|--------|--------|-------------------------|-------------------------------|---------|
| Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - febrero 2020 | 124.4 | 4.5 | 115 | 133 | Media | 2.23 | 0.041* |
| Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - julio 2020 | 121.4 | 4.2 | 114 | 126 | Media | 5 | |

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05.

Resumen para el año 2021: temporadas lluviosa y seca

La vulnerabilidad IV-DRASTIC-LQ para la temporada lluviosa fue *vulnerabilidad alta* (147.0 ± 6.6 ; Mín: 139 – Máx: 157). Para el mes de julio (temporada seca) se calculó un IV-DRASTIC-LQ que tipifica una *vulnerabilidad alta* (145.1 ± 5.7 ; Mín: 138 – Máx: 154) (ver tabla 4). Se apreciaron también diferencias significativas entre los dos índices estacionales (Wilcoxon: 2.048; p-valor: $0.049 \leq 0.05$; se rechaza la H_0), resultando esto influido por el mayor promedio general de la temporada lluviosa, situación similar al año 2020 (ver tabla 4).

Figura 4: Índices de vulnerabilidad DRASTIC-LQ para el año 2021

| | Media | DS | Mínimo | Máximo | Grado de vulnerabilidad | de Wilcoxon ¹ Z | p-valor |
|--|-------|-----|--------|--------|-------------------------|-------------------------------|---------|
| Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - febrero 2021 | 147.0 | 6.6 | 139 | 157 | Alta | 2.04 | 0.049* |
| Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - julio | 145.1 | 5.7 | 138 | 154 | Alta | 8 | |

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05.

Discusión

El método DRASTIC-LQ propuesto de Carrión Mero et al. (2021), se fundamenta en los parámetros del método DRASTIC, al cual se le suman dos parámetros adicionales, los cuales pueden estar presentes en distintos sistemas acuíferos, y que son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), obteniendo el método DRASTIC-LQ.

Los resultados de este trabajo corroboran que el método DRASTIC propuesto por Aller et al. (1987), utilizado de base, sirve de fundamento para experimentar con nuevas aproximaciones de evaluación a la vulnerabilidad. La adición de la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), pueden ser factores diferenciadores con respecto a la estimación realizada con el método DRASTIC, tanto en las temporadas lluviosa como seca.

En tal sentido, el método DRASTIC-LQ confirma la existencia de condiciones de vulnerabilidad y resulta ser más sensible en la estimación en la temporada lluviosa. La vulnerabilidad según el método DRASTIC-LQ resultó en general media, pero se registró un intervalo desde vulnerabilidad media hasta vulnerabilidad muy alta (IV-DRASTIC - JULIO 2019), la cual responde también al componente estacional, pero que deja claramente establecido la influencia de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona, y en especial con los factores añadidos al modelo como son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q).

Los resultados coinciden con lo expresado por Carrión Mero et al. (2021), y contribuye a la validación del método, el cual aún se encuentra en fase de experimentación y validación. Sin embargo, estos resultados *a priori* confirman la idea de que la recarga lateral (recarga de borde), es un factor significativo en el aporte del agua subterránea, originado mediante la escorrentía producto de las precipitaciones, propias de la temporada lluviosa. Por su parte el dique es considerado debido a su importante aplicación en la recarga superficial del acuífero, el cual puede incidir en la contaminación. Carrión Mero et al. (2021), establecieron que el modelo dependerá de las condiciones climatológicas de cada año, destacando el peso de la recarga y el dique.

Se logra apreciar así que es posible ampliar los estudios y determinaciones de la vulnerabilidad de acuíferos partiendo de métodos ampliamente validados como DRASTIC, pero que ha sido potenciado en este caso por las modificaciones aplicadas por Carrión Mero et al. (2021), existiendo otras posibilidades adicionales como la propuesta por Voutchkova et al. (2021), denominada DRASTIC-N.

Conclusiones

El método DRASTIC-LQ permite estimar la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto. Esta resultó en líneas generales una *vulnerabilidad media*, pero se registró un intervalo desde *vulnerabilidad media* (IV-DRASTIC-LQ - febrero 2019; IV-DRASTIC - 2020) hasta *alta* (IV-DRASTIC-LQ 2021). La variabilidad responde al componente estacional, y deja claramente establecido la influencia en la temporada lluviosa de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona, y en especial con los factores añadidos al modelo como son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q).

El método DRASTIC-LQ permite confirmar la existencia de condiciones de vulnerabilidad y resulta ser más sensible en la estimación en la temporada lluviosa. Sin embargo, al presentarse una serie de registros tan corta, la aplicación del método puede estar influida por oscilaciones pluviométricas que pueden incrementar el error del mismo, por tanto la extensión de la serie es una limitante para establecer conclusiones definitivas sobre el mismo. En tal sentido, surge la necesidad de continuar con el monitoreo sistemático de la vulnerabilidad avanzando hacia muestreos mensuales. Adicionalmente conviene avanzar en estudios de vulnerabilidad específica donde se incorporen variables como la salinidad.

Referencias

1. Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H. & Petty, R. J. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US Environ. Protection Agency EPA/600/2-85-018.
2. Asfaw, D., & Mengistu, D. (2020). Modeling megech watershed aquifer vulnerability to pollution using modified DRASTIC model for sustainable groundwater management, Northwestern Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100375.

3. Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. *Water*, 12(5), 1356.
4. Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., Chowdhury, P., Ghosh, A., & Biswas, S. (2021). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112085.
5. Carrión, P., Herrera, G., Briones, J., Sánchez, C., & Limón, J. (2018). Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 375–386. <https://doi.org/10.2495/SDP180341>.
6. Carrión-Mero, P., Montalván, F. J., Morante-Carballo, F., Loo-Flores de Valgas, C., Apolo-Masache, B., & Heredia, J. (2021). Flow and Transport Numerical Model of a Coastal Aquifer Based on the Hydraulic Importance of a Dyke and Its Impact on Water Quality: Manglaralto—Ecuador. *Water*, 13(4), 443.
7. Durango-Cordero, J., Saqalli, M., Ferrant, S., Bonilla, S., Maurice, L., Arellano, P. y Elger, A. (2022). Risk assessment of unlined oil pits leaking into groundwater in the Ecuadorian Amazon: A modified GIS-DRASTIC approach. *Applied Geography*, (139), 102628. Doi: 10.1016/j.apgeog.2021.102628
8. Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). Propuestas Metodológicas para la Protección del Agua Subterránea. En *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guías para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales* (págs. 15-34). Banco Mundial.
9. Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research Information n°38, Ed. by W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegenigh, The Hague: 69-86.
10. García, F. (2009). *La investigación tecnológica. Investigar, idear e innovar en ingenierías y ciencias sociales*. México: Editorial Limusa.
11. Giambastiani, B. M. S., Kidanemariam, A., Dagneu, A., & Antonellini, M. (2021). Evolution of salinity and water table level of the phreatic coastal aquifer of the Emilia Romagna region (Italy). *Water (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/w13030372>.

12. Gricelda, H. F., Paúl, C. M., & Niurka, A. M. (2018). Participatory process for local development: Sustainability of water resources in rural communities: Case manglaralto-santa Elena, Ecuador. In *Handbook of Sustainability Science and Research* (pp. 663-676). Springer, Cham.
13. Hansen, B., & Thorling, L. (2018). Kemisk Grundvandskortlægning (Geo-Vejledning No. 2018/2). GEUS, Copenhagen.
14. Hoekstra, A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. (J. Marques, & F. Müller, Edits.) *Ecological Indicators*, 66, 564- 573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>.
15. Loor Bruno, Á. C., Carrión Rodríguez, R. A., & Mantilla Campaña, G. V. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde. *Revista Universidad y Sociedad*, 11(2), 395-401.
16. Martínez, M., Delgado, P., y Fabregat, V. (1998). Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Memorias de las Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia 1998. AIH-GE.
17. Morante, F.; Montalván, F.J.; Carrión, P.; Herrera, G.; Heredia, J.; Elorza, F.J.; Pilco, D.; Solórzano, J. (2019). Hydrochemical and geological correlation to establish the groundwater salinity of the coastal aquifer of the Manglaralto River basin, Ecuador. *WIT Trans. Ecol. Environ.* , 229, 139–149.
18. Nasri, G., Hajji, S., Aydi, W., Boughariou, E., Allouche, N., & Bouri, S. (2021). Water vulnerability of coastal aquifers using AHP and parametric models: methodological overview and a case study assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 1-19.
19. Naturstyrelsen (2014). Nitratsårbarhed Og Afgrænsning Af NFI Og IO (Afgiftsfinansieret Grundvandskortlægning). Naturstyrelsen, København Ø.
20. Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Rasmussen, P., & Hansen, B. (2021). A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *Journal of Environmental Management*, 277, 111330.
21. Worthington, S. R. H., Jeannin, P. Y., Alexander, E. C., Davies, G. J., & Schindel, G. M. (2017). Définitions contrastées pour le terme ‘aquifère karstique.’ *Hydrogeology Journal*, 25(5), 1237–1240. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1628-7>

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).