

Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno del agua superficial en una
unidad hidrográfica del Páramo de Berlín (Santander, Colombia) mediante análisis espacial
multicriterio

Diana Paola Ardila Aragón, Valentina Villán Pacheco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera civil

Directora

Daniela Cristina Rey Romero

M. Sc. Planificación y desarrollo de recursos hídricos

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Con inmensa gratitud y alegría, queremos dedicar este logro tan significativo en nuestras vidas a Dios, a nuestra familia y a nosotras mismas. Este trabajo de grado representa dedicación, esfuerzo y superación personal, y no podríamos haber llegado hasta aquí sin su amor incondicional, apoyo constante y aliento en cada paso del camino.

A nuestros padres Juan Ardila, Marta Aragón, Freddy Villán y Esmeralda Pacheco, y abuela Rosa Mary Camargo.

A nuestros hermanos, Juan José Ardila y Valeria Villán.

A mi amado abuelo Héctor Pacheco, aunque ya no estés físicamente conmigo, siento tu presencia en cada paso que doy. Tu sabiduría, cariño y esencia siempre estarán grabados en mi vida. Quiero honrar tu memoria y dedicar este logro a tu legado inspirador.

Por último, pero no menos importante, nos dedicamos a nosotras mismas. A Valentina y Diana, felicitaciones por este logro sobresaliente. Hemos demostrado que con determinación, dedicación y pasión, podemos alcanzar cualquier meta que nos propongamos. Este trabajo de grado no solo representa nuestro esfuerzo académico, sino también nuestro crecimiento personal, nuestra capacidad de superar obstáculos y nuestra firme determinación de dejar una huella positiva en el mundo.

Sin todos ustedes, nada de esto hubiera sido posible.

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestra profunda gratitud a Dios quien ha sido nuestra guía constante y fortaleza en todo este proceso. Su presencia en nuestras vidas ha sido un faro de esperanza y nos ha dado la fuerza para superar los desafíos y mantenernos firmes en nuestro propósito.

Agradecemos a nuestros padres, Juan Ardila, Marta Aragón, Freddy Villán y Esmeralda Pacheco, y abuelos Rosa Mary Camargo y Héctor Pacheco, de todo corazón por su amor incondicional, sacrificio y apoyo inquebrantable. Han sido nuestros pilares, nuestros mayores impulsores y nuestros modelos a seguir. Su confianza en nosotras nos ha dado la determinación para perseguir nuestros sueños y alcanzar este logro trascendental. Su constante aliento y palabras de aliento han sido nuestro motor en los momentos de duda y dificultad. A nuestros hermanos, Juan José Ardila y Valeria Villán, gracias por su apoyo incondicional ha sido un regalo invaluable en este viaje.

A la profesora Daniela Cristina Rey, directora de este trabajo de grado, por toda su dedicación, paciencia, acompañamiento, y sus sabios y motivadores consejos. Le agradecemos haber confiado y creído en nosotras, y ver nuestro gran potencial. En el largo camino de la realización de este trabajo sus enormes contribuciones y las del profesor Edgar Ricardo Oviedo, permitieron pulir y obtener un gran producto que engloba el esfuerzo, la pasión y la dedicación con la que se realizó. De ustedes aprendimos valiosas enseñanzas tanto personales como académicas, que sin duda perdurarán en nuestras vidas.

Agradecemos también al semillero de investigación de gestión de recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH), de donde nació la iniciativa para este trabajo, recibió apoyo y pudo alcanzar su propósito de ser fuente de información valiosa para contribuir a los dilemas sociales y ambientales de nuestro contexto. Por las bases en la investigación y su gran labor educando a los estudiantes en este campo, somos frutos sobresalientes de su pedagogía.

A las personas que gestionaron su tiempo y nos apoyaron con consultas durante la realización del trabajo de grado: Arley David Celis, Viviana Gómez, Alejandra Hurtado y Ana María Buitrago. Gracias por sus consejos, lecciones y su tiempo, esos espacios nos permitieron superar obstáculos que surgieron en el camino de la forma correcta.

A las personas que amablemente facilitaron datos para la realización del trabajo de grado, e hicieron parte de los expertos que participaron en la primera etapa: Ana María Buitrago, María Victoria Acevedo, Jhonatan Soto, Andrés Echeverri, Octavio Ardila Rueda, John Jairo Márquez, Sebastián Patiño, Sandra Villamizar y Héctor Gutiérrez.

A todas las personas que, aunque no figuran con sus nombres aquí, estuvieron presentes de alguna forma en estos 5 años y medio de carrera e hicieron posible que este trabajo concluya.

A todos, nuestro eterno agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Contaminación difusa por nitrógeno (N)	15
2.2 Vulnerabilidad a la contaminación difusa del agua superficial	17
2.3 Análisis Espacial Multicriterio (AEM).....	18
3. Metodología	21
3.1 Zona de estudio	21
3.2 Selección de parámetros para la evaluación de la vulnerabilidad.....	23
3.3 Adquisición y procesamiento de datos	24
3.4 Aplicación del AHP	25
3.5 Aplicación del AEM	27
3.6 Validación de resultados	28
4. Resultados y discusión	29
4.1 Parámetros seleccionados para la evaluación de la vulnerabilidad	29
4.1.1 Pendiente del terreno.....	30
4.1.2 Distancia desde la fuente hídrica superficial	31
4.1.3 Uso de suelo/cobertura.....	31

4.1.4 Precipitación	32
4.1.5 Textura del suelo.....	32
4.1.6 Tasa de aplicación de fertilizante.....	33
4.2 Magnitud de los parámetros estimados para el área de estudio	33
4.3 Ponderación de los parámetros obtenida del AHP.....	37
4.4 Estimación del IVCDN y zonificación en el SIG.....	39
5. Conclusiones	44
6. Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47
Apéndices.....	54

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Escala fundamental de comparación por pares para evaluar en AHP</i>	26
Tabla 2 <i>Categorías de vulnerabilidad según sus rangos</i>	28
Tabla 3 <i>Parámetros empleados en la formulación del índice a la contaminación difusa por nitrógeno</i>	30
Tabla 4 <i>Precipitación mensual registrada en el área de estudio durante el 2020</i>	34
Tabla 5 <i>Agrupación y recategorización de las coberturas y uso de suelo, y su respectiva textura</i>	35
Tabla 6 <i>Tasa de aplicación de pollinaza utilizada en los cultivos de cebolla de rama y papa en el año 2020</i>	36

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Unidades hidrográficas en estudio</i>	22
Figura 2 <i>Estructura jerárquica del AHP</i>	26
Figura 3 <i>Parámetros para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación difusa del agua superficial extraídos de la literatura</i>	29
Figura 4 <i>Pesos ponderados para los subcriterios</i>	38
Figura 5 <i>Valores del índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por Nitrógeno en a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre, l) diciembre</i>	40
Figura 6 <i>Zonas homogéneas de vulnerabilidad a la contaminación difusa por Nitrógeno en a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre, l) diciembre</i>	41

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Artículos seleccionados para la revisión bibliográfica	54
Apéndice B. Resumen de los parámetros que influyen en la contaminación difusa extraídos de la literatura	63
Apéndice C. Listado de expertos que participaron en la consulta para la asignación de pesos a los parámetros de vulnerabilidad.....	73
Apéndice D. Metodología para el cálculo de los parámetros seleccionados para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno.....	75
Apéndice E. Procedimiento para la generación de los mapas de los parámetros seleccionados para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno.	77
Apéndice F. Datos de concentración de nitrógeno total (NT).	79
Apéndice G. Tabla de categorización y normalización de los parámetros.	80
Apéndice H. Matrices de las respuestas individuales de cada experto para los criterios y subcriterios.....	82
Apéndice I. Resultados del análisis jerárquico de procesos.	85
Apéndice J. Elementos cartográficos empleados en la creación del índice de vulnerabilidades..	87
Apéndice K. Resoluciones de los mapas empleados y generados en el software ArcGIS 10.8. ..	88
Apéndice L. Resultados de las categorías de los parámetros en función de las áreas obtenidas en cada mapa.....	89
Apéndice M. Valores máximos y mínimos del IVCDN para cada mes del año 2020.....	91
Apéndice N. Áreas por categoría de vulnerabilidad para cada mes del año 2020.....	92

Resumen

Título: Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno del agua superficial en una unidad hidrográfica del Páramo de Berlín (Santander, Colombia) mediante análisis espacial multicriterio*

Autor: Diana Paola Ardila Aragón y Valentina Villán Pacheco**

Palabras Clave: Vulnerabilidad, contaminación difusa, agua superficial, análisis espacial multicriterio, análisis jerárquico de procesos.

Descripción:

El Páramo de Berlín es un ecosistema estratégico del montano intertropical para el desarrollo sostenible de Colombia debido a su importancia en la regulación de los recursos hídricos y su biodiversidad. Sin embargo, el crecimiento de la actividad agropecuaria en la zona puede generar contaminación difusa en el agua superficial. Considerando la importancia de la vulnerabilidad a dicha contaminación por nitrógeno (VCDN), se evaluaron los posibles parámetros que inciden en ella en dos unidades hidrográficas (UH) del Páramo de Berlín, con características biofísicas similares y diferentes usos del suelo. El análisis de la vulnerabilidad se abordó mensualmente mediante la aplicación del análisis jerárquico de procesos para estimar un índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno (IVCDN) y la generación de un mapa zonificado del IVCDN con sistemas de información geográfica. Los parámetros de incidencia en la vulnerabilidad identificados y evaluados para ambas UH corresponden a pendiente del terreno, distancia desde la fuente hídrica superficial, tasa de aplicación de fertilizante, uso de suelo, cobertura, precipitación y textura del suelo. Las zonas de vulnerabilidad media representaron el mayor porcentaje de área de las UH, con valores entre el 84.45% y 99.31% de la superficie total atribuida a parámetros como el uso, cobertura y textura del suelo, mientras que en ningún mes se identificaron zonas con vulnerabilidad muy baja. La validación de datos mostró que hay una diferencia significativa en las concentraciones de nitrógeno total entre las épocas seca y lluviosa, donde los resultados de calidad del agua de la época lluviosa reflejaron que esta posee mayor vulnerabilidad. Esto comprueba que el índice propuesto a partir de la metodología de análisis espacial multicriterio fue eficaz para el análisis de la VCDN en agua superficial en las UH del Páramo de Berlín y puede ser aplicado en futuras investigaciones en este campo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Daniela Cristina Rey Romero. M. Sc. Planificación y desarrollo de recursos hídricos. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental.

Abstract

Title: Analysis of surface water vulnerability to diffuse nitrogen pollution in a hydrographic unit of the Paramo de Berlin (Santander, Colombia) using spatial multi-criteria analysis*

Author(s): Diana Paola Ardila Aragón y Valentina Villán Pacheco**

Key Words: Vulnerability, diffuse pollution, surface water, spatial multi-criteria analysis, analytic hierarchy process.

Description:

The Paramo de Berlin is a strategic montane intertropical ecosystem for the sustainable development of Colombia due to its importance in regulating water resources and preserving biodiversity. However, the expansion of agricultural and livestock activities in this area can lead to diffuse contamination in surface water. Considering the significance nitrogen diffuse pollution vulnerability (NDPV), this study assessed the potential parameters influencing it in two hydrographic units (HUs) within the Paramo de Berlin, which shared similar biophysical characteristics but differed in land use. The vulnerability analysis was conducted on a monthly basis, employing the hierarchical process analysis to estimate a nitrogen diffuse pollution vulnerability index (NDPVI) and generate a zoned map of NDPVI using geographic information systems. The identified and evaluated parameters contributing to vulnerability in both HUs encompassed terrain slope, distance from surface water sources, fertilizer application rate, land use, land cover, precipitation, and soil texture. The medium vulnerability zones represented the largest proportion of the HU area, ranging from 84.45% to 99.31% of the total surface; attributed to parameters such as land use, land cover, and soil texture. Conversely, zones with very low vulnerability were not identified in any month. Data validation revealed a significant difference in total nitrogen concentrations between dry and rainy seasons, with water quality results during the rainy season reflecting higher vulnerability. These findings validate the effectiveness of the proposed index derived from the multicriteria spatial analysis methodology for the analysis of NDPV in surface water within the HUs of the Paramo de Berlin and can be applied in future investigations in this field.

* Degree Work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Daniela Cristina Rey Romero. MSc in water resources planning and development. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD. In sanitary and environment engineering.

Introducción

El agua como recurso natural enfrenta adversidades asociadas a la actividad antropogénica como la elevada demanda hídrica y el deterioro de su calidad, lo cual impide garantizar su disponibilidad, gestión sostenible y saneamiento para la sociedad como se propone en el Objetivo 6 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ONU, 2022). En este contexto, la contaminación difusa por nitrógeno (N) posee una alta importancia en la afectación de la calidad del agua superficial debido a las múltiples descargas continuas de actividades antrópicas, principalmente agrícolas (Cuellar & Mosquera, 2021), que desencadenan problemas ambientales como la inestabilidad de los ecosistemas acuáticos, eutrofización, y altas concentraciones de nitratos que limitan su consumo y representan un riesgo para la salud humana (Cárdenas & Sánchez, 2013).

Mediante el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N de las aguas superficiales se pueden obtener indicadores para la gestión del riesgo (Vera & Albarracín, 2017). Para realizar el análisis, recientemente diferentes autores como Echeverri Sánchez et al. (2020), Cuellar & Mosquera (2021), y Zhang & Huang (2021) han venido implementando un método conocido como Análisis Espacial Multicriterio (AEM), que integra el Análisis Multi Objetivo (AMO) de los parámetros de incidencia en la contaminación difusa y datos georreferenciados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), cuyo resultado esperado es un mapa zonificado con valores cuantitativos de los niveles de vulnerabilidad.

Este tipo de enfoque puede utilizarse en ecosistemas estratégicos para contribuir a la gestión integral del recurso hídrico. Entre ellos se encuentran los páramos, los cuales se

caracterizan por ser reguladores hídricos y fuentes de abastecimiento de las poblaciones, por lo que su preservación es una prioridad para el desarrollo sostenible (Llambí et al., 2012). En Colombia, se encuentran alrededor del 50% de los páramos del mundo (ONU, 2022), siendo uno de estos el Páramo de Berlín, ubicado entre los departamentos de Santander y Norte de Santander, el cual ha sido declarado Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables, debido a su alta capacidad de proveer servicios hidrológicos (CDMB & CORPONOR, 2022). A pesar de esta importancia, estudios previos realizados en este páramo han determinado altas concentraciones de N en el agua superficial asociadas a prácticas agrícolas, lo cual podría comprometer la integridad de este ecosistema (Bautista & Barrera, 2022; Gómez & Quintero, 2020).

Por lo tanto, en este proyecto de grado se analizó la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N del agua superficial en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín, empleando AEM. Para ello, los objetivos específicos de este trabajo fueron: i) seleccionar las variables que influyen en la contaminación difusa por N del agua superficial de la unidad hidrográfica y ii) proponer un índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por N (IVCDN) para este contexto. Se espera que los resultados de este proyecto de grado contribuyan a ampliar la información que se tiene para suplir la carencia de mecanismos para la toma de decisiones y la creación de políticas en referencia a la agricultura, el medio ambiente y la gestión de riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) (Rojas et al., 2020).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno del agua superficial en una unidad hidrográfica del Páramo de Berlín mediante análisis espacial multicriterio.

1.2 Objetivos Específicos

Seleccionar las variables que influyen en la contaminación difusa por nitrógeno del agua superficial de la unidad hidrográfica.

Proponer un índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno en la unidad hidrográfica.

2. Marco Teórico

2.1 Contaminación difusa por nitrógeno (N)

La degradación de la calidad del agua debido a la contaminación difusa o de fuentes no puntuales es uno de los impactos ambientales más apremiantes en las áreas agrícolas (Y. Wang et al., 2019). A diferencia de la contaminación por N generada en vertimientos puntuales, la contaminación difusa por N se caracteriza por estar distribuida espacialmente y varía en magnitud con base en interacciones complejas entre el medio ambiente y los sistemas agrícolas. El proceso consiste en la introducción excesiva de algunas formas de N (p. ej. nitratos, nitritos) en los cuerpos hídricos por vías indirectas consecuentes de diversas fuentes no puntuales; lo que genera incertidumbre sobre la descarga en cursos hídricos respecto a flujos máxicos, y variaciones temporales y espaciales de las cargas de contaminación (Abdulkareem et al., 2018). Estas características hacen que su evaluación, monitoreo, tratamiento y control se dificulten. Por lo tanto, existe la necesidad de comprender los principales parámetros que influyen en la contaminación difusa por N y evaluar la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas ante esta para la planificación, el diseño de medidas de control y la toma de decisiones para la protección ambiental sostenible (Jabbar et al., 2019).

Dado que la contaminación difusa por N es transportada por la escorrentía, naturalmente se asocia con la precipitación y con el uso y cobertura del suelo. Sin embargo, se identifican cuatro (4) mecanismos principales de transporte de nutrientes cuyo recorrido va desde suelos agrícolas hacia cuerpos hídricos, estos son: la precipitación directa sobre el cauce; el transporte terrestre sobre la superficie (escorrentía superficial, el flujo terrestre y la erosión); el transporte

subsuperficial a través de zonas no saturadas del suelo; y el flujo subterráneo que descarga en aguas superficiales (Rickert et al., 2016).

Por otro lado, es importante analizar la situación del sitio de estudio, ya que los mecanismos predominantes difieren según las condiciones de la cuenca. Por ejemplo, en un suelo cubierto con vegetación, la escorrentía puede disminuir hasta en un 40% comparada con la de un suelo desnudo (Durán Zuazo et al., 2004). Asimismo, la cobertura del suelo a nivel de su vegetación tiene la propiedad de actuar como una barrera con la capacidad de interceptar las precipitaciones, modificando su efecto bajo el área de cobertura y a su vez la concentración de nutrientes en el agua (Flores-López et al., 2011). Por esta razón, no se pueden hacer generalizaciones sobre cuáles son los mecanismos clave en un contexto particular.

La importancia del control y mitigación de la contaminación difusa por N radica en que la presencia de altas concentraciones de este nutriente en el agua superficial hace que se vea restringido su posterior uso. Además, favorecen la proliferación excesiva de algas y plantas acuáticas, proceso denominado eutrofización que resulta en llamadas zonas muertas (cuerpos de agua con poco oxígeno durante la noche) (Gómez & Quintero, 2020).

Para reducir la contaminación difusa por N es importante conocer las contribuciones de las principales fuentes y su aporte a la carga total de contaminante. Para abordar esta complejidad es fundamental realizar un control riguroso de las áreas críticas, las cuales pueden identificarse mediante un análisis de vulnerabilidad a la contaminación difusa (Phetprayoon & Sarapirome, 2012).

2.2 Vulnerabilidad a la contaminación difusa del agua superficial

La vulnerabilidad se puede describir como el nivel en que un sistema o sus componentes pueden llegar a ser deteriorados debido a la exposición a un riesgo potencial (Jabbar et al., 2019a), entendiendo riesgo como la posibilidad de que un fenómeno externo o interno ocasione pérdidas catastróficas en un ecosistema (Jabbar et al., 2019), entendiendo riesgo como la posibilidad de que un fenómeno externo o interno ocasione pérdidas catastróficas en un ecosistema (Vera & Albarracín, 2017). La vulnerabilidad de las fuentes hídricas y la degradación de su calidad por fuentes de contaminación se ha convertido en un problema crítico a nivel global y un foco de estudio por diferentes investigadores (Arriagada et al., 2019). Por ejemplo, la contaminación difusa de las aguas superficiales por N de origen agrícola actualmente es una de las consecuencias más importantes derivadas de la vulnerabilidad de una cuenca, presentándose inconvenientes con la disponibilidad del recurso hídrico (Ariza, 2022).

Existen diferentes variables que inciden en la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N del agua superficial de una cuenca, las cuales pueden afectar positiva o negativamente la calidad del recurso hídrico. Estos parámetros pueden agruparse en diversos factores, tales como: i) topografía de la cuenca, definida como el conjunto de características que describen el relieve de un terreno; ii) características del suelo, en las cuales se precisan las propiedades inherentes al terreno para diferentes usos; iii) actividades socioeconómicas, las cuales reúnen las actividades comerciales y productivas que se realizan en una sociedad para mantener una buena calidad de vida; iv) actividades agropecuarias, las cuales son actividades económicas del sector primario que se ocupan de la producción de cultivo, y/o cría de ganado para el consumo humano; v) calidad del agua, la cual describe las características físicas, químicas y biológicas del recurso hídrico en su

estado natural o alterado; vi) ocurrencia de eventos naturales extremos; definido por aquellos fenómenos atmosféricos que afectan al ecosistema sin la intervención humana y que pueden causar daños irreparables; vii) hidrología de la cuenca, en la cual se estudia la distribución, circulación y propiedades del agua ligado a su relación con la atmósfera y el suelo; y viii) la morfología de la cuenca, definida como el conjunto de características que describen la forma, el relieve y la red hídrica de una cuenca hidrográfica (Alilou et al., 2019; Chang et al., 2008; Fernandes et al., 2021; Gardiol et al., 2021; Jabbar & Grote, 2019; Maleki et al., 2020).

Para calcular la vulnerabilidad a la contaminación en diferentes contextos hídricos se conocen cuatro (4) grupos de modelos que reúnen diferentes metodologías: de simulación, estadísticos, de ambientes hidrogeológicos, y de superposición e índices (Vargas, 2010). Entre estos, el modelo de superposición e índices se destaca para el contexto del agua superficial ya que puede ser adaptado a las necesidades del estudio y a las características propias de la cuenca, lo que le da un carácter flexible para los diferentes posibles entornos de estudio del agua superficial. Por último, para definir la metodología a trabajar se debe tener en cuenta la información que se posea, de las características de la cuenca hidrográfica y el número de parámetros que se definan (Vargas, 2010).

2.3 Análisis Espacial Multicriterio (AEM)

Debido a la alta variabilidad espacial de características biofísicas en una cuenca hidrográfica, el método de AEM resulta ventajoso para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N del agua superficial. El AEM consiste en la integración de dos procesos fundamentales: i) la estimación del índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa

por N (IVCDN) del agua superficial por medio de un análisis multicriterio que permite dar un peso a cada parámetro de incidencia en la contaminación y ii) el empleo de SIG para calcular el índice y determinar las zonas de fuente crítica en un mapa de la cuenca.

El enfoque metodológico del AEM parte de: i) una búsqueda y selección de parámetros, ii) la normalización para homogeneizar los datos cuando se tienen variables cuantitativas y cualitativas, iii) ponderación de estas por medio de métodos de Análisis Multicriterio (AM), iv) integración en un SIG con datos espaciales, v) estimación de un IVCDN y, por último, vi) obtención de un mapa zonificado por niveles de vulnerabilidad.

Entre las ventajas del AEM se incluye que puede ser empleado en casos de escasez de información, posee flexibilidad para proponer índices nuevos con parámetros adaptados a las necesidades del contexto de estudio a diferencia de otras herramientas de modelación como SWAT, GOD o DRASTIC (Echeverri Sánchez et al., 2020) cuyos parámetros son predeterminados. Estos otros enfoques, según la literatura, presentan una baja tasa de uso para análisis de vulnerabilidad en el agua superficial, predominando estudios con ellos en aguas subterráneas o una combinación de ambas (Campoverde-Muñoz et al., 2022; Chen & Lu, 2014; Cuellar & Mosquera, 2021). Por ende, las técnicas que integran el AEM permiten simplificar la lectura de información territorial generando bases de datos respecto a los atributos que componen el espacio geográfico en especial para el agua superficial (De Groot et al., 2002).

A partir de esto, se revisaron diferentes estudios relacionados con la aplicación del AEM o metodologías similares. Por ejemplo, Zhang y Huang (2011), en la cuenca del río Huai en China, aplicaron AEM para evaluar el potencial de pérdida de N a nivel de cuenca para el control de la contaminación difusa en el agua superficial. Phetprayoon & Sarapirome (2012) determinaron el

índice potencial de contaminación difusa para ubicar las áreas de fuente crítica en la cuenca del Alto Lam Phra Phloeng, en Tailandia, usando AEM. Siqueira et al. (2017) contribuyeron con un nuevo modelo de vulnerabilidad de la cuenca a la contaminación por derrames en las carreteras basados únicamente en parámetros biofísicos aplicando el AEM en el Área de Protección Ambiental de la cuenca del río Uberaba, en Brasil. Arriagada et al. (2019) desarrollaron un método espacial validado para determinar la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas en medio de múltiples estresores antropogénicos y perturbaciones naturales en la cuenca del río Andalién, Chile. Jabbar et al. (2019) evaluaron la vulnerabilidad de cuencas hidrográficas por contaminación difusa y caracterizaron el riesgo potencial aplicando AEM en la cuenca de Eagle Creek, Indiana, EEUU. Wu et al. (2019) evaluaron la contaminación difusa por fósforo en el agua superficial de la cuenca del río Huai, China usando AEM. Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco (2020) calcularon un Índice Modificado de Contaminación No Puntual (MPNPI) que describió el impacto de la contaminación difusa en Pico de Tancítaro Michoacán, México mediante el AEM y un análisis cartográfico. Echeverri Sánchez et al. (2020) desarrollaron un índice que fue aplicado por Cuellar & Mosquera (2021) basados en la metodología de AEM para valorar las categorías de vulnerabilidad a la que están expuestos los cuerpos hídricos superficiales por la contaminación difusa de origen agrícola de la cuenca del Río Cerrito y en la subzona hidrográfica Guachal en Colombia, respectivamente, siendo AHP el método de análisis multicriterio (Saaty, 2004). De lo anterior se resalta que este tipo de metodología no ha sido planteada en ecosistemas de páramos, por lo tanto, se presenta un vacío en el conocimiento que fue abordado en este estudio.

3. Metodología

3.1 Zona de estudio

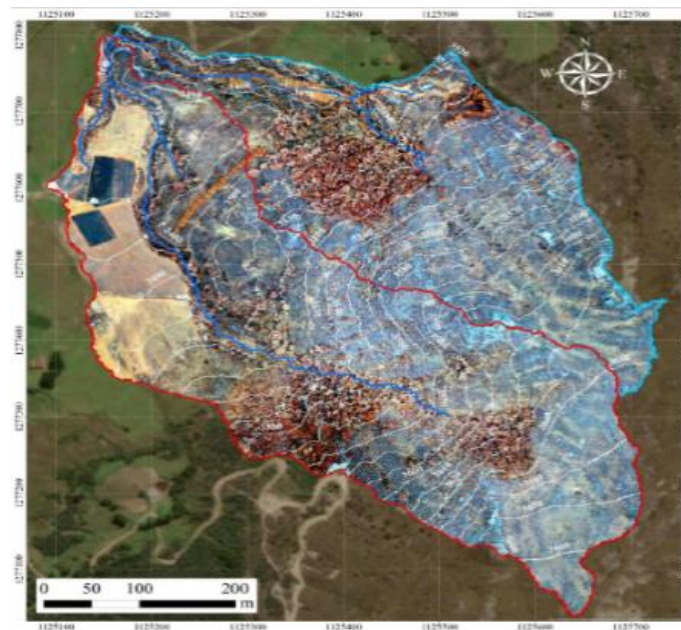
El sitio de estudio se encuentra localizado en el Páramo de Berlín, en la cordillera oriental de Colombia. Posee una altitud media entre los 3538 y 3550 m.s.n.m, y una composición geológica de rocas metamórficas precámbricas en las formaciones del Neis de Bucaramanga y Silgará; así como también rocas ígneas cuarzos monzonitas en la formación Santa Barbara, entre otras. Presenta una humedad relativa media alrededor del 86% y una temperatura media de 8 °C, con un régimen bimodal de precipitaciones, con valores que varían entre los 700 mm y 2000 mm anuales (Celis, 2022).

Dentro del Páramo de Berlín, el área elegida para analizar en este trabajo de grado ha sido foco de estudio del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en diferentes trabajos de investigación en los que se ha evaluado el análisis de factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica (Afanador & Buitrago, 2021), la influencia de las actividades agropecuarias sobre el contenido de N en el agua superficial (Bautista & Barrera, 2022), y los efectos de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua superficial (Gómez & Quintero, 2020). Esta zona de estudio está compuesta por dos unidades hidrográficas (UH), como se muestra en la Figura 1: una unidad hidrográfica intervenida (UHI) delimitada con color rojo, con un área de aproximadamente 19 ha, perímetro de 3019 m y pendiente media de 24°, la cual presenta en el 9.43% de su área zonas cultivadas con cebolla de rama (*Allium fistulosum*) y papa (*Solanum tuberosum*) (Gómez & Quintero, 2020), así como también actividades de pastoreo

extensivo y extracciones hídricas (Celis, 2022). Por otra parte, el polígono delimitado en color azul corresponde a la unidad hidrográfica no intervenida por actividad antrópica (UHNI), la cual conserva la vegetación natural del páramo como frailejones, pajonales y arbustos y carece de áreas destinadas a la agricultura. La UHNI posee un área aproximada de 11 ha, perímetro de 2347 m y pendiente media de 27°; aunque en ella no existen zonas cultivadas, existe un pastoreo extensivo mínimo (Celis, 2022).

Figura 1

Unidades hidrográficas en estudio



Nota. La unidad hidrográfica intervenida está delimitada en rojo y la unidad hidrográfica no intervenida está delimitada en azul. Tomado de la *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo* (p. 38) por A. Celis, 2022, Universidad Industrial de Santander.

3.2 Selección de parámetros para la evaluación de la vulnerabilidad

Con el fin de identificar los parámetros con mayor relevancia para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N en las unidades hidrográficas de estudio, se realizó una revisión bibliográfica utilizando bases de datos especializadas como Scopus y Science Direct, y estudios del grupo GPH mediante acceso remoto de la biblioteca UIS. La información buscada estuvo enfocada principalmente en la contaminación difusa por N del agua superficial con orientación a la actividad agrícola, el análisis de los parámetros que inciden en ella y el uso de AEM para evaluación de la vulnerabilidad.

Durante las búsquedas realizadas, se utilizaron diferentes combinaciones de palabras clave que incluían términos como “mcda”, “multicriteria”, “GIS”, “water quality”, “nitrogen” “watershed”, “non-point source”, “agriculture” y “surface water”. Estas búsquedas se limitaron a publicaciones entre los años 2008 al 2022 y documentos de tipo artículo de investigación.

Dentro de los criterios de selección de los artículos se recopilaron aquellos que en su título enunciaran la contaminación difusa por N en una cuenca hidrográfica, además de que en su cuerpo y/o resumen analizaran factores que inciden en el tipo de vulnerabilidad en estudio con enfoque en el agua superficial. Por último, en los artículos previamente elegidos se realizó una revisión más detallada de su contenido, inspeccionando el método y la justificación de selección de dichos parámetros.

Con el fin de contrastar los datos recolectados de cada artículo se organizó una tabla en el software Excel (ver Apéndice A) cuyos encabezados incluyen: autores y año, título del artículo, zona de estudio, tipo de fuente hídrica, objetivo del estudio, parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad y método de análisis. A partir de la anterior recopilación de información, se

obtuvieron los parámetros preliminares con su respectiva definición e intensidad de mención según las referencias encontradas, como se presenta en el Apéndice B, agrupados por factores.

Posteriormente, para la selección de los parámetros a incluir en el IVCDN, para el caso de estudio de este proyecto de grado, se consideraron los siguientes criterios: i) el objetivo de la implementación de dicho parámetro en la literatura, ii) la frecuencia de uso en la literatura, iii) disponibilidad de datos para el contexto de estudio, y iv) la posibilidad de geoespacialización.

3.3 Adquisición y procesamiento de datos

Los datos recolectados por parte del grupo de investigación GPH de la UIS fueron tomados como fuente secundaria para el procesamiento y espacialización de los parámetros. Entre ellos, se destaca el trabajo de grado de maestría de Celis (Celis, 2022), del cual se extrajeron las coberturas, usos de suelo, precipitación mensual, parteaguas de la UHI y UHNI, modelo de elevación digital (DEM) y corrientes hídricas, cada uno con su respectivo insumo cartográfico a excepción de la precipitación. Por otro lado, se obtuvo un segundo mapa de coberturas del trabajo de maestría de Patiño (Patiño, 2021), junto con el cual, basados en la información presente, se conoció la ubicación espacial de las texturas del suelo. Para finalizar, las tasas de aplicación de fertilizante fueron obtenidas de un proyecto de investigación realizado por los grupos de investigación GPH y GIMBA de la UIS (GPH & GIMBA, 2022).

Posteriormente, se utilizó el enfoque metodológico de Echeverri Sánchez et al. (2020) e información de los datos recolectados para clasificar y normalizar los parámetros con el fin de homogeneizarlos y hacerlos comparables. Su cálculo consistió en el cociente de uno (1) (valor

normal máximo) entre el número de categorías definidas en dicho parámetro, y se ordenaron de acuerdo al efecto de contribución a la contaminación difusa (maximización o minimización).

3.4 Aplicación del AHP

El Análisis Jerárquico de Procesos (AHP por sus siglas en inglés) propuesto por Saaty (Saaty, 2004) es una técnica utilizada para tomar decisiones en situaciones complejas donde se asignan pesos a múltiples criterios y subcriterios en función de su importancia relativa. En este estudio participaron 11 profesionales con diferentes grados de conocimiento y experiencia en la temática (ver Apéndice C); entre ellos magísteres, estudiantes de maestría, doctores y funcionarios de diferentes instituciones gubernamentales y de educación superior, quienes fueron consultados de forma remota por medio de un cuestionario en la plataforma de Google Forms.

Siguiendo con la metodología del AHP, se diseñó una estructura jerárquica de tres niveles partiendo del objetivo del problema, seguido de forma descendente por los criterios (i.e. factores) y subcriterios (i.e. parámetros) como se muestra en la Figura 2. La importancia relativa de cada uno de ellos fue evaluada en una escala del uno (1) al nueve (9) por el grupo de expertos con base en la Tabla 1, donde los resultados obtenidos se establecieron en matrices de comparación por pares como se muestra en la siguiente ecuación.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & a_{2n} \\ \cdots & 1/a_{23} & \cdots & \cdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde: A: Matriz de comparación por pares. a_{ij} : Valor de la relación de importancia entre el criterio/subcriterio de la columna i y con el criterio/subcriterio de la fila j .

Figura 2

Estructura jerárquica del AHP

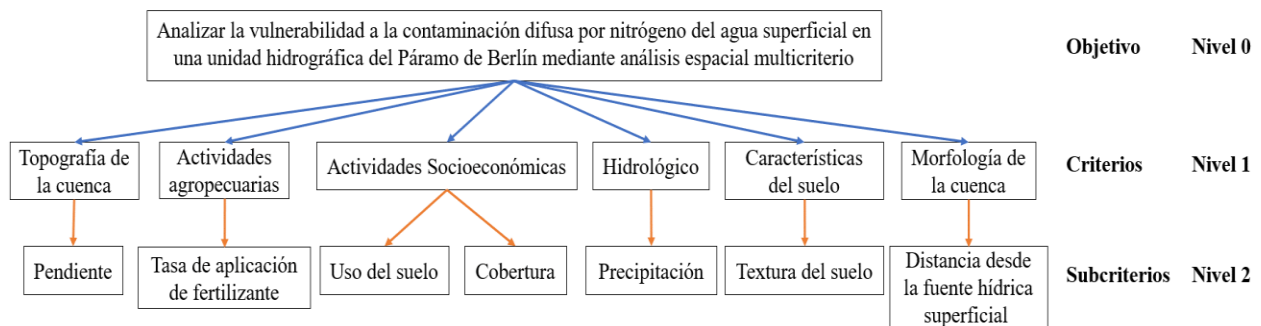


Tabla 1

Escala fundamental de comparación por pares para evaluar en AHP

Escala Verbal	Escala numérica	Explicación
Igual de importante	1	Los dos elementos contribuyen de igual forma al objetivo.
Ligeramente más importante	3	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro.
Más importante	5	Uno de los elementos es fuertemente favorecido.
Mucho más importante	7	Uno de los elementos es fuertemente dominante.
Extremadamente más importante	9	La evidencia que favorece a uno de los elementos es del mayor orden de afirmación.
Valores intermedios	2, 4, 6, 8	Usados para graduación más fina de los juicios.

Nota. Adaptada de *Decision making: the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP)* por T.L. Saaty, 2004, Journal of Systems Science and Systems Engineering.

Seguidamente, se evaluó la consistencia de la matriz individual de comparación pareada como un indicador de la razonabilidad del juicio a los expertos, comparándose el índice de consistencia IC (propio) con un índice aleatorio (IA) que varía de acuerdo al orden de la matriz,

con valores entre los 0.58 y 1.30 (Saaty, 2004). Los resultados obtenidos se deben comparar con un valor admisible según el orden de la matriz, donde si el orden es tres (3) la tasa de consistencia admisible es del 5%, si es de orden cuatro (4) es del 9% y para órdenes iguales o superiores a cinco (5) corresponde al 10%; matrices de orden uno (1) y dos (2) no requieren de este proceso (Saaty, 2004).

Finalmente, con los pesos determinados se estimó la ecuación del índice de vulnerabilidad mediante el análisis de superposición ponderada con base en la ecuación 2.

$$IVCDN = \sum_{j=1}^n W_j x P_j \quad (2)$$

Donde: P: Valor normalizado de cada uno de los parámetros previamente determinado. W: Peso de importancia resultante del método AHP. n: número total de parámetros.

3.5 Aplicación del AEM

En esta sección se empleó como SIG el software ArcMap 10.8, donde se generaron los mapas para los parámetros faltantes siguiendo las rutas de comandos presentadas en el Apéndice D y el procedimiento empleado en su respectivo caso en el Apéndice E.

Para el cálculo de la vulnerabilidad o IVCDN se tomaron como insumos los resultados cartográficos (capas ráster) de los siete parámetros del índice. Posteriormente, por medio de la herramienta “*Raster Calculator*” del software ArcMap 10.8, se realizó la aplicación de la ecuación general del IVCDN (ecuación 2), para la obtención de una capa ráster con los valores del índice por cada mes del año.

Una vez calculado el IVCDN, los resultados fueron categorizados con base en el estudio realizado por Echeverri Sánchez et al. (2020), como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Categorías de vulnerabilidad según sus rangos

Categoría	Rango del IVCDN
Muy baja	0 – 0.2
Baja	0.2 – 0.4
Media	0.4 – 0.6
Alta	0.6 – 0.8
Muy alta	0.8 – 1.0

Nota. Adaptado de la *Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del río cerrito a la contaminación difusa agrícola* por A. F. Echeverri Sánchez, N. Urrutia Cobo, S. M. Barona Ramírez, 2020, Revista de Investigación Agraria y Ambiental.

3.6 Validación de resultados

La validación de los mapas categorizados generados en el software ArcMap 10.8 consistió en una comparación cualitativa con los datos de concentración de N de la misma zona recolectados por Rey-Romero et al. (2022) (ver Apéndice F). En el referido estudio, según el periodo de tiempo (época seca y época lluviosa), se observaron los sitios de mayor concentración y su coincidencia con los de mayor vulnerabilidad en dichos meses, pasando luego a un análisis de lo observado.

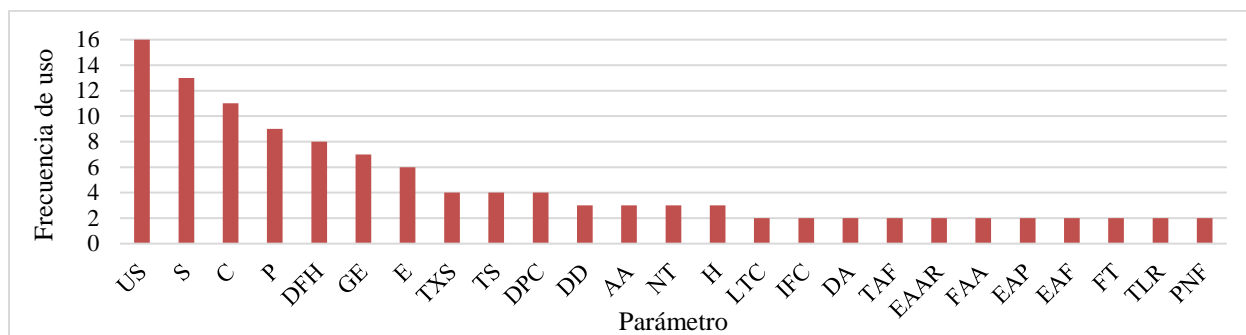
4. Resultados y discusión

4.1 Parámetros seleccionados para la evaluación de la vulnerabilidad

A partir de los criterios empleados para la revisión de literatura, se seleccionaron 19 artículos (ver Apéndice A). Para cada artículo se identificaron los parámetros utilizados para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación difusa (ver Apéndice B) y se agruparon en los factores descritos en la sección 2.2. En la Figura 3 se observa la frecuencia de uso de aquellos parámetros que fueron reportados en más de un artículo seleccionado.

Figura 3

Parámetros para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación difusa del agua superficial extraídos de la literatura



Nota. US: uso del suelo; S: pendiente del terreno; C: cobertura; P: precipitación; DFH: distancia desde la fuente hídrica superficial; GE: grado de erosión; E: escorrentía superficial; TXS: textura del suelo; TS: tipo de suelo; DPC: densidad poblacional de la cuenca; DD: densidad de drenaje; AA: área aferente; NT: concentración de nitrógeno total; H: elevación; LTC: longitud total de la corriente; IFC: Índice de la forma de la cuenca; DA: descarga de agua residual; TAF: tasa de aplicación de fertilizante; EAAR: eficiencia de la aplicación del agua de riego; FAA:

fraccionamiento de aplicación de agroquímicos; EAP: eficiencia de aplicación del plaguicida; EAF: eficiencia de aplicación del fertilizante; FT: concentración de Fósforo total; TLR: tipo de lecho rocoso; PNF: profundidad hasta el nivel freático..

Con base en la revisión de literatura y después del proceso de descarte, se consideraron como parámetros explicativos de la incidencia en la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N del agua superficial los presentados en la Tabla 3. A continuación, se presenta una descripción de cada parámetro.

Tabla 3

Parámetros empleados en la formulación del índice a la contaminación difusa por nitrógeno

Factor	Parámetro
Topografía de la cuenca	Pendiente del terreno
Actividades agropecuarias	Tasa de aplicación de fertilizante
Características socioeconómicas	Uso del suelo
	Cobertura
Hidrológico	Precipitación
Características del suelo	Textura del suelo
Morfología de la cuenca	Distancia desde la fuente hídrica superficial

4.1.1 Pendiente del terreno

Los factores topográficos, como la pendiente, se correlacionan fuertemente con los indicadores de calidad del agua debido a su influencia en la alteración del flujo superficial de escorrentía que propician la intrusión de materia orgánica e inorgánica, nutrientes y sedimentos finos al sistema fluvial (Jabbar & Grote, 2019). Estudios como el de Chang et al. (2008) comprueban que las exportaciones de contaminantes en cuencas hidrográficas son altamente

variables al presentarse cambios en la pendiente promedio, donde las exportaciones terrestres máximas de N total con una pendiente media del 80% fueron alrededor de 1.6 veces las de aquellas con una pendiente media del 10%.

4.1.2 Distancia desde la fuente hídrica superficial

Este parámetro representa el enrutamiento de los contaminantes y es proporcional al decaimiento del N difuso por el movimiento de la escorrentía durante la confluencia del flujo (Siqueira et al., 2017; Wu et al., 2019). Asimismo, dependiendo de la cercanía de las coberturas a la fuente hídrica superficial, puede existir interferencia en el transporte de sedimentos y contaminantes, y reducirse los tiempo de viaje hasta el cuerpo de agua (Arriagada et al., 2019). Por ejemplo, Cuellar & Mosquera (2021) identificaron que los sitios donde los cultivos se acercaban o se sitúan a distancias cercanas al cuerpo hídrico presentaban una tendencia a aumentar el índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por la agricultura. En Echeverri Sánchez et al. (2020) se encontró que las zonas con vulnerabilidad alta coinciden mayormente con aquellas cercanas a los cuerpos hídricos (menor a 100 metros) a pesar de presentar relieves planos y ligero grado de erosión.

4.1.3 Uso de suelo/cobertura

El uso y cobertura del suelo han sido considerados como dos de los factores más importantes que afectan la calidad del agua al influir en las características naturales de los suelos que determinan los procesos relacionados con el agua en el suelo, alterando el tiempo de viaje del agua y el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica (Lopes et al., 2022). En investigaciones como la de Wang S. et al. (2022) se comprobó que el aumento de las áreas agrícolas lleva a que se entreguen más nutrientes a los ríos, entre estos el N, encontrando así que

el uso del suelo contribuyó en un 37.35% en la determinación de la ocurrencia de las áreas de fuente crítica, siendo este el parámetro que mayor aporte tuvo entre los utilizados en la investigación.

4.1.4 Precipitación

La precipitación intensa favorece el transporte de formas de N asociadas a las cargas de sedimentos y nutrientes a las aguas superficiales (Zhang & Huang, 2011), generando de esta forma una mayor probabilidad de que ocurran inundaciones, deslizamientos de tierra y otros eventos relacionados con el exceso de agua cuando hay altos niveles de precipitación en una cuenca hidrográfica (Jabbar et al., 2019). Jabbar & Grote (2019) observaron que la precipitación fue el parámetro más significativo relacionado con la contaminación por N, ya que incluso las pequeñas cantidades de precipitación fueron relevantes en el transporte de nutrientes y sólidos disueltos. Igualmente, Cheng et al. (2017) obtuvieron que, a pesar de una baja tasa de utilización promedio de N en el suelo (30%~40%), más de la mitad ingresa por escorrentía superficial de las tierras de cultivo y erosión del suelo a causa de la temporada de lluvias, contribuyendo al deterioro de la calidad de fuentes hídricas superficiales.

4.1.5 Textura del suelo

La textura del suelo indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, presentes en este. Dichas partículas pueden convertir al suelo en una fuente de sedimentos y materiales solubles que, al llegar al cuerpo de agua por medio de la erosión, pueden alterar la calidad del agua superficial. Así, un suelo de tipo arenoso con alto contenido de arena o limo es más susceptible a la erosión, mientras que los arcillosos son más estables (Arriagada et al., 2019). Esto se respalda con la normalización empleada por Cuellar & Mosquera

(2021) y Echeverri Sánchez et al. (2020) donde las texturas livianas como las limosas tienen un valor más alto a diferencia de las pesadas como las arcillosas, dada la falta de capacidad de retener agua en los suelos arenosos que puede permitir que los contaminantes se filtren rápidamente en los cuerpos hídricos cercanos.

4.1.6 Tasa de aplicación de fertilizante

El uso excesivo de fertilizantes es un parámetro que aumenta el riesgo de contaminación hídrica en las cuencas hidrográficas (Maleki et al., 2020). Este parámetro es importante dado que con él se regula el manejo de nutrientes y se llega a mejorar la eficiencia en la utilización de agua y fertilizante, siendo así un control de la contaminación difusa (S. Wang et al., 2022). Dependiendo de la cantidad de fertilizantes que se apliquen y del uso que se le dé al suelo en una determinada zona de la cuenca, se pueden clasificar diferentes niveles de carga potencial: alta, media, baja y no aplicable (Phetprayoon & Sarapirome, 2012). Por otra parte, la tasa de aplicación de fertilizante que depende del cultivo varía temporal y espacialmente, generando diferencias en las pérdidas por contaminación difusa en las diferentes zonas de la cuenca, y sumado a ello, una aplicación inadecuada de carga de fertilizante aumentará la vulnerabilidad de la zona a este tipo de contaminación. El estudio de Guo et al. (2020) encontró que el factor más significativo que afectó la intensidad de la carga de N en la cuenca fue la tasa de aplicación de fertilizante.

4.2 Magnitud de los parámetros estimados para el área de estudio

En la presente sección, se presentan los datos recopilados a partir de la información secundaria para cada parámetro de influencia en la vulnerabilidad a la contaminación difusa por N y su análisis correspondiente.

Se identificaron cinco (5) categorías para el uso del suelo y 10 categorías para la cobertura del terreno en el área de estudio (Celis, 2022). Con respecto al uso de suelo se encuentra la conservación, el barbecho, el pastoreo extensivo, los cultivos y la zona habitable, y por parte de las coberturas, estas van desde herbazal denso de tierra firme no arbolado hasta tejido urbano discontinuo según una adaptación de Löwer (2020).

Para el análisis de la precipitación, se utilizó una ventana de tiempo mensual desde enero de 2020 hasta diciembre de 2020 (Tabla 4). Esta contó con dos épocas secas: una que se extiende en los meses de enero y febrero y otra que inicia en diciembre, con una precipitación mínima de 27.2 mm en febrero, y una época de lluvias que abarca desde septiembre hasta noviembre, con una precipitación máxima de 182.50 mm en octubre.

Tabla 4

Precipitación mensual registrada en el área de estudio durante el 2020

Mes monitoreado	Precipitación [mm/mes]
Enero	32.00
Febrero	27.20
Marzo	51.33
Abril	51.46
Mayo	61.60
Junio	104.10
Julio	99.70
Agosto	143.60
Septiembre	161.60
Octubre	182.50
Noviembre	146.30
Diciembre	28.70

Nota. Tomado de la *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo* (p. 71) por A. Celis, 2022, Universidad Industrial de Santander

Con respecto al análisis de la textura del suelo, fue necesario agrupar y recategorizar las coberturas y usos de suelo (Tabla 5) para obtener su ubicación espacial. De allí se obtuvo que en el área de estudio se presentan tres tipos de texturas: franco-arenosa, franco-arcillo-arenosa y franco-arcillosa, las cuales se categorizaron en texturas livianas (franco-arenosa) y texturas medias (franco-arcillo-arenosa y franco-arcillosa) basadas en la metodología de Echeverri Sánchez et al. (2020).

Tabla 5

Agrupación y recategorización de las coberturas y uso de suelo, y su respectiva textura

Categoría	Cobertura/Usos del suelo	Textura
Arbustivo denso	• Bosque denso bajo de tierra firme	Franco arcillosa
Barbecho	• Una parte de pastos limpios y herbazal denso de tierra con arbustos/Barbecho • Tejido urbano	• UHNI: Franco arcillo arenosa • UHI: Franco arcillosa
Cultivos agrícolas	• Papa • Cebolla de rama	Franco arcillosa
Natural de baja* y Natural alta pendiente**	• Una parte de herbazal denso de tierra con arbustos • Herbazal denso de tierra no arbolado • Una parte de pastos limpios • Plantación de coníferas • Tierras desnudas y degradadas • Afloramientos rocosos	Franco arenosa

Nota. *Natural de baja pendiente corresponde a las zonas de dichas coberturas que se encuentren en terreno con pendiente menor a 10°.

**Natural de alta pendiente corresponde a las zonas de dichas coberturas que se encuentren en terreno con pendiente mayor a 10°.

En cuanto a la tasa de aplicación de fertilizante, se tomó en cuenta que en la UHI, existen cuatro áreas designadas para la agricultura, localmente conocidas como "cortes". Tres de estas áreas se dedican al cultivo de cebolla de rama, mientras que una está destinada al cultivo de papa. En la Tabla 6 se presentan las tasas de aplicación de pollinaza, el principal fertilizante utilizado en la zona, para el año 2020.

Tabla 6

Tasa de aplicación de pollinaza utilizada en los cultivos de cebolla de rama y papa en el año 2020

Mes monitoreado	Cultivo de cebolla de rama [Ton/ha/mes]		
	Corte 1	Corte 2	Corte 3
Enero	0	10	0
Febrero	10	0	0
Marzo	0	0	10
Abril	0	10	0
Mayo	10	0	0
Junio	0	0	10
Julio	0	10	0
Agosto	10	0	0
Septiembre	0	0	10
Octubre	0	10	0
Noviembre	10	0	0
Diciembre	0	0	10
Mes monitoreado	Cultivo de papa [Ton/ha/mes] - Corte 1		
Marzo	0.50		

Nota: Tomado de *Estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno en cultivos de cebolla junca que promuevan la resiliencia de pequeños agricultores del Páramo de Berlín, frente a los retos económicos derivados de la pandemia* por GPH & GIMBA, 2022, Universidad Industrial de Santander.

Por último, la categorización y normalización de cada parámetro se presenta en el Apéndice G.

4.3 Ponderación de los parámetros obtenida del AHP

Con base en los resultados obtenidos de la consulta a expertos (ver Apéndice H), se construyó una matriz de comparación pareada de orden seis (6) entre criterios y otra de orden dos (2) entre subcriterios, tal como se ilustra en el Apéndice I (Tablas I-1 e I-2, respectivamente). En el caso de criterios con un solo subcriterio, se asigna el peso directamente a ese subcriterio, mientras que en el caso de criterios con múltiples subcriterios, como el criterio 3 (C3) que tiene dos subcriterios (subC3 y subC4), el peso se distribuirá según el peso que asignen los expertos.

El proceso de iteración se detuvo en ambos casos al cabo de cuatro iteraciones, donde se obtuvo el autovector para los criterios mostrado en la Tabla I-3 con una tasa de consistencia del 0.69% (Tabla I-4); recordando que el valor admisible para matrices de orden mayor a cinco (5) es del 10%. Por lo tanto, se concluyó que los resultados fueron coherentes en sus relaciones de importancia.

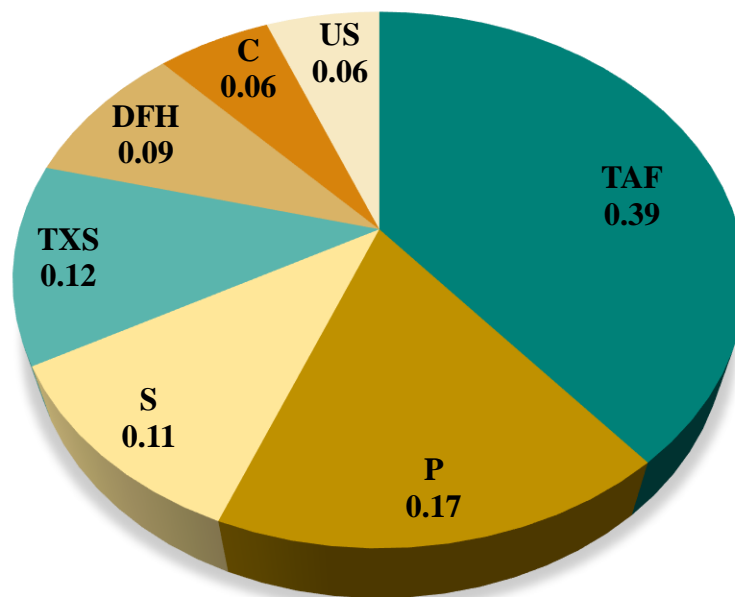
Por otro lado, no se calculó la tasa de consistencia de la matriz de los subcriterios al ser de orden dos (2), y su autovector se presenta en la Tabla I-5 junto con el valor del peso ponderado final, obtenido del producto entre el peso del criterio 3 (0.12) y el valor del autovector de su respectivo subcriterio (0.5 para cada uno).

En resumen, los subcriterios (i.e., parámetros) obtuvieron un peso ponderado expuesto en la Figura 4. Se destaca que el subcriterio con más peso correspondió a la tasa de aplicación de fertilizante y los de menor peso fueron el uso de suelo y cobertura con 0.06 cada uno. Con base en la revisión bibliográfica para la determinación de los parámetros, se esperaba que estos últimos

obtuvieran una mayor importancia, sin embargo, según el juicio de los expertos, en el contexto de las unidades hidrográficas del Páramo de Berlín, el uso del suelo y la cobertura desempeñan un papel de menor importancia frente a los demás parámetros.

Figura 4

Pesos ponderados para los subcriterios



Nota. TAF: Tasa de aplicación de fertilizante; P: Precipitación; S: Pendiente del terreno; TXS: Textura del suelo; DFH: Distancia desde la fuente hídrica superficial; C: Cobertura; US: Uso de suelo.

Con las variables potenciales determinadas, se construyó la ecuación 3 para determinar el IVCDN en las unidades hidrográficas de estudio, donde se tuvieron en cuenta los valores normalizados asignados para cada parámetro.

$$IVCDN = (0.39 TAF) + (0.17 P) + (0.11 S) + (0.12 TXS) + (0.09 DFH) \\ + (0.06 C) + (0.06 US) \quad (3)$$

Donde: TAF: Valor normalizado de tasa de aplicación de fertilizante del mes. P: Valor normalizado de precipitación del mes. S: Valor normalizado de pendiente del terreno. TXS: Valor normalizado de textura del suelo. DFH: Valor normalizado de distancia desde la fuente hídrica superficial. C: Valor normalizado de cobertura. US: Valor normalizado de uso de suelo.

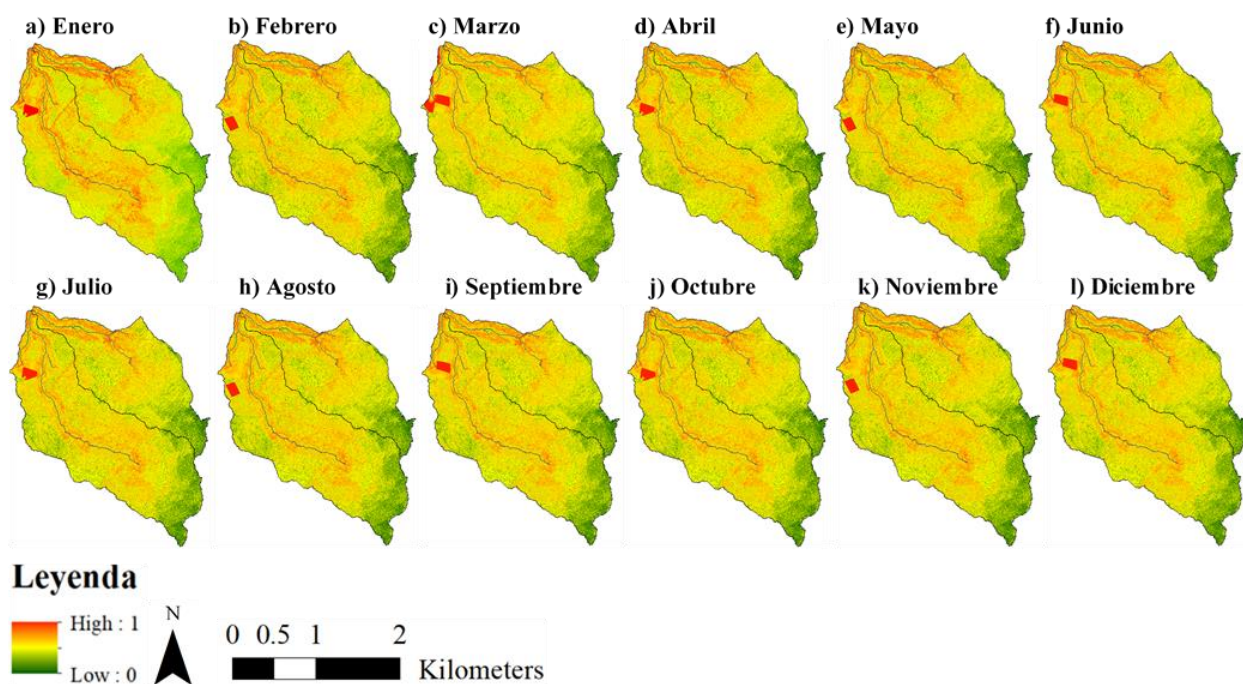
4.4 Estimación del IVCDN y zonificación en el SIG

En el Apéndice J se presentan los insumos cartográficos empleados para el cálculo de los parámetros, la generación de los mapas de IVCDN y de los mapas zonificados de vulnerabilidad para los doce meses del año (i.e., se obtuvieron doce mapas de cada uno). Las resoluciones espaciales de los mapas de los parámetros y los mapas generados se detallan en el Apéndice K, y en el Apéndice L se presentan los resultados de los parámetros en función de las áreas obtenidas de sus respectivas categorías.

En la Figura 5 se puede apreciar que el máximo valor obtenido para el IVCDN en la zona de estudio es 0.98 en el mes de octubre en el corte 2 de cultivo de cebolla de rama (ver Apéndice M, con los valores máximos y mínimos de IVCDN que se dieron en cada mes). Por otro lado en la Figura 6 se presentan las zonas homogéneas de vulnerabilidad, identificadas a partir de la reclasificación de los valores del IVCDN en las categorías de la Tabla 2. En el Apéndice N se adjuntan las áreas por categoría para cada mes. Es importante resaltar que, para ningún mes del año, se identificaron áreas con vulnerabilidad muy baja en ninguna unidad hidrográfica de estudio.

Figura 5

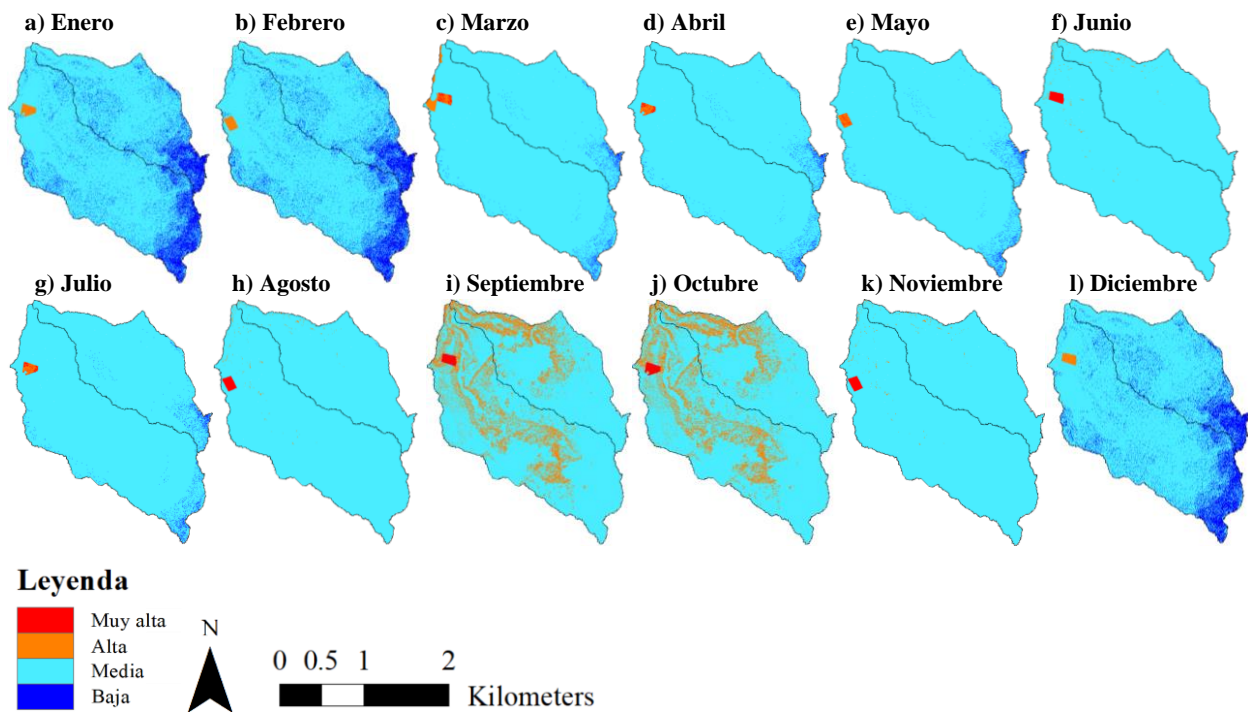
Valores del índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por Nitrógeno en a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre, l) diciembre



Los meses de enero, febrero y diciembre poseen solo tres categorías de vulnerabilidad, siendo la vulnerabilidad media la de mayor extensión con 85.43% del área total, seguida de la vulnerabilidad baja con 14.12% del área de estudio y la vulnerabilidad alta con 0.45% del área total.

Figura 6

Zonas homogéneas de vulnerabilidad a la contaminación difusa por Nitrógeno en a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre, l) diciembre



El mes de marzo presenta como zona homogénea más extensa aquella correspondiente a la de vulnerabilidad media con 97.84% del área total, continuando con vulnerabilidad baja con 1.18% del área de estudio, vulnerabilidad alta con 0.80% del área de estudio y la vulnerabilidad muy alta con 0.19% del área de estudio.

Para los meses de abril, mayo y julio, la zona de vulnerabilidad media representó el 98.37% del área total, seguida de las áreas con vulnerabilidad baja, ocupando 1.18% del área total,

vulnerabilidad alta con 0.32% del área total y por último, vulnerabilidad muy alta con 0.13% del área total.

En los meses de junio, agosto y noviembre, la zona con mayor área total fue la vulnerabilidad media con 99.31%, siguiendo con la vulnerabilidad muy alta con 0.45% del área estudiada y finalizando con la vulnerabilidad alta con 0.24% del área total. En estos meses no se identificaron zonas con vulnerabilidad baja.

Los meses de septiembre y octubre solo exhibieron tres categorías, las zonas de vulnerabilidad media, como las de mayor área total con 84.47%, siguiendo con las de vulnerabilidad alta con 15.07% del área de estudio y la más reducida de vulnerabilidad muy alta con 0.46% del área total.

En el análisis de las categorías de vulnerabilidad, se encontró que las zonas con vulnerabilidad muy alta y alta aumentan cuando hay alta pluviosidad y se asocian con los cultivos de papa y cebolla de rama en los cuales se ha realizado la aplicación de fertilizante en el mes correspondiente. Asimismo, las zonas identificadas con vulnerabilidad alta se encontraron en zonas con textura de suelo liviana (franco-arenosa) y pendientes mayores a los 25° en terrenos escarpados y muy escarpados. Las coberturas que mayormente ocupaban estas zonas resultaron ser tierras desnudas y degradadas, herbazales densos de tierra firme no arbolado y con arbustos, y plantaciones de coníferas ubicadas usualmente al lado y lado de la fuente hídrica superficial o cerca de esta (< 75 m); ya que esto facilita el movimiento de carga de N que impacta negativamente el cuerpo de agua.

La vulnerabilidad media predomina en zonas con inclinaciones mayores a los 10° y diferentes coberturas del suelo como lo son pastos limpios, bosque denso bajo de tierra firme y

herbazal denso de tierra firme no arbolado. Además, coinciden con suelos de textura media (franco-arcillosa y franco-arcillo-arenosa) y con los usos de barbecho y conservación.

Las zonas con vulnerabilidad baja se presentan en gran medida cuando hay bajas condiciones de precipitación. Así como, en zonas donde la pendiente suave y muy suave es la topografía dominante, el suelo se usa para pastoreo extensivo y zona habitable, que coinciden en parte con las coberturas de herbazal denso de tierra firme con arbustos y bosque denso de baja pendiente. En especial, se incluyen las ubicaciones lejanas a la fuente hídrica superficial (> 125 m).

En contraste con el análisis de vulnerabilidad realizado por Echeverri Sánchez et al. (2020), en este estudio, las zonas de vulnerabilidad baja coinciden con las coberturas de herbazal denso de tierra firme con arbustos y bosque denso de baja pendiente. En las zonas de vulnerabilidad alta, los parámetros más relevantes concuerdan con los del referido estudio, pero en este caso se incluye la tasa de aplicación de fertilizante como la más incidente, y el terreno donde se presentan se asocia mayormente a escarpado y muy escarpado. En comparación con los resultados del índice de vulnerabilidad aplicado en Cuellar & Mosquera (2021) las zonas de vulnerabilidad media no se asociaron con actividades antropogénicas, sino con el uso del suelo de barbecho y conservación, aunque hubo coincidencia con la textura de suelo media. Por otro lado, mientras que la tasa de aplicación de fertilizante tuvo la mayor influencia seguida de la precipitación, en los resultados de Wang et al. (2022) se les atribuyó mayor importancia a los usos de suelo, seguido de la tasa de aplicación de fertilizante.

5. Conclusiones

Los parámetros seleccionados para analizar la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno en el Páramo de Berlín fueron la tasa de aplicación de fertilizante, la precipitación, la pendiente del terreno, la textura del suelo y la distancia desde la fuente hídrica superficial. De estos, la tasa de aplicación de fertilizante fue el parámetro con mayor importancia, con un peso de 0.39 y la precipitación con 0.17; mientras que el uso del suelo y cobertura fueron los parámetros de menor importancia, con 0.06 de ponderación en el cálculo del IVCDN cada uno, acorde al AHP efectuado.

Los meses con mayor vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno fueron los correspondientes a la época de lluvias con valores máximos de 0.97 en septiembre y 0.98 en octubre. Los meses de época seca obtuvieron los valores más bajos para los índices de mayor vulnerabilidad siendo estos 0.81 en febrero y 0.84 en diciembre. Se destaca además que en todos los meses del año, los valores mínimos de vulnerabilidad superan el umbral de categoría muy baja de 0.2.

Las áreas con mayor índice de vulnerabilidad a la contaminación se encontraron en zonas de cultivo de papa y cebolla de rama y correspondieron a los meses en los que se aplica fertilizante. Las áreas con vulnerabilidad intermedia se presentaron en zonas con textura de suelo liviana (franco-arcillosa y franco-arcillo-arenosa), pendientes escarpadas y muy escarpadas, y coberturas de tierras desnudas y degradadas, herbazales densos de tierra firme no arbolado y con arbustos, y plantaciones de coníferas ubicadas usualmente al lado y lado de la fuente hídrica superficial o

cerca de esta (< 75 m). Las áreas con menor índice se ubicaron a más de 175 m de la fuente hídrica superficial en pendientes suaves y muy suaves.

Entre las categorías de la vulnerabilidad, la vulnerabilidad media fue la zona más extensa con áreas totales entre el 84.43~99.31%, le siguió la vulnerabilidad alta con 0.24~15.09% del área total estudiada, la vulnerabilidad baja con 1.18~14.12% y la vulnerabilidad muy alta con 0.11~0.45%. No se identificaron áreas con vulnerabilidad muy baja en ninguna UH y para ningún mes del año.

En cuanto a la validación de datos, se encontró coherencia entre las concentraciones de nitrógeno en época seca y época lluviosa con las zonas de vulnerabilidad obtenidas para cada UH y sus características en los meses correspondientes. Lo cual refleja que el índice propuesto a partir de la metodología de AEM fue eficaz para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno en agua superficial en las UH del Páramo de Berlín y puede ser aplicado en futuras investigaciones en este campo.

6. Recomendaciones

Dado que la herramienta implementada en este estudio depende de información detallada a nivel espacial y temporal, se recomienda: i) diversificar y ampliar el número de expertos a un mínimo de 30 para una evaluación más completa e integral; ii) cuando se trabaje con datos mensuales, se debe reconocer que la importancia de los parámetros varía según la época de precipitación (seca o lluviosa) e implementar dicha diferenciación en el AHP para un mejor análisis, y iii) ampliar el espectro de datos que se tiene de otros parámetros relevantes que por falta de información no se incluyeron (p. ej. evapotranspiración).

Referencias Bibliográficas

- Abdulkareem, J. H., Nor, W., Sulaiman, A., Pradhan, · Biswajeet, Nor, ·, & Jamil, R. (2018). Long-Term Hydrologic Impact Assessment of Non-point Source Pollution Measured Through Land Use/Land Cover (LULC) Changes in a Tropical Complex Catchment. *Earth Systems and Environment*, 2, 67–84. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0042-1>
- Afanador, J., & Buitrago, G. (2021). *Análisis de factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín (Santander Colombia)*. Univerdidad Industrial de Santander.
- Alilou, H., Rahmati, O., Singh, V. P., Choubin, B., Pradhan, B., Keesstra, S., Ghiasi, S. S., & Sadeghi, S. H. (2019). Evaluation of watershed health using Fuzzy-ANP approach considering geo-environmental and topo-hydrological criteria. *Journal of Environmental Management*, 232, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.019>
- Ariza, J. (2022). *Contaminación difusa por nitratos de origen agrario | Gobierno de Castilla-La Mancha*.
<https://www.castillalamancha.es/gobierno/desarrollosostenible/estructura/dgecocir/actuaciones/contaminación-difusa-por-nitratos-de-origen-agrario>
- Arriagada, L., Rojas, O., Arumí, J. L., Munizaga, J., Rojas, C., Farias, L., & Vega, C. (2019). A new method to evaluate the vulnerability of watersheds facing several stressors: A case study in mediterranean Chile. *Science of the Total Environment*, 651, 1517–1533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.237>
- Bautista, E., & Barrera, J. (2022). *Influencia de las actividades agropecuarias sobre el contenido*

de Nitrógeno en el agua superficial de una unidad hidrográfica del Parámo de Berlín (Santander, Colombia). Universidad Industrial de Santander.

Campoverde-Muñoz, P., Aguilar-Salas, L., Romero-Crespo, P., Valverde-Armas, P. E., Villamar-Marazita, K., Jiménez-Oyola, S., & Garcés-León, D. (2022). Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 403, 15(1), 403. <https://doi.org/10.3390/SU15010403>

Cárdenas, G., & Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 72–88. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lang=pt

CDMB & CORPONOR. (2022). *Corponor – Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental*. <https://corponor.gov.co/web/>

Celis, A. (2022). *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo*.

Chang, C. L., Kuan, W. H., Lui, P. S., & Hu, C. Y. (2008). Relationship between landscape characteristics and surface water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 147(1–3), 57–64. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0097-1>

Chen, J., & Lu, J. (2014). Effects of land use, topography and socio-economic factors on river water quality in a mountainous watershed with intensive agricultural production in East China. *PLoS ONE*, 9(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102714>

- Cheng, X., Chen, L., & Sun, R. (2017). Estimation of non-point source pollution loads of Beijing-Tianjin-Hebei region considering precipitation and topography. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(4), 265–272. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.036>
- Cuellar, L., & Mosquera, A. M. (2021). *Estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola en subzona hidrográfica Guachal, Valle del Cauca* [Universidad del Valle sede Cali]. <http://hdl.handle.net/10893/20223>
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Durán Zuazo, V. H., Martínez Raya, A., & Aguilar Ruiz, J. (2004). Nutrient Losses by Runoff and Sediment from the Taluses of Orchard Terraces. *Water Air and Soil Pollution*, 153(1–4), 355–373. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000019956.17314.88>
- Echeverri Sánchez, A. F., Urrutia Cobo, N., & Barona Ramírez, S. M. (2020). Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del río cerrito a la contaminación difusa agrícola. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(2), 117–130. <https://doi.org/10.22490/21456453.3136>
- Fernandes, A. C. P., Terêncio, D. P. S., Pacheco, F. A. L., & Fernandes, L. F. S. (2021). A combined GIS-MCDA approach to prioritize stream water quality interventions, based on the contamination risk and intervention complexity. *Science of the Total Environment*, 798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149322>
- Flores-López, F., Easton, Z. M., Geohring, L. D., & Steenhuis, T. S. (2011). Factors Affecting

Dissolved Phosphorus and Nitrate Concentrations in Ground and Surface Water for a Valley Dairy Farm in the Northeastern United States. *Water Environment Research*, 83(2), 116–127. <https://doi.org/10.2175/106143010X12681059116770>

Gardiol, M., Morresi, M. del V., Grand, L., Cardoso, M., & Finelli, N. (2021). Análisis de Vulnerabilidad ante Amenazas de Origen Hídrico en la Cuenca del Arroyo Las Turbias, Argentina. *Reder*, 5(1), 70. <https://doi.org/10.55467/reder.v5i1.62>

Gómez, V., & Quintero, J. M. (2020). *Análisis del efecto de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua superficial en el páramo de Berlín (Santander-Colombia) en época seca*. Universidad Industrial de Santander.

GPH & GIMBA. (2022). *Estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno en cultivos de cebolla junca que promuevan la resiliencia de pequeños agricultores del Páramo de Berlín, frente a los retos económicos derivados de la pandemia*. Proyecto de investigación financiado por la VIE. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Guo, Y., Wang, X., Zhou, L., Melching, C., & Li, Z. (2020). Identification of Critical Source Areas of Nitrogen Load in the Miyun Reservoir Watershed under Different Hydrological Conditions. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 964, 12(3), 964. <https://doi.org/10.3390/SU12030964>

Jabbar, F. K., & Grote, K. (2019). Statistical assessment of nonpoint source pollution in agricultural watersheds in the Lower Grand River watershed, MO, USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(2), 1487–1506. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3682-7>

Jabbar, F. K., Grote, K., & Tucker, R. E. (2019). A novel approach for assessing watershed

- susceptibility using weighted overlay and analytical hierarchy process (AHP) methodology: a case study in Eagle Creek Watershed, USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(31), 31981–31997. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06355-9>
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos* (Vol. 1). <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/39251>
- Lopes, T. R., Folegatti, M. V., Zolin, C. A., Moura, L. B., Oliveira, R. K., Fraga, L. S., Duarte, S. N., Santos, O. N. A., & Moster, C. (2022). Multicriterial Analysis for the Identification of Key Areas to Improve the Management in Piracicaba River Basin, Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002146](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002146)
- Löwer, C. (2020). What impact does grazing intensity have on the degradation of vegetation structure in a dry páramo? *Universidad de Bayreuth*.
- Maleki, P., Rahman, P., Jafariyan, H. A., Salmanmahiny, A., Ghorbani, R., Gholizadeh, M., & Harsij, M. (2020). The risk assessment of water pollution in the Gorgan Bay catchment using the WRASTIC index. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100393>
- ONU. (2022). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Ortiz-Rivera, A., & Fuentes-Junco, J. de J. A. (2020). Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el Área de Protección de Flora y Fauna, Pico de Tancítaro, Michoacán, México. *Revista Geográfica de América Central*, 2(65), 207–238. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.8>
- Patiño, S. (2021). *Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en*

ecosistema de páramo asociadas a los servicios de suministro y regulación hídrica.

Universidad Industrial de Santander.

Phetprayoon, T., & Sarapirome, S. (2012). Determination of nonpoint source pollution index using MCDA-GIS. *33rd Asian Conference on Remote Sensing 2012, ACRS 2012, 1(Ldd)*, 791–796.

Rey-Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 29, Issue 55, pp. 83169–83190). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21709-6>

6

Rickert, B., Chorus, I., & Schmoll, O. (2016). Protecting surface water for health. Identifying, assessing and managing drinking-water quality risks in surface-water catchments. *Protecting Surface Water for Health. Identifying, Assessing and Managing Drinking-Water Quality Risks in Surface-Water Catchments.*

Rojas, I., Coronado, M., Rossetti, S., & Beltrán, F. (2020). Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(2), 247–256. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V38I2.642>

Saaty, T. L. (2004). Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 2004 13:1, 13(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/S11518-006-0151-5>

Siqueira, H. E., Pissarra, T. C. T., do Valle Junior, R. F., Fernandes, L. F. S., & Pacheco, F. A. L. (2017). A multi criteria analog model for assessing the vulnerability of rural catchments to road spills of hazardous substances. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, 26–36.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.02.002>

- Vargas, M. C. (2010). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Ambiente grupo de recurso hídrico propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.*
- Vera, J., & Albarracín, A. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109–136. <https://doi.org/10.18359/RCIN.2309>
- Wang, S., Wang, Y., Wang, Y., & Wang, Z. (2022). Assessment of influencing factors on non-point source pollution critical source areas in an agricultural watershed. *Ecological Indicators*, 141(35), 109084. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109084>
- Wang, Y., Liang, J., Yang, J., Ma, X., Li, X., Wu, J., Yang, G., Ren, G., & Feng, Y. (2019). Analysis of the environmental behavior of farmers for non-point source pollution control and management: An integration of the theory of planned behavior and the protection motivation theory. *Journal of Environmental Management*, 237, 15–23. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.02.070>
- Wu, B., Zhang, X., Xu, J., Liu, J., & Wei, F. (2019). Assessment and management of nonpoint source pollution based on multicriteria analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(26), 27073–27086. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05923-3>
- Zhang, H., & Huang, G. H. (2011). Assessment of non-point source pollution using a spatial multicriteria analysis approach. *Ecological Modelling*, 222(2), 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.011>

Apéndices

Apéndice A. Artículos seleccionados para la revisión bibliográfica

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
1	Chang et al. (2008)	Relationship between landscape characteristics and surface water quality	El arroyo Chichiawan en la cuenca de Wulin, Taiwán	Superficial	Predecir la respuesta hidrológica y la exportación de contaminantes de fuentes difusas en la cuenta ante cambios de uso del suelo, tipo de suelo y pendiente.	Uso del suelo Tipo de suelo Pendiente del terreno	Modelo WinVAST
2	Zhang & Huang (2011)	Assessment of non-point source pollution using a spatial multicriteria analysis approach	Cuenca del Río Huai, China.	Superficial	Desarrollar un método espacial multicriterio para evaluar el potencial de pérdida de nitrógeno a nivel de cuenca para el control de la contaminación de fuentes no puntuales.	Uso del suelo/cobertura Distancia del cultivo a la fuente hídrica superficial Escorrentía superficial Precipitación	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)
3	Phetprayoon & Sarapirome (2012)	Determination of nonpoint source pollution index using MCDA-GIS	Cuenca del Alto Lam Phra Phloeng, Tailandia	Superficial	Determinar el NPSI para ubicar el área potencial de la fuente de contaminación no puntual en la cuenca usando GIS y análisis de decisiones de criterios múltiples (MCDA).	Escorrentía superficial Producción de sedimentos en la cuenca Exportación de nutrientes en el agua (tasa de aplicación de fertilizante)	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
4	Chen & Lu (2014)	Effects of Land Use, Topography and Socio-Economic Factors on River Water Quality in a Mountainous Watershed with Intensive Agricultural Production in East China	Río Cao-E, China	Superficial	Investigar las relaciones entre los parámetros de calidad del agua del río y el uso de la tierra, la topografía y los factores socioeconómicos en la calidad del agua del río.	Uso del suelo/cobertura Elevación Pendiente del terreno Área aferente Densidad poblacional en la cuenca Producto Interno Bruto per cápita Producción ganadera per cápita	Análisis Multicriterio (MCDA) y estadístico
5	Siqueira et al. (2017)	A multi criteria analog model for assessing the vulnerability of rural catchments to road spills of hazardous substances	Área de Protección Ambiental de la cuenca del río Uberaba, Brasil	Superficial	Contribuir con un nuevo modelo de vulnerabilidad de la cuenca a la contaminación por derrames en las carreteras basados únicamente en parámetros biofísicos.	Pendiente del terreno Tipo de suelo Uso del suelo Distancia desde la fuente hídrica superficial Densidad de drenaje	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)
6	Cheng et al. (2017)	Estimation of non-point source pollution loads of Beijing-Tianjin-Hebei region considering precipitation and topography	17 embalses al oeste y al norte de la cuenca del río Haihe, China	Superficial	Estudiar las cargas nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP) de contaminantes de fuente no puntual y su intensidad de carga en la cuenca del embalse.	Densidad poblacional en la cuenca Densidad del ganado en la cuenca Uso del suelo Precipitación Pendiente del terreno	Modelo de coeficiente de salida e índice de eutrofización EI
7	Arriagada et al. (2019)	A new method to evaluate the vulnerability of	Cuenca del río Andalién, Chile	Superficial	Desarrollar un método espacial validado para determinar la	1) Sub-índice de estresores antropogénicos Densidad poblacional en la	Análisis Espacial

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
		watersheds facing several stressors: A case study in Mediterranean Chile			vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas en medio de múltiples estresores antropogénicos y perturbaciones naturales.	cuenca Distancia del camino al río Extracción de grava y arena Encauzamiento de ríos Vertederos 2) Sub-índice fragilidad ambiental Tipo de suelo Grado de erosión Pendiente del terreno Exposición de laderas Orden de canales Cobertura Precipitación 3) Sub-índice perturbación natural Inundaciones y tsunamis Deslizamientos Incendios forestales	Multicriterio (AEM)
8	Jabbar & Grote (2019)	Statistical assessment of nonpoint source pollution in agricultural watersheds in the Lower Grand River watershed, MO, USA	Cuenca baja del río Grand, EE.UU.	Superficial	Proporcionar relaciones que se puedan usar con bases de datos GIS fácilmente disponibles y herramientas ArcGIS para indicar qué cuencas hidrográficas tienen la combinación de características con mayor	Uso del suelo/cobertura Textura del suelo Profundidad del suelo hasta el lecho rocoso Profundidad del suelo hasta el nivel freático Área aferente Precipitación Caudal de la corriente	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
					probabilidad de resultar en una mala calidad del agua.	Longitud total de la corriente Índice de forma de la cuenca Pendiente de la cuenca/relación de relieve Complejidad topográfica Elevación media Pendiente del terreno	
9	Jabbar et al. (2019)	A novel approach for assessing watershed susceptibility using weighted overlay and analytical hierarchy process (AHP) methodology: a case study in Eagle Creek Watershed, USA	Cuenca de Eagle Creek, Indiana EE.UU.	Superficial	Evaluar la vulnerabilidad de cuencas hidrográficas por contaminación difusa y caracterizar el riesgo potencial.	Uso del suelo/cobertura Textura del suelo Precipitación Pendiente del terreno Profundidad hasta el nivel freático Tipo de lecho rocoso	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)
10	Alilou et al. (2019)	Evaluation of watershed health using Fuzzy-ANP approach considering geoenvironmental and topo-hydrological criteria	Cuenca del río Araz, en el noroeste de Irán	Superficial	Evaluar el estado de la salud de cuencas a partir de un enfoque integral que considere la vulnerabilidad climática, geología y erosión, características morfométricas y calidad del agua.	Precipitación Evapotranspiración Temperatura Grado de erosión Relación de circularidad Relación de elongación Índice de la forma de la cuenca Frecuencia de corriente Densidad de drenaje Textura de drenaje	Análisis Espacial Multicriterio (AEM) y SWAT (Herramienta de evaluación de suelos y aguas)

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
						Constante de mantenimiento del canal Coeficiente de compacidad Relación de longitud de flujo Relación de bifurcación Longitud total de la corriente Razón de alivio Número de rugosidad Concentración de nitrógeno total Concentración de Fósforo total Concentración de sólidos suspendidos Uso del suelo	
11	Wu et al. (2019)	Assessment and management of nonpoint source pollution based on multicriteria analysis	La cuenca del río Huai, China	Superficial	Evaluar la contaminación difusa por fósforo.	Grado de erosión Uso del suelo/cobertura Escorrentía Distancia del cultivo a la fuente hídrica superficial	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)
12	Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco (2020)	Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el Área de Protección de Flora y Fauna, Pico de	Pico de Tancítaro, Michoacán, México	Superficial	Calcular un Índice Modificado de Contaminación No Puntual (MPNPI) que describa el impacto de la contaminación difusa.	Precipitación Escorrentía Uso del suelo/cobertura Distancia del cultivo a la fuente hídrica superficial	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
		Tancítaro, Michoacán, México					
13	Echeverri et al. (2020)	Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del Río Cerrito a la contaminación difusa agrícola	Río Cerrito, Departamento del Valle, Colombia	Superficial	Aplicar una propuesta metodológica para valorar las categorías de vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales de la cuenca a la contaminación difusa de origen agrícola.	Uso del suelo/cobertura Eficiencia de aplicación de fertilizantes Eficiencia de aplicación de plaguicidas Precipitación Distancia del cultivo a la fuente hídrica superficial Fraccionamiento de aplicación de agroquímicos Eficiencia de la aplicación del agua de riego Pendiente del terreno Grado de erosión Textura del suelo	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)
14	Maleki et al. (2020)	The risk assessment of water pollution in the Gorgan Bay catchment using the WRASTIC index	Cuenca de captación de la Bahía Georgiana, Canadá	Superficial	Evaluar el riesgo de contaminación.	Descarga de agua residual Impacto recreacional Impacto agrícola Área aferente Vías de transporte Impacto industrial Uso de suelo/cobertura	Modelo WRASTIC
15	Cuellar & Mosquera (2021)	Estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la	Guachal, Valle del Cauca, Colombia	Superficial / Subterránea	Determinar el grado de vulnerabilidad al que están expuestos los cuerpos hídricos por la	Uso del suelo/cobertura Eficiencia de aplicación de fertilizantes Eficiencia de aplicación de	Análisis Espacial Multicriterio (AEM)

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
		contaminación difusa de origen agrícola en la subzona hidrográfica Guachal, Valle del Cauca			contaminación difusa planteando una metodología basada en una técnica de análisis multicriterio y sistemas de información geográfica.	plaguicidas Precipitación Distancia del cultivo a la fuente hídrica superficial Fraccionamiento de aplicación de agroquímicos Eficiencia de la aplicación del agua de riego Pendiente del terreno Grado de erosión Textura del suelo	
16	Gardiol et al. (2021)	Análisis de vulnerabilidad ante amenazas de origen hídrico en la Cuenca del Arroyo Las Turbias, Argentina	Cuenca del Arroyo Las Turbias, Argentina	Superficial	Analizar la vulnerabilidad en los sectores de la cuenca del arroyo Las Turbias para las dimensiones socioeconómica y ambiental.	Pendiente del terreno Densidad de drenaje Densidad vial Humedad del suelo	Análisis multicriterio (MCDA)
17	Fernandes et al. (2021)	A combined GIS-MCDA approach to prioritize stream water quality interventions, based on the contamination risk and intervention complexity	Cuenca del río Ave, Portugal	Superficial	Identificar el riesgo de contaminación de cada cuenca e identificar la complejidad de la intervención en las cuencas.	1) Riesgo de contaminación: Emisiones de nitrógeno Emisiones de fósforo Descarga de agua residual Uso del suelo 2) Complejidad de la intervención: Sitios de descarga de agua	Análisis Espacial Multicriterio (AEM) combinado

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
						residual Pendiente del terreno Densidad poblacional en la cuenca Área quemada Número de Strahler	
18	Wang S. et al. (2022)	Assessment of influencing factors on non-point source pollution critical source areas in an agricultural watershed	Cuenca Wangjiaqiao, región del embalse de las Tres Gargantas, China	Superficial	Cuantificar la contribución de ocho factores influyentes en dos tipos de áreas de origen crítico (CSA).	Pendiente del terreno Grado de erosión (factor RUSLE LS, factor RUSLE K) Tipo de suelo Elevación Uso del suelo Escorrentía Tasa de aplicación de fertilizante	Modelo de árboles de regresión potenciados (BRT) y análisis cuantitativo de las respuestas no lineales y los límites
19	Lopes et al. (2022)	Multicriterial Analysis for the Identification of Key Areas to Improve the Management in Piracicaba River Basin, Brazil	Cuenca del río Piracicaba, Brasil	Superficial	Identificar las áreas con potencial para mejorar la disponibilidad y calidad del agua.	Uso del suelo/cobertura Escorrentía superficial Almacenamiento de agua en el suelo Escorrentía subsuperficial y subterránea Tiempo de concentración Pendiente del terreno Grado de erosión Distancia a la corriente	Análisis Espacial Multicriterio (AEM) y SWAT (Herramienta de evaluación de suelos y aguas)

No	Autores y año (referencia)	Título	Zona de estudio	Tipo de fuente hídrica	Objetivo del estudio	Parámetros utilizados para estimar la vulnerabilidad	Método de análisis
						Distancia a las áreas mineras Concentración de nitrógeno en el agua	

Apéndice B. Resumen de los parámetros que influyen en la contaminación difusa extraídos de la literatura

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
Topografía de la cuenca	S	Pendiente del terreno	Ángulo que forma el plano tangente a la superficie del terreno con el plano horizontal en un punto.	13	(Arriagada et al., 2019; Chang et al., 2008; Chen & Lu, 2014; Cheng et al., 2017; Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Gardiol et al., 2021; Jabbar et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019; Lopes et al., 2022; Siqueira et al., 2017; S. Wang et al., 2022)
	H	Elevación media	Altitud basada en un punto de referencia fijo.	3	(Chen & Lu, 2014; Jabbar & Grote, 2019; S. Wang et al., 2022)
	CT	Complejidad topográfica	Desviación estándar de la elevación dentro de la cuenca.	1	(Jabbar & Grote, 2019)
	PCRR	Pendiente de la cuenca/relación de relieve	Relación entre el cambio de elevación de la cuenca hidrográfica y la longitud de la cuenca hidrográfica desde la salida hasta el punto más alto del perímetro.	1	(Jabbar & Grote, 2019)
Actividades Socioeconómicas	US	Uso del suelo	Utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano, como actividades antropogénicas o funciones económicas.	16	(Alilou et al., 2019; Chang et al., 2008; Chen & Lu, 2014; Cheng et al., 2017; Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Jabbar et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019; Lopes et al., 2022; Maleki et al.,

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
					2020; Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco, 2020; Siqueira et al., 2017; S. Wang et al., 2022; Wu et al., 2019; Zhang & Huang, 2011)
	CB	Cobertura	Recubrimiento (bio) físico observado sobre la superficie de la celda terrestre.	11	(Arriagada et al., 2019; Chen & Lu, 2014; Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Jabbar et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019; Lopes et al., 2022; Maleki et al., 2020; Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco, 2020; Wu et al., 2019; Zhang & Huang, 2011)
	PIB	Producto Interno Bruto per cápita	Indicador económico que indica el valor monetario de los bienes y servicios producidos por persona.	1	(Chen & Lu, 2014)
	PGC	Producción ganadera per cápita	Indicador económico que indica el valor monetario de la crianza de ganado por persona.	1	(Chen & Lu, 2014)
	DPC	Densidad poblacional en la cuenca	Cantidad de personas que en promedio habitan por unidad terrestre de la cuenca.	4	(Arriagada et al., 2019; Chen & Lu, 2014; Cheng et al., 2017; Fernandes et al., 2021)
	ER	Encauzamiento de ríos	La canalización del río según el nivel de intervención.	1	(Arriagada et al., 2019)
	SDA	Sitios de descarga de agua residual	Celdas terrestres donde se descarga el agua residual en la cuenca.	1	(Fernandes et al., 2021)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
	DAM	Distancia a las áreas mineras	Distancia euclidiana desde cada celda terrestre que se encuentre en uso como mina hasta el cuerpo de agua receptor a lo largo de la dirección del flujo de agua.	1	(Lopes et al., 2022)
Características del suelo	GE	Grado de erosión	Clasificación de la pérdida de suelo.	7	(Alilou et al., 2019; Arriagada et al., 2019; Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Lopes et al., 2022; S. Wang et al., 2022; Wu et al., 2019)
	PLR	Profundidad hasta el lecho rocoso	Distancia desde la superficie terrestre hasta el lecho rocoso.	1	(Jabbar & Grote, 2019)
	PNF	Profundidad hasta el nivel freático	Distancia desde la superficie terrestre hasta el nivel freático.	2	(Jabbar et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019)
	TS	Tipo de suelo	Clasificación distintiva del suelo que comparten un cierto conjunto de propiedades bien definidas.	4	(Arriagada et al., 2019; Chang et al., 2008; Siqueira et al., 2017; S. Wang et al., 2022)
	TXS	Textura del suelo	Clase textural según el contenido relativo de partículas de diferente tamaño en el suelo.	4	(Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Jabbar et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019)
	TLR	Tipo de lecho rocoso	Indica el tipo de roca madre o base rocosa que compone la superficie terrestre.	2	(Alilou et al., 2019; Jabbar et al., 2019)
	WS	Humedad del suelo	Cantidad de agua en una porción conocida de suelo.	1	(Gardiol et al., 2021)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
	AAS	Almacenamiento de agua en el suelo	Capacidad de retención máxima de agua del suelo.	1	(Lopes et al., 2022)
	EL	Exposición de laderas	Distribución de la vegetación y el desarrollo del suelo en las laderas, influye directamente en los procesos hidrológicos y de erosión.	1	(Arriagada et al., 2019)
	FT	Concentración de Fósforo total	Concentración de fósforo total en la corriente de agua.	2	(Alilou et al., 2019; Fernandes et al., 2021)
	NT	Concentración de nitrógeno total	Concentración de nitrógeno total en la corriente de agua.	3	(Alilou et al., 2019; Fernandes et al., 2021; Lopes et al., 2022)
	T	Temperatura del agua	Nivel de energía térmica con la que cuenta el agua de la cuenca.	1	(Alilou et al., 2019)
Calidad del agua	SCS	Sólidos suspendidos	Concentración de partículas sólidas que permanecen suspendidas en muestras de agua de la cuenca.	1	(Alilou et al., 2019)
	PRS	Potencial de rendimiento de sedimentos	Producción potencial de sedimentos en laderas, transportados y depositados en cauces o en las márgenes de los ríos.	1	(Phetprayoon & Sarapirome, 2012)
Actividades agropecuarias	DGC	Densidad del ganado en la cuenca	Cantidad de ganado que en promedio habita por unidad terrestre de la cuenca.	1	(Cheng et al., 2017)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
	EAF	Eficiencia de aplicación de fertilizantes	Método de aplicación de fertilizantes según la proporción (%) de nutrientes utilizada en el cultivo, en relación con la cantidad total aplicada en la fertilización.	2	(Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020)
	EAP	Eficiencia de aplicación de plaguicidas	Método de aplicación de plaguicidas según la proporción (%) de plaguicida que queda en el suelo utilizada en el cultivo, en relación con la cantidad total aplicada.	2	(Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020)
	FAA	Fraccionamiento de aplicación de agroquímicos	División de la aplicación del agroquímico en varias dosis.	2	(Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020)
	EAAR	Eficiencia de la aplicación del agua de riego	Cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo después de un riego, en relación al total del agua que se aplicó.	2	(Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020)
	TAF	Tasa de aplicación de fertilizante	Cantidad de fertilizante aplicada por área del cultivo en un periodo de tiempo determinado.	2	(Phetprayoon & Sarapirome, 2012; S. Wang et al., 2022)
	DA	Descarga de agua residual	Medición de la liberación de aguas utilizadas previamente en actividades agrícolas.	2	(Fernandes et al., 2021; Maleki et al., 2020)
Eventos naturales extremos	IT	Inundaciones y tsunamis	Clasificación según el porcentaje de área de la cuenca que pueda	1	(Arriagada et al., 2019)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
			afectar. Incremento del flujo de agua en los sistemas de río.		
	D	Deslizamientos	Clasificación según el porcentaje de área de la cuenca que pueda afectar. Movimiento del material superficial de un talud hacia un punto de equilibrio debido a la acción directa de la gravedad.	1	(Arriagada et al., 2019)
	IF	Incendios forestales	Clasificación según el porcentaje de área de la cuenca que pueda ser afectado por el incendio de origen natural o antrópico.	1	(Arriagada et al., 2019)
	AQ	Área quemada	Área total de la superficie quemada de la cuenca proyectada sobre un plano horizontal.	1	(Fernandes et al., 2021)
	AA	Área aferente	Área proyectada horizontalmente de la superficie delimitada por el parteaguas de la unidad.	3	(Chen & Lu, 2014; Jabbar & Grote, 2019; Maleki et al., 2020)
Morfología de la cuenca	DCH	Distancia desde la fuente hídrica superficial	Distancias medidas en forma de buffers o áreas aferentes que rodean la corriente hídrica superficial y van aumentando hasta llegar a la divisoria de aguas de la cuenca.	8	(Arriagada et al., 2019; Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Lopes et al., 2022; Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco, 2020; Siqueira et al., 2017; Wu et al., 2019; Zhang & Huang, 2011)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
	IFC	Índice de la forma de la cuenca	Cociente entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca.	2	(Alilou et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019)
	LTC	Longitud total de la corriente	Longitud calculada a partir de la sumatoria de las proyecciones horizontales de las corrientes hídricas perennes de la unidad hidrográfica.	2	(Alilou et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019)
	CC	Coefficiente de compacidad	Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente.	1	(Alilou et al., 2019)
	RC	Relación de circularidad	Cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca.	1	(Alilou et al., 2019)
	RE	Relación de elongación	Razón entre el diámetro de un círculo que posee la misma área que la cuenca y la longitud del cauce principal que la drena.	1	(Alilou et al., 2019)
	RLF	Relación de longitud de flujo	Relación entre la longitud total de la corriente de un orden y el siguiente orden inferior del segmento de la corriente.	1	(Alilou et al., 2019)
	TD	Textura de drenaje	Clasificación cualitativa de la densidad de drenaje.	1	(Alilou et al., 2019)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
	DD	Densidad de drenaje	Relación entre la longitud total de las corrientes hídricas perennes de la unidad, con respecto al área total de la superficie de la cuenca.	3	(Alilou et al., 2019; Gardiol et al., 2021; Siqueira et al., 2017)
	NS	Número de Strahler	Forma numérica que expresa la complejidad de la ramificación de la red de drenaje.	1	(Fernandes et al., 2021)
	RB	Relación de bifurcación	Relación entre el número de segmentos de un orden y el número de segmentos de orden inmediatamente superior.	1	(Alilou et al., 2019)
	RA	Razón de alivio	Relación entre la diferencia de altitud de los puntos extremos de la cuenca y la longitud mayor entre los extremos.	1	(Alilou et al., 2019)
	NR	Número de rugosidad	Combina la inclinación y la longitud de la pendiente, lo que indica el alcance de la inestabilidad de la superficie terrestre.	1	(Alilou et al., 2019)
	TC	Tiempo de concentración	Tiempo que tarda toda la cuenca considerada en drenar una gota de lluvia desde el punto más alejado de la unidad hasta el punto de desfogue.	1	(Lopes et al., 2022)
	CMC	Constante de mantenimiento del canal	Inverso de la densidad de drenaje.	1	(Alilou et al., 2019)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
	FC	Frecuencia de corriente	Número total de segmentos de corriente/Área de la cuenca.	1	(Alilou et al., 2019)
	OC	Orden de canales	Clasificación numérica de las corrientes perennes que describe el grado de bifurcación dentro de la unidad hidrográfica.	1	(Arriagada et al., 2019)
	E	Escorrentía superficial	Precipitación que por la gravedad fluye sobre la superficie del terreno sin infiltrarse en el suelo.	6	(Lopes et al., 2022; Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco, 2020; Phetprayoon & Sarapirome, 2012; S. Wang et al., 2022; Wu et al., 2019; Zhang & Huang, 2011)
	ELS	Escorrentía subsuperficial y subterránea	Precipitación que se infiltrar hasta llegar al nivel freático y puede darse con un flujo lateral por gradiente verticales y capas relativamente impermeables.	1	(Lopes et al., 2022)
Hidrológico	P	Precipitación	Precipitación mensual durante el año de estudio.	9	(Alilou et al., 2019; Arriagada et al., 2019; Cheng et al., 2017; Cuellar & Mosquera, 2021; Echeverri Sánchez et al., 2020; Jabbar et al., 2019; Jabbar & Grote, 2019; Ortiz-Rivera & Fuentes-Junco, 2020; Zhang & Huang, 2011)
	ET	Evapotranspiración	Proceso por el cual el agua líquida contenida en la superficie terrestre	1	(Alilou et al., 2019)

Factor	Abreviación	Parámetro	Definición	Frecuencia de uso	Autores y año (referencia)
			regresa a la atmósfera en forma de vapor.		
	DC	Descarga de corriente	Medición de la liberación de agua de la corriente en donde desemboca.	1	(Jabbar & Grote, 2019)

Apéndice C. Listado de expertos que participaron en la consulta para la asignación de pesos a los parámetros de vulnerabilidad.

No	Nombre	Institución	Perfil	Correo
E1	Sebastián Patiño	Universidad Industrial de Santander	Magister en Ingeniería Civil, Ingeniero Civil Universidad industrial de Santander	seelpagu@correo.uis.edu.co
E2	María Victoria Acevedo Ramírez	Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental	Ingeniera Química de la Universidad Industrial de Santander, Especialista en Gestión Ambiental en la Escuela Superior de Administración Pública	mariavictoria_acevedo@hotmail.com
E3	Ana María Buitrago Ramírez	Universidad del Valle	Magister en Gestión Integrada de Recursos Hídricos, Especialista en Implementación de Sistemas de Información Geográfica Administradora Ambiental Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación: Riego para el Desarrollo Agrícola y Seguridad Alimentaria – REGAR	ana.maria.buitrago@correo.univalle.edu.co
E4	Jhon Jairo Márquez Molina	Universidad Industrial de Santander	Doctoren Ciencias Agropecuarias Universidad de Buenos Aires, Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos Universidad Nacional del Litoral, Ingeniero Agrícola Universidad del Valle	johnjmar@uis.edu.co
E5	Octavio Ardila Rueda	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja	Ingeniero Agrónomo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Coordinador nacional de capacitación, Jefe de unidades técnicas y director regional de la federación de Cacaoteros, Santander	octardial@yahoo.es

No	Nombre	Institución	Perfil	Correo
E6	Arley David Celis Vargas	Universidad Industrial de Santander	Magister en Ingeniería Civil, Ingeniero civil Universidad Industrial de Santander	arley211920@hotmail.com
E7	Jonathan Soto	Universidad Industrial de Santander	Doctor en Ingeniería, Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Ingeniero Sanitario y Ambiental Universidad del Valle	jsotopaz@correo.uis.edu.co
E8	Andrés Fernando Echeverri Sánchez	Universidad del Valle	Doctor en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Ingeniero Agrícola Universidad del Valle, Grupo de Investigación: Riego para el Desarrollo Agrícola y Seguridad Alimentaria – REGAR	andres.echeverri@correo.univalle.edu.co
E9	Sandra Rocío Villamizar Amaya	Universidad Industrial de Santander	Doctora en Sistemas Ambientales, Maestría en Sistemas Ambientales Universidad de California, Ingeniera Civil Universidad Industrial de Santander	srvillam@uis.edu.co
E10	Viviana Lucía Gómez Ríos	Universidad Industrial de Santander	Magister en Ingeniería Civil, Ingeniera Civil Universidad Industrial de Santander	viviana.gomez1@correo.uis.edu.co
E11	Héctor Mario Gutiérrez Zapata	Universidad del Valle	Doctor Ing Énfasis Ing Sanitaria y Ambiental (Candidato) Universidad del Valle, Maestría En Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle, Especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambienta Universidad del Valle, Ingeniero Químico Universidad del Valle	hector.gutierrez@correo.univalle.edu.co

Apéndice D. Metodología para el cálculo de los parámetros seleccionados para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno.

Parámetro	Programa	Ruta de comandos
Pendiente del terreno	ArcMap 10.8	1) <i>Arctoolbox, Spatial Analyst Tools, Extraction, Extract by mask (recorte del DEM).</i> 2) <i>Arctoolbox, Spatial Analyst Tools, Surface, Slope.</i> 3) <i>Open the Layer Properties, Symbology, Classified, Classify.</i> 4) <i>Arctoolbox, Spatial Analyst Tools, Reclass, Reclassify.</i> 5) <i>Raster Calculator, “Con (“capa” == “categoría”, “valor normalizado”, Con (“capa” == “categoría”, “valor normalizado”, ..., 0) ...)”.</i>
Precipitación	ArcMap 10.8	1) <i>Open Attribute Table, Add Field "nombre del mes", Editor, Start Editing, Save Edits, Stop Editing.</i> 2) <i>Arctoolbox, Conversion Tools, to Raster, Polygon to Raster.</i>
Textura del suelo	ArcMap 10.8	1) <i>Geoprocessing, Union, Dissolve.</i> 2) <i>Mapa de pendiente: Open the Layer Properties, Symbology, Classified, Classify “>10° y <10°”.</i> 3) <i>Editor, Start Editing, Polygon, Trace (área natural de baja pendiente), Save Edits, Stop Editing.</i> 4) <i>Open Attribute Table, Add Field, Editor, Start Editing, Save Edits, Stop Editing.</i> 5) <i>Arctoolbox, Conversion Tools, to Raster, Polygon to Raster.</i>
Uso de suelo	ArcMap 10.8	1) <i>Geoprocessing, Merge.</i> 2) <i>Open Attribute Table, Add Field, Editor, Start Editing, Save Edits, Stop Editing.</i> 2) <i>Arctoolbox, Conversion Tools, to Raster, Polygon to Raster.</i>
Cobertura	ArcMap 10.8	1) <i>Geoprocessing, Merge.</i> 2) <i>Open Attribute Table, Add Field, Editor, Start Editing, Save Edits, Stop Editing.</i> 2) <i>Arctoolbox, Conversion Tools, to Raster, Polygon to Raster.</i>
Tasa de aplicación de fertilizante	ArcMap 10.8	1) <i>Arctoolbox, Analysis Tools, Overlay, Erase.</i> 2) <i>Open Catalog, New, Folder, Data, Export Data to New Folder, New, File Geodatabase, New, Feature Dataset, New, Parcel Fabric, Customize, Toolbars, Parcel Editor, Start Editing, Control, New Parcel.</i> 3) <i>Open Parcel Explorer, Parcel Division, By proportional area, Save and Finish.</i> 4) <i>Open Attribute Table, Add Field "nombre del mes", Editor, Start Editing, Save Edits, Stop Editing.</i> 5) <i>Arctoolbox, Conversion Tools, to Raster, Polygon to Raster.</i>

Distancia desde la fuente hídrica superficial	ArcMap 10.8	<p>1) <i>Arctoolbox, Spatial Analyst Tools, Distance, Euclidean Distance.</i></p> <p>2) <i>Open the Layer Properties, Symbology, Classified, Classify.</i></p> <p>3) <i>Arctoolbox, Spatial Analyst Tools, Reclass, Reclassify.</i></p> <p>4) <i>Raster Calculator, “Con (“capa” == “categoría”, “valor normalizado”, Con (“capa” == “categoría”, “valor normalizado”, ..., 0) ...)”.</i></p>
Índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno	ArcMap 10.8	<p><i>Raster Calculator,</i></p> <p><i>(“peso_parámetro_1”*“capa_raster_parámetro_1”)</i></p> <p><i>+ (“peso_parámetro_2”*“capa_raster_parámetro_2”)+...</i></p> <p><i>+ (“peso_parámetro_n”*“capa_raster_parámetro_n”),</i></p> <p><i>Environments, Raster Analysis, Cell size, Cell Size Projection Method.</i></p>

Apéndice E. Procedimiento para la generación de los mapas de los parámetros seleccionados para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno.

Parámetro	Procedimiento
Pendiente del terreno	Se realizó un recorte de máscara del DEM al tamaño de la divisoria de aguas que rodea ambas unidades hidrográficas para reducir el peso de la capa. Después, se obtuvo un mapa ráster de pendientes que se reclasificó según las categorías establecidas y que posteriormente dichas categorías pasaron a ser valores normalizados especificados con la herramienta calculadora ráster.
Precipitación	Con base en la capa de divisoria de aguas de ambas unidades hidrográficas, en su tabla de atributos, se crearon nuevos campos con los nombres de cada mes del año, donde se agregaron los datos normalizados de precipitación según el mes. Posteriormente, se convirtió la capa vectorial a una capa ráster cuyos valores de salida fueron los datos normalizados anteriormente agregados. Se repitió el proceso para cada mes.
Textura del suelo	A partir de las categorías de coberturas de Patiño (Patiño, 2021) se tuvieron que realizar agrupaciones de capas de cobertura y uso de suelo de Celis (Celis, 2022) como se presentan en la Tabla 5. De las capas obtenidas se redujo el detalle eliminando manualmente la dispersión de polígonos ya que no era requerido en este parámetro, y se unificó cada una en un solo polígono. Utilizando un mapa de pendientes reclasificado en menor de 10° y mayor a 10° se observó si la zona natural de baja pendiente coincidía con su misma clasificación en el mapa de Patiño (Patiño, 2021) para dibujar un polígono que siguiera el contorno de esta. Por último, se agregó un nuevo campo en la tabla de atributos y desde el editor en dicho campo se le asignó su respectivo valor normalizado, para poder convertir la capa vectorial en capa ráster y que su valor de salida correspondiera a dichos valores.
Uso de suelo	Primero se unieron las capas vectoriales de Celis (Celis, 2022) para cada categoría de uso de suelo tanto de la UHI como de la UHNI. En la tabla de atributos se añadió un nuevo campo y con el editor se agregaron los valores normalizados para cada categoría. A continuación, se convirtió la capa vectorial obtenida de la unión a una capa ráster con valores de salida los valores normalizados agregados anteriormente.
Cobertura	Se siguió el mismo proceso de Uso de suelo.
Tasa de aplicación de fertilizante	De un duplicado de la divisoria de aguas se realizó un conjunto de eliminaciones, donde se borró las intersecciones de las capas de los cultivos obteniendo un polígono donde no se aplica fertilizante. Luego, del polígono de mayor área del cultivo de cebolla de rama, se hizo una división de igual proporción de área (50-50). En la tabla de atributos de cada corte de cultivo se crearon nuevos campos con los nombres de cada mes del año donde se agregaron los valores normalizados para este parámetro, y finalmente se

	convirtió a formato ráster con valores de salida los valores normalizados para cada categoría. Se repitió el proceso para cada mes.
Distancia desde la fuente hídrica superficial	Se convirtió la capa de la divisoria de aguas a ráster, para luego generar buffers o áreas aferentes que rodearan la fuente hídrica superficial y fueran aumentando su extensión en diferentes categorías hasta llegar al límite de la divisoria. Por último, estas categorías se reclasificaron y con la herramienta calculadora ráster pasaron a ser valores normalizados especificados.
Índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa por nitrógeno	En la herramienta calculadora ráster se escribió la ecuación 3, donde los valores normalizados de los parámetros correspondieron a las capas ráster de cada uno de ellos. En el caso de la precipitación y la tasa de aplicación de fertilizante fueron las únicas capas en variar según el mes del índice que se estuviese calculando. Además, se configuro la herramienta para obtener una resolución de 0.05x0.05 m cuyo método de proyección fuera la preservación de la resolución.

Apéndice F. Datos de concentración de nitrógeno total (NT).

Temporada monitoreada	Punto de muestreo	Concentración de NT [mg N/L]
Época seca (Dic 2019-Feb 2020)	Nacimiento del afluyente de la unidad no intervenida	0.32±0.14
	Cierre del afluyente de la unidad no intervenida	0.44±0.05
	Nacimiento del afluyente de la unidad intervenida	0.28±0.2
	Cierre del afluyente de la unidad intervenida	1.71±0.38
Época lluviosa (Sept 2020-Nov 2020)	Nacimiento del afluyente de la unidad no intervenida	0.92±0.27
	Cierre del afluyente de la unidad no intervenida	0.9±0.42
	Nacimiento del afluyente de la unidad intervenida	0.57±0.09
	Cierre del afluyente de la unidad intervenida	1.92±0.25

Nota. La columna tres corresponde al promedio de NT más o menos su desviación estándar. Tomado de *Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems* por D.C. Rey-Romero, I. Domínguez, E. R. Oviedo-Ocaña, 2022, In Environmental Science and Pollution Research.

Apéndice G. Tabla de categorización y normalización de los parámetros.

Parámetro	Categoría	Normalización
Pendiente del terreno [°]	0 - 5°. Muy suave	0.17
	5 - 10°. Suave	0.33
	10 - 15°. Moderado	0.50
	15 - 25°. Moderadamente escarpado	0.67
	25 - 35°. Escarpado	0.83
	Mayor a 35°. Muy escarpado	1
Uso del suelo	Pastoreo extensivo	0.20
	Conservación	0.40
	Zona habitable	0.60
	Barbecho	0.80
	Cultivos	1
Cobertura	Herbazal denso de tierra con arbustos	0.10
	Herbazal denso de tierra no arbolado	0.20
	Plantación de coníferas	0.30
	Bosque denso bajo de tierra firme	0.40
	Afloramientos rocosos	0.50
	Tierras desnudas y degradadas	0.60
	Pastos limpios	0.70
	Papa	0.80
	Cebolla de rama	0.90
	Tejido urbano discontinuo	1
Precipitación [mm/mes]	Mayor a 150 mm/mes	1
	entre 100 y 150 mm/mes	0.75
	entre 50 y 100 mm/mes	0.50
	Menor a 50 mm/mes	0.25
Textura del suelo	Texturas pesadas: arcillosa	0.33

Parámetro	Categoría	Normalización
	Texturas medias: arcillo-limosa, arcillo-arenosa, franca, franco-arcillosa, franco-arcillo-arenosa, franco-arcillo-limosa, franco	0.67
	Texturas livianas: franco-arenosa, arenosa, limosa, franco-limosa	1
Distancia desde la fuente hídrica superficial [m]	Menor a 25 m	1
	entre 25 y 75 m	0.83
	entre 75 y 125 m	0.67
	entre 125 y 175 m	0.50
	entre 175 y 225 m	0.33
	Mayor a 225 m	0.17
Tasa de aplicación de fertilizantes [Ton/ha/mes]	Mayor a 0.5 Ton/ha/mes	1
	entre 0.5 y 0.1 Ton/ha/mes	0.75
	Menor a 0.1 Ton/ha/mes	0.5
	No aplica	0.25

Apéndice H. Matrices de las respuestas individuales de cada experto para los criterios y subcriterios.

Criterios

E1 Sebastian Patiño

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	5	1	1/5	5
C2	3	1	5	3	1	7
C3	1/5	1/5	1	1/5	1/5	1/3
C4	1	1/3	5	1	1	1
C5	5	1	5	1	1	5
C6	1/5	1/7	3	1	1/5	1

Subcriterios

C3	subC3	subC4
subC3	1	1/3
subC4	3	1

E3 Ana María Buitrago Ramírez

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	1/3	1	5	3
C2	3	1	3	5	5	3
C3	3	1/3	1	3	5	5
C4	1	1/5	1/3	1	5	1
C5	1/5	1/5	1/5	1/5	1	3
C6	1/3	1/3	1/5	1	1/3	1

Subcriterios

C3	subC3	subC4
subC3	1	5
subC4	1/5	1

Criterios

E2 María Victoria Acevedo Ramírez

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1	7	5	5	1/7
C2	1	1	9	7	3	1
C3	1/7	1/9	1	1/7	1	1/3
C4	1/5	1/7	7	1	7	5
C5	1/5	1/3	1	1/7	1	1/7
C6	7	1	3	1/5	7	1

Subcriterios

C3	subC3	subC4
subC3	1	1/7
subC4	7	1

E4 John Jairo Márquez Molina

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1
C2	3	1	5	1	1	3
C3	3	1/5	1	1/5	1/3	1/3
C4	3	1	5	1	1	1
C5	3	1	3	1	1	1
C6	1	1/3	3	1	1	1

Subcriterios

C3	subC3	subC4
subC3	1	1
subC4	1	1

E5 Octavio Ardila Rueda

E6 Arley David Celis Vargas

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/5	1/7	1/3	5	1/5
C2	5	1	1/7	1/5	5	7
C3	7	7	1	5	5	7
C4	3	5	1/5	1	5	5
C5	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1
C6	5	1/7	1/7	1/5	1	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	1/7
subC4	7	1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/9	1/7	1/5	1/3	1/5
C2	9	1	3	5	7	5
C3	7	1/3	1	5	7	9
C4	5	1/5	1/5	1	3	5
C5	3	1/7	1/7	1/3	1	1/5
C6	5	1/5	1/9	1/5	5	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	5
subC4	1/5	1

E7 Jonathan Soto

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1	3	1	3	1
C2	1	1	1	3	5	3
C3	1/3	1	1	1/5	1	1/5
C4	1	1/3	5	1	1	5
C5	1/3	1/5	1	1	1	1
C6	1	1/3	5	1/5	1	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	1
subC4	1	1

E8 Andrés Fernando Echeverri
Sánchez

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/5	1/3	1	1/3	5
C2	5	1	5	3	3	7
C3	3	1/5	1	1	1	1/3
C4	1	1/3	1	1	1	5
C5	3	1/3	1	1	1	3
C6	1/5	1/7	3	1/5	1/3	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	3
subC4	1/3	1

E9 Sandra Rocío Villamizar Amaya

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/5	5	1/5	1/3	1
C2	5	1	7	1	1	5
C3	1/5	1/7	1	1/5	1/5	1/5
C4	5	1	5	1	1	3
C5	3	1	5	1	1	5
C6	1	1/5	5	1/3	1/5	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	1
subC4	1	1

E10 Viviana Lucía Gómez Ríos

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/5	1	3	3	7
C2	5	1	5	5	7	7
C3	1	1/5	1	3	3	5
C4	1/3	1/5	1/3	1	1	5
C5	1/3	1/7	1/3	1	1	3
C6	1/7	1/7	1/5	1/5	1/3	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	1/3
subC4	3	1

E11 Héctor Mario Gutiérrez Zapata

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3
C2	3	1	7	5	5	7
C3	5	1/7	1	7	3	7
C4	3	1/5	1/7	1	1/3	1/5
C5	5	1/5	1/3	3	1	7
C6	3	1/7	1/7	5	1/7	1

C3	subC3	subC4
subC3	1	5
subC4	1/5	1

Apéndice I. Resultados del análisis jerárquico de procesos.

Tabla I-1. Matriz de comparación pareada ensamblada con las respuestas obtenidas para los criterios

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	1	1	1	1
C2	3	1	3	2	3	4
C3	1	1/3	1	1	1	1
C4	1	1/2	1	1	2	2
C5	1	1/3	1	1/2	1	2
C6	1	1/4	1	1/2	1/2	1

Nota. C1: criterio 1, topografía de la cuenca. C2: criterio 2, actividades agropecuarias. C3: criterio 3, actividades socioeconómicas. C4: criterio 4, características del suelo. C5: criterio 5, factor hidrológico. C6: criterio 6, morfología de la cuenca.

Tabla I-2. Matriz de comparación pareada ensamblada con las respuestas obtenidas para los subcriterios

C3	subC3	subC4
subC3	1	1
subC4	1	1

Nota. SubC3: subcriterio 3, uso de suelo. SubC4: subcriterio 4, cobertura.

Tabla I-3. Peso ponderado obtenido para los criterios

Criterios	Autovector
C1	0.11
C2	0.39
C3	0.12
C4	0.17
C5	0.12
C6	0.09

Tabla I-4. Tasa de consistencia para los criterios

λ	6.04
m	6
IA	1.24
IC	0.008
CC	0.69%

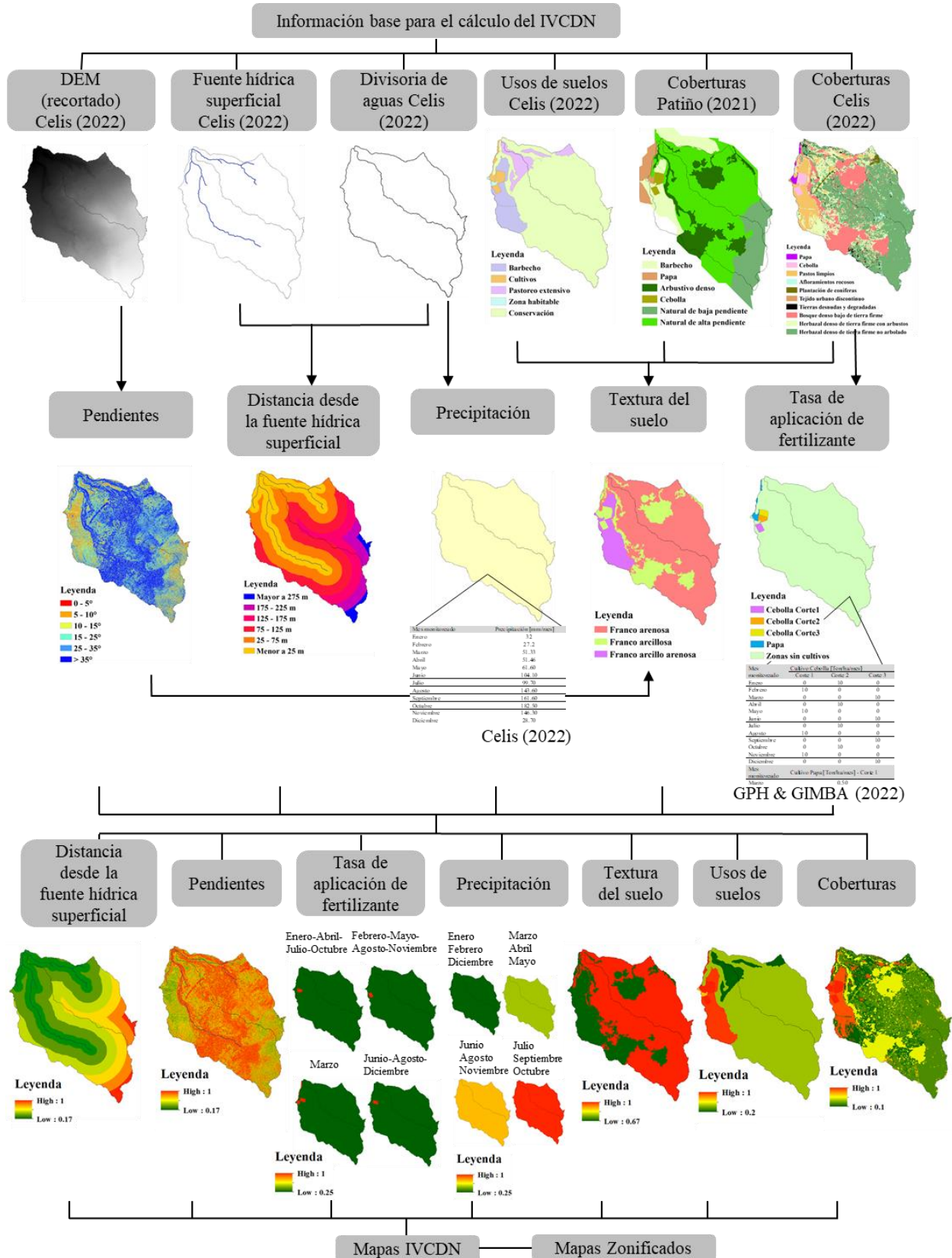
Nota. λ : lambda; medida de la "importancia" total de los criterios en la matriz de comparaciones.

m: orden de la matriz. IA: índice aleatorio. IC: índice de consistencia. CC: tasa de consistencia.

Tabla I-5. Peso ponderado obtenido para los subcriterios 3 y 4

C3	Autovector	Peso ponderado final
subC3	0.50	0.06
subC4	0.50	0.06

Apéndice J. Elementos cartográficos empleados en la creación del índice de vulnerabilidades.



Apéndice K. Resoluciones de los mapas empleados y generados en el software ArcGIS 10.8.

Mapa	Resolución del mapa [m]
Pendiente del terreno	6.8e-07x6.8e-07
Precipitación	2.3e-05x2.03e-05
Tasa de aplicación de fertilizante	0.05x0.05
Textura del suelo	2.3e-07x2.03e-07
Cobertura	0.05x0.05
Uso del suelo	0.03x0.03
Distancia desde la fuente hídrica superficial	1.5x1.5
IVCDN	0.05x0.05
Zonificado	0.05x0.05

Nota. La resolución de un mapa corresponde al tamaño del pixel, es decir, a su base por altura.

Apéndice L. Resultados de las categorías de los parámetros en función de las áreas obtenidas en cada mapa.

Pendiente del terreno	Área total estudiada* (ha)		Área total estudiada (%)			
Muy suave	1.16		3.86			
Suave	2.59		8.63			
Moderado	3.23		10.74			
Moderadamente escarpado	7.40		24.63			
Escarpado	6.02		20.04			
Muy escarpado	9.62		32.03			
Usos de suelo	UHI**		UHNI***		Área total estudiada	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Conservación	14.31	75.70	10.24	92.00	24.55	81.74
Barbecho	2.81	14.88	0.00	0.00	2.81	9.37
Pastoreo extensivo	1.08	5.72	0.89	8.01	1.97	6.57
Cultivos	0.63	3.31	0.00	0.00	0.63	2.08
Zona habitable	0.07	0.40	0.00	0.00	0.07	0.25
Cobertura	UHI		UHNI		Área total estudiada	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	8.19	43.31	6.54	58.76	14.73	49.03
Bosque denso	3.24	17.14	2.33	20.95	5.57	18.56
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	3.56	18.84	1.56	13.98	5.12	17.04
Pastos limpios	2.26	11.93	0.23	2.09	2.49	8.29
Afloramientos rocosos	0.23	1.22	0.20	1.83	0.43	1.45
Cebolla de rama	0.40	2.10	0.00	0.00	0.40	1.32
Tierras desnudas y degradadas	0.19	0.99	0.11	0.96	0.29	0.98
Plantación de coníferas	0.08	0.43	0.16	1.40	0.24	0.79
Papa	0.16	0.87	0.00	0.00	0.16	0.55
Tejido urbano	0.03	0.14	0.00	0.01	0.03	0.09
Textura del suelo	UHI		UHNI		Área total estudiada	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Texturas pesadas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Texturas medias	6.75	35.70	1.89	16.97	8.64	28.76

Texturas livianas	12.16	64.31	9.24	83.03	21.40	71.25
Distancia desde la fuente hídrica superficial	Área total estudiada (ha)		Área total estudiada (%)			
Menor a 25 metros	6.73		35.58			
entre 25 y 75 metros	9.09		48.07			
entre 75 y 125 metros	7.28		38.47			
entre 125 y 175 metros	4.01		21.18			
entre 175 y 225 metros	2.25		11.89			
Mayor a 225 metros	0.70		3.71			

Mes del 2020	Tasa de aplicación de fertilizante (Área total estudiada)					
	Mayor a 0.5 Ton/ha/mes		entre 0.5 y 0.1 Ton/ha/mes		No aplica	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Enero	0.14	0.45	0.00	0.00	29.90	99.55
Febrero	0.13	0.44	0.00	0.00	29.91	99.56
Marzo	0.14	0.45	0.16	0.55	29.74	99
Abril	0.14	0.45	0.00	0.00	29.9	99.55
Mayo	0.13	0.44	0.00	0.00	29.91	99.56
Junio	0.14	0.45	0.00	0.00	29.90	99.55
Julio	0.14	0.45	0.00	0.00	29.9	99.55
Agosto	0.13	0.44	0.00	0.00	29.91	99.56
Septiembre	0.14	0.45	0.00	0.00	29.90	99.55
Octubre	0.14	0.45	0.00	0.00	29.9	99.55
Noviembre	0.13	0.44	0.00	0.00	29.91	99.56
Diciembre	0.14	0.45	0.00	0.00	29.90	99.55

*Área total estudiada: Ambas unidades hidrográficas; la UHI y la UHNI.

**UHI: unidad hidrográfica intervenida.

***UHNI: unidad hidrográfica no intervenida.

Nota. La precipitación ocupa un área constante los doce (12) meses del año (2020) siendo igual al área total de la zona estudiada con un valor de 30.04 ha. En la tasa de aplicación de fertilizante no se presentó ningún valor en la categoría “Menor a 0.1 Ton/ha/mes” siendo las áreas para esta categoría “0” en todos los meses.

Apéndice M. Valores máximos y mínimos del IVCDN para cada mes del año 2020.

IVCDN	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Máximo	0.85	0.81	0.89	0.89	0.85	0.93
Mínimo	0.31	0.31	0.36	0.36	0.36	0.40
IVCDN	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Máximo	0.89	0.90	0.97	0.98	0.90	0.84
Mínimo	0.36	0.40	0.44	0.44	0.40	0.31

Apéndice N. Áreas por categoría de vulnerabilidad para cada mes del año 2020.

Categoría de Vulnerabilidad	Muy baja		Baja		Media		Alta		Muy alta	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Enero	0.00	0.00	4.22	14.12	25.55	85.43	0.14	0.45	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.00	4.22	14.12	25.56	85.44	0.13	0.44	0.00	0.00
Marzo	0.00	0.00	0.35	1.18	29.26	97.84	0.24	0.80	0.06	0.19
Abril	0.00	0.00	0.35	1.18	29.42	98.36	0.09	0.31	0.04	0.14
Mayo	0.00	0.00	0.35	1.18	29.42	98.38	0.10	0.33	0.03	0.11
Junio	0.00	0.00	0.00	0.00	29.70	99.30	0.07	0.24	0.14	0.45
Julio	0.00	0.00	0.35	1.18	29.42	98.36	0.09	0.31	0.04	0.14
Agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	29.70	99.31	0.07	0.24	0.13	0.44
Septiembre	0.00	0.00	0.00	0.00	25.27	84.49	4.50	15.05	0.14	0.45
Octubre	0.00	0.00	0.00	0.00	25.26	84.45	4.51	15.09	0.14	0.45
Noviembre	0.00	0.00	0.00	0.00	29.70	99.31	0.07	0.24	0.13	0.44
Diciembre	0.00	0.00	4.22	14.12	25.55	85.43	0.13	0.45	0.00	0.00