

VULNERABILIDAD DE FUENTES HÍDRICAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO CERRITO A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA AGRÍCOLA

VULNERABILITY OF SURFACE WATER SOURCES OF THE CERRITO RIVER BASIN TO THE AGRICULTURAL DIFFUSE POLLUTION

¹Andrés Echeverri Sánchez ²Norberto Urrutia Cobo
³Sandra Milena Barona Ramírez

^{1,2} PhD. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

³ Est. Maestría. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

¹andres.echeverri@correounivalle.edu.co; ²norberto.urrutia@correounivalle.edu.co;

³barona.sandra@correounivalle.edu.co

RESUMEN

Contextualización: la actividad agrícola tradicional incluye la aplicación de productos químicos para nutrición vegetal, control de plagas, malezas y enfermedades. Una vez aplicados, estos productos se transportan hasta los cuerpos hídricos de manera difusa. Al mismo tiempo, las fuentes hídricas superficiales se aprovechan para consumo humano, agrícola, industrial y recreativo, entre otros, y son el soporte de los ecosistemas acuáticos.

Vacío de conocimiento: existen métodos paramétricos para valorar la vulnerabilidad de las fuentes subterráneas, pero son escasas para las fuentes hídricas superficiales.

Propósito del estudio: el objetivo fue aplicar una propuesta metodológica para valorar las categorías de vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales de la Cuenca del Río

Cerrito a la contaminación difusa de origen agrícola, como instrumento de apoyo a la planificación de acciones de prevención, mitigación y recuperación.

Metodología: en ese sentido, se propone una metodología basada en una técnica de Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para identificar y espacializar la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales de las cuencas tributarias al Río Cauca, en jurisdicción del Departamento del Valle. Este modelo se aplicó a la cuenca del Río Cerrito (Colombia), la cual presenta diversidad de coberturas, pendientes mayores al 12% en su parte alta y agricultura tecnificada en su parte baja.

Resultados y conclusiones: el resultado obtenido fue una superficie *raster* con valores del Índice de vulnerabilidad de las fuentes hídricas

superficiales a la Contaminación Difusa de origen Agroquímico (IVCDA). Esta valoración indicó que la mayor parte de la cuenca (75,3%) presenta vulnerabilidad Media y está asociada principalmente a cultivos de caña de azúcar en zona plana y a pasturas en zona de ladera. Se obtuvieron pequeños focos con vulnerabilidad Alta (0,6%) asociada a cultivos como hortalizas, cítricos y vid. Las zonas boscosas y herbazales se calificaron con vulnerabilidad Baja a Muy baja. La distribución espacial del IVCDA permitió concluir que los principales factores de vulnerabilidad en zona de ladera son la pendiente y la erosión y en zona plana las inadecuadas prácticas agrícolas. En términos de coberturas, se concluyó que las que generan mayor nivel de vulnerabilidad son vid, cítricos y hortalizas.

Palabras clave: análisis multicriterio; contaminación difusa; índice de vulnerabilidad; SIG

ABSTRACT

Contextualization: The traditional agricultural practices include the application of agrochemical products to fertilize and control pests, weeds, and diseases. After the application, those products are transported through diffusion phenomena to water bodies. At the same time, surface water bodies are used as a source of water in human consumption, agriculture, industrial and recreational activities, among others, and are the support of aquatic ecosystems.

Knowledge gap: Although there are several available parametric methods to value the vulnerability of groundwater, methods to surface water bodies are scarce.

Purpose: The main aim was to apply a methodological proposal to value the vulnerability categories of surface water bodies to the diffuse contamination triggered by agricultural

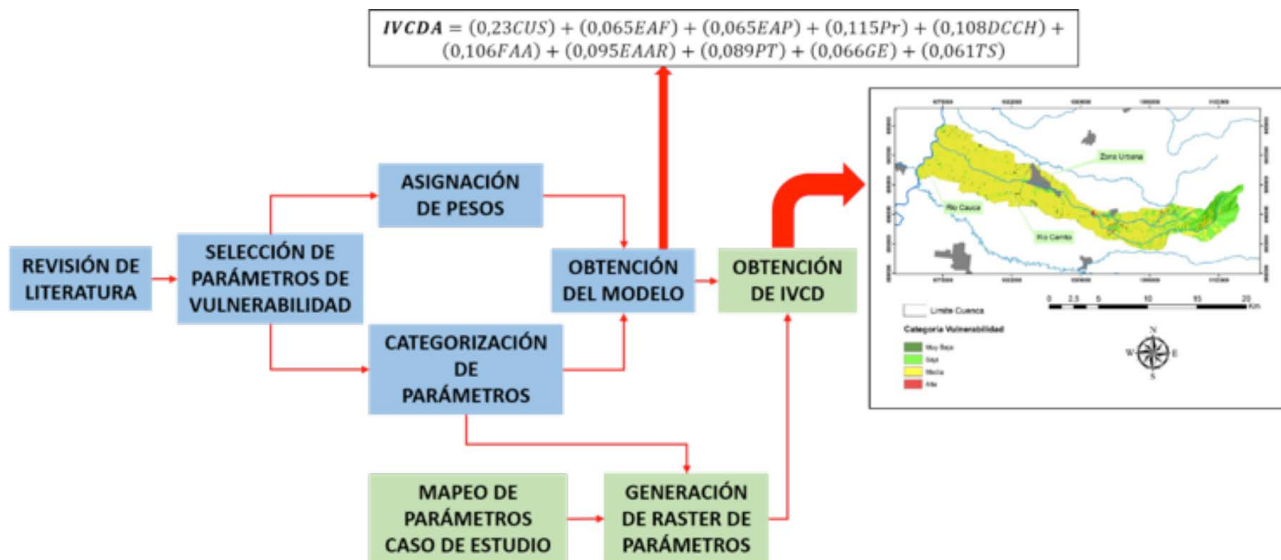
activities in the Cerrito river watershed (Colombia), as an instrument to support the planning of prevention, mitigation and recovering actions.

Material and methods: A methodology based on a multicriteria analysis and geographic information system techniques to identify and to map the vulnerability of surface water bodies in tributary watersheds of Cauca river in Valle del Cauca Department (Colombia) was proposed. This framework was applied to Cerrito river watershed, which showed several land covers, slopes greater than 12% in its upper part and technified agriculture in its lower part.

Results and discussion: The outcome was a raster map of vulnerability index values of surface water bodies to diffuse contamination triggered by agrochemicals (IVCDA, for its original in Spanish). This estimation indicated that a high percentage of watershed area (75.3%) presented a medium vulnerability, mainly associated to sugarcane crops in its floodplain zone and associate to grasslands in its hillslope zone. Moreover, it was obtained small and dispersed areas of high vulnerability (0.6%), associated to vegetable, citric and grape crops. Forest zones and remaining grasslands were categorized with low and very low vulnerability. The spatial distribution of IVCDA permitted to conclude that the main factors causing vulnerability in hillslope zone of Cerrito river watershed were slope and erosion, while at the floodplain zone it was the inadequate agricultural practices. In terms of land cover, it was concluded that vineyard, vegetable and citric crops promoted a major vulnerability level in the watershed.

Keywords: Multicriteria analysis; diffuse contamination; vulnerability index; geographic information system

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

Es ampliamente conocido que la agricultura es la base de la alimentación mundial (FAO, 2018). De la misma manera, se conoce que esta actividad productiva impacta de múltiples maneras y en distintos niveles a los recursos naturales (Goudie, 2013). Los principales impactos asociados a la actividad agrícola son: degradación de suelos; afectación de ecosistemas terrestres y acuáticos; contaminación de aguas superficiales y subterráneas: presión sobre la oferta hídrica natural; y, en algunos casos, disminución de la calidad del aire (Shiferaw, et al, 2005).

El caso específico de la contaminación de aguas superficiales y subterráneas se asocia a la aplicación de agroquímicos en el proceso productivo, tales como fertilizantes y pesticidas, que son transportados por diferentes mecanismos hasta los cuerpos hídricos. En general, la contaminación difusa se refiere a los contaminantes que afectan los cuerpos hídricos (superficiales y subterráneos) y que provienen de fuentes no puntuales bien sea de origen urbano o rural (Ferrier et al. 2005). Cuando los contaminantes se originan en la actividad

agrícola, se denomina “contaminación difusa por agroquímicos” (Custodio, et al., 2012).

En la carta mundial de los suelos (FAO, 2015), se identifica la necesidad de cuidar este recurso y su capacidad productiva e insta a la comunidad científica a desarrollar herramientas de gestión y planificación de la producción en un contexto de sostenibilidad. A nivel nacional, la Resolución No. 549 de marzo de 2017 (Ministerio de Protección Social and Ministerio de Vivienda, 2017) menciona que las actividades agrícolas generan amenazas por el aporte de sustancias como nitratos, fosfatos, sales de potasio y plaguicidas, que alteran la calidad del agua de manera difusa. en esta misma resolución se indica que la industria agrícola ha contribuido al deterioro del agua, estimándose que el 40% de los fertilizantes suministrados a los cultivos llegan a las fuentes hídricas.

La valoración de vulnerabilidad de fuentes subterráneas se basa principalmente en modelos paramétricos. Algunos métodos conocidos son GOD, DRASTIC, SINTACS y EPIK (MAVDT, 2010). En menor proporción se han

propuesto metodologías paramétricas para el caso de fuentes hídricas superficiales, que se localizan indistintamente en zonas planas y de ladera. Estas metodologías se basan en parámetros que tienen relación directa con los mecanismos de transporte de contaminantes desde las áreas productivas hasta los cuerpos hídricos, tales como la Cobertura y uso del suelo, pendiente del terreno, erosión, textura del suelo (Cardona, 2003), cobertura del suelo, pendiente del terreno y precipitación anual (Eimers, et al., 2000), porcentaje de área agrícola en la cuenca, riego, pendiente del terreno y textura del suelo (Cotler Lura, 2011), distancia de actividad agrícola a fuentes hídricas (Giupponi, et al., 1999), pendiente del terreno, tipo de suelo, distancia de origen de contaminantes a red hídrica (Macary, Morin, Probst, & Saudubray, 2014).

Cuando se dispone de información suficiente es posible realizar modelación de la contaminación difusa a través de software como ArcSwat (Arnold et al., 2012). La mayoría de los estudios están enfocados en la predicción de las concentraciones de contaminantes (especialmente nitratos) basados en modelos como SWAT o ArcSWAT que requieren un alto nivel de información de entrada (Grizzetti, et al., 2005); (Lam, et al., 2010); (Panagopoulos, et al., 2011); (Rocha et al., 2015); (Taylor, et al., 2016) and (Liu, et al., 2016)). Sin embargo, existen varias propuestas que, como en el caso anterior, se basan en la integración de técnicas de análisis multicriterio y sistemas de información geográfica (Malczewski & Rinner, 2015; Chandio et al., 2013).

En el suroccidente colombiano existe agricultura en zonas planas (valles interandinos) y en zonas de ladera. En el primer caso se ubica la agricultura tecnificada, como caña de azúcar y arroz; en el segundo, agricultura de menor escala productiva y de subsistencia. Dado que

las condiciones biofísicas, como suelos, pendiente, coberturas y erosión están asociadas al movimiento de los contaminantes, se tendrían diferentes niveles de vulnerabilidad a la contaminación difusa. Por esto, se requiere desarrollar herramientas metodológicas para identificar y valorar los niveles de vulnerabilidad de los cuerpos hídricos a la contaminación difusa de origen agrícola, como punto de partida para iniciar un proceso de gestión del riesgo que incluya, en su etapa inicial, la identificación del riesgo a través del conocimiento de sus componentes vulnerabilidad y amenaza (Narváez, et al. 2009; FAO, 2009; UNISDR, 2016).

La alta variabilidad espacial de características biofísicas en las cuencas del Valle del Cauca, sumadas a la escasez de información, suponen un reto en la generación de un modelo que permita priorizar áreas vulnerables. Sin embargo, la integración de herramientas multicriterio y los sistemas de información geográfica representan una oportunidad para avanzar en este sentido.

Dado este contexto, y en respuesta a la Ley 1523 de 2012 y a la Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo, el objetivo fue aplicar una propuesta metodológica para valorar los niveles de vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales de la Cuenca del Río Cerrito a la contaminación difusa de origen agrícola, como caso representativo de las cuencas tributarias al Río Cauca en jurisdicción del Departamento del Valle del Cauca, Colombia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción zona de estudio

La cuenca del Río Cerrito se localiza en el centro del Departamento del Valle del Cauca, tiene una extensión de 126,4 Km² y se ubica al oriente del Río Cauca (Figura 1). La cuenca se orienta en dirección Oriente-Occidente, su

parte alta y media se localiza sobre las estribaciones de la cordillera central de Colombia, y su parte baja hace parte del valle geográfico del Río Cauca. Las alturas varían entre los 932 y 3909 m.s.n.m. Posteriormente se presentan las coberturas del suelo para el año 2016 (Figura 2; escala 1:25.000) levantadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

Se observa que la cobertura dominante es la caña de azúcar, localizada en la zona plana de la cuenca y en menor proporción en el piedemonte (56,89% del área total de la cuenca). En la zona plana también son importantes

coberturas como hortalizas, sorgo, maíz y arroz (3,7% del área). Coberturas como cítricos, vid y maracuyá tienen pequeños focos en la zona plana y en la parte media de la cuenca (1,6% del área total). Los pastos (naturales y cultivados) se localizan principalmente en la zona media de la cuenca, aunque se presenta un porcentaje importante en la zona alta (14,4% del área). El café con sombrero se presenta en la zona alta de la cuenca y representa solamente el 1,1% del área total. Las zonas con coberturas boscosas se localizan en la zona alta y media de la cuenca con indicios de baja conectividad (10,4% del área de la cuenca).

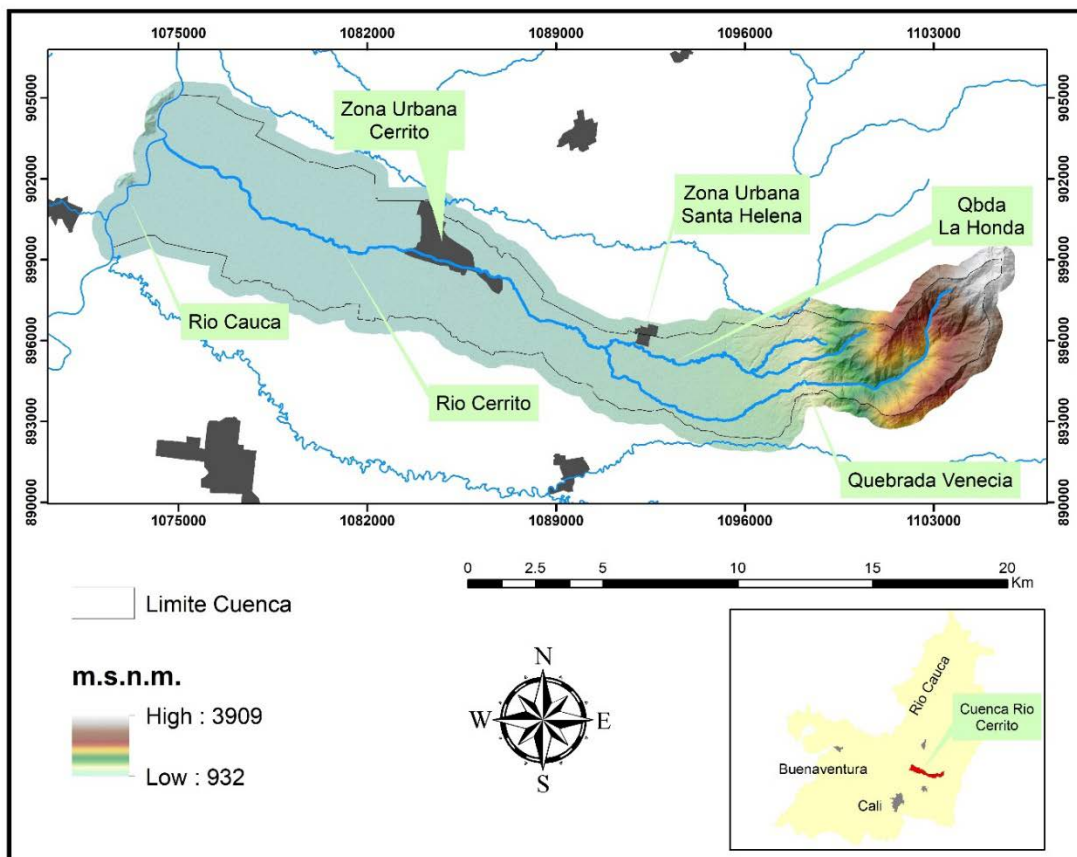


Figura 1. Localización Cuenca Cerrito (Sistema de proyección: Magna Colombia Oeste).

Fuente: autores.

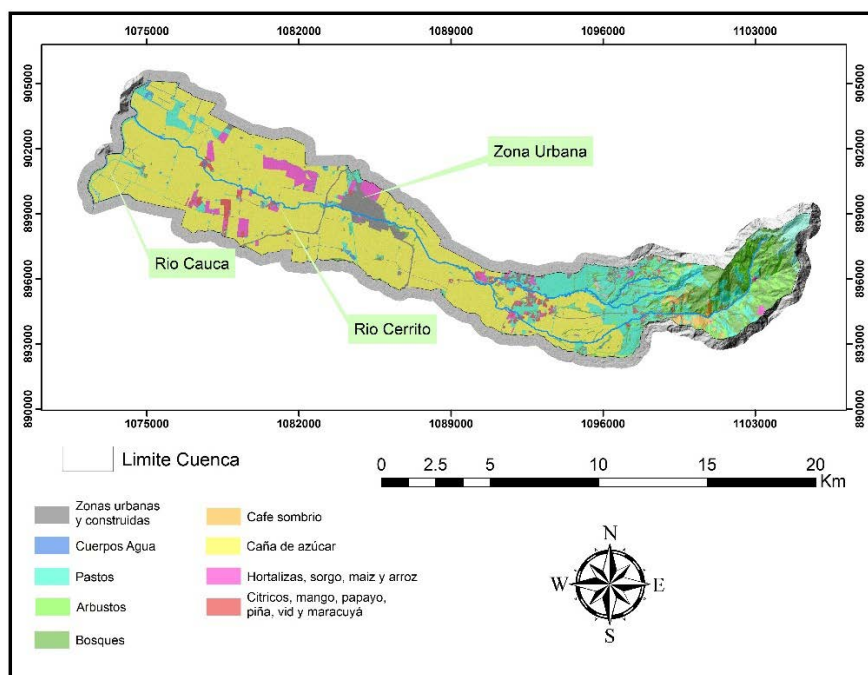


Figura 2. Cobertura del suelo en la Cuenca Cerrito.

Adaptado (CVC, 2018).

La red hídrica principal está compuesta por el Río Cerrito, que nace en la parte más alta de la cuenca y se orienta en dirección Oriente-Occidente hasta su desembocadura en el Río Cauca y las Quebradas La Honda y Venecia, que nacen en la parte media de la cuenca. La Quebrada Venecia tributa a la Quebrada La Honda, que a su vez tributa al Río Cerrito en proximidades del centro poblado Santa Helena.

Enfoque metodológico

El estudio se abordó mediante dos pilares metodológicos: Análisis Multicriterio, específicamente Análisis Jerárquico de Procesos (Saaty, 2008) en ambiente de Sistemas de Información Geográfica, y la Gestión del riesgo de desastres según la concepción de UNISDR (2016).

Construcción del índice

El proceso constó de cuatro fases metodológicas: i) la primera consistió en la conceptualización del fenómeno y la identificación de los parámetros de vulnerabilidad; ii) en la

segunda, se realizó una consulta de expertos para asignar pesos a cada parámetro de vulnerabilidad; iii) en la tercera, se categorizaron y normalizaron dichos parámetros (En el Anexo I se presentan las categorías y valores normalizados de cada parámetro). Los valores cercanos a 1 fueron asignados a las categorías que representan mayor vulnerabilidad; iv) y en la cuarta, se propuso el IVCDA para la zona de estudio. La construcción del índice se basó en el método denominado "Ponderación aditiva simple" (Abdullah & Adawiyah, 2014; Kaliszewski & D. Podkopaev, 2016) que considera un modelo de la forma:

$$IV = \sum_{j=1}^n W_j x P_j \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde,

IV: índice de vulnerabilidad (valores de 0 a 1)

W_j : peso o grado de importancia del factor j

P_j : valor normalizado del parámetro j

Una vez identificados los parámetros de vulnerabilidad y asignados los pesos o grados de importancia se obtuvo la expresión del IVCDA (Ecuación 2):

$$IVCDA=(0,23CUS)+(0,065EAF)+(0,065EAP)+ (0,115Pr)+(0,108DCCH)+(0,106FAA)+ (0,095EAAR)+(0,089PT) \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde,

IVCDA: índice de vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola.

CUS: valor normalizado Cobertura y uso del suelo

EAF: valor normalizado Eficiencia de aplicación de fertilizantes

EAP: valor normalizado Eficiencia de aplicación de pesticidas

Pr: valor normalizado Precipitación

DCCH: valor normalizado Distancia de los cultivos a los cuerpos hídricos

FAA: valor normalizado Fraccionamiento de aplicación de agroquímicos

EAAR: valor normalizado Eficiencia de la aplicación del agua de riego

PT: valor normalizado Pendiente del terreno

GE: valor normalizado Grado de erosión

TS: valor normalizado Textura del suelo

Espacialización de valores normalizados por parámetro

Todos los procesos de análisis espacial se llevaron a cabo en el software ArcGis 10.3. Se definió un tamaño de pixel de 100 m × 100 m (acorde a la escala de la mayor parte de la información) y se usó el Modelo Digital de la Cuenca como máscara para todos los procesos.

La cobertura y uso del suelo y el grado de erosión se obtuvieron del visor avanzado de CVC a escala 1:25.000 (CVC, 2018). Inicialmente, se realizó un proceso de disolución de

propiedades y posteriormente recodificación con los valores del Anexo I. Finalmente, estas capas vectoriales se convirtieron a formato raster con los valores normalizados.

En el caso de la eficiencia y fraccionamiento de aplicación de agroquímicos y de la eficiencia del método de aplicación de agua de riego, se llevó a cabo una caracterización de los productos utilizados en los principales cultivos de la cuenca y se realizaron entrevistas con agricultores de las líneas productivas más representativas de la zona de estudio.

El raster de precipitación anual se obtuvo a partir de 115 estaciones pluviométricas, pluviográficas y climáticas de IDEAM y CVC (IDEAM, 2018 y CVC, 2018) localizadas en la cuenca del Río Cauca (jurisdicción del Departamento del Valle). Se realizó un análisis exploratorio y se interpoló con un método determinístico (*Inverse Distance Weighting*) dada la no normalidad del conjunto de datos y el bajo ajuste de los modelos de semivariograma ($R^2 < 0.5$) (Oliver & Webster, 2014) generado en el software GS+ (Versión de prueba) (Robertson, 2008).

El análisis de distancia de las zonas cultivadas a la red hídrica principal se realizó mediante la aplicación de la herramienta *Euclidean Distance* del ArcGis 10.3. Finalmente, las herramientas *Reclassify* y *Lookup* permitieron generar los rangos y crear un raster con los valores normalizados (Fischer & Getis, 2010).

La pendiente del terreno se obtuvo mediante la aplicación de la herramienta *Slope* de ArcGis 10.3. sobre un modelo digital de elevación facilitado por CVC (2,5 m × 2,5 m); igual que en el caso anterior, las herramientas *Reclassify* y *Lookup* permitieron obtener los rangos y crear un raster con los valores de la Tabla 1.

La información de textura del suelo se obtuvo de acuerdo con la zona de la cuenca. Para la zona plana se consultó el estudio de suelos de (IGAC & CVC, 2004) y para la zona de ladera el estudio realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (IGAC & CVC, 2016).

Obtención del IVCDA

Una vez obtenidas todas las capas raster de los parámetros de vulnerabilidad, se procedió a aplicar la ecuación del IVCDA en la herramienta *Raster Calculator* del ArcGis 10.3; de esta manera se obtuvo un mapa raster de la cuenca del Río Cerrito con valores del IVCDA. Los resultados fueron reclasificados en rangos de valores iguales para obtener zonas homogéneas de vulnerabilidad. Los rangos usados fueron los siguientes: IVCDA entre 0,0 y 0,2 Muy Baja, IVCDA entre 0,2 y 0,4 Baja, IVCDA entre 0,4 y 0,6 Media, IVCDA entre 0,6 y 0,8 Alta y IVCDA entre 0,8 y 1,0 Muy Alta.

Análisis Estadístico

Se realizó una prueba de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) a los datos de precipitación anual (software IBM Corp. Released 2017. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. Armonk, NY: IBM Corp. con el objetivo de decidir el método de interpolación. Se llevó a cabo la validación de los resultados obtenidos en el proceso de interpolación de los datos de precipitación mediante validación cruzada en el software ArcGis 10.6. Adicionalmente, se calculó el indicador denominado Root Mean

Square (RMS) con la extensión Geostatistical Analyst del software ArcGis 10.3. Se calcularon los indicadores de estadística de tendencia central sobre la superficie raster del IVCDA obtenido al final del proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución espacial del IVCDA para la zona de estudio de manera continua en píxeles de 100 × 100 metros se presenta en la Figura 3, producto de la aplicación del modelo para el área de estudio (Ecuación 2). En la Figura 3 se puede apreciar que el máximo valor obtenido para el IVCDA en la zona de estudio es 0,69. Asimismo, es evidente que los mayores valores del IVCDA se localizan al lado y lado de los cauces desde la parte media hasta la parte plana de los cauces principales. Los valores intermedios se distribuyen principalmente en la zona plana, donde coinciden con coberturas como caña de azúcar, hortalizas, sorgo, maíz y arroz y con valores de pendientes planas, erosión ligera, aunque con prácticas ineficientes de aplicación de fertilizantes y pesticidas, así como con bajo fraccionamiento de estos.

Los valores más altos de IVCDA (0,55 a 0,6), presentes en zona de ladera, corresponden a coberturas de pastos en altas pendientes y grados de erosión moderada a severa. Los valores bajos del IVCDA se correlacionan espacialmente con las áreas boscosas y cultivos de café con sombrero y frutales de porte alto. En la Figura 4 se presentan las zonas homogéneas de vulnerabilidad, identificadas a partir de los valores del IVCDA.

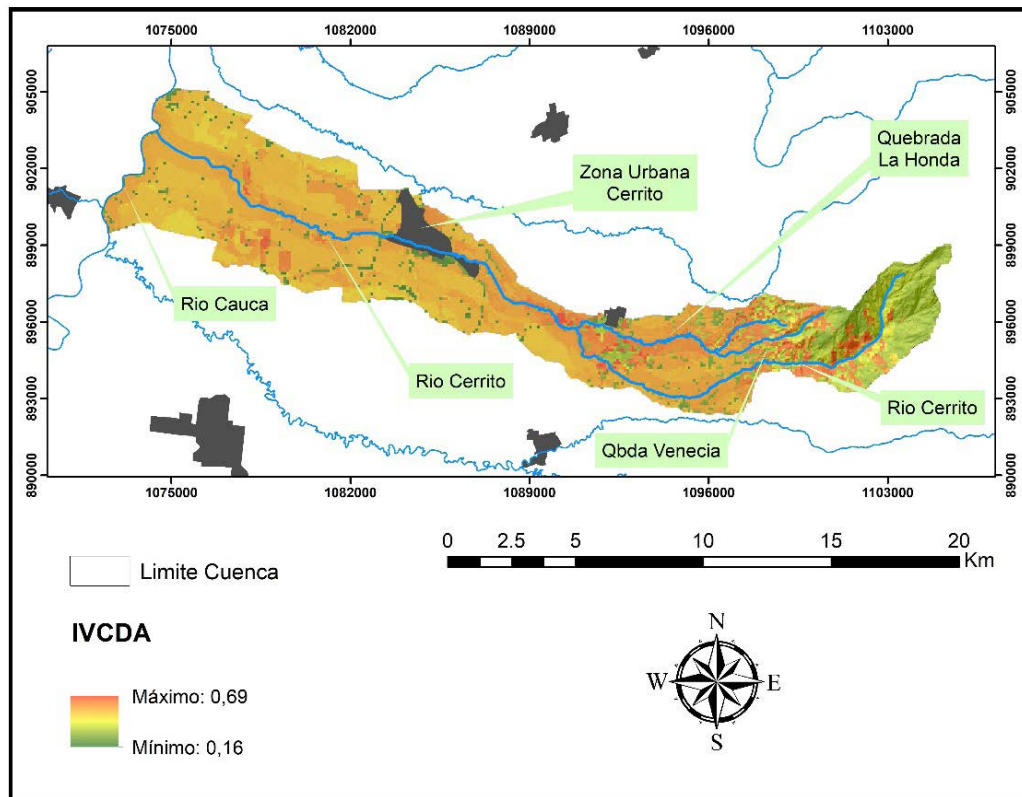


Figura 3. Valores del Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de origen Agrícola (IVCDA).

Fuente: Autores

La zona homogénea de mayor área obtenida fue la de Vulnerabilidad media (75,3% del área total), la zona con Vulnerabilidad baja representa el 21,5% del área de la cuenca. En Vulnerabilidad alta se obtuvieron pequeños focos que suman el 0,6% del área evaluada. En la categoría Muy Baja se obtuvieron zonas dispersas que representan el 2,57% del área. En la (Tabla 1) se presentan los porcentajes de área de cada categoría de vulnerabilidad por cobertura vegetal.

La zona correspondiente a Vulnerabilidad baja se ubica en las zonas altas (bosques, arbustos y herbazales) de la parte alta de la cuenca, guardando coherencia con el uso del suelo. Estas zonas, a pesar de tener pendientes medianas a altas, presentan valores bajos del IVCDA por ser coberturas que no propician el escurrimiento, bajo o nulo nivel de intervención antrópica y bajo grado de erosión.

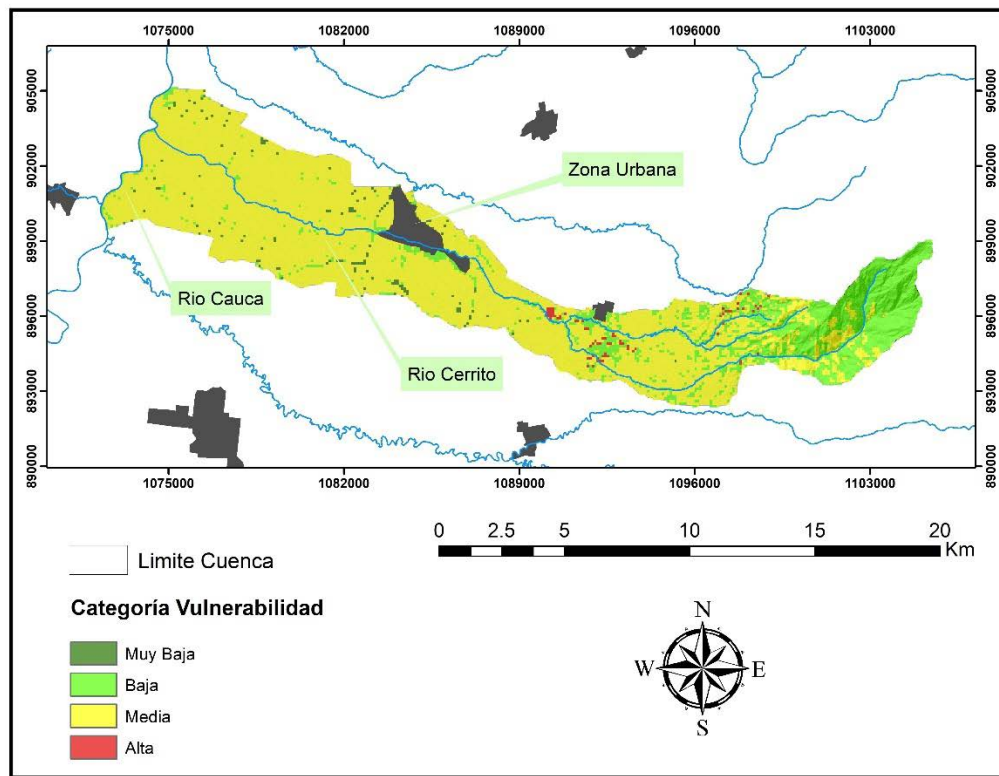


Figura 4. Zonas homogéneas de vulnerabilidad.

Fuente: autores.

Tabla 1. Áreas por nivel de vulnerabilidad para coberturas representativas.

| Cobertura | % Área por categoría de vulnerabilidad | | | | Área cobertura (m ²) | % área Cuenca |
|----------------|--|--------|--------|----------|----------------------------------|---------------|
| | Alta | Media | Baja | Muy baja | | |
| Caña de azúcar | 0,06% | 96,88% | 2,27% | 0,79% | 71923000 | 56,89% |
| Pastos | 0,53% | 76,41% | 22,09% | 0,98% | 18183000 | 14,38% |
| Bosques | 0,26% | 16,05% | 83,41% | 0,28% | 13173000 | 10,42% |
| Arbustos | 0,48% | 18,54% | 80,70% | 0,28% | 6074000 | 4,80% |
| Maíz | 3,68% | 90,66% | 3,62% | 2,04% | 2158000 | 1,71% |
| Herbazal | 0,00% | 0,77% | 99,23% | 0,00% | 1873000 | 1,48% |
| Hortalizas | 7,16% | 79,74% | 10,42% | 2,67% | 1748000 | 1,38% |
| Café sombrío | 0,00% | 81,20% | 18,80% | 0,00% | 1375000 | 1,09% |
| Cítricos | 13,27% | 52,32% | 31,98% | 2,43% | 1329000 | 1,05% |
| Sorgo | 0,00% | 98,56% | 0,19% | 1,25% | 600000 | 0,47% |
| Piña | 0,00% | 99,65% | 0,35% | 0,00% | 330000 | 0,26% |
| Vid | 50,54% | 16,78% | 32,68% | 0,00% | 261000 | 0,21% |
| Arroz | 0,00% | 96,21% | 2,00% | 1,79% | 150000 | 0,12% |

Fuente: autores

Las zonas con Vulnerabilidad media de la zona plana corresponden principalmente a zonas cultivadas con caña de azúcar, piña, sorgo, maíz y arroz, que se localizan sobre zonas sin erosión; pluviosidad entre 1200 a 1500 mm/año, aunque a distancias menores de 500 metros de los cuerpos hídricos; baja eficiencia de aplicación de agroquímicos; y bajo nivel de fraccionamiento de aplicación de estos productos.

Las zonas con Vulnerabilidad media en zona de ladera coinciden espacialmente con cultivos de café y pasturas asociadas a ganadería extensiva. El primer caso se correlaciona con medianas eficiencias de aplicación de agroquímicos, zonas sin erosión o erosión ligera, pendientes moderadas a escarpadas y distancias a cuerpos hídricos menores a 500 m. El segundo caso coincide con áreas que presentan erosión moderada a severa, pendientes mayores al 12% y distancias a cuerpos hídricos superficiales menores a 500 m.

Las zonas con Vulnerabilidad alta coinciden espacialmente con cultivos de hortalizas, principalmente como tomate, cítricos y vid. Los parámetros determinantes de la vulnerabilidad en estas zonas son: baja eficiencia de aplicación de pesticidas y/o fertilizantes y la alta pluviosidad anual (entre 1500 y 2500 mm/año) y escasa distancia a cuerpos hídricos (menor a 500 metros). Estas zonas fueron categorizadas como de Vulnerabilidad alta a pesar de estar localizadas en relieves planos y presentar grados de erosión ligera.

4. CONCLUSIONES

La distribución espacial del IVCDA permite concluir que los principales factores de vulnerabilidad en zona de ladera son la pendiente y la erosión y, en zona plana, prácticas agrícolas inadecuadas.

Los cultivos con métodos de riego de baja eficiencia, baja eficiencia en la aplicación de insumos agrícolas, y localizados a menos de 500 metros de las fuentes hídricas superficiales, generan vulnerabilidad Media a Alta de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa, a pesar de no presentarse erosión y localizarse en pendientes menores al 7%.

Las coberturas que generan mayores porcentajes de área con Vulnerabilidad alta son las asociadas a predios medianos y pequeños, es decir, vid, cítricos y hortalizas. Los parámetros de vulnerabilidad importantes en estos cultivos son la baja eficiencia de aplicación de fertilizantes y pesticidas, así como el bajo fraccionamiento de estos y la poca distancia a las fuentes hídricas superficiales.

El mayor porcentaje de área en Vulnerabilidad media lo genera el cultivo caña de azúcar debido a las bajas eficiencias de aplicación de riego y la poca distancia de las áreas cultivadas a las fuentes hídricas superficiales.

La propuesta metodológica aplicada permitió identificar de manera integral el nivel de vulnerabilidad de las diferentes coberturas de una cuenca hidrográfica y está en función de los parámetros de análisis en diferentes grados de importancia. En este sentido, el modelo representa una herramienta valiosa para la planificación territorial ambiental, dado que permite tener información importante de la primera etapa del proceso de gestión del riesgo. Una siguiente etapa del proceso sería una modelación de la contaminación difusa y su correspondiente calibración. De esta manera sería posible predecir el impacto de las medidas de mitigación aplicadas.

CONTRIBUCION A LA AUTORIA

Primer autor: Conceptualización, metodología, análisis de resultados, escritura borrador original, edición. **Segundo autor:** Revisión de literatura, búsqueda de información cartográfica digital, procesamiento de información cartográfica y revisión. **Tercer autor:** Resumen, análisis de resultados, conclusiones y revisión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan agradecimiento al Sistema Nacional de Regalías y a la Universidad del Valle por el soporte económico e institucional para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Abdullah, L, y Adawiyah, R. (2014). Simple Additive Weighting Methods of Multi criteria Decision Making and Applications: A Decade Review. *International Journal of Information Processing and Management*, 5, (1), 39-49.
- Cardona, A. J. (2003). Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la micocuenca del Río La Soledad, Valle de Ángeles, Honduras. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Chandio, I., Matori, A., WanYusof, K., Talpur, M., Balogun, A. y Lawal, D. (2013). GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3059-3066. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0568-8>
- Cotler, H., y Lura, D. (2011). Contaminación potencial difusa por actividad agrícola. En "Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización." México, DF.
- Custodio, E., Garrido, A., Coletto, C. y Salmoral, G. (2012). The challenges of agricultural diffuse pollution. In L. De Stefano & R. Llamas (Eds.), *Water, Agriculture and the Environment in Spain: can we square the circle?* (pp. 153-164). Madrid, España.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2018). Visor Avanzado. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Recuperado de https://www.geo.cvc.gov.co/visor_avanzado/
- Eimers, J. L., Weaver, J. C., Terziotti, S., y Midgette, R. W. (2000). *Methods of Rating Unsaturated Zone and Watershed Characteristics of Public Water Supplies in North Carolina*. Raleigh.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres. Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres*. Roma: FAO.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). *Carta mundial de los suelos*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/b-i4965s.pdf>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *El estado mundial de la agricultura y alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura*. ISSN 0251-1371. Roma, Italia.
- Ferrier, R. C., D'Arcy, B. J., MacDonald, J., y Aitken, M. (2005). Diffuse pollution - what is the nature of the problem? *Water and Environment Journal*, 19(4), 361-366. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2005.tb00574.x>
- Fischer, M., y Getis, A. (2010). *Handbook of Applied Spatial Analysis Software Tools, Methods and Applications*. Springer. e-ISBN 978-3-642-03647-7. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7>.
- Giupponi, C., Eiselt, B., y Ghetti, P. F. (1999). A multicriteria approach for mapping risks of agricultural pollution for water resources: the venice lagoon watershed case study. *Journal of Environmental Management*, 56 (4), 259-269. <https://doi.org/10.1006/jema.1999.0283>
- Goudie, A. (2013). *The human impact on the natural environment: past, present, and future*. Seventh edition. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. p. 424.
- Grizzetti, B., Bouraoui, F., y De Marsily, G. (2005). Modelling nitrogen pressure in river basins: A comparison between a statistical approach and the physically-based SWAT model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(8-10), 508-517. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.07.005>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). Sistema de Información para la Gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos - DHIME. Consulta y Descarga de datos Hidrometeorológicos. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2004). Levantamiento de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Valle del Cauca. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC & Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, Eds. Cali, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) & Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2016). Levantamiento semi-detallado de suelos Escala 1:25000. Convenio Interadministrativo 4488 IGAC - 087 CVC de 2014. Cali, Colombia.
- Kaliszewski I. y Podkopaev, D. (2016). Simple additive weighting - A metamodel for multiple criteria decision analysis methods. *Expert Systems with Applications*, 54, 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.042>
- Lam, Q. D., Schmalz, B., y Fohrer, N. (2010). Modelling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT model. *Agricultural Water Management*, 97(2), 317-325. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.004>
- Liu, R., Xu, F., Zhang, P., Yu, W., y Men, C. (2016). Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT. *Journal of Hydrology*, 533, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.024>
- Macary, F., Morin, S., Probst, J. L., y Saudubray, F. (2014). A multi-scale method to assess pesticide contamination risks in agricultural watersheds. *Ecological Indicators*, 36, 624-639. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.001>
- MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Vice-ministerio de ambiente. Grupo de Recurso Hídrico. Bogotá. D. C.
- Malczewski, J., y Rinner, C. (2015). Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. eBook ISBN 978-3-540-74757-4. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Ministerio de Protección Social y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 549 DE 2017. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0549 - 2017.pdf>
- Narváez, L., Lavell, A., y Pérez, G. (2009). La Gestión del Riesgo Un enfoque basado en procesos. (COMUNIDAD ANDINA, Ed.) (1 ed). Lima. Recuperado de http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/libros/PROCESOS_ok.pdf
- Oliver, M. A., y Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56 - 69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas, E., y Mimikou, M. (2011). SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. *Ecological Modelling*, 222(19), 3500-3512. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.008>
- Robertson, G.P. (2008). Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software. Plaiwell, Michigan USA. p. 179.
- Rocha, J., Roebeling, P., y Rial-Rivas, M.E. (2015). Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 536, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.038>
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- Shiferaw, B., Bank, W., Freeman, A., Bank, W., y Swinton, S. (2005). Natural resource management in agriculture: methods for assessing economic and environmental impacts. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Natural_Resources_Management_in_Agricult.html?id=CqVoz7LUHfIC&redir_esc=y
- Taylor, S. D., He, Y., y Hiscock, K. M. (2016). Modelling the impacts of agricultural management practices on river water quality in Eastern England. *Journal of Environmental Management*, 180, 147-163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.002>
- UNISDR (2017). Terminology on Disaster Risk Reduction. Retrieved from <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>

Conflicto de Intereses
Los autores declaran no tener
ningún conflicto de intereses



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.