

Potential Infiltration Determination in Areas of Influence of the Zona Bananera Aquifer in Northern Colombia

José-Eduardo Revueltas-Martínez; Teobaldis Mercado-Fernández;
Sonia Aguirre-Forero

Citación: J.-E. Revueltas-Martínez, T. Mercado-Fernández, S. Aguirre-Forero, “Potential Infiltration Determination in Areas of Influence of the Zona Bananera Aquifer in Northern Colombia,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e11427, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11427>

Recibido: Julio 13, 2020; **Aceptado:** Septiembre 14, 2020;

Publicado: Septiembre 15, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Potential Infiltration Determination in Areas of Influence of the Zona Bananera Aquifer in Northern Colombia

José-Eduardo Revueltas-Martínez¹

Teobaldis Mercado-Fernández²

Sonia Aguirre-Forero³

Abstract

Through the implementation of geographic information systems (GIS) and images of the study area obtained by remote sensors, the curve number method (NC) was implemented in this research, in order to determine potential recharge zones in two micro-basins in the aquifer region called Zona Bananera, located in the department of Magdalena in Northern Colombia. Potential infiltration of the area was estimated and the hydrological response for precipitation events with different return periods was evaluated. The predominant hydrological soil groups were found to be A and B, with 77.4% (84115.2 ha) in the Sevilla River micro-basin and 81.6% (7466.1 ha) in La Aguja micro-basin. The Sevilla River micro-basin showed both the best water regulation and enhancement of the infiltration process, evidenced by the existence of low as well as medium values of curve number and potential surface runoff. The highest values of potential runoff were in the middle and lower part of the micro-basins, where there are extensive areas covered with banana crops; indicating that anthropic intervention is a determining factor in the area's hydrological response. Under current conditions, the micro-basins show a minimal risk of erosive processes

¹ Universidad de Córdoba (Montería-Córdoba, Colombia). ORCID: [0000-0003-4139-6104](https://orcid.org/0000-0003-4139-6104)

² Ph. D. Universidad de Córdoba (Montería-Córdoba, Colombia). tmercado@correo.unicordoba.edu.co. ORCID: [0000-0002-3948-8010](https://orcid.org/0000-0002-3948-8010)

³ Ph. D. Universidad de Magdalena (Santa Marta, Colombia). s.aguirre@unimagdalena.edu.co. ORCID: [0000-0002-6975-1940](https://orcid.org/0000-0002-6975-1940)

for rainfall with return periods of less than 5 years, due to runoff occurrence of less than 100 mm. Within the study area, it was found that approximately 3380 hectares show favorable conditions to contribute to the recharge of the Zona Bananera aquifer, making it a strategic conservation area.

Keywords: aquifer; curve number; potential infiltration; recharge zones; remote sensing; runoff.

Determinación de la infiltración potencial en áreas de influencia del acuífero Zona Bananera, Norte de Colombia

Resumen

En la presente investigación, mediante la implementación de sistemas de información geográfica (SIG) e imágenes del territorio obtenidas por sensores remotos, se implementó el método del número de curva (NC), para determinar las zonas potenciales de recarga en dos microcuencas en la región acuífera denominada Zona Bananera, la cual se localiza en el departamento del Magdalena, Norte de Colombia. Se estimó la infiltración potencial del territorio y se evaluó la respuesta hidrológica para eventos de precipitación con diferentes periodos de retorno. Se encontró que los grupos hidrológicos de suelo predominantes fueron A y B, con 77.4 % (84115.2 ha) en la microcuenca río Sevilla y 81.6% (7466.1 ha) en la microcuenca quebrada La Aguja. La microcuenca río Sevilla presentó la mejor regulación hídrica y favorecimiento del proceso de infiltración, lo cual se evidenció con la existencia de bajos y medios valores del número de curva y escurrimientos superficiales potenciales. Los mayores valores de escurrimientos potenciales se localizaron en la parte media y baja de las microcuencas, donde existen extensas áreas con cultivo de Banano; indicando que la intervención antrópica es un factor determinante en la respuesta hidrológica del territorio. En las condiciones actuales, las microcuencas presentan bajo riesgo de procesos erosivos para lluvias con periodos de retorno menores de 5 años, debido a la ocurrencia de escurrimientos menores de 100 mm. En el área de estudio se encontró que aproximadamente 3380

hectáreas presentan condiciones propicias para contribuir a la recarga del acuífero Zona Bananera, convirtiéndola en un área estratégica de conservación.

Palabras clave: acuífero; escurrimiento; infiltración potencial; número de curva; teledetección; zonas de recarga.

Determinação da infiltração potencial nas áreas de influência do aquífero Zona Bananera, Norte da Colômbia

Resumo

Na presente pesquisa, mediante a implementação de sistemas de informação geográfica (SIG) e imagens do território obtidas por sensores remotos, implementou-se o método do número de curva (NC), para determinar as zonas potenciais de recarga em duas microbacias na região aquífera denominada Zona Bananera, a qual localiza-se no departamento de Magdalena, Norte da Colômbia. Estimou-se a infiltração potencial do território e avaliou-se a resposta hidrológica para eventos de precipitação com diferentes períodos de retorno. Encontrou-se que os grupos hidrológicos de solo predominantes foram A e B, com 77.4 % (84115.2 ha) na microbacia rio Sevilla e 81.6% (7466.1 ha) na microbacia arroio La Aguja. A microbacia rio Sevilla apresentou a melhor regulação hídrica e favorecimento do processo de infiltração, o qual evidenciou-se com a existência de baixos e médios valores do número de curva e escoamentos superficiais potenciais. Os maiores valores de escoamentos potenciais localizaram-se na parte média e baixa das microbacias, onde existem extensas áreas com cultivo de Banana; indicando que a intervenção antrópica é um fator determinante na resposta hidrológica do território. Nas condições atuais, as microbacias apresentam baixo risco de processos erosivos para chuvas com períodos de retorno menores de 5 anos, devido à ocorrência de escoamentos menores de 100 mm. Na área de estudo encontrou-se que aproximadamente 3380 hectares apresentam condições propicias para contribuir à recarga do aquífero Zona Bananera, convertendo-a em uma área estratégica de conservação.

Palavras chave: aquífero; escoamento; infiltração potencial; número de curva; teledeteção; zonas de recarga.

I. INTRODUCCIÓN

Los acuíferos son territorios que almacenan y transmiten agua en sus poros y/o fisuras, pudiendo ser usados por el hombre por diferentes métodos para obtener caudales económicamente rentables. El municipio de Zona Bananera se encuentra ubicado sobre la región acuífera de su mismo nombre, donde se extraen anualmente grandes volúmenes de agua, principalmente para el riego de cultivos de Banano y para el abastecimiento público y doméstico mediante pozos profundos y aljibes. Este uso intensivo ha venido ocasionando en esta región, un descenso continuo de los niveles dinámicos de las superficies piezométricas [1].

La regulación del ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas depende de factores climáticos, tipo de suelos, geomorfología del territorio y vegetación. Estas características determinan la cantidad de agua que se escurre sobre la superficie después de una precipitación y la cantidad que se infiltra y posteriormente contribuye a la recarga del agua subterránea [2]. Para determinar la capacidad de infiltración del territorio se utilizan métodos directos como los anillos dobles de infiltración y simuladores de lluvia; y los métodos indirectos, donde se encuentra el modelo empírico del número de curva [3].

El método del número de curva (NC) desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en 1954 es el método más común para estimar la escorrentía superficial. El escurrimiento se puede calcular mediante la ecuación (1) [4].

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (1)$$

Donde la escorrentía (Q) es una función de la lámina de lluvia (P) y el potencial máximo de infiltración (S), expresados en milímetros. La infiltración potencial depende de las condiciones de coberturas y tipo de suelos, estimada con el NC utilizando la ecuación (2). El NC tiene valores que varían de 0 a 100, los cuales indican el porcentaje de afectación del proceso de infiltración.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Los valores de NC reflejan el efecto en la capacidad de infiltración por factores como el tipo de suelo, condiciones de humedad antecedente, cobertura vegetal y prácticas

de uso del suelo. Las tablas que contienen los valores del NC permiten transformar información cualitativa en cuantitativa del comportamiento de la escorrentía, que además puede utilizarse como un indicador de impacto ambiental [5, 6].

A nivel mundial se ha implementado ampliamente el método del NC mediante herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) con diversos fines. A través de estas técnicas Zabaleta et al. [7] analizaron el comportamiento hidrológico de la superficie en la cuenca baja de los afluentes del río Cauca, San Jorge y Magdalena en la llamada región de La Mojana, Norte de Colombia mediante la estimación del NC. Domínguez y Mercado [8] identificaron zonas potenciales de recarga del acuífero de Morroa en la cuenca del Arroyo Grande, Sucre, Colombia; estimando el potencial de infiltración del territorio[9]. Rajasekhar et al. [9] en una zona semiárida al Sur de la india identificaron áreas adecuadas para la construcción de obras de recolección de aguas lluvias calculando el potencial de escurrimiento de la región. Baalousha et al. [10] estimaron el aporte de la lluvia a la recarga del agua subterránea en una zona árida, utilizando un balance hídrico donde el escurrimiento se estimó mediante el método del NC; asimismo Santhanam y Abraham [11] estimaron el aporte de la precipitación a la recarga de agua subterránea en una cuenca de 323 km² en la India mediante el método de balance hídrico. La presente investigación se realizó con el objetivo de identificar zonas promisorias de recarga del agua subterránea en dos microcuencas sobre el acuífero de Zona Bananera, mediante la estimación de la infiltración potencial implementando el método de número de curva, mediante el uso de sistemas de información geográfico y sensores remotos.

II. METODOLOGÍA

El área de estudio se localiza en el municipio de Zona Bananera, Magdalena, Norte de Colombia y corresponde a la microcuenca río Sevilla con extensión de 1086.5 km², perímetro de 172.5 Km y longitud de cauce principal de 75.5 Km; y la microcuenca quebrada La Aguja con extensión de 91.5 km², perímetro de 50.6 Km y longitud de cauce principal de 27.6 Km (Figura 1). La zona de estudio presenta un valor promedio de precipitación anual de 1112.7 mm con variaciones entre 693.3 y

1532 mm, la temperatura presenta valor promedio de 28.1 °C con intervalo de confianza entre 27.3 y 29 °C y la humedad relativa está entre el 78% y 83%. Aproximadamente 290.5 km² de la microcuenca río Sevilla y 32 km² de la microcuenca quebrada La Aguja se interceptan con el acuífero Zona Bananera.

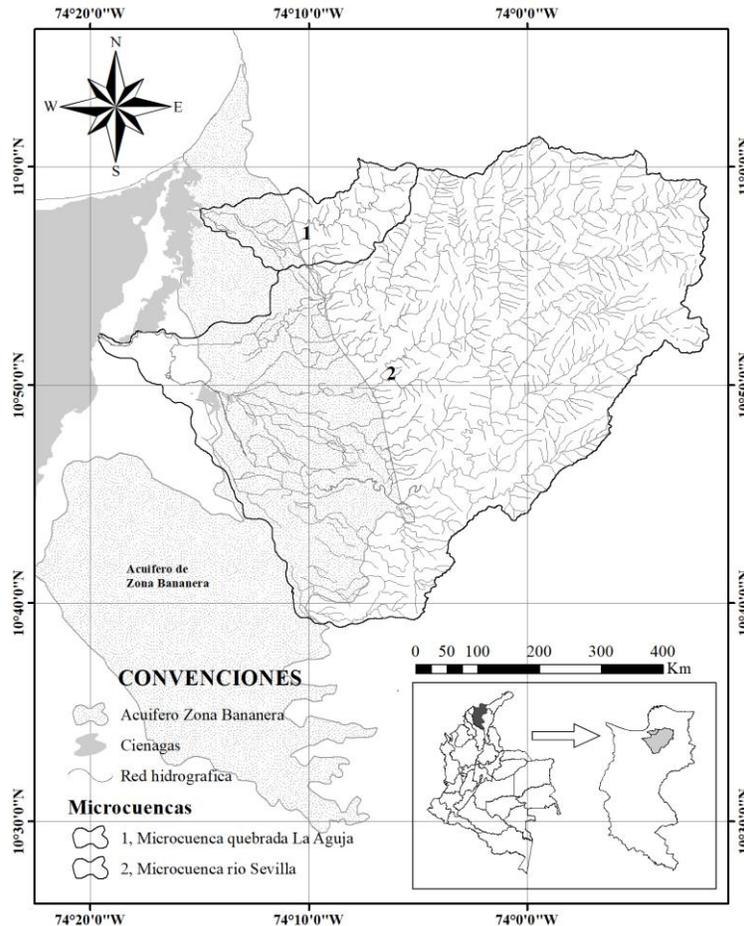


Fig. 1. Área de estudio.

A. Determinación de cobertura vegetal

Se determinó la cobertura del terreno por clasificación digital de imágenes satelitales mediante clasificación supervisada para una imagen Landsat 8 corregida atmosféricamente, tomada el 22 de enero de 2019 y obtenida a través del portal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) que contiene el área de estudio (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), empleando la metodología Corine Land Cover adaptado para Colombia por el Instituto de

Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. La agrupación de clases de coberturas se realizó mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, el cual, con base en la definición de “áreas de entrenamiento” agrupa los píxeles con información estadística similar bajo la categoría o clase definida. Se usa este algoritmo para la clasificación por ser el que otorga mayor solidez estadística a la clasificación [12, 13].

Se determinó el Factor de Índice Óptimo (OIF) para la escogencia de la combinación de tres bandas con mejor separabilidad estadística sobre un total de 120 posibles combinaciones, usando seis bandas (bandas 2 a 7) sobre las cuales se realizó la agrupación. El OIF se determinó mediante la ecuación (3) [14].

$$OIF = \frac{\sum S^2}{\sum r} \quad (3)$$

Donde S^2 es la desviación estándar de cada banda individual y r es el coeficiente de correlación entre las tres bandas a combinar obtenida a partir de la matriz de correlación. La evaluación estadística se realizó mediante matriz de confusión, usando la comparación entre las condiciones reales del terreno y la clasificación realizada, para lo cual se realizó un muestreo aleatorio estratificado garantizando que la clasificación realizada represente adecuadamente los distintos tipos de coberturas [15]. Se calcularon los parámetros de exactitud del productor, la exactitud del usuario, la exactitud global de la clasificación, definido como la relación entre la suma de la diagonal principal de la matriz con el total de puntos muestreados y finalmente se determinó el coeficiente Kappa mediante la ecuación (4) establecida en Chuvieco [12].

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (4)$$

Donde X_{ii} son los valores de la diagonal principal de la matriz, X_{i+} es el total marginal de la fila i , X_{+i} el total marginal de la columna i y N es el total de puntos de control como referencia. El valor mínimo estandarizado para la aceptación del producto final cartografiado obtenido por clasificación digital es de 85 % de confiabilidad o exactitud global. Congalton y Green [15] y Loya et al. [16] sostienen que el coeficiente Kappa es el parámetro estadístico que otorga mayor confiabilidad al producto final clasificado, cuando alcanza un valor mayor a 0.8. Ariza [14] sugiere

la escogencia del número mínimo de puntos de verificación mediante la ecuación (5).

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2} \quad (5)$$

Donde n es el número mínimo de puntos de muestreo, z el factor de confiabilidad de acuerdo con el nivel de confianza en probabilidad, p el mínimo de aciertos, q el número mayor de desaciertos ($q = 1 - p$) y E el error estadístico. Se estimó el número mínimo de puntos a supervisar considerando una probabilidad del 95 %, un z de 1.96 y error de 5 %, con un mínimo de aciertos del 85 % y en consecuencia un 15 % de desaciertos.

B. Grupo hidrológico de suelos (HGS)

La asignación de grupos hidrológicos de suelos se realizó mediante la clasificación textural de los tipos de suelos reportados por Instituto Geográfico Agustín Codazzi, como fuente oficial de información básica, teniendo en cuenta las sugerencias de NRCS [17] y Mongil y Navarro [18], para la asignación de grupos hidrológicos, tomando como referencia las texturas más finas del suelo, por ser la condición más limitante para la infiltración.

C. Asignación de número de curva (NC)

Se estimó el NC realizando el geoprocesamiento de intercepción entre las capas de grupos hidrológicos del suelo GHS y coberturas, para asignar el correspondiente NC de acuerdo con la condición de humedad antecedente de la zona de estudio que es AMC III. A los tipos de coberturas de agua, suelo desnudo y zona urbana se les asignó un NC de 100, suponiendo una afectación total a la infiltración.

D. Respuesta hidrológica del territorio

Para analizar la respuesta hidrológica del territorio se calculó la escurrentía potencial para precipitaciones máximas en 24 horas, con información de la estación Tasajera localizada a 10° 58' 36.5" Latitud Norte y 74° 21' 42.1" Longitud Oeste; para periodos de retornos de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, estimados a través de la distribución de probabilidad de Gumbel [19].

III. RESULTADOS

Los resultados más relevantes obtenidos en las diferentes etapas de esta investigación se presentan a continuación.

A. Cobertura vegetal

La determinación de la cobertura vegetal se realizó para la discriminación de bosque, cultivo permanente, zona pantanosa, pasto, nubes, sombras, tierra desnuda y tejido urbano discontinuo. El factor de índice óptimo de mayor valor correspondió a la combinación RGB 567 con magnitud de 6567.97 sobre la cual se realizó la agrupación de las clases. Con la validación de la clasificación mediante la matriz de confusión se obtuvo una confiabilidad global del 90.38 % y un coeficiente Kappa de 0.8552; aprobándose los resultados obtenidos en la clasificación.

Los resultados de la clasificación supervisada mostraron que el 61 % del territorio de la microcuenca río Sevilla (66624.3 ha) se encuentra cubierto por bosque denso, localizado principalmente en territorio de la Sierra Nevada de Santa Marta, la cual es un área protegida y poco intervenida por la acción antrópica. La parte baja de la microcuenca se encuentra cubierta por bosque de manglar denso, siendo esta la cobertura típica de los humedales costeros. En la parte media de esta microcuenca se concentran principalmente plantaciones bananeras con un área aproximada de 16892.4 ha. En cuanto a la microcuenca quebrada La Aguja, el tipo de cobertura predominante es de pastos con un 41.8 % del territorio, equivalentes a 3823.6 hectáreas; seguido por cultivos permanentes con un 27.1 % (2477.5 ha) y bosque denso con un 25.8% (2362 ha). En la Figura 2 se presenta la distribución espacial de las coberturas identificadas en la zona de estudio.

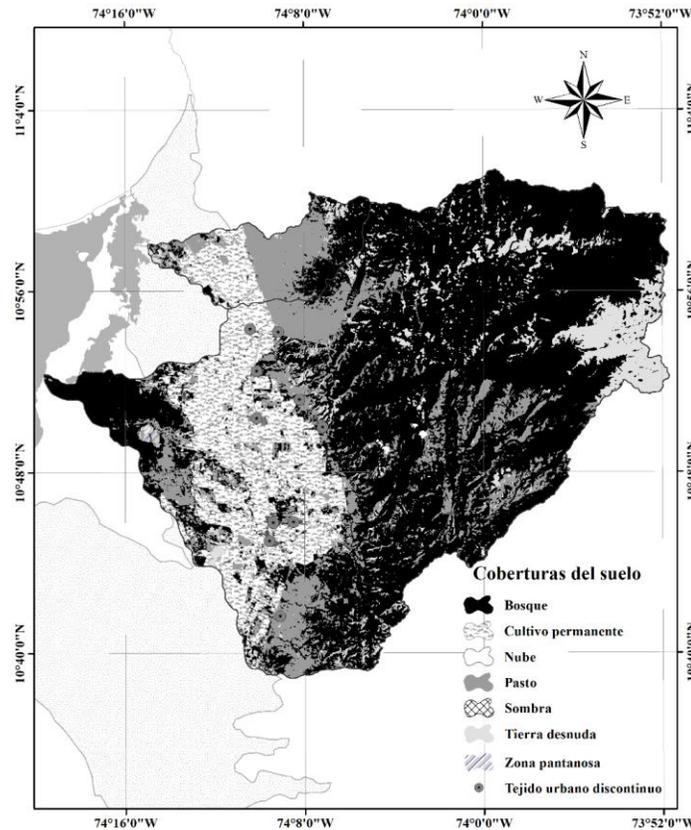


Fig. 2. Distribución espacial de las coberturas en la zona de estudio

B. Grupo hidrológico de suelos (HGS)

En la Tabla 1 se presentan los grupos hidrológicos del suelo (GHS) para la zona de estudio. El 77.4 % (84115.2 ha) de los suelos de la microcuenca río Sevilla y el 81.6 % (7466.1 ha) en la microcuenca quebrada La Aguja se clasificaron como GHS A o B; lo cual indica que existe un bajo potencial de escurrimiento, al favorecer la infiltración.

Tabla 1. Clasificación hidrológica de los suelos (GHS).

Microcuenca	GHS	Área (ha)	Porcentaje (%)	Microcuenca	GHS	Área (ha)	Porcentaje (%)
Rio Sevilla	A	18519.1	17	Quebrada La Aguja	A	664.7	7.3
	B	65596.1	60.4		B	6801.3	74.3
	C	18213.1	16.8		C	1628	17.8
	D	5863	5.4		D	53.9	0.6
	Agua	4554	0.4		Agua	3.6	0
	Total	108646.7	100		Total	9151.6	100

C. Número de curva (NC)

En la Figura 3 se presenta la distribución espacial del NC para la zona de estudio. La microcuenca río Sevilla presenta valores de NC menores de 80 en aproximadamente el 56.1% de su territorio (60868.7 ha), siendo la zona que presenta las mejores condiciones para el proceso de infiltración; como resultado de la interacción entre tipos de coberturas, prácticas de manejo y textura de los suelos. La microcuenca quebrada La Aguja presenta valores de NC entre 81 y 90 en el 51.2 % de su territorio, viéndose afectada la infiltración en más del 80 %, y valores de NC mayores a 90 en el 19.7 % del territorio; debido a que las condiciones físicas del territorio no favorecen la infiltración, potenciando el escurrimiento superficial.

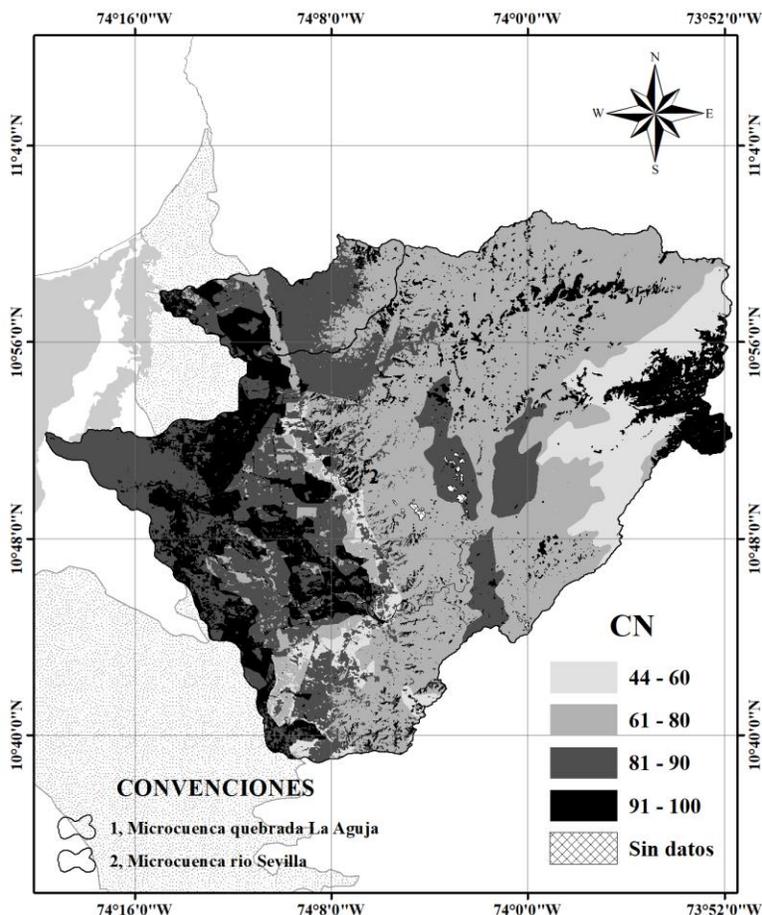


Fig. 3. Distribución espacial del número de curva en el área de estudio.

D. Respuesta hidrológica del territorio

En la Figura 4 se presenta la distribución espacial de los escurrimientos potenciales para precipitaciones máximas en 24 horas con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para periodos de retorno de 2 y 5 años predominan escurrimientos entre 50 y 75 mm en las dos microcuencas objeto de estudio; lo cual indica un bajo riesgo de efecto erosivo en periodos de retornos menores de 5 años. Cada 10 años en la microcuenca quebrada La Aguja pueden ocurrir escurrimientos mayores de 100 mm en el 5,3% de su territorio, mientras que en la microcuenca rio Sevilla un 9.7% de su territorio. Para periodos de retornos de 25, 50 y 100 años se espera la ocurrencia de escurrimientos iguales o mayores a 100 mm en el 67.7%, 71% y 76.6 % respectivamente del territorio de la microcuenca quebrada La Aguja, y en el 33.2%, 43.7% y 48.6 % de la microcuenca rio Sevilla.

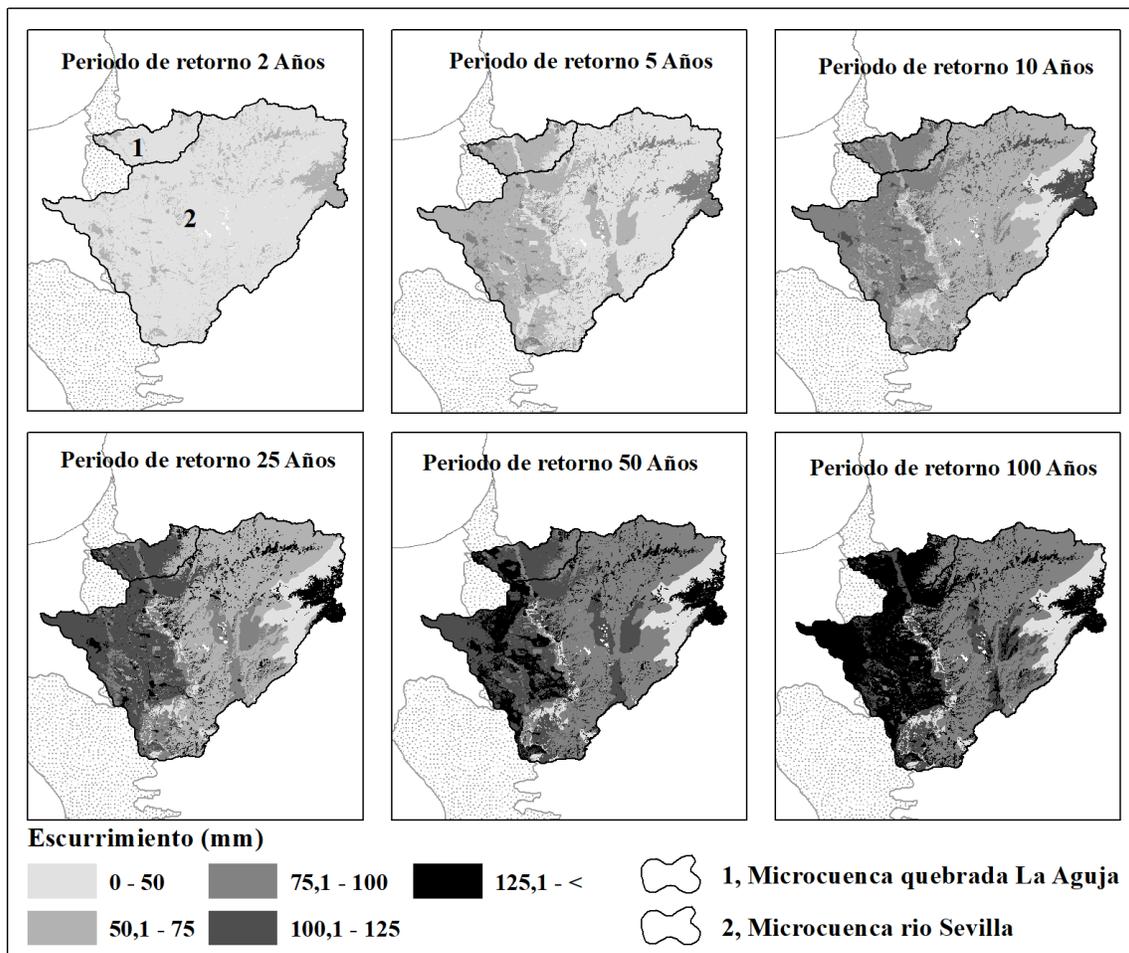


Fig. 4. Distribución espacial de los escurrimientos.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La cobertura de pastos no favorece los procesos de abstracción inicial de la lluvia, generando una pobre respuesta hidrológica del territorio, al presentarse altos valores de escurrimiento; lo cual concuerda con las investigaciones reportadas por [7, 8, 20]. El tipo de cobertura es un factor determinante en el valor del número de curva; aun cuando las condiciones texturales del terreno favorezcan la infiltración, se obtiene mejor respuesta hidrológica por una cobertura de bosques denso que una de pastos, ya que se favorece la abstracción inicial y se aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la superficie, disminuyendo la escorrentía; esto concuerda con los resultados obtenidos por [5, 21, 22, 23].

Considerando un NC de 80 como valor límite para una infiltración potencial aceptable, se encontró que 135 hectáreas en la microcuenca quebrada La Aguja y 3245 hectáreas de la microcuenca río Sevilla presentan condiciones propicias para contribuir a la recarga del acuífero Zona Bananera; por tal motivo estas áreas deben ser objetos de protección. El acuífero se intercepta con la parte baja-media de las microcuencas, coincidiendo con los mayores valores de NC estimados; siendo viable en estas zonas, la implementación de proyectos de restauración forestal, que mejoren la capacidad de infiltración potencial.

Los mayores valores de escurrimientos potenciales se obtuvieron la parte media y baja de las microcuencas, donde se encuentran localizadas las plantaciones bananeras, esto coincide con los resultados obtenidos por Aladejana et al. [24] quienes encontraron que el aumento en el área de tierras cultivadas está fuertemente correlacionado con el aumento en la escorrentía superficial y negativamente con el flujo de agua subterránea. Esto permite inferir que la disminución en la capacidad de infiltración del territorio se debe a la deforestación y a los cambios de uso y coberturas del suelo. En general las microcuencas del área de estudio presentan buena respuesta hidrológica al proceso lluvia-escorrentía; pero de acuerdo con los resultados la microcuenca río Sevilla presentó las mejores condiciones para favorecer la regulación hídrica y reducir el riesgo de erosión.

En el área de estudio la interacción entre los tipos de coberturas, humedad antecedente, prácticas de uso, manejo y textura de suelos; expresados con un valor de número de curva; permitió establecer zonas con atributos para contribuir a la

recarga del acuífero Zona Bananera, siendo posible estimar 135 hectáreas de la microcuenca quebrada La Aguja y 3245 hectáreas de la microcuenca río Sevilla; por tal motivo estas áreas deben ser objeto de protección. La extensa presencia de cultivos permanentes en la parte media y baja de las microcuencas fue un factor determinante en los mayores valores de número de curva obtenidos; indicando que la intervención antrópica condiciona en gran medida la capacidad de infiltración del territorio. Las microcuencas del área de estudio presentan buena respuesta hidrológica al proceso lluvia-escorrentía; pero la microcuenca río Sevilla presentó los mejores resultados, ya que eventos de escorrentía mayores de 100 mm con períodos de retornos de 25, 50 y 100 ocurren en el 33.2 %, 43.7 % y 48.6 % de su territorio, lo cual favorece la regulación hídrica y reduce el riesgo de erosión.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

José-Eduardo Revueltas-Martínez: Curación de datos, Análisis formal, Investigación y Escritura – borrador original.

Teobaldis Mercado-Fernández: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión y Escritura – revisión y edición.

Sonia Aguirre-Forero: Análisis formal, Investigación, Administrador del Proyecto, Escritura – revisión y edición.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación se realizó en el desarrollo del Proyecto “Investigación de los efectos de la variabilidad y el cambio climáticos sobre el recurso hídrico, biodiversidad y actividades agropecuarias en el departamento del Magdalena”.

REFERENCIAS

- [1] Ingeominas, *Atlas de aguas subterráneas de Colombia en escala 1:500.000*, Bogotá D.C, 2003.
- [2] D. Le Maitre, I. M. Kotzee, and P. J. O’Farrell, “Impacts of land-cover change on the water flow regulation ecosystem service : Invasive alien plants , fire and their policy implications,” *Land use policy*, vol. 36, pp. 171-181, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.07.007>
- [3] A. Pulido, *Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos*, Almería: Editorial Universidad de Almería, 2007.
- [4] NRCS, *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55* NRCS, USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55, 1986.

- [5] Á. Díaz, and T. Mercado, "Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35 (2), pp. 200-218, 2017. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10171>
- [6] H. Lian, H. Yenc, J.-C. Huang, Q. Feng, L. Qin, M. A. Bashira, S. Wu, A.-X. Zhu, J. Luo. H. Di, Q. Lei, and H. Liu, "Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China," *Water Research*, vol. 177, pp. e 115767, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>
- [7] A. Zabaleta, T. Mercado, J. L. Marrugo, and J. Feria, "Curve Number (CN) as Pressure Indicator of the Hydrological Condition under Global Warming Scenarios at a Local Scale in La Mojana Region , Colombia," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 11 (29), pp. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i29/129276>
- [8] F. Dominguez, and T. Mercado, "Potential infiltration and morphometry in the Arroyo Grande basin, Sucre Colombia Infiltración potencial y morfometría en la Cuenca Arroyo Grande, Sucre Colombia," *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 96, pp. 21–31, 2020. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191043>
- [9] M. Rajasekhar, S. R. Gadhiraaju, A. Kadam, and V. Bhagat, "Identification of groundwater recharge-based potential rainwater harvesting sites for sustainable development of a semiarid region of southern India using geospatial , AHP , and SCS-CN approach," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, e24, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4996-6>
- [10] H. M. Baalousha, N. Barth, F. H. Ramasomanana, and S. Ahzi, "Groundwater recharge estimation and its spatial distribution in arid regions using GIS : a case study from Qatar karst aquifer," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 4, pp. 1319-1329, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0503-4>
- [11] K. Santhanam, and M. Abraham, "Assessment of surface water potential and groundwater recharge in ungauged watersheds : a case study in Tamil Nadu, India," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, e788, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7972-7>
- [12] E. Chuvieco, *Fundamentos de Teledetección espacial*, Madrid, 1996.
- [13] E. Posada, *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011*, Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2012.
- [14] A. Ariza, *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*, Bogotá D.C., 2013.
- [15] R. Congalton, and K. Green, *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*, New York: CRC Press, 2009. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- [16] J. Loya, S. Aguilar, L. Bravo, and E. Sánchez, "Evaluación espacio-temporal del impacto del crecimiento urbano sobre la cobertura vegetal en la región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos, durante el periodo 1995-2010," *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 9 (1), pp. 124-140, 2013.
- [17] NRCS, *Hydrologic Soil Groups*, National Engineering Handbook, 2009, p. 13.
- [18] J. Mongil, and J. Navarro, "Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid)," *Cuadernos de Investigación Geográfica*, vol. 38 (1), pp. 131-153, 2012. <https://doi.org/10.18172/cig.1279>
- [19] H. J. Niemann, and S. Diburg, "Statistics of extreme climatic actions based on the gumbel probability distributions with an upper limit," *Computers & Structures*, vol. 126, pp. 193-198, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.03.016>

- [20] T. De Moraes, V. Dos Santos, M. Calijuri, and F. Pereira, "Effects on runoff caused by changes in land cover in a Brazilian southeast basin : evaluation by HEC-HMS and HEC-GEOHMS," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, e250, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7430-6>
- [21] A. Dahal, R. Khanal, and B. K. Mishra, "Identification of critical location for enhancing groundwater recharge in Kathmandu Valley, Nepal," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 9, e100253, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100253>
- [22] S. Roy, and A. S. Sahu, "Effectiveness of basin morphometry, remote sensing, and applied geosciences on groundwater recharge potential mapping: a comparative study within a small watershed," *Frontiers of Earth Science*, vol. 10, pp. 274-291, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0558-3>
- [23] K. Ibrahim, and S. A. Ahmed, "Geospatial technology for delineating groundwater potential zones in Doddahalla watershed of Chitradurga district, India," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 19 (2), pp. 223-234, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.002>
- [24] O. O. Aladejana, A. T. Salami, and O. I. O. Adetoro, "Hydrological responses to land degradation in the Northwest Benin Owena River Basin, Nigeria," *Journal of Environmental Management*, vol. 225, pp. 300-312, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.095>