

Evaluación de la localización del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo e identificación de sitios aptos para la disposición final de residuos en los municipios de Mosquera y Bojacá por medio de sistemas de información geográfica
Evaluation of the location of the New Mondoñedo Landfill and identification of suitable sites for the final disposal of waste in the municipalities of Mosquera and Bojacá through geographic information systems

Angie Tatiana Duarte-Casas^{1*} , Carlos Armando Parra-Montero¹ 

¹ Universidad de Cundinamarca, extensión Facatativá, Facultad de Ciencias Agropecuarias, programa de Ingeniería Ambiental, Facatativá, Cundinamarca (Colombia).

* Autora de correspondencia: atduarte@ucundinamarca.edu.co

Recibido: 04/11/2021

Aceptado: 22/12/2021

Como citar este artículo:

Duarte-Casas A.T., Parra-Montero C.A. (2021). Evaluación de la localización del relleno sanitario nuevo Mondoñedo e identificación de sitios aptos para la disposición final de residuos en los municipios de Mosquera y Bojacá por medio de sistemas de información geográfica. *Revista Ciencias Agropecuarias* 7(2): 65-82

Resumen

El presente trabajo se centra en la evaluación actual del Relleno Sanitario de Nuevo Mondoñedo y en la verificación de los sitios adecuados para la ubicación de nuevos rellenos sanitarios en los municipios de Mosquera y Bojacá con la ayuda del análisis y variables cartográficas, acompañado de la normativa ambiental vigente. Para ello, se utilizaron sistemas de información geográfica y el software ArcGIS, que permitieron realizar un análisis multicriterio, seleccionando tres sitios adecuados con áreas mayores a 77 ha en los municipios de Mosquera y Bojacá. Además, se identificó que sólo el 32,05 % del área total del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo es apta para la disposición de residuos sólidos, debido a la presencia de por deslizamientos y fuertemente inclinadas.

Palabras clave: relleno sanitario, superposición ponderada, ArcGIS, SIG, análisis multicriterio.

Abstract

The present work focuses on the current evaluation of the New Mondoñedo Sanitary Landfill and the verification of suitable sites for the location of new sanitary landfills within the municipalities of Mosquera and Bojacá with the help of analysis and cartographic variables, accompanied by the application of the current environmental regulations. For this, geographic information systems and ArcGIS software were used, which allowed a multicriteria analysis to be carried out, selecting three suitable sites with areas greater than 77 hectares in the municipalities of Mosquera and Bojacá, in addition, it was possible to identify that only 32, 05% with respect to the total area of the New Mondoñedo Sanitary Landfill is suitable for the disposal of solid waste.

Keywords: sanitary landfill, weighted overlay, ArcGIS, GIS, multicriteria analysis.

Introducción

Uno de los problemas a los que está expuesto el mundo hoy en día es la producción de residuos, resultado de la evolución del consumismo y del crecimiento demográfico con sus respectivas actividades antrópicas, por lo que se producen diversos tipos de residuos que se clasifican según su composición, estado o peligrosidad. Las características, la manipulación, el tratamiento y el almacenamiento de los mismos dan lugar a la necesidad de establecer áreas y mecanismos adecuados para su disposición final que ayuden a prevenir cualquier deterioro ambiental [1]. En todo el mundo se producen más de 2.400 millones de toneladas de residuos al año y solo se aprovecha el 16 %, lo que provoca un

impacto tanto medioambiental como social [2].

En Colombia, la generación de residuos sólidos derivados de la producción, consumo y acumulación ascendió a 24,85 millones de toneladas para el año 2018, donde el 11,1 % fue reciclado [3]. Considerando lo anterior, surgió la necesidad de crear planes de manejo integral de residuos sólidos en cada departamento a través de las autoridades municipales, mediante el diseño de infraestructura o actividades que incorporen el manejo adecuado de estos residuos, para evitar problemas ambientales, sociales, económicos o culturales.

En los municipios de Bojacá y Mosquera se generaron aproximadamente 2.832 toneladas de residuos al mes para el año 2019 [4]. La disposición final de estos residuos se realiza en el Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo, que actualmente tiene una capacidad licenciada por 8 años a partir de enero de 2019 y una operación contratada por 32 años. Este relleno sanitario cuenta con una infraestructura denominada *lagrima de acceso*, en la entrada cuenta con una báscula con capacidad de 80 toneladas que se utiliza para pesar los camiones que entran y salen del lugar. En la parte delantera, los vehículos descargan todos los residuos sólidos para luego ser repartidos en cada celda y a través de compactación reducen su volumen. También cuenta con una red de captación de biogás, al mismo tiempo que estos residuos están cubiertos con membranas de polietileno para reducir la infiltración de agua, minimizar la contaminación visual y reducir los olores emitidos. Así mismo, cuenta con una estación de recolección y tratamiento de lixiviados que son captados por tuberías.

Además, el “Plan de Manejo Ambiental tiene como objetivo principal la prevención, seguimiento y control de los impactos ambientales que puedan generar las actividades del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo S.A. E.S.P.” [5]. Según el *Diagnóstico sobre las condiciones existentes en el Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo localizado en Mosquera, Cundinamarca*, los vertidos de lixiviados ge-

nerados en el río Balsillas no provienen del relleno sanitario, sino de otro tipo de vertidos contaminantes a lo largo del río, y cumplen con los valores mínimos determinados por la CAR, concluyendo que la gestión de los residuos sólidos y lixiviados es adecuada [6]. Sin embargo, pueden producirse otros tipos de afectaciones, como la generación de polvo, la inestabilidad de las capas del suelo, los daños a la salud, la pérdida de suelo, la erosión, el deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, los impactos paisajísticos, las emisiones de gases, entre otros [7].

Por lo tanto, es necesario seleccionar los lugares apropiados para la disposición final de los residuos en el área de estudio y evaluar la ubicación del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo a través del SIG. Teniendo en cuenta la ubicación de cuerpos de agua, zonas urbanas y turísticas, escuelas, dirección de los vientos, amenaza de movimientos en masa y demás características mencionadas en el Decreto 838 de 2005: “Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones” [8].

Para ello, se utilizan técnicas de análisis espacial, que cuentan con un amplio conjunto de herramientas que permiten analizar eventos u objetos localizados espacial o geográficamente, estos análisis permiten evaluar los datos y relacionarlos entre sí. Estos datos

pueden representarse mediante puntos, líneas o polígonos. Un punto es una ubicación precisa que puede georreferenciarse mediante la latitud y la longitud, por otro lado, una línea son varios puntos en contacto continuo, y un polígono tiene extensión vertical y horizontal [9].

Las herramientas más utilizadas son la distancia, que permite realizar análisis de distancias, como la distancia euclidiana en línea recta; la extracción, que permite extraer un subconjunto de celdas de un ráster por sus atributos; la interpolación, que realiza predicciones a partir de las mediciones de la muestra para todas las ubicaciones de un *dataset* ráster de salida, como IDW (ponderación de distancia inversa); la superposición, que permite aplicar pesos a varias entradas y combinarlas para obtener una variable de salida; y la herramienta de reclasificación, que permite cambiar los valores de las celdas de entrada a valores específicos [10].

Materiales y Métodos

Para evaluar la localización del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo e identificar alternativas para su reubicación, se utilizó como guía el Taller de Análisis y Modelamiento Ambiental [11], el cual se basa en un análisis multicriterio desarrollado a través del software ArcGIS de geoprocésamiento, utilizando variables cartográficas de los municipios de Mosquera y Bojacá con la implementación del Decreto 838 de 2005.

Las variables cartográficas utilizadas por municipio fueron las que se observan en la Tabla 1.

Descripción del área de estudio

La identificación de los sitios óptimos se verificó en los municipios de Mosquera y Bojacá, ubicados en el departamento de Cundinamarca (Figura 1), debido a la existencia del actual relleno sanitario y a las implicaciones de trasladar todo el sitio de disposición a otros municipios.

De una parte, el municipio de Mosquera tiene una superficie de 106,2 km² y generó 2.710 toneladas mensuales de residuos para 2019. Por otra parte, el municipio de Bojacá tiene un área de 102,23 km² y generó 122 toneladas mensuales de residuos para 2019 [27].

El Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo tiene una superficie de 76 ha, de las cuales 17 corresponden al área licenciada para la disposición final de residuos sólidos. Está ubicado en la vía La Mesa - Mosquera a 4°38'44.65 "N y 74°17'8.95 "O en el municipio de Mosquera y el municipio de Bojacá. El relleno sanitario recibe 1.838 toneladas diarias de residuos de 80 municipios, entre ellos Mosquera y Bojacá, y tiene un contrato de concesión de 32 años y 5 meses con la Gobernación de Cundinamarca para disponer de los residuos de estos municipios [30].

Tabla 1.
Variables cartográficas utilizadas en el modelo

Variables	Descripción	Representación
Amenaza_alta_media	Amenazas por deslizamientos	Polígono
Escuelas	Escuelas rurales y urbanas	Punto
Cuerpos_Lenticos	Lagunas, humedales y reservorios	Polígono
CanalDren_S_1	Ríos, quebradas, canales y drenajes sencillos	Línea
CanalDren_D_1	Vallados, ríos, distrito de riego, canales y drenajes dobles	Polígono
LimiteDiss	Límite municipal de Mosquera y Bojacá	Polígono
Suelos	Cobertura del suelo	Polígono
Den_UrbaYRural	Densidad poblacional urbana y rural	Polígono
Zonasturisticas	Perímetro de zonas turísticas	Polígono
Vías	Sistema vial rural y urbano categorizado	Línea
Urbanofn2	Perímetro urbano	Polígono
Relleno_Sanitario	Perímetro del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo	Polígono
VientoSelect	Dirección del viento	Punto
Imagenclip	Imagen satelital	Ráster
Dem	Modelo digital de elevación	Ráster

Nota. Cada variable utilizada en el modelo cuenta con una breve descripción y una representación cartográfica para su identificación, en total se utilizaron aproximadamente 15 variables las cuales fueron geoprocesadas según su necesidad. Fuente: Adaptado de: Amenazas por deslizamientos (12). Escuelas rurales y urbanas (13). Lagunas, Humedales y Reservorios (14). Ríos, Quebradas, Canales y Drenajes sencillos (15). Vallados, Ríos, Distrito de riego, Canales y Drenajes dobles (16). Limite municipal de Mosquera y Bojacá (17). Cobertura del suelo (18). Densidad poblacional urbana y rural (19). Perímetro de zonas turísticas (20). Sistema vial rural y urbano categorizado (21). Perímetro urbano (22). Perímetro del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo (23). Dirección del viento (24). Imagen satelital (25). Modelo digital de elevación (26).

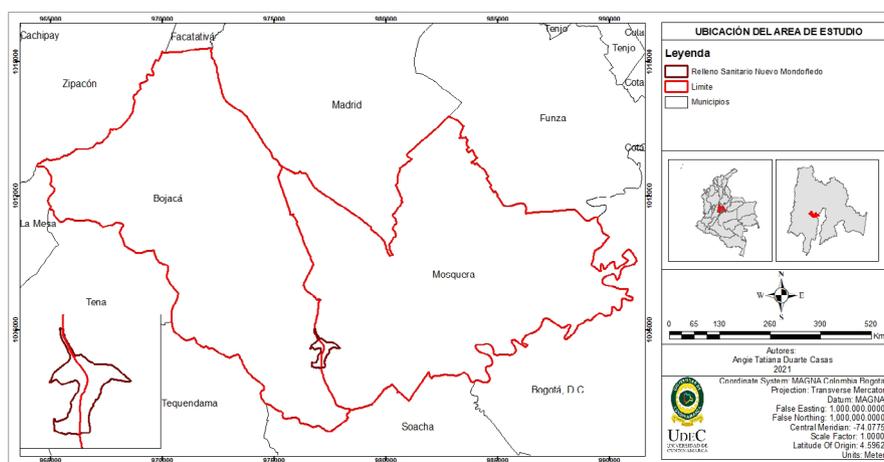


Fig. 1. Polígono de la ubicación del área de estudio (municipio de Mosquera, municipio de Bojacá y Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo)

Nota. El polígono con tonalidad roja corresponde al Municipio de Mosquera y Bojacá, y el polígono con tonalidad café corresponde al Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo. Fuente: Limite municipal de Mosquera y Bojacá (28). Perímetro del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo (29).

Desarrollo del modelo

El modelo fue desarrollado utilizando la aplicación ModelBuilder desarrollada por la compañía ESRI y que está integrada en el software ArcGIS 10.8. Este modelo realiza el geoprocésamiento de las diferentes variables cartográficas que se eligieron (Tabla 1). La reclasificación de cada variable fue de 1 a 10, siendo 1 las áreas menos aptas y 10 las áreas más aptas según las restricciones y distancias mínimas y máximas (m) contempladas en el Decreto 838 de 2005.

Cuerpos lénticos, canales y drenajes dobles y sencillos, escuelas, amenazas por deslizamientos, zonas turísticas y urbanas

El procesamiento de los cuerpos hídricos se realizó mediante las herramientas de *buffer*, *euclidean*, *distance* y *reclassify* (Figura 2). Cada *shape* tenía un campo con la distancia mínima correspondiente al tipo de fuente hídrica de la siguiente manera: ríos y cuerpos lénticos a 200 m, quebradas a 100 m, drenajes y canales a 50 m.

En la Figura 2, las escuelas, las amenazas, las zonas turísticas y las urbanas se procesaron utilizando las herramientas de *buffer*, *euclidean*, *distance* y *reclassify*. Para reclasificar cada *shape*, la distancia mínima fue: escuelas, zonas turísticas y amenazas por deslizamientos de nivel alto y medio a 500 m. La distancia mínima y máxima para las zonas urbanas fue de 1.000 m y 5.500 m, respectivamente.

Densidad poblacional, dirección del viento, visibilidad y curvatura, pendientes, cobertura del suelo y vías

El procesamiento de la densidad poblacional, la dirección del viento, la visibilidad y la curvatura se muestran en la Figura 3. El *shape* de densidad poblacional tenía un campo con aptitudes de 1, 8 y 10, siendo 1 para las hectáreas con más de 5 habitantes, 8 para las hectáreas con 2 a 5 habitantes y 10 para las hectáreas con menos de 5 habitantes; a través de este campo se obtuvo un ráster utilizando la herramienta *Feature to raster*. Por otra parte, el mapa de vientos se obtuvo a partir de IDW y *Create fishnet* para visualizar la dirección, y se utilizó una distancia mínima de 3 km del casco urbano.

Las áreas visibles y no visibles en relación con las zonas turísticas se obtuvieron a partir del *shape* de suelos que contenía un campo con sus respectivas cotas, junto con el modelo digital de elevación y las cotas de las zonas turísticas, utilizando las herramientas *Feature to raster*, *Plus* y *Viewshed*. Igualmente, se utilizó el *Dem* para procesar las curvaturas a través de las herramientas *Filter*, *Curvature* y *Reclassify*, reclasificándolas según su proximidad a cero (los valores negativos son áreas cóncavas, los positivos son áreas convexas y los más cercanos a cero son áreas planas); las áreas convexas son las menos aptas.

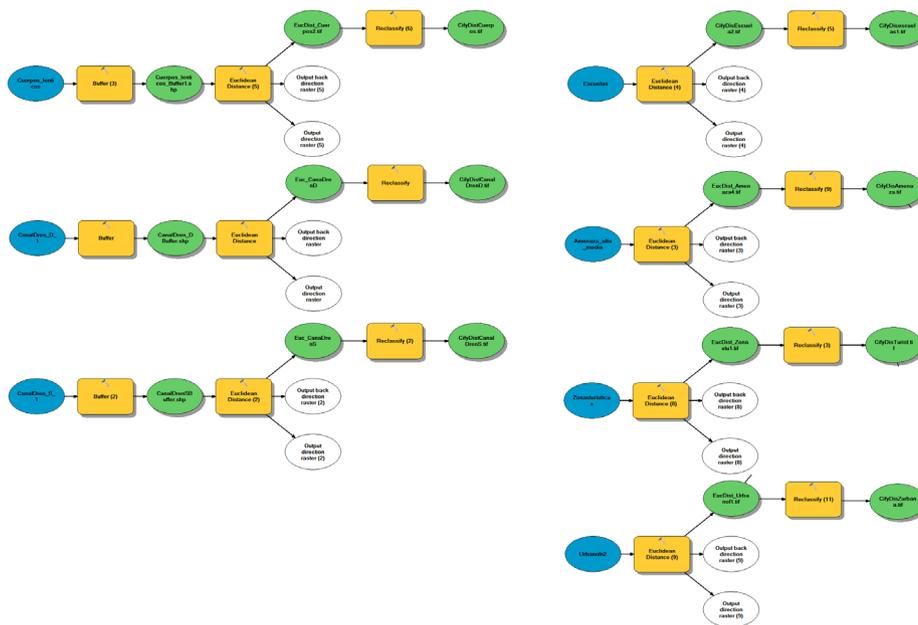


Fig. 2. Procesamiento de cuerpos lénticos, canales y drenajes dobles y sencillos, escuelas, amenazas por deslizamientos, zonas turísticas y urbanas (ModelBuilder)
 Nota. Los círculos azules corresponden a las variables de entrada, los cuadros amarillos a los procesamientos y los círculos verdes a los resultados. Fuente: Elaboración propia.

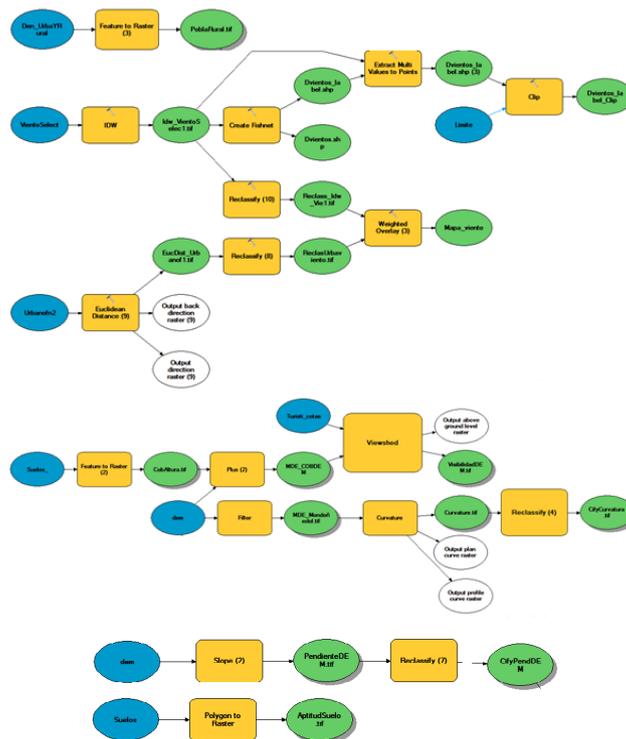


Fig. 3. Procesamiento densidad poblacional, dirección del viento, visibilidad y curvatura, pendientes, cobertura del suelo y vías (ModelBuilder)
 Fuente: elaboración propia.

Las pendientes se obtuvieron del modelo digital de elevación utilizando las herramientas Slope y Reclassify, las cuales fueron reclasificadas como: áreas menos aptas con pendientes mayores al 25 % y más aptas con pendientes menores al 25 %. Por otro lado, el *shape* de suelos contenía un campo llamado "Utilidad" el cual fue reclasificado: 1 para áreas con texturas moderadamente gruesas y 10 para áreas con texturas moderadamente finas, y a través de este campo se obtuvo un archivo ráster (Figura 3). Del mismo modo, las vías se reclasificaron según su tipo: aptas tipo 1, 2, 3 y 4, y menos aptas tipo 5, 6, y caminos o senderos (Figura 8).

Superposición ponderada y evaluación de la superficie de los sitios potenciales

Los resultados del procesamiento de cada variable se volvieron a procesar utilizando la herramienta Weighted overlay, en la que se utilizaron influencias iguales para cada variable restringiendo las zonas turísticas y urbanas, las fuentes hídricas, las escuelas y la cobertura del suelo. Posteriormente, se realizó una superposición ponderada para ambas aptitudes (Aptitud 01 y 02), como se muestra en la Figura 4, con una influencia del 50 % y el 50 %.

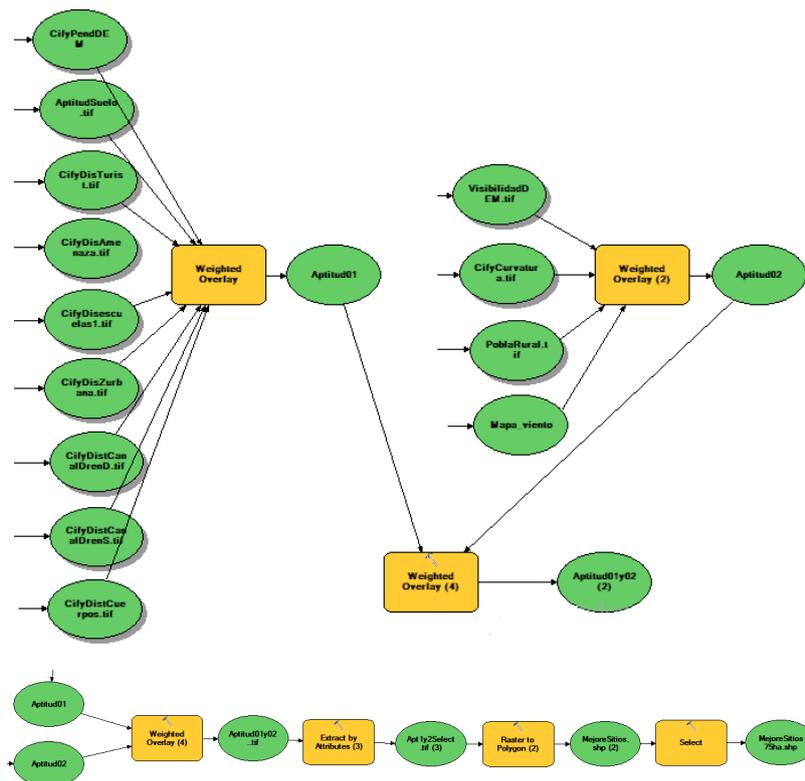


Fig. 4. Superposición ponderada y evaluación de superficie de los sitios potenciales (ModelBuilder)

Fuente: elaboración propia.

La selección de los sitios más aptos se realizó en la herramienta Extract by attributes, extrayendo aptitudes mayores o iguales a 6, seguido de la obtención de unos polígonos y la selección de las áreas con hectáreas mayores o iguales a 76 ha (Figura 4), y utilizando como referencia el área del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo.

Accesibilidad

La accesibilidad a los sitios más adecuados se evaluó utilizando las vías tipo 1, 2, 3 y 4, se seleccionaron las vías más cercanas al casco urbano y al área de disposición final. Posteriormente, se descartaron las áreas que se encuentran sobre las vías a través de la herramienta Editor.

Resultados

Dentro del área de estudio existen lagunas, humedales, reservorios, ríos, quebradas, canales, drenajes sencillos y dobles, vallados y distritos de riego, que se muestran en la Figura 5. El humedal del Gualí, la laguna de La Herrera, el río Subachoque, el río Bojacá, el río Balsillas, el río Bogotá, el río Apulo y las quebradas son algunas de las fuentes hídricas que se encuentran dentro del área y deben mantener una distancia de 50 m a 200 m del relleno sanitario.

Según la Figura 6, se observaron 79 escuelas dentro de estas zonas, además de centros de enseñanza, academias e instituciones edu-

cativas, 11 en el municipio de Bojacá y 68 en el municipio de Mosquera. Estos deben tener una distancia mínima de 500 m. Del mismo modo, las zonas turísticas y las zonas de amenazas por deslizamiento deben tener una distancia mínima de 500 m del lugar de disposición de residuos.

Las zonas turísticas corresponden a alcaldías, iglesias, centros turísticos, parques y hospitales. Por otro lado, las zonas de amenaza por deslizamiento son movimientos en masa con niveles altos y medios que cubren un área de 25,34 km², ubicada principalmente en el municipio de Bojacá. Además, la distancia máxima y mínima para las zonas urbanas es de 5.500 m y 1.000 m, respectivamente, según el Decreto 838 de 2005. Este criterio está asociado a los costos de transporte de los residuos sólidos desde el casco urbano hasta el área de disposición final.

En la Figura 7 se identificó que las zonas urbanas están habitadas por más de 6 personas por hectárea y las zonas rurales por menos de 2 personas por hectárea, las zonas con más de 6 habitantes por hectárea son áreas restringidas. Las direcciones del viento varían de 282, 57° en el noroeste, 138, 14° en la parte central y en el noreste 80, 94°, por otro lado, las áreas no visibles y con una curvatura plana a cóncava son ideales para la ubicación del relleno sanitario.

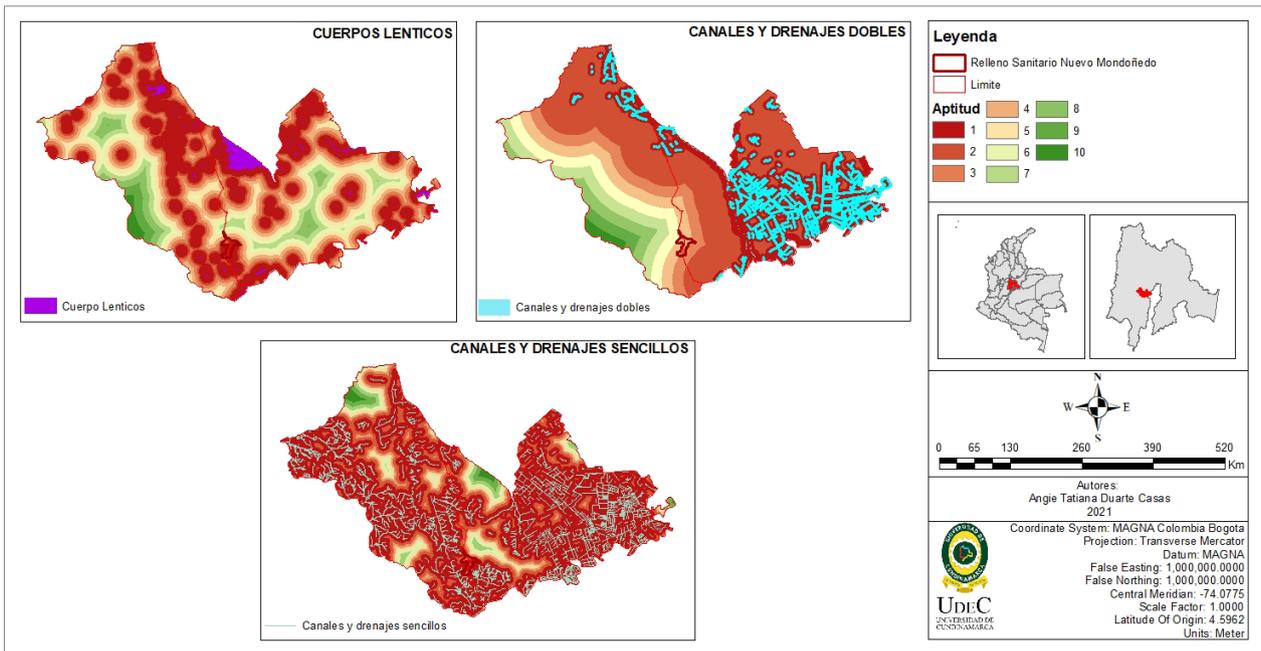


Fig. 5. Cuerpos lénticos, canales y drenajes dobles y sencillos

Nota. La aptitud corresponde a la reclasificación de cada variable de 1 a 10, siendo 1 con tonalidad rojiza a las áreas menos aptas y 10 con tonalidad verde a las áreas más aptas para la ubicación de nuevos relleños sanitarios. Fuente: elaboración propia.

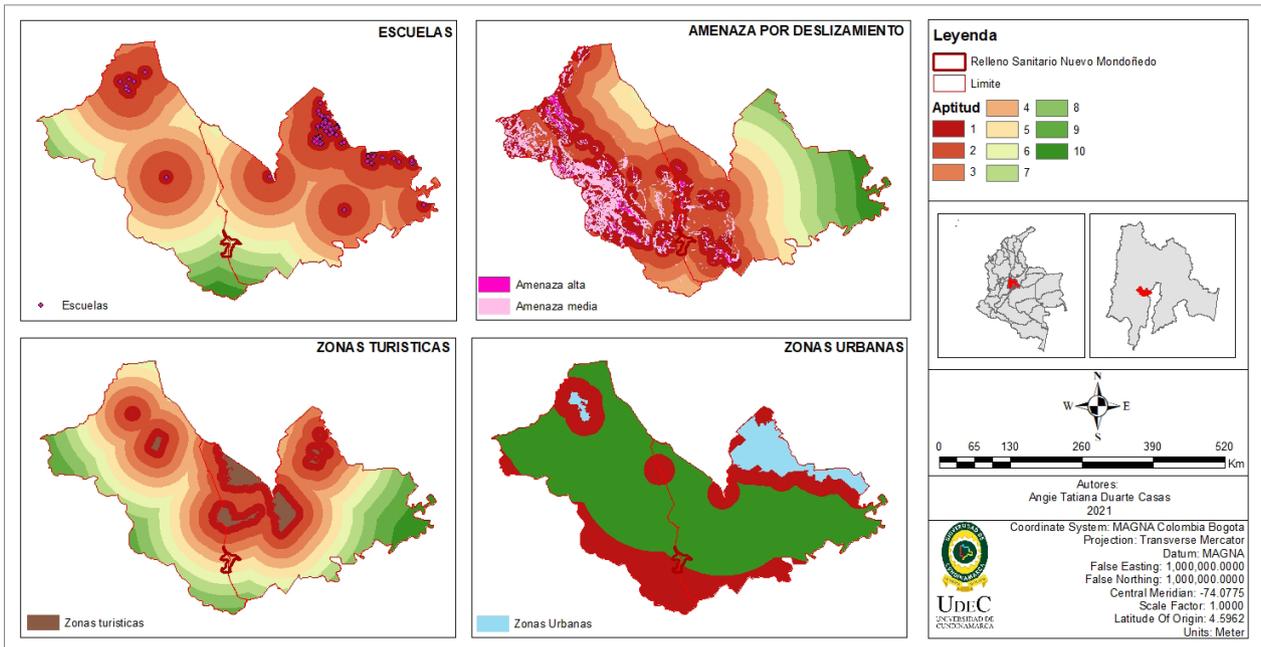


Fig. 6. Escuelas, amenazas por deslizamientos, zonas turísticas, y zonas urbanas
Fuente: elaboración propia.

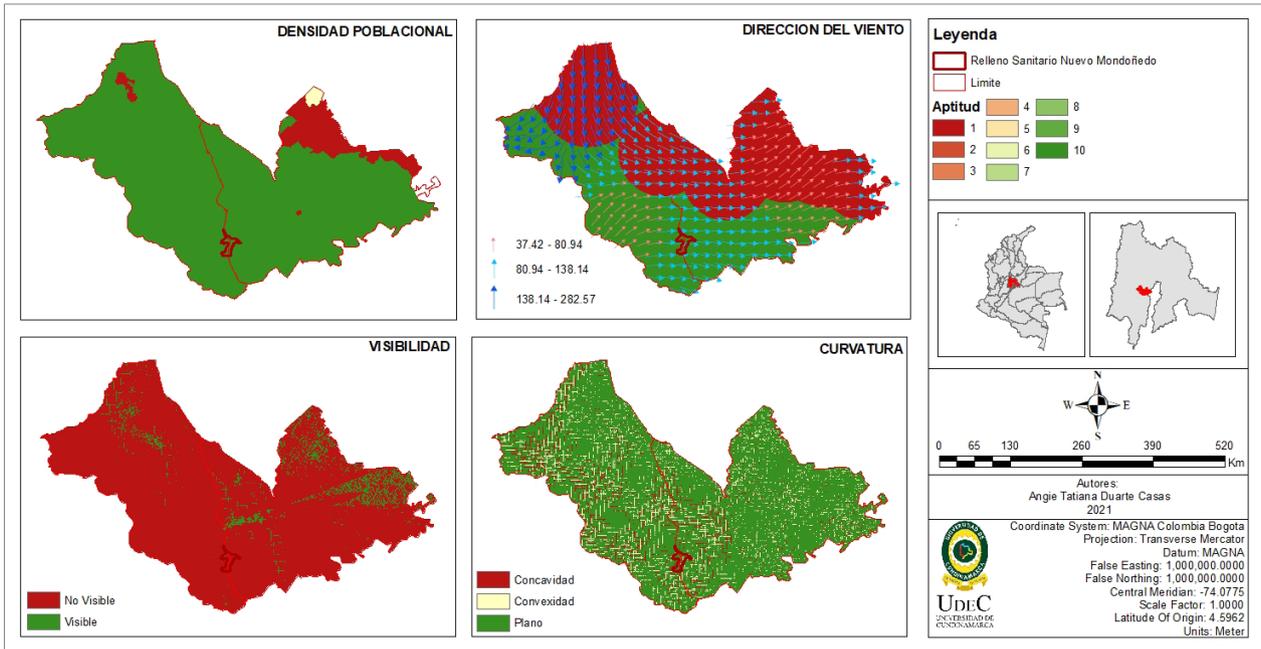


Fig. 7. Densidad poblacional, dirección del viento, visibilidad y curvatura
Fuente: elaboración propia.

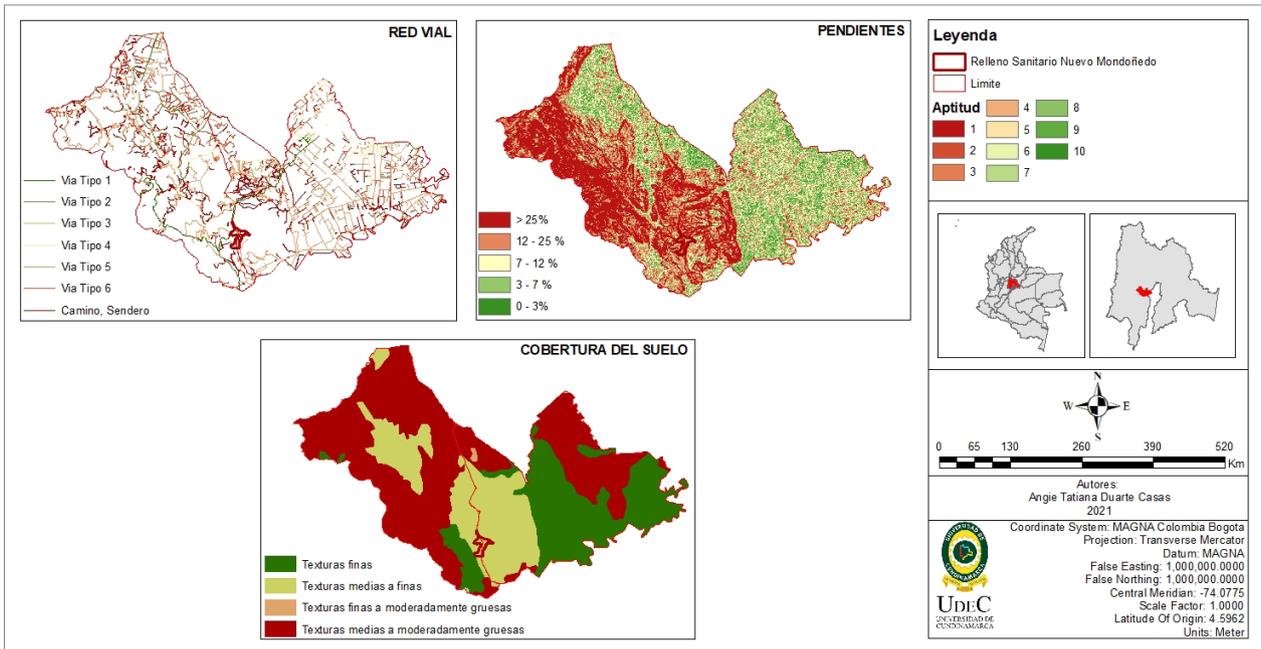


Fig. 8. Red vial, pendientes y cobertura del suelo
Fuente: elaboración propia.

Las redes viales de tipo 1 están pavimentadas, tienen más de dos carriles de más de 5 m de ancho y son transitables todo el año, al igual que las vías de tipo 2, pero sin pavimentar. Por otro lado, las vías de tipo 3, 4 y 5 son carreteras estrechas, estando el tipo 3 pavimentado y el resto sin pavimentar, y por último, las carreteras de tipo 6 y los caminos o senderos sin pavimentar [31]. Como se puede observar en la Figura 8, las vías más relevantes son las de tipo 5, y las de tipo 1 son las más cercanas al Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo.

Por otra parte, las pendientes que cubren una gran área son fuertemente quebradas en el municipio de Bojacá, y planas a moderadamente inclinadas en el municipio de Mosquera. Dentro del polígono del relleno sanitario las pendientes varían de planas a fuertemente quebradas. Con respecto a la cobertura del suelo se observa que las texturas más adecuadas son las finas y medias a finas que corresponden a texturas arcillosas limosas y las menos adecuadas son las moderadamente gruesas o arenosas (Figura 8).

En la superposición ponderada de la aptitud O1 y O2 (Figura 9), se observa que las zonas menos aptas se ubican en la parte superior del área de estudio debido a la presencia de zonas turísticas y urbanas, escuelas, fuentes hídricas, áreas visibles, densidades de población superiores a 5 habitantes por hectárea y dirección del viento hacia el casco urbano. Por otra parte, las áreas con aptitudes de 5

se encuentran en la parte inferior debido a la presencia de pendientes fuertemente inclinadas a moderadamente escarpadas, curvaturas convexas, fuentes hídricas y amenazas por deslizamiento alto.

Finalmente, las zonas más adecuadas se ubican en la parte central y hacia el noroeste del área de estudio, ya que no hay presencia de las variables antes mencionadas, además, la dirección del viento va en sentido contrario al casco urbano, presenta una curvatura plana a cóncava y la densidad de población es menor a 2 habitantes por hectárea, sin embargo, incluye zonas con fuertes pendientes y amenazas por deslizamiento medio.

Existen tres alternativas posibles para la ubicación de un relleno sanitario con áreas superiores a 77 ha (Figura 10). La alternativa 1 tiene un área de 108,20 ha y la alternativa 3 tiene un área de 96,26 ha, ambas están ubicadas cerca del casco urbano del municipio de Bojacá y su accesibilidad corresponde a vías de tipo 2 que pueden ser transitadas durante todo el año. Por otro lado, la alternativa 2 se encuentra en el municipio de Mosquera y tiene un área de 636,86 ha, la vía es de tipo 1 (Madrid-Soacha), y es la más adecuada para el transporte de residuos desde el casco urbano hasta la zona. Con respecto al Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo, solo 25,03 ha del área total del polígono (76 ha) son aptas para la disposición final de los residuos, es decir, el 32,05 %.

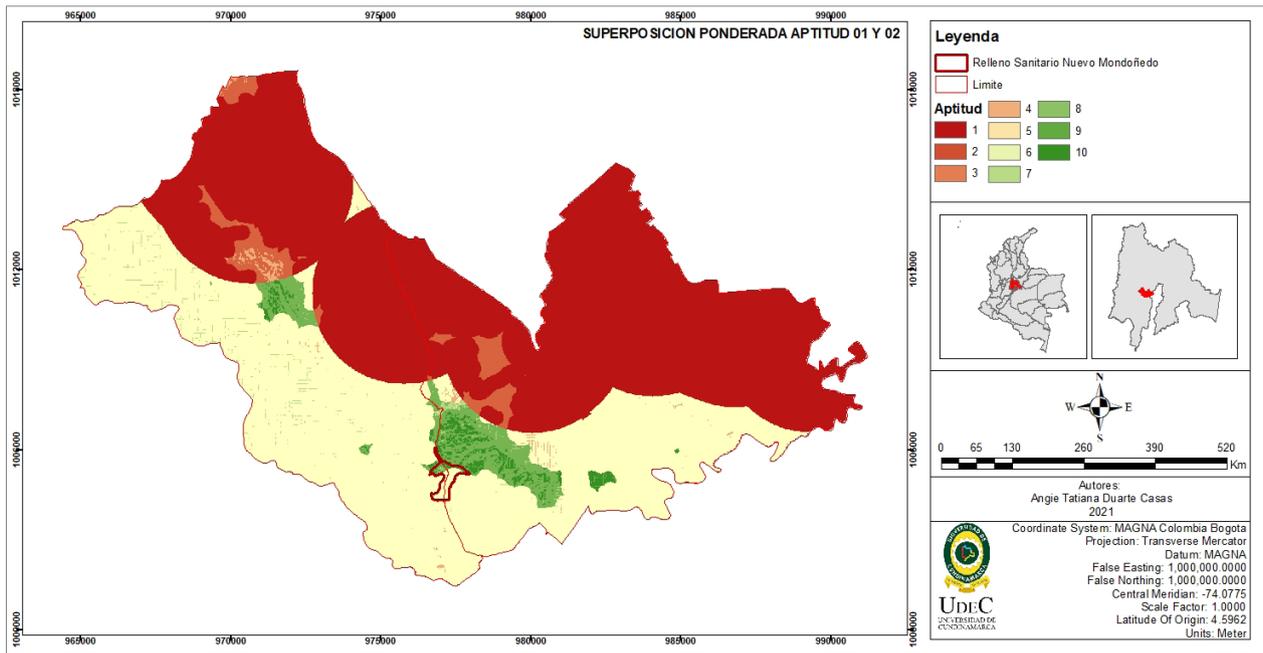


Fig. 9. Superposición ponderada Aptitud 01 y 02
Fuente: elaboración propia.

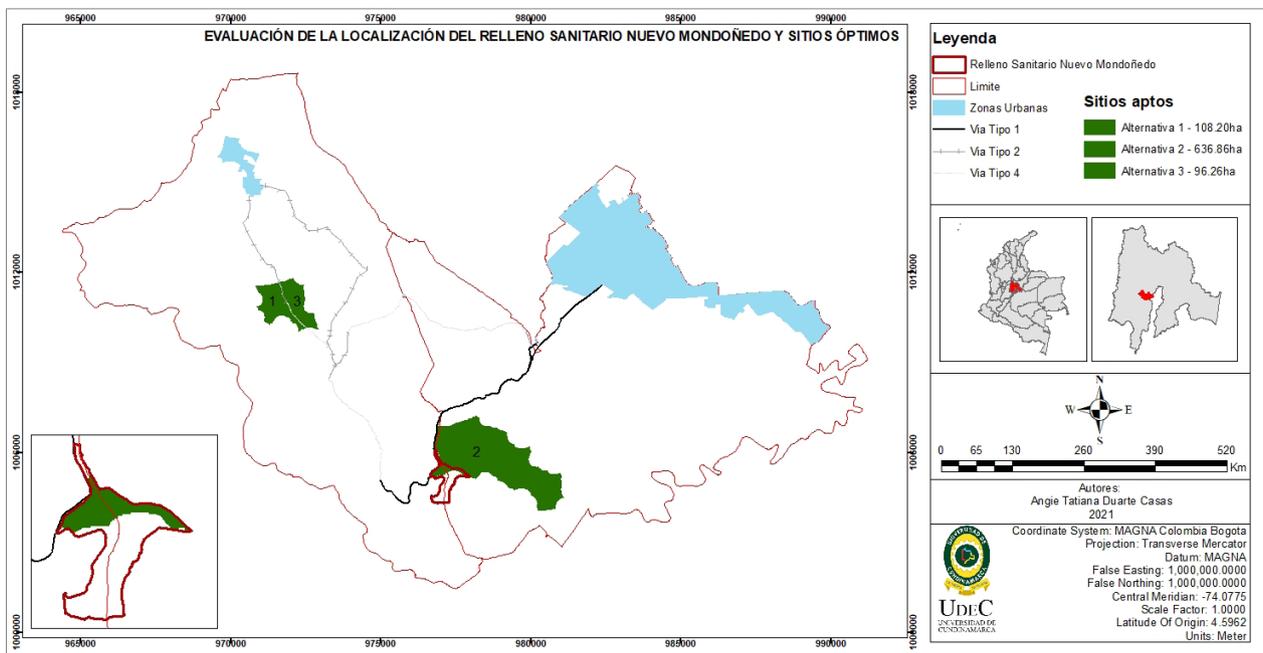


Fig. 10. Evaluación de la localización del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo y sitios aptos mayores a 77 ha
Fuente: elaboración propia.

Discusión

De acuerdo con las fuentes hídricas (Figura 5), se evidencia la existencia de canales y drenajes sencillos en toda el área, cuerpos lénticos localizados en la parte superior, y canales y drenajes dobles localizados principalmente en el municipio de Mosquera. Estos pueden ser afectados por la descomposición de la materia orgánica en los rellenos sanitarios, debido a la producción de lixiviados que pueden filtrarse en el suelo y comprometer las fuentes hídricas [32]. Además, alrededor del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo se encuentran cuerpos lénticos, canales y drenajes sencillos.

Por otro lado, la Figura 6 muestra las escuelas, las amenazas por deslizamientos, las zonas turísticas y las zonas urbanas. Las escuelas, las zonas urbanas y turísticas son áreas restringidas por los problemas que puede causar la instalación de vertederos a cielo abierto cerca de estas zonas, debido al mayor deterioro de las condiciones sanitarias, ambientales y paisajísticas [33]. De igual manera, las amenazas por deslizamiento alta son zonas restringidas porque pueden causar fallas en el terreno, deformación tectónica o licuefacción [34]. Estas zonas se ubican hacia el occidente, principalmente en el municipio de Bojacá.

En cuanto a los resultados de la Figura 7, las zonas rurales tienen una baja densidad po-

blacional en comparación con las zonas urbanas, siendo las más adecuadas debido a la baja presencia de habitantes. Así mismo, las zonas más idóneas según la dirección del viento se encuentran en la parte inferior del área de estudio y se sitúan a 3 km del casco urbano con dirección en sentido contrario al mismo. Esta es una variable importante teniendo en cuenta la generación de emisiones de biogás producidas por la descomposición de los residuos sólidos orgánicos presentes en un relleno sanitario [35], que pueden ser transportados por el viento y generar afectaciones a las zonas urbanas. En cuanto a la visibilidad, las zonas menos aptas son las que son visibles por el impacto paisajístico de las zonas turísticas; por otra parte, el tipo de relleno sanitario a ubicar es un relleno sanitario tipo área, que es adecuado para terrenos relativamente planos [36], según lo observado en la curvatura.

En cuanto a la Figura 8, se obtuvo información sobre la red vial, las pendientes y la cobertura del suelo, donde se observó que las vías más apropiadas son las de tipo 1, 2, 3 y 4, ya que el Decreto 838 de 2005 menciona como vías aptas aquellas que son pavimentadas, sin pavimentar, carretables y de uno o más carriles. También menciona que las pendientes del terreno deben ser de 0,1 % a 25 % y están asociadas a la facilidad de construcción y operación dentro del área de disposición final. Las pendientes más predominantes en la zona son superiores al 25 %

ubicadas en el municipio de Bojacá, lo que indica una facilidad baja, mientras que las pendientes más planas se ubican en el municipio de Mosquera, aumentando la facilidad de construcción y operación. Según la cobertura del suelo, la más adecuada es la de texturas finas y medias a finas o suelos limo-arcillosos, ya que los suelos de grano fino contienen poros muy pequeños que aumentan la compactación y disminuyen la permeabilidad del suelo [37], lo que indica una menor inestabilidad.

Por último, las Figuras 9 y 10 muestran los sitios aptos para la ubicación de un relleno sanitario y la caracterización del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo. En cuanto a los sitios óptimos, las tres alternativas son adecuadas debido a la baja incidencia de variables cartográficas como zonas urbanas y turísticas, escuelas o fuentes hídricas; sin embargo, presentan pequeñas áreas con amenazas de deslizamiento y pendientes fuertemente escarpadas, lo que no restringe la ubicación de un área para la disposición final de los residuos, pero aumenta la dificultad de construcción y operación, generando un aumento de los costos en relación con las pendientes. En cuanto a las áreas con amenazas de deslizamiento, es necesario implementar un sistema de gestión de riesgo de desastres por deslizamiento. En cuanto a la evaluación del Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo, solo el 32,05 % del área total es óptima, debido a que el área restante

(67,95 %) tiene proximidad a canales y drenajes sencillos, cuerpos de agua y pendientes fuertemente inclinadas.

Conclusiones

Entre las tres alternativas aptas para la ubicación del relleno sanitario, se sugiere la alternativa 1 porque su accesibilidad es equidistante para ambos municipios respecto a sus zonas urbanas. Sin embargo, las tres alternativas presentan un riesgo de amenaza por deslizamiento y pendientes fuertemente inclinadas, lo que generará un posible aumento de los costos de construcción, operación e implementación de gestiones de riesgo.

El área apta para la disposición de residuos sólidos en el Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo no debe tener grandes superficies debido a la presencia de fuentes hídricas y pendientes fuertemente inclinadas, sin embargo, cumple con la mayoría de los requerimientos del Decreto 838 de 2005. En vista de su vida útil es aconsejable hacer una ampliación al norte del polígono, en esta área se encuentra la tercera alternativa.

Referencias

- [1] Giménez M, Cardozo R. Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG) en el área metropolitana del alto Paraná. AUGM [Internet] 2017 [Consultado 16 Agto 2021]; [aprox. 20 p]. Disponible en: <http://sedici.unlp>.

[edu.ar/bitstream/handle/10915/26832/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.ugc.edu.ar/bitstream/handle/10915/26832/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[2] Semana. Crisis mundial por la basura: solo el 16% de los desechos son reciclados [Internet]. Colombia: Revista semana; 2019 [Consultado 16 Ago 2021]. Disponible en <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/crisis-mundial-por-la-basura-solo-el-16-de-los-desechos-son-reciclados/44932/>

[3] DANE. Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos [Internet]. Bogotá D.C: DANE; 2018 [Consultado 16 Ago 2021] Disponible en https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Bt-Cuenta-residuos-2018p.pdf

[4] Poveda A. Gestión Integral de los residuos sólidos en el departamento de Cundinamarca [Internet]. Bogotá D.C: Contraloría de Cundinamarca; 2019 [Consultado 16 Ago 2021]. Disponible en: <http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/images/INFORME%20RESIDUOS%20SOLIDOS.pdf>

[5] Nuevo Mondoñedo S, A. Generalidades [Internet]. Colombia; Consorcio Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo; 2018 [Consultado 16 Ago 2021]. Disponible en: <https://nuevomondoneo.com/servicios>

[6] Gil A. Diagnóstico sobre las condiciones existentes en el relleno sanitario nuevo Mondoñedo localizado en Mosquera Cundinamarca. Universidad la gran Colombia; 2018. [Consultado 18 Ene 2022]. Disponible en: https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5318/Diagn%C3%B3stico_condiciones_relleno_sanitario_Mondo%C3%B1edo.pdf?sequence=1

[7] Ullua J. Los rellenos sanitarios. Ecuador. Universidad politécnica salesiana; 2005. [Consultado 18 Ene 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047388001.pdf>

[8] Min ambiente. Decreto número (0838) 23 de marzo. [Internet]. Colombia: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial; 2005 [Consultado 16 Ago 2021]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_0838_230305.pdf

[9] Rodríguez A. Análisis espacial en epidemiología: Revisión de métodos. Colombia, Universidad Industrial de Santander; 2018 [Consultado 16 Ago 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3438/343860383009/html/>

[10] ArcGIS. Visita general de la caja de herramientas de spatial Analyst. [Internet]. [Consultado 16 Ago 2021]. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm>

[11] Gómez L. Taller de análisis y modelamiento ambiental. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2015 [aprox. 52 p].

[12] CAR. Datos abiertos Corporación autónoma regional Cundinamarca. POMCA Rio Bogotá [Internet]. Bogotá D.C; 2019 [Consultado 15 Jun 2021]. Disponible en: <https://datosgeograficos.car.gov.co/>

[13] Alcaldía de Municipal de Mosquera. Directorio de instituciones educativas aprobadas en Mosquera – Cundinamarca [Internet]. Datos Abiertos; Alcaldía Municipal de Mosquera Cundinamarca; 2020 [Consultado 15 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/Educacion/DIRECTORIO-DE-INSTITUCIONES-EDUCATIVAS-APROBADAS-E/c377-rdaj>

- [14] Alcaldía de Bojacá. Instituciones educativas Bojacá [Internet]. Datos Abiertos; Desarrollo económico; 2018 [Consultado 16 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/Educaci-n/INSTITUCIONES-EDUCATIVAS-BOJAC-/q44w-37hw>
- [15] Min TIC. Cartografía de Mosquera Cundinamarca. Cartografía de Mosquera Cundinamarca [Internet]. Datos Abiertos; IDEC; 2021 [Consultado 16 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/dataset/Cartograf-a-de-Mosquera-Cundinamarca/yfqc-ew6f>
- [16] Min TIC. Cartografía de Bojacá Cundinamarca [Internet]. Datos Abiertos; IDEC; 2021 [Consultado 16 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/dataset/Cartografia-de-Bojaca-Cundinamarca/6w6j-eeku>
- [17] IGAC. Límites: Municipios, Distritos y Áreas no municipalizadas de Colombia [Internet]. Colombia en mapas; Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 2021 [Consultado 16 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>
- [18] IGAC. Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Cundinamarca [Internet]. Geoportal; Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 2017 [Consultado 16 Jun 2021]. Disponible en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- [19] DANE. Censo Nacional de Población y Vivienda-CNPV Marco Integrado [Internet]. Geoportal; Entidad responsable de la planeación, levantamiento, procesamiento, análisis y difusión de las estadísticas oficiales de Colombia; 2018 [Consultado 17 Jun 2021]. Disponible en: <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-geovisores/>
- [20] Alcaldía Municipal de Mosquera. Mapa turístico de Mosquera [Internet]. Turismo; Alcaldía Municipal de Mosquera; 2017 [Consultado 17 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.mosquera-cundinamarca.gov.co/turismo/mapa-turistico-de-mosquera>
- [21] IGAC. Red vial de Colombia [Internet]. Colombia en mapas; Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 2016 [Consultado 15 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- [22] IGAC. Capas de Información Geográfica Individuales - Cobertura Nacional [Internet]. Geoportal; Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 2021 [Consultado 18 Jun 2021]. Disponible en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-catastro>
- [23] SIAC. Áreas otorgadas hidrocarburos [Internet]. Catálogo de mapas; Sistema de Información Ambiental de Colombia; 2020 [Consultado 18 Jun 2021]. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- [24] IDEAM. Dirección Viento [Internet]. Datos abiertos; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; 2019 [Consultado 18 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Direcci-n-Viento/kiw7-v9ta>
- [25] Google Earth (2021). SAS Planet (Versión 15.11.11) [Windows].
- [26] ALOS PALSAR (2010). ASF DATA Search. Disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- [27] CAR. Gestión Integral de los residuos sólidos en el departamento de Cundinamarca [Internet]. Bogotá D.C; 2019 [Consultado 19 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5e29f9d0e2cda.pdf>

- [28] IGAC. Límites: Municipios, Distritos y Áreas no municipalizadas de Colombia [Internet]. Colombia en mapas; Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 2021 [Consultado 16 Jun 2021]. Disponible en: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>
- [29] SIAC. Áreas otorgadas hidrocarburos [Internet]. Catálogo de mapas; Sistema de Información Ambiental de Colombia; 2020 [Consultado 18 Jun 2021]. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- [30] SSPD. Informe de seguimiento a sitios de disposición final [Internet]. Bogotá D.C; Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios; 2018 [Consultado 19 Jun 2021]. Disponible en: https://www.superservicios.gov.co/system/files_force/Acueducto%2C%20alcantarillado%20y%20aseo/Aseo/2019/Jun/nuevo_mondonedo_s.a._e.s.p._1.pdf?download=
- [31] IGAC. Catálogo de objetos geográficos cartografía básica digital [Internet]. Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 2016 [Consultado 2 Ago 2021] Disponible en: https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/anexo_1.1_catalogo_objetos_cartografiabasica_v1.0_.pdf
- [32] Ullca, J. Los rellenos sanitarios. La Granja. Revista de Ciencias de la Vida [Internet]. 2005; (4):2-17. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047388001>
- [33] Jaramillo, J. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. UDEA [Internet] 2002 [Consultado 16 Ago 2021]; [aprox. 27 p]. Disponible en: <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20090128200240.pdf>
- [34] Díaz, B. CAPÍTULO II Aspectos generales del riesgo sísmico [Internet]. s.f; [Consultado 16 Ago 2021]; Disponible en: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6222/03CAPITULO_2.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [35] Camargo, Y Vélez, A. Emisiones de biogas producidas en rellenos sanitarios. REDISA [Internet] 2009 [Consultado 16 Ago 2021]; [aprox. 12 p]. Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones%20de%20biog%C3%A1s%20producidas%20en%20rellenos%20sanitarios.pdf>
- [36] Benavides, L Vallejo, A. Propuesta para el diseño del nuevo relleno sanitario para el municipio de Aguachica – cesar. Ucatolica [Internet] 2017 [Consultado 16 Ago 2021]; [aprox. 83 p]. Disponible en <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15489/1/Dise%C3%B1o%20de%20relleno%20sanitario%20para%20Aguachica%20Cesar.pdf>
- [37] FAO. Diversas propiedades del suelo [Internet]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; s.f [Consultado 16 Ago 2021] Disponible en: http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s10.htm