

*Artículo de investigación*

# **Análisis de idoneidad para el establecimiento de un relleno sanitario en el cantón Mocache apoyado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), 2024**

José Luis Muñoz<sup>1\*</sup>; Nathaly Vera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo - UTEQ

\* E-mail: [jmunoz@uteq.edu.ec](mailto:jmunoz@uteq.edu.ec)

Recibido: 21/10/2024; Aceptado: 09/12/2024; Publicado: 23/12/2024

## **Resumen**

En esta investigación se propone evaluar los sitios idóneos para establecer un relleno sanitario en el cantón Mocache, mediante el uso del sistema de información geográfica (SIG) y el proceso de jerarquía analítica (AHP). Primero se establecieron once criterios de evaluación agrupados en factores socioeconómico (2), ambiental (4) y físico (5), el área de estudio se evaluó según el valor de clasificación para cada criterio en una escala de 0 a 4, y sus pesos se obtuvieron a través de las comparaciones por pares derivadas de la consulta a expertos en materia de gestión ambiental, planificación territorial y gestión integral de desechos sólidos y rellenos sanitarios de diversos municipios, carteras de estado y empresas privadas, mediante el método AHP. La suma ponderada (weighted sum) dentro del software ArcGIS 10.5, permitió obtener el mapa de idoneidad final. Los resultados muestran que, de la totalidad del territorio cantonal el 81,74% (45.287 ha), tiene condiciones moderadamente adecuado, el 11,30% (6.260 ha) marginalmente adecuado, 3,95% (2.186 ha) no apto y el 3,01% (1.668 ha) adecuado para el establecimiento del relleno sanitario. Por lo cual, el cantón cuenta con diez sitios adecuados, para la ubicación de un relleno sanitario.

**Palabras clave:** análisis multicriterio; consulta a expertos; índice de idoneidad; proceso analítico jerárquico; suma ponderada.

## **Suitability analysis for the establishment of a sanitary landfill in the canton of Mocache supported by Geographic Information Systems (GIS), 2024**

### **Abstract**

This research proposes to evaluate suitable sites for establishing a sanitary landfill in the Mocache canton, through the use of the geographic information system (GIS) and the analytical hierarchy process (AHP). First, eleven evaluation criteria were established, grouped into socioeconomic (2), environmental (4) and physical (5) factors, the study area was evaluated according to the ranking value for each criterion on a scale of 0 to 4, and their weights were obtained through pairwise comparisons derived from consultation with experts in environmental management of solid waste and landfills from various municipalities, state portfolios and private companies, using the AHP

method. The weighted sum in ArcGIS 10.5 software allowed obtaining the final suitability map. The results show that 81.74% (45,287 ha) of the canton's territory is moderately suitable, 11.30% (6,260 ha) is marginally suitable, 3.95% (2,186 ha) is not suitable, and 3.01% (1,668 ha) is suitable for the establishment of a sanitary landfill. Therefore, the canton has ten sites suitable for the location of a sanitary landfill.

**Keywords:** multicriteria analysis; expert consultation; suitability index; analytic hierarchy process; weighted sum.

---

## 1. Introducción

Los rellenos sanitarios se definen como estructuras de ingeniería destinadas a la disposición final de desechos sólidos urbanos (Vaverková, 2019), es decir, a la eliminación, compresión y relleno de terraplenes de residuos en sitios apropiados (Ibarra et al., 2020) (Khanna y Chauhan, 2023). Estas instalaciones cuentan con una operación controlada en la que los residuos se depositan en capas definidas, las cuales se compacta y se cubre con tierra antes de depositar la siguiente (Valdivia et al., 2022); disponen de revestimientos inferiores, sistemas de recolección y eliminación de lixiviados y cubiertas finales (Shevchuk et al., 2021) (Lopez y Iannacone, 2021a). Su ubicación, diseño, funcionamiento y control deben garantizar el cumplimiento de las normas ambientales (Zafra y Romero, 2019) (Cobos et al., 2023). Su diseño y construcción requieren una planificación suficiente desde el inicio hasta su etapa posterior al uso (Karimi et al., 2022).

Aunque los rellenos sanitarios han solventado la necesidad de eliminación inmediata de residuos en las zonas urbanas (Jacintos y Delgado, 2023); sin embargo, este método no es ideal para la gestión de residuos a largo plazo, debido a que tiene múltiples efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública de la población (Njoku et al., 2019) (Shammas et al., 2020) (Shi et al., 2021). Estas infraestructuras contribuyen a muchos problemas ambientales, incluida la contaminación del suelo, las aguas subterráneas y superficiales por la percolación de lixiviados nocivos (Mohanty et al., 2023) (Gautam et al., 2024). Los rellenos sanitarios también causan contaminación del aire al emitir polvos y metaloides volátiles como Arsénico (As) y Antimonio (Sb) (de Oliveira et al., 2022). También emiten gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (Luo et al., 2020), como consecuencia de la descomposición de sustancias orgánicas por microorganismos (Vaverková, 2019)(Ozbay et al., 2021), causantes de calentamiento global e incendios (Díaz y Espinoza, 2020).

La salud humana puede verse afectada por la inadecuada ubicación de rellenos sanitarios, especialmente en residentes de las zonas de influencia directa (García et al., 2022). A menudo se relaciona a estos sitios con complicaciones reproductivas y otros resultados adversos como bajo peso al nacer, malformaciones congénitas, partos múltiples, trastornos respiratorios, proporción anormal de sexos en los recién nacidos, síntomas gastrointestinales, infecciones de la piel e incluso cáncer (del Pilar Cárdenas et al., 2022) (Fazzo et al., 2023).

La construcción de rellenos sanitarios cerca de zonas residenciales suele estar asociada a la acumulación de CH<sub>4</sub>, la contaminación de aguas subterráneas, y la destrucción de propiedades (Alkaradaghi et al., 2019) (Siddiqua et al., 2022) (Noriega, 2023). Esto sucede cuando sus instalaciones no han sido adecuadamente establecidas, presentan desperfectos en su diseño o mantienen un estado

operativo inadecuado (Njoku et al., 2019); en tales casos, pueden producirse fugas hacia las aguas subterráneas, inutilizar el suelo y las tierras circundantes (Marder, 2022), incluso pudiendo influir negativamente en el valor de las propiedades cercanas (Bedoya, 2023) (Zúñiga et al., 2024).

La disposición final de los residuos sólidos urbanos es uno de los mayores desafíos ambientales a nivel global, especialmente en países menos desarrollados, en donde las poblaciones urbanas siguen creciendo, con el consecuente aumento de la generación de residuos (Mvula et al., 2023). Por tanto, la selección de sitios óptimos para rellenos sanitarios, ha sido un desafío debido al rápido crecimiento de la población, el costo y la disponibilidad de la tierra, las preocupaciones ambientales, las actividades humanas y el desarrollo económico (Rezaeisabzevar et al., 2020). Esta situación se ve agravada por la falta de conocimientos técnicos y capacidad financiera (Moreira et al., 2021). Para solucionar esta macro problemática se requiere un enfoque multidisciplinario que incluya soluciones de ingeniería, humanidades, sociológicas y científicas que sean tecnológicamente factibles, socialmente aceptables, legalmente compatibles, financieramente viables y respetuosas con el medio ambiente (Dávila, 2021).

En América Latina, los residuos sólidos urbanos terminan en rellenos sanitarios, sean éstos, informales, aquellos que son focos graves de contaminación y enfermedades (Margallo et al., 2019); y/o municipales, que cumplen con normas en materia de regulación y control (Guerra y Cajas, 2023). En esta región, son la técnica más frecuente de disposición final de residuos sólidos; sin embargo, determinar su ubicación ha sido una tarea compleja y tediosa, debido a la diversidad de factores y regulaciones a considerar (Silva et al., 2022). A pesar de que la cantidad de rellenos sanitarios diseñados adecuadamente ha aumentado durante la última década, muchos de estas instalaciones enfrentan problemas operativos y ambientales (Hettiarachchi et al., 2018). La cobertura del servicio de disposición final adecuada es apenas un 55%, existiendo aún una alta proporción de residuos que no se disponen en sitios idóneos (Tyagi y Ojha, 2023).

En Ecuador, el 50,7% de los municipios disponen los residuos sólidos en rellenos sanitarios, el 26,7% eliminan en celdas temporales y el 22,26% en botaderos a cielo abierto (MAATE, 2023). En todo el territorio, existen 79 rellenos sanitarios, 39 celdas emergentes y 46 botaderos (INEC-AME, 2023). A pesar del crecimiento en la construcción de sitios de disposición final, se recibe únicamente el 87% de los residuos sólidos, lo que corresponde a 12.000 t/día aproximadamente, por lo que alrededor de 1000 t/día tienen aún una disposición final inadecuada (Cobos et al., 2021). Muchos de los sitios de disposición final han sido establecidos en función de la necesidad operativa de la instalación y por la accesibilidad a la tierra (Hidalgo et al., 2023), sin considerar aspectos igualmente importantes, como el socioeconómico y ambiental (Villa et al., 2024).

La selección de sitios idóneos para la implantación de los rellenos sanitarios es un tema de seria preocupación socioeconómica con implicaciones ambientales y de salud en las comunidades aledañas a estas instalaciones (Mohammed et al., 2019). En la actualidad, muchos de los rellenos sanitarios se seleccionan en función de la disponibilidad de tierras y no de su idoneidad (Mallick, 2021). Es por ello que a menudo los rellenos sanitarios se vinculan con problemas de contaminación ambiental y riesgos para la salud de las comunidades adyacentes (Burneo et al., 2020).

La inadecuada ubicación de un relleno sanitario puede agravar esta problemática al tiempo que provoca percepciones y actitudes negativas en la comunidad (Burneo et al., 2020). Por otra parte, la expansión urbana, la escasez de fuentes de suelo y el aumento de los residuos no sólo han reducido

la vida útil de los rellenos existentes (Zafra y Romero, 2019), sino que también han dificultado la ubicación de nuevos emplazamientos (Lopez y Iannacone, 2021). A menudo, la expansión urbana, el crecimiento económico de ciudades, las afectaciones a propiedades aledañas, la competencia por el espacio físico, y el uso incompatible del suelo, suelen ser los principales problemas a la hora de definir un sitio adecuado (Junger et al., 2022), que sumado a una planificación territorial fallida con dinámicas poblacionales complejas y la falta de una visión integral del territorio, reducen aún más las alternativas (Poma et al., 2021).

En la actualidad, son más restringidos los espacios para construir un relleno sanitario debido a que deben cumplir regulaciones estrictas y a su vez minimizar los costos sociales, económicos y ambientales (Cobos et al., 2021). Además, la tendencia actual hacia instalaciones más grandes hace que encontrar un nuevo sitio o ampliar los existentes sea una tarea compleja (Meléndez, 2022), tanto a nivel técnico, socioeconómico y ambiental. Ante ello, la selección de posibles sitios es un paso inevitable para abordar esta controvertida problemática (Ali y Ahmad, 2020).

El proceso de obtención de sitios idóneos para rellenos sanitarios es muy tedioso, complejo y requiere mucho tiempo, ya que implica a varios expertos de diferentes campos del conocimiento, como el medio ambiente, la economía, la política, la sociedad, la técnica e ingeniería (Mohammed et al., 2019). Esto hace que la selección del emplazamiento sea más difícil, ya que implica el tratamiento y la evaluación de una gran cantidad de datos que se rigen por normas, reglamentos, factores y limitaciones (Aderoju et al., 2020)(Abdo et al., 2023). Es así como, los gobernantes y decisores técnicos y políticos poseen una tarea muy crítica debido a la diversidad de factores que deben tener en cuenta para evitar tanto la obstrucción pública como el deterioro ambiental (Asefi et al., 2020).

Es cierto que las mejoras de ingeniería facilitan y hacen físicamente posible la ubicación de un relleno sanitario en casi cualquier lugar (Lü et al., 2019); sin embargo, estos avances tecnológicos no bastan para que los posibles emplazamientos cumplan los requisitos normativos y la aceptación pública (Vidal et al., 2021), sobre todo porque los problemas relacionados con los rellenos sanitarios van más allá del mal olor y la basura. Por tanto, la ubicación de un relleno sanitario es una cuestión compleja y multidimensional que requiere ser comprendida desde diversas perspectivas (Morales, 2020).

La selección de los lugares idóneos debe realizarse de forma científica para evitar diversos problemas estéticos y ambientales (Ali et al., 2021) (Silva et al., 2022a). Por lo tanto, debido a la estricta aplicación de las leyes ambientales, la falta de tierras disponibles debido a las zonas densamente pobladas, los efectos negativos en la salud de los residentes, el alto coste del transporte y las protestas políticas y comunitarias, elegir los vertederos de forma científica sería una tarea muy difícil (Pande et al., 2023). De ahí que, la mejor manera de localizar un buen relleno sanitario es mediante un análisis de su idoneidad, que combine la toma de decisiones multicriterio y el uso de tecnología SIG (Zhi et al., 2023) (Santisteban et al., 2024). Los SIG son una herramienta ideal para determinar la idoneidad de un relleno sanitario, dada su capacidad para gestionar grandes cantidades de datos espaciales obtenidos de distintas fuentes (Yildirim et al., 2018) (Alkaradaghi et al., 2019), mientras que la evaluación multicriterio investiga una serie de posibles opciones para un problema de selección de emplazamientos (Aderoju et al., 2020), teniendo en cuenta múltiples criterios y objetivos contrapuestos (Abdo et al., 2023) (Rane et al., 2024).

En el cantón Mocache, la disposición final de los residuos sólidos urbanos se realiza en una celda emergente, aperturada en el año 2022 por parte de la Mancomunidad Mundo Verde, ubicada en el

sector "Barro Colorado", zona limítrofe con el cantón. El Empalme de la provincia del Guayas. Esta celda recibe una disposición de residuos sólidos de 420 Tn/día, provenientes de seis cantones vecinos: Quevedo, Valencia, Buena Fe, El Empalme, Mocache y La Maná (Quinteros et al., 2020), que forman parte de la mancomunidad. Esta instalación cuenta con un área operativa de 46 hectáreas, y beneficia a una población de 500.000 habitantes. Sin embargo, uno de los desafíos más importantes es mantener su operatividad a lo largo del tiempo, considerando la enorme cantidad de desechos que recibe, y que sigue incrementando al ritmo que lo hace la población.

En la comunidad aledaña al relleno sanitario de Mocache, existe estrés y preocupación respecto a una posible expansión de la instalación hacia zonas pobladas y agrícolas, dado el gran volumen de desechos recibidos diariamente, lo que saturaría en un corto plazo la capacidad operativa. Por tanto, esta investigación presenta un enfoque de apoyo a la toma de decisiones basado en análisis multicriterio mediante AHP y SIG, que permita evaluar los sitios idóneos para el emplazamiento de rellenos sanitarios en Mocache (Ecuador). Para ello, se planteó en primer lugar, i) definir los factores socioeconómicos, ambientales y físicos que influyen en la locación del relleno sanitario; luego se procedió a, ii) establecer el grado de importancia de los criterios según la opinión de expertos y AHP; y por último, iii) determinar las áreas óptimas para el relleno sanitario mediante SIG.

#### *Hipótesis de investigación*

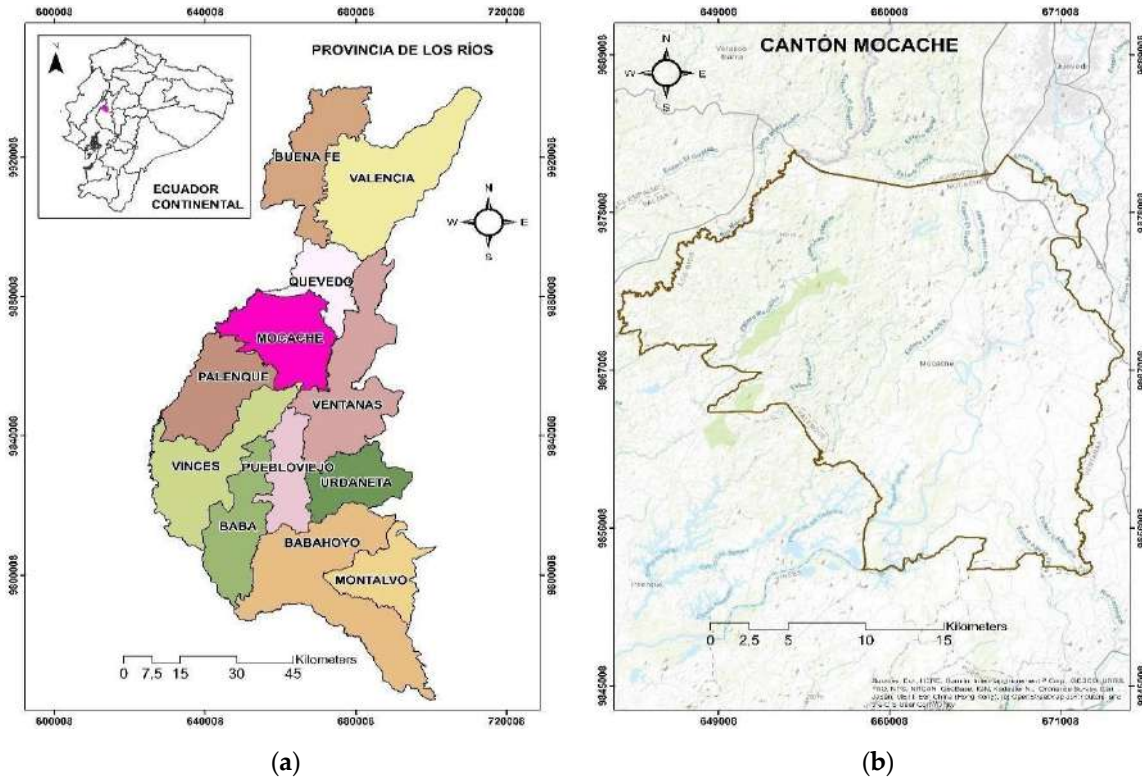
La localización actual del relleno sanitario del cantón Mocache es inadecuada, dado que ha sido definida sin considerar la idoneidad de los criterios físicos, socioeconómicos y ambientales, con lo cual se afecta la calidad ambiental local y la salud de la población del área de influencia directa.

#### *Descripción del área de estudio*

##### *Geografía*

El cantón Mocache está ubicado en la provincia de Los Ríos, Ecuador continental (Figura 1), con coordenadas 1° 11' 02" de latitud Sur; 79° 30' 20" longitud Oeste, y una altitud promedio de 38 msnm. Posee una extensión territorial de 562.3 km<sup>2</sup>. Comparte límites con cuatro cantones de la misma provincia: Quevedo (Norte), Ventanas (Este), Vinces (Sur) y Palenque (Suroeste); y dos cantones de la provincia del Guayas: El Empalme (Noroeste) y Balzar (Oeste). La población según el último Censo de Población y Vivienda 2022 - INEC es de 42.026 habitantes, con una densidad poblacional de 74,73 hab/km<sup>2</sup>, y una tasa de crecimiento promedio anual de 1,52%. El territorio pertenece a la cuenca del río Guayas, integrada por las subcuencas de los ríos: Macul, Vinces y Babahoyo; y las microcuencas del río Macul y Lechugal, demás esteros y drenajes menores; sur de este cantón nace el límite del Humedal Abras de Mantequilla, declarado por UNESCO en el año 2000 como sitio Ramsar. La clasificación geológica recae, en el período cuaternario, con formación Pichilingue, con una litología de terrazas, sedimentos fluviales y arcillas marinas de estuario.

**Figura 1.** Localización geográfica de Mocache: (a) Ecuador continental y provincia Los Ríos; (b) mapa base.



*Comercio y agricultura*

La zona urbana de Mocache integra el área metropolitana de Quevedo, ya que sus actividades económicas, sociales y comerciales están fuertemente vinculadas, al ser una “ciudad dormitorio” para cientos de trabajadores que se desplazan diariamente a Quevedo por vía terrestre. La agricultura es el primer nivel de ocupación de la población, con el 66,31%, seguido del comercio al por mayor y menor con el 6,63%; mientras que un 9,82% de los residentes no reportan ningún tipo de ocupación.

*Clima*

Existe la presencia de dos climas: tropical megatérmico y semi-húmedo, con temperatura promedio anual entre 24 - 26°C, y precipitación dentro del rango de 1500 - 2500 mm/año. También se percibe la influencia de las corrientes marinas El Niño y Humboldt, provenientes del océano Pacífico.

**2. Materiales y métodos**

*2.1 Definición de los factores socioeconómicos, ambientales y físicos*

Se seleccionaron doce criterios de evaluación: dos socioeconómicos, cinco ambientales y cinco físicos, basados en los requisitos de la normativa ecuatoriana vigente, la literatura científica disponible y las características del sitio de estudio (Tabla 1).

**Tabla 1.** Criterios de evaluación para emplazamiento de rellenos sanitarios.

Criterio	Factor socioeconómico	Factor ambiental	Factor físico
			Uso de suelo

Distancia a poblados, centros educativos y centros de salud	Distancia a las fuentes de agua superficiales	Textura del suelo
	Nivel freático	Precipitación
Distancia a zona urbana	Distancia a zonas inundables	Distancia a la red vial
	Áreas protegidas	Distancia hasta las líneas de transmisión eléctrica

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.2 Nivel de importancia de los criterios según opinión de expertos y Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

La consulta a expertos se realizó mediante la aplicación de un cuestionario de encuesta de tipo matriz comparativa, conformada por cuatro comparaciones: entre factores, entre criterios socioeconómicos, entre criterios ambientales y entre criterios físicos. A partir de esto se obtuvo los pesos absolutos para cada factor y criterio, para luego utilizarlos en el análisis AHP. El instrumento fue remitido a cada experto mediante correo electrónico.

Los expertos consultados fueron profesionales de muchos años de experiencia en el área de gestión ambiental, planificación territorial y gestión integral de desechos sólidos y rellenos sanitarios; pertenecientes a diversos municipios locales, carteras de Estado y empresa privada (Tabla 2).

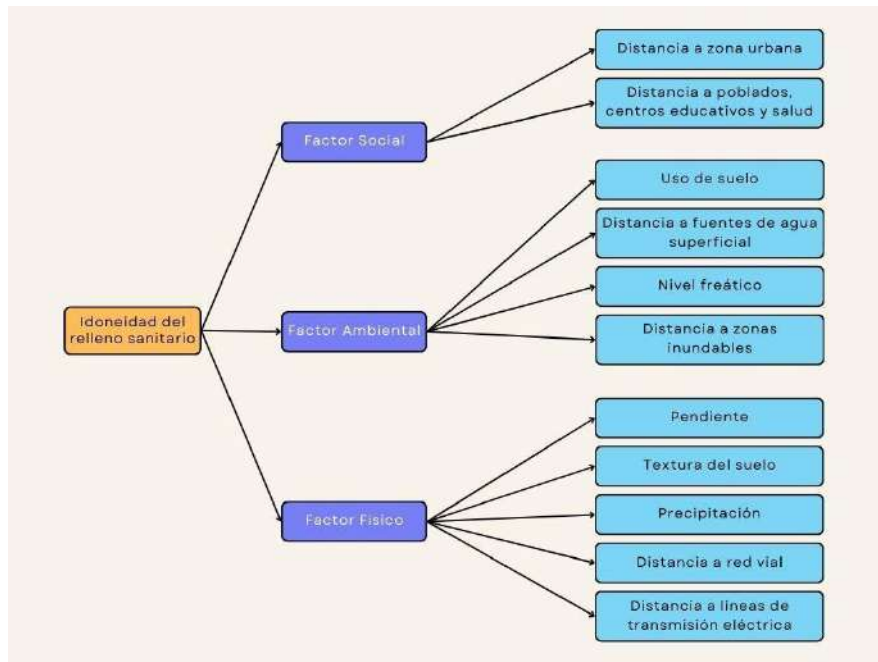
**Tabla 2.** Expertos seleccionados para la encuesta.

Profesión	Cant.	Ocupación	Institución
Ingeniero Ambiental	3	Jefe de Gestión Integral de Desechos Sólidos, Supervisor de Auxiliar de Servicios GIDS Técnico Ambiental	Municipio El Empalme
Ingeniero Ambiental, Ingeniero Civil	3	Jefe de Gestión Ambiental y Desechos Sólidos, Técnico de Planificación Territorial y proyectos, Técnico Ambiental	Municipio de Mocache
Ingeniero Ambiental	1	Técnico en Manejo de Lixiviados	Mancomunidad Mundo Verde
Ingeniero Ambiental	2	Técnicos en Gestión Integral de Desechos	Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, Zona 5
Ingeniero Ambiental	1	Técnico Ambiental	Municipio de Quevedo

**Fuente:** Elaboración propia

El análisis AHP constó de 3 niveles de jerarquía de decisión, donde el primer nivel fue el objetivo principal que es la idoneidad del relleno sanitario; el segundo nivel correspondió a los tres factores evaluados: socioeconómico, ambiental y físico. El tercer nivel representó los 11 criterios de evaluación de los diferentes aspectos en relación con el emplazamiento idóneo del relleno sanitario (Figura 2).

Figura 2. Nivel jerárquico de decisión del análisis AHP utilizado en el estudio.



Fuente: Elaboración propia

Los criterios se compararon por pares y la importancia de un criterio *i* en relación con otro criterio *j* se calificó en función de una escala de 1 a 9. La encuesta permitió determinar qué criterios consideran más importantes los expertos, y cuánto más, en una escala de 1 a 9 (Tabla 3).

Tabla 3. Escala de comparación por pares en AHP

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualdad de importancia
3	Débil Importancia de uno sobre otro
5	Importancia esencial o fuerte
7	Importancia demostrada
9	Importancia absoluta
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes
Recíprocos de los anteriores distintos de cero	Si a la actividad <i>i</i> se le asigna uno de los números anteriores distintos de cero al compararla con la actividad <i>j</i> , entonces <i>j</i> tiene el valor recíproco al en comparación con <i>i</i>

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la comparación por pares obtenidos de la consulta a expertos se ordenaron en una matriz cuadrada según cada comparación: matriz 3 x 3 (factores), matriz 2 x 2 (factor socioeconómico), matriz 4 x 4 (factor ambiental) y matriz 5 x 5 (factor físico) para establecer el nivel de prioridad de cada criterio mediante la metodología AHP. El método se basó en la solución de un problema matemático de valores y vectores propios. La matriz cuadrada (Mx) de la comparación por pares se expresa en la ecuación 1.



$$A = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \dots & C_{2n} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & \dots & C_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$Mx = [C_{ij}] \forall i, j = 1, 2, 3, \dots, n$  para  $n$  criterios que influyen en el objetivo del estudio, donde,  $C_{ij}$  demuestra la importancia relativa de los criterios  $C_i$  sobre  $C_j$  y el recíproco fue  $C_{ji}$  o  $1/C_{ij} \forall i \neq j$  y  $C_{ii} = 1$ .

Luego, se normalizó cada matriz y calculó el vector propio de cada criterio mediante la media de cada fila para obtener los pesos factoriales. En otras palabras, se calculó los pesos factoriales normalizando los eigenvectores individuales asociados al eigenvector principal de la matriz de relación recíproca. Así, un eigenvector muestra el peso factorial del estudio y revela la importancia relativa de los criterios que se comparan. El primer eigenvector normalizado de la matriz da la escala de relación (ponderación), y el valor propio determinaron la relación de coherencia.

Una vez elaborada la matriz, se calculó el Índice de Coherencia y el Ratio de Coherencia, según ecuación 2. El valor propio y/o  $\lambda$ , se obtuvo primero para luego estimar el Índice de Consistencia y el Ratio de Consistencia. Se cómputo el valor propio dividiendo el total ponderado de la matriz normalizada por el vector propio, y de esta manera evitar incoherencias ( $\leq 10\%$  aceptable) en los resultados de la encuesta con respecto al juicio de los expertos.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{2}$$

Donde  $\lambda_{max}$  es la media de todos los valores propios de la matriz, y  $n$  es el número de criterios de la matriz.

A continuación, el Índice de Coherencia puede compararse con el de una matriz aleatoria, el Índice de Coherencia Aleatorio y el Coeficiente de Coherencia, se representan mediante la ecuación 3:

$$CR = \frac{IC}{IR} \tag{3}$$

Así, el Índice de Coherencia es una comparación entre el Índice de coherencia de la encuesta y el Índice de coherencia aleatorio, proporcionado por (Saaty, 1980). El índice aleatorio usado para diferentes tamaños de matriz (Tabla 4).

**Tabla 4.** Escala de comparación por pares del método AHP.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,0	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fuente: Donegan & Dodd (1991)

El procedimiento AHP fue ejecutado dentro de la calculadora AHP Priority Calculator® de Business Performance Management Singapore disponible en el siguiente enlace (Goepel, 2018): <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php>

### 2.3 Establecimiento de áreas óptimas

Los criterios se clasificaron en cinco clases, cada una con su respectivo valor y/o categoría. Las clases utilizadas fueron: no apto (0), marginalmente adecuado (1), moderadamente adecuado (2), adecuado (3) y muy adecuado (4). Los rangos y categorías de cada clase se definieron según los requisitos de la

normativa vigente aplicable y la literatura científica, así, por ejemplo, en el caso de la distancia a poblados, centros educativos y salud, y distancia a fuentes de agua superficial se consideró lo estipulado en la normativa nacional: TULSMA Libro VI Anexo 6 (Tabla 5).

**Tabla 5.** Estructura de clasificación para cada criterio.

Factores	Criterios	Valor de clasificación				
		No apto (0)	Marginalmente adecuado (1)	Moderadamente adecuado (2)	Adecuado (3)	Muy adecuado (4)
Socioeconómicos	Distancia a poblados, centros educativos y salud	< 0,5 km		0,5 – 2 km		> 2 km
	Distancia a zona urbana	< 0,5 km	0,5 - 2 km	2 – 3,5 km	3,5 - 5 km	> 5 km
Ambiental	Uso de suelo	Antrópico, Aguas, Tierras improductivas, Conservación y protección	Protección y producción	Agrícola	Agropecuario mixto	Pecuario
	Distancia a fuentes de agua superficial	< 0,2 km		0,2 – 0,4 km		> 0,4 km
	Nivel freático	< 3 m			> 4 m	
	Distancia a zonas inundables	< 1 km	1 – 1,5 km	1,5 – 2 km	2 – 3 km	> 3 km
	Áreas protegidas (*)	-	-	-	-	-
Físicos	Pendiente	40% - 70%	25% - 40%	12% - 25%	5% - 12%	0% - 5%
	Textura del suelo		Franco	Franco limoso - Franco arcilloso	Franco arcillo arenoso - franco arcillo limoso	Arcilloso
	Precipitación	1900 - 2000 mm	1800 – 1900 mm	1700 – 1800 mm	1600 – 1700 mm	1600 mm
	Distancia a red vial	< 0,3 km	> 0,9 km	0,7 – 0,9 km	0,5 – 0,7 km	0,3 – 0,5 km
	Distancia a líneas de transmisión eléctrica (35 kV)	< 213 m		213 – 416 m		> 416 m

*Nota.* El criterio áreas protegidas (\*) no dispone de ningún rango o categoría debido a que dentro de la jurisdicción del cantón Mocache no existe ninguna área de protección o conservación registrada en el SNAP; sin embargo, fue necesario

detallarlo dentro de esta tabla debido a que la normativa vigente lo define como un requisito esencial para el establecimiento de rellenos sanitarios en el país.

**Fuente:** Moon (2020); TULSMA (2003)

Las capas shapefile (shp) para cada criterio se obtuvieron de la Geodatabase del cantón Mocache a escala 1: 25.000, generada por (MAG-SIGTIERRAS, 2016). Para la clasificación de las capas de los criterios distancia a poblados, centros educativos, centros de salud, zona urbana, fuentes de agua superficial, zonas inundables, red vial y transmisión eléctrica se utilizó la herramienta Buffer de Geoprocessing y Dissolve de Data Management Tools. En cambio, las capas de pendiente, precipitación, nivel freático, uso y textura del suelo fueron clasificadas según la categoría correspondiente utilizando las herramientas: Data Management Tools (Dissolve), Conversion Tools (Raster to Polygon), Spatial Analyst Tools (Reclassify) de ArcMap 10.5.

Para obtener el mapa de idoneidad final se utilizó el vector de prioridad de cada criterio como peso factorial  $w_j$ , se asignó cada peso a la capa raster de cada criterio, utilizando la herramienta Weighted Sum de Spatial Analyst Tools dentro del software ArcGIS 10.5 y su aplicativo ArcMap, de acuerdo a la ecuación matemática 4, y que se describe a continuación:

$$IR_j = \sum_{i=1}^n w_j v_{ij} \quad (4)$$

Donde  $IR_j$  es el índice de idoneidad para el área  $j$ ,  $w_j$  es la importancia normalizada del peso dado al criterio  $j$ ,  $v_{ij}$  es el valor de prioridad del área  $i$  con respecto al criterio  $j$ ,  $n$  es el número total de criterios. La capa raster resultante de la suma ponderada se convirtió en formato shapefile utilizando Raster to Polygon, y luego agrupada por categoría mediante la herramienta Dissolve de Data Management Tools. Luego se extrajo el área de cada polígono (en hectáreas) para su interpretación final.

### 3. Resultados

#### 3.1. Factores socioeconómicos para la locación del relleno sanitario.

En el ámbito socioeconómico se consideró a la zona urbana, poblados, centros educativos y de salud, como criterios restrictivos a la hora de definir la locación del relleno, dado que se especifican en la normativa vigente y el ámbito del diseño técnico de estas instalaciones. Los criterios de restricción se identifican con base en las regulaciones y directrices que restringen la ubicación de un relleno sanitario para salvaguardar el medio ambiente, la salud pública (Bravo y García, 2023) y otros factores sociales (Mvula et al., 2023) La cabecera cantonal de Mocache (zona urbana) alberga el 84% de la población residente del cantón, situada en la zona septentrional del territorio, en torno a los márgenes del río principal. Mientras que, el 16% de la población restante se concentra en el sector rural de Aguas Frías, a 15 km del área urbanizada (Tabla 6). Esto demuestra que el área urbana de Mocache presenta un importante crecimiento poblacional, caracterizado por una mayor generación de residuos, y consecuentemente la necesidad de incrementar la capacidad técnica y económica para una gestión eficaz. Muchas ciudades en países menos desarrollados muestran desafíos importantes en la gestión de residuos, debido al rápido crecimiento de la población y la urbanización, la falta de

una planificación urbana adecuada (Meléndez, 2022) y la falta de inversión de capital en el sector (Lopez y Iannacone, 2021b).

**Tabla 6.** Estructura de clasificación para cada criterio.

Zona	Extensión territorial	Ubicación	Población
Cabecera cantonal	178	Zona Septentrional	43.316
Aguas Frías	11	Zona Sur	6.930

**Fuente:** Elaboración propia

Se identificaron setenta y ocho (78) poblados rurales y periurbanos que corresponden a una concentración de pocas viviendas familiares, además de 69 centros educativos, en funcionamiento, con niveles de Educación Inicial, Educación General Básica y Bachillerato, distribuidos en toda la circunscripción territorial. También existen 3 centros de salud primaria, localizados en diversas zonas del territorio: Oeste (Dispensario Bella Aurora), Este (Subcentro Mocache) y Sur (Subcentro Aguas Frías) (Tabla 7). Se debe considerar una distancia aceptable y segura desde el relleno sanitario hasta los centros urbanos, sitios de atención hospitalaria, centros educativos, áreas residenciales e industriales (Mvula et al., 2023). La distancia debe ser razonable para minimizar el costo de transporte desde los centros de generación de residuos hasta el sitio de disposición final (Silva et al., 2022a). El ruido, la pérdida de valor de los activos, el olor, los efectos visuales adversos, el síndrome NIMBY (Cobos y Solano, 2020), los impactos ambientales y el crecimiento futuro de la ciudad son algunos de los factores que requieren una consideración seria (Alkaradaghi et al., 2019).

**Tabla 7.** Poblados, centros educativos y salud del cantón Mocache.

Nombre	Número	Distribución	Características
Poblados	78	Todo el territorio cantonal	Concentración de pocas viviendas
Centros educativos	69	Todo el territorio cantonal	Activo ordinario
Centros de salud	3	Este, Oeste y Sur	Primer nivel

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2. Factores ambientales para la locación del relleno sanitario.

Los factores uso de suelo, nivel freático y áreas inundables fueron definidos según los criterios técnicos establecidos por la literatura científica y organismos de control. El factor fuentes de agua superficial fue establecido como un criterio restrictivo definido en la normativa ambiental vigente de Ecuador. Se identificaron ocho tipos distintos de uso del suelo para el territorio del cantón Mocache, con predominancia del uso agrícola, con una ocupación del 76,87% del territorio cantonal, y seguido del uso pecuario con el 13,86% (Tabla 8). La ocupación del suelo es un factor crucial que necesita una consideración seria al ubicar un relleno sanitario para evitar el síndrome Not In My Back Yard (NIMBY) (Desta et al., 2023). El uso del suelo se está utilizando para abordar las instalaciones no deseadas para satisfacer a las personas (Canlas, 2021). En realidad, el uso del suelo de bajo valor a la vista del público causa menos resistencia a las ubicaciones de los rellenos sanitarios (Meléndez, 2022). Para la selección del sitio de disposición final de residuos, puede no elegirse para ciertos usos del suelo, incluyendo la agricultura y la silvicultura (Silva et al., 2022a).

**Tabla 8.** Usos del suelo del cantón Mocache.

Uso	Extensión (ha)	Porcentaje
Agrícola	43.514	76,87%

Agropecuario mixto	1.643	2,90%
Agua	378	0,67%
Antrópico	232	0,41%
Conservación y Protección	1.987	3,51%
Pecuario	7.847	13,86%
Protección o Producción	892	1,58%
Tierras improductivas	116	0,20%
<b>Total</b>	<b>56.609</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

El 85,85% del territorio presenta un nivel freático > 4 m. En cambio, el 14,15% del área cantonal posee un nivel freático < 3 m, localizado principalmente en los sectores Este, Noroeste y Suroeste (Tabla 9). La tasa de permeabilidad de la geología del lecho rocoso es esencial a la hora de establecer un área para relleno sanitario (Mvula et al., 2023). Estos sitios deben ubicarse en áreas con mínima contaminación de aguas subterráneas (Bilas et al., 2022). La piedra caliza no es adecuada para rellenos sanitarios, mientras que las rocas metamórficas son apropiadas (Khater et al., 2022).

Tabla 9. Nivel freático del cantón Mocache.

Nivel freático	Distribución	Extensión (ha)	Porcentaje
< 3 m	Noroeste, Suroeste, Este	8.009	14,15%
> 4 m	Todo el territorio	48.600	85,85%
<b>Total</b>		<b>56.609</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

El territorio cuenta con 37 fuentes de agua superficial, de las cuales sólo tres corresponden a la categoría perenne: Mocache, Lechugal y Macul, con una extensión territorial de 84 km, mientras que 34 de estas fuentes son intermitentes y/o estacionales. El río principal que atraviesa el territorio, en sentido noreste-suroeste, ocupa una extensión de 826 ha y tiene una longitud de 48 km (Tabla 10). Estas fuentes de agua fueron consideradas a efectos de definir las zonas idóneas para el establecimiento del relleno sanitario, en virtud de que constituyen un criterio restrictivo según la norma vigente. Al planificar un relleno sanitario, se debe respetar una distancia segura o una zona de amortiguamiento razonable con respecto a ríos, arroyos, esteros o cualquier otra fuente de agua superficial (Desta et al., 2023). Este criterio es importante porque los rellenos sanitarios son fuente de producción de lixiviados y emisiones gaseosas nocivas, que son contaminantes potenciales de las aguas fuentes de agua dulce (Mvula et al., 2023). Además, es importante conocer la estacionalidad o temporalidad de estas fuentes de agua, dado que con la presencia de las precipitaciones, el efecto de los lixiviados puede dispersarse con facilidad y ser aún más perjudicial (Silva et al., 2022a).

Tabla 10. Fuentes de agua superficial del cantón Mocache.

Fuentes de aguas	Categoría	Nombres	Cant.	Extensión (km)	Área (ha)
Río principal	Perenne	Mocache	1	48	826
Ríos secundarios	Perenne	Lechugal, Macul	2	36	-

Esteros	Intermitente	Agua Fría, Agua Prieta, Barro Colorado, Bijagual, Chojampe, Ajisal, Cherre, Guabito, Roncador, Taco, Estrella Grande, Garza Grande, Garza Chica, Garzas del Medio, Guarumal, Chonta, Muralla, Porfía, Piedra, Saibas, Limón, Bueyes, Cañales, Mosquitos, Maculillo, Negrita, Peñafiel, Piedrillas, Potreros, Sábalo, San Pedro	34	809	-
		<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>845</b>	<b>826</b>

Fuente: Elaboración propia

Las zonas inundables del cantón Mocache ocupan una extensión de 550 ha, y se distribuyen en el norte y sur del territorio; se encuentran conformadas por esteros, pequeños lagos intermitentes, que permanecen inundados durante la época de lluvias (Tabla 11). Las zonas inundables fueron incorporadas como criterio de análisis en este estudio, dada su destacada importancia para el emplazamiento del relleno sanitario, según la literatura científica y técnica disponible. Las inundaciones en áreas adyacentes a zonas de disposición final de desechos sólidos generan riesgo de contaminación o afectar negativamente la calidad de las aguas superficiales (Brand y Spencer, 2020) y subterráneas (Kamdar et al., 2019), especialmente en suelos con texturas finas, tendientes al encharcamiento (Carević et al., 2021).

Tabla 11. Zonas inundables del cantón Mocache.

Zonas inundables	Distribución	Extensión (ha)
Esteros y lagos intermitentes (estacionales)	Norte, Sur	550
<b>Total</b>		<b>550</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Factores físicos para la locación del relleno sanitario.

Los factores físicos utilizados para definir la idoneidad del relleno sanitario fueron: pendiente, textura del suelo, precipitación, red vial y líneas de transmisión eléctrica. El factor red vial fue incorporado al análisis del emplazamiento del relleno dado que es un criterio restrictivo referido en la normativa vigente. Mientras que el resto de los factores obedecen a consideraciones técnicas definidas en la literatura científica. La pendiente del suelo del cantón Mocache se sitúa en un rango de 0 - 70%. Los niveles más representativos de pendiente corresponden al rango 5 – 12%, con una extensión de 23.527 ha (41,56%). Los valores de pendiente entre 12 - 70% ocupan el 29,21% del territorio. En cambio, las pendientes con rango entre 0 – 5% corresponde al 29,24% de extensión territorial (Tabla 12). La pendiente es un factor que necesita una consideración seria al seleccionar un sitio para relleno sanitario (Kamdar et al., 2019). Para minimizar los costos de jardinería y la fuga de lixiviados, los terrenos con una pendiente suave se consideran los más adecuados (Silva et al., 2022a); además, es igualmente trascendental a la hora de otorgar estabilidad a la infraestructura, como consecuencia del peso de los residuos (Ayaim et al., 2019). Desde una perspectiva de costo-construcción, la pendiente

es un elemento importante y crítico (Kamdar et al., 2019). Las pendientes muy pronunciadas pueden resultar en mayores costos de excavación (Mallick, 2021).

**Tabla 12.** Niveles de pendiente del cantón Mocache.

Niveles de Pendiente	Área (ha)	Porcentaje
0 – 2%	5.205	9,20%
2 – 5%	11.343	20,04%
5 – 12%	23.527	41,56%
12 – 25%	10.873	19,21%
25 – 40%	5.366	9,48%
40 – 70%	293	0,52%
<b>Total</b>	<b>56.609</b>	<b>100%</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Se identificó seis clases de texturas del suelo, siendo la textura franca y franco limoso las de mayor proporción, con el 63,13% y 22,92% en orden. Por su parte, las texturas: arcillosa, franco arcillo-arenoso, franco arcillo-limoso y franco arcilloso ocupan el 13,95% del territorio restante (Tabla 13). Las características de textura del suelo son un dato básico para la identificación de un sitio idóneo para disposición final de residuos sólidos (Carević et al., 2021). El suelo actúa como un medio para el flujo de agua/lixiviado hacia las aguas subterráneas (Asefi et al., 2020). Si el suelo tiene una gran porosidad, el flujo es mayor y la contaminación de las aguas subterráneas es mayor y también el lixiviado se esparcirá; eso afecta la calidad del suelo (Canlas, 2021). A partir del conocimiento de la textura y la consistencia de un suelo, se pueden determinar los grados de trabajabilidad del suelo tanto en condiciones secas como húmedas (Macalam et al., 2023).

**Tabla 13.** Textura del suelo del cantón Mocache.

Tipo de textura	Área (ha)	Porcentaje
Arcillosa	605	1,07%
Franca	35.737	63,13%
Franco arcillo-arenoso	664	1,17%
Franco arcillo-limoso	1.211	2,14%
Franco arcilloso	5.419	9,57%
Franco limoso	12.973	22,92%
<b>Total</b>	<b>56.609</b>	<b>100%</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La precipitación oscila entre 1600-2000 mm/año. El rango de 1700-1800 mm es la más representativa, ocupando el 47,64% de la zona centro-sur. Los mayores niveles de precipitación se sitúan en la zona centro-norte y norte, con rangos entre 1800-2000 mm, que representan el 41,57%. Mientras que en el este y oeste la precipitación es menor, con rango de 1600-1700 mm, abarcando el 10,80% (Tabla 14). La precipitación es un factor clave e influyente al momento de seleccionar un sitio de disposición final de desechos y puede afectar la concentración de productos químicos solubles y de cuidado personal en los lixiviados generados por el relleno sanitario (Canlas, 2021) (Silva et al., 2022a). La tasa de infiltración en rellenos sanitarios depende en gran medida de las precipitaciones (Mallick, 2021).

**Tabla 14.** Precipitación del cantón Mocache.

Precipitación (mm)	Distribución	Área (ha)	Porcentaje
1600	Este, Oeste	225	0,40%
1600-1700	Este	5.886	10,40%
1700-1800	Centro-Sur, Este, Oeste	26.968	47,64%
1800-1900	Centro-Norte	15.797	27,91%
1900-2000	Norte	7.733	13,66%
<b>Total</b>		<b>56.609</b>	<b>100%</b>

**Fuente:** Elaboración propia

El territorio cuenta con una red vial de 572 km de longitud. El 50,7% de estas vías corresponden al orden local, seguido por las vías secundarias con el 34,3% y el 15,0% para las vías de orden primaria. Las vías de orden local y primario se vinculan de forma directa a la cabecera cantonal, mientras que las vías de orden secundarias se encuentran principalmente conexas a las zonas rurales (Tabla 15). La facilidad de acceso es uno de los factores críticos a la hora de localizar un relleno sanitario. Por tanto, las carreteras deben ser accesibles durante todo el año (Mvula et al., 2023). La distancia de las carreteras determina el coste de transporte desde los centros de generación de residuos hasta los sitios de disposición final (Vidal et al., 2021). Por otro lado, un relleno no debe estar demasiado cerca de las carreteras para evitar olores adversos y efectos estéticos (Meléndez, 2022). Un relleno sanitario adecuado debe estar situado a una distancia razonable de las carreteras principales y secundarias.

**Tabla 15.** Red vial del cantón Mocache.

Orden	Material	Longitud (km)	Porcentaje
Local	Temporal y otros	290	50,7%
Primaria	Duro/pavimento, Suelto/no pavimento	86	15,0%
Secundaria	Suelto/no pavimento	196	34,3%
<b>Total</b>		<b>572</b>	<b>100%</b>

**Fuente:** Elaboración propia

El cantón Mocache se encuentra atravesado por una línea de transmisión eléctrica a distancia de 230 kw de potencia denominada Quevedo-Pascuales, perteneciente a la empresa TRANSELECTRIC S.A., que se extiende por 24 km en el norte del territorio. Este factor fue incluido en el análisis de idoneidad, en virtud de que se considera un criterio restrictivo dentro de la normativa ecuatoriana para el emplazamiento de cualquier tipo de instalación (incluidos rellenos sanitarios). Las áreas de líneas eléctricas deben evitarse al seleccionar emplazamientos para relleno sanitario debido al riesgo de dañar las infraestructuras y sugirió que se debe mantener una distancia de al menos 30 metros a ambos lados de las líneas eléctricas de alta tensión (Asefa et al., 2021), considerando la necesidad de suministrar energía a la infraestructura a la instalación del relleno (Dolui y Sarkar, 2021).

#### 3.4. Importancia de los criterios según la opinión de expertos y proceso de análisis jerárquico (AHP)

La consulta a expertos, permitió obtener cuatro matrices de comparación por pares y el vector de prioridad final de cada criterio resultante, según aplicación de metodología AHP. Esto dio como resultado que el factor ambiental es el más importante con un peso del 77% entre los tres factores



evaluados; es decir, el factor ambiental es 6 puntos más importante que el factor socioeconómico y 9 puntos más importantes que el factor físico. El coeficiente de coherencia de la matriz es de 5,6%, es decir, inferior al 10%, por lo que el resultado de la importancia relativa de los criterios de idoneidad es razonable para avanzar en el análisis de los criterios de cada factor (Tabla 16). De igual forma, en la selección de sitios de disposición final en Chachapoyas y Huancas (Perú) se obtuvo que el factor ambiental (8,2%) fue el más importante, seguido de cerca por el factor físico (7,6%); mientras que el aspecto socioeconómico (5,2%) se situó en último lugar, con un índice de coherencia global de <10% (Silva et al., 2022a). En cambio, para un estudio similar en el distrito de Peshawar (Pakistán), se obtuvo que los criterios socioeconómicos fueron los más importantes, con un valor de 48,24% (Ali et al., 2023).

**Tabla 16.** Matriz de comparación por pares de los criterios de idoneidad.

Criterio	Socioeconómico	Ambiental	Físico	Vector propio
Socioeconómico	1,00	0,17	3,00	0,162
Ambiental	6,00	1,00	9,00	0,770
Físico	0,33	0,11	1,00	0,068

CR = 5,6% < 10%

**Fuente:** Elaboración propia

Según los expertos, el criterio distancia a poblados, centros educativos y salud fue el de mayor importancia, con un vector de prioridad de 0,900 puntos entre los dos factores socioeconómicos. Por el contrario, distancia a zona urbana recibió una puntuación de 0,100 como criterio menos importante. Por lo tanto, el resultado de la importancia de distancia a poblados, centros educativos y salud se refleja probablemente por la vulnerabilidad de este en relación con la instalación de un relleno sanitario (Tabla 17). En cambio, (Silva et al., 2022a) encontró que la cercanía a zonas urbanas (30,1%) y la cercanía al acceso a vías de comunicación (26,1%) fueron los criterios más importantes en la determinación de sitios idóneos para rellenos sanitarios. El aporte de este factor se explica por la amplia relación de los sitios de disposición final con la comunidad aledaña, que dependiendo de las condiciones, pueden verse ampliamente afectadas. Por otra parte, (Ali et al., 2023), reveló al criterio distancia a los asentamientos humanos como el más importante con un valor de vector propio de 0,1568. Asimismo, (Santisteban et al., 2024) y (Chafiq et al., 2023) encontraron que la proximidad a zonas pobladas como el criterio más importante, con valores de 0,544 y 0,344 respectivamente. Esto indica que ubicar un vertedero de residuos sólidos lejos de las zonas residenciales es crucial para minimizar el impacto en la salud humana.

**Tabla 17.** Matriz de comparación por pares del factor socioeconómico.

Criterio socioeconómico	Distancia a poblados, centros educativos y salud	Distancia a la zona urbana	Vector propio
Distancia a poblados, centros educativos y salud	1,00	9,00	0,900
Distancia a zona urbana	0,11	1,00	0,100

CR = 4,3% < 10%

**Fuente:** Elaboración propia

La comparación por pares del factor ambiental reveló que el criterio más importante de todos fue el nivel freático, con un vector de prioridad de 0,644. La distancia a zonas inundables como el segundo criterio más importante con un peso factorial de 0,181 y la distancia a las fuentes de agua superficial como tercer criterio importante con una puntuación de 0,118, con una ligera diferencia en las ponderaciones entre ambas. Por otra parte, el uso del suelo recibió una ponderación de 0,058 como el componente menos importante (Tabla 18). En cambio, (Kamdar et al., 2019) encontró que el criterio uso del suelo reveló una importancia del 47,1%. De igual forma, (Mallick, 2021) identificó al criterio uso de la tierra/cobertura terrestre como el criterio más importante, con el 18,78%; algo similar identificó (Santisteban et al., 2024) para el criterio cobertura del suelo (45,5%) en Alto Utcubamba (Perú). Otro estudio de idoneidad en Fez (Marruecos) mostró al criterio distancia a las aguas superficiales como el más influyente, con un peso de 0,219 (Chafiq et al., 2023). Así, se demuestra que en zonas idóneas para rellenos sanitarios debe primarse la protección de las fuentes de agua y el suelo, dado que se vinculan de forma directa con el entorno y las comunidades colindantes.

**Tabla 18.** Matriz de comparación por pares del factor ambiental.

Criterio ambiental	Uso de suelo	Distancia a las fuentes de agua superficial	Nivel freático	Distancia a las zonas inundables	Vector propio
Uso de suelo	1,00	0,50	0,11	0,25	0,058
Distancia a las fuentes de agua superficial	2,00	1,00	0,12	1,00	0,118
Nivel freático	9,00	8,00	1,00	3,00	0,644
Distancia a zonas inundables	4,00	1,00	0,33	1,00	0,181

CR = 4,3% < 10%

**Fuente:** Elaboración propia

El criterio pendiente fue considerado por los participantes como el más importante, con una ponderación de 0,475, ocupando el primer lugar entre los factores físicos. En cambio, la textura del suelo y la precipitación recibieron una ponderación de 0,234 y 0,204, siendo los segundos criterios más importantes, con ponderaciones ligeramente similares, de igual manera los criterios red vial y distancia a líneas de transmisión eléctrica son considerados de menor importancia, con un vector de prioridad de 0,044 y 0,042 puntos (Tabla 19). De igual forma (Macalam et al., 2023), encontró que la pendiente es el subcriterio de mayor importancia, con un valor de 22,3%. En cambio, (Ali et al., 2023), reportó los criterios distancia a las carreteras (0,2118) y la pendiente (0,0795) como los más determinantes a la hora de establecer sitios óptimos en el distrito de Peshawar (Pakistán). Un estudio realizado en Alto Utcubamba (Perú) reveló a la pendiente (0,242) como el tercer criterio más importante (Santisteban et al., 2024). Mientras que (Chafiq et al., 2023) reveló a la distancia a las carreteras (0,160) como el criterio más importante. De esta forma, se revela que la pendiente y la distancia a las carreteras pueden ser muy determinantes en el entorno físico, a la hora de establecer sitios óptimos para rellenos sanitarios.

**Tabla 19.** Matriz de comparación por pares del factor físico.

Criterio físico	Pendiente	Textura del suelo	Precipitación	Distancia a la red vial	Distancia a las líneas de transmisión eléctrica	Vector propio
-----------------	-----------	-------------------	---------------	-------------------------	---	---------------

Pendiente	1,00	3,00	3,00	7,00	9,00	0,475
Textura del suelo	0,33	1,00	1,00	5,00	5,00	0,204
Precipitación	0,33	1,00	1,00	7,00	7,00	0,234
Distancia a red vial	0,14	0,20	0,14	1,00	1,00	0,044
Distancia a líneas de transmisión eléctrica	0,11	0,20	0,14	1,00	1,00	0,042

Fuente: Elaboración propia

La consulta a expertos muestra que el factor ambiental fue el de mayor importancia con un vector prioridad de 0,770 puntos (77,0%). Además, los pesos finales indican que, el criterio de mayor significancia es el nivel freático con una ponderación de 0,496 (49,6%), seguido de distancia a poblados, centros educativos y salud con un peso de 0,146 (14,6%) y distancia a zonas inundables con 0,139 (13,9%). Por otra parte, los criterios distancia a zona urbana= 0,016 (1,6%), precipitación y textura del suelo= 0,014 (1,4%), mostraron pesos similares debido a que el grupo de expertos determinó que estos tres criterios guardan relación entre sí. En cambio, los criterios de menor importancia para los encuestados fueron distancia a red vial y distancia a líneas de transmisión eléctrica con puntuación de 0,003 (0,3%) para ambos criterios pertenecientes al factor físico (Tabla 20).

Tabla 20. Matriz de ponderación final de los criterios

Factores	Vector propio	Criterio	Vector propio	Peso final	Clasificación
Socio-económico	0,162	Distancia a poblados, centros educativos y salud	0,900	0,146	2
		Distancia a zona urbana	0,100	0,016	7
Ambiental	0,770	Uso de suelo	0,058	0,044	5
		Distancia a fuentes de agua superficial	0,118	0,091	4
		Nivel freático	0,644	0,496	1
		Distancia a zonas inundables	0,181	0,139	3
Físico	0,068	Pendiente	0,475	0,032	6
		Textura del suelo	0,204	0,014	8
		Precipitación	0,234	0,016	7
		Distancia a red vial	0,044	0,003	9
		Distancia a líneas de transmisión eléctrica	0,042	0,003	9

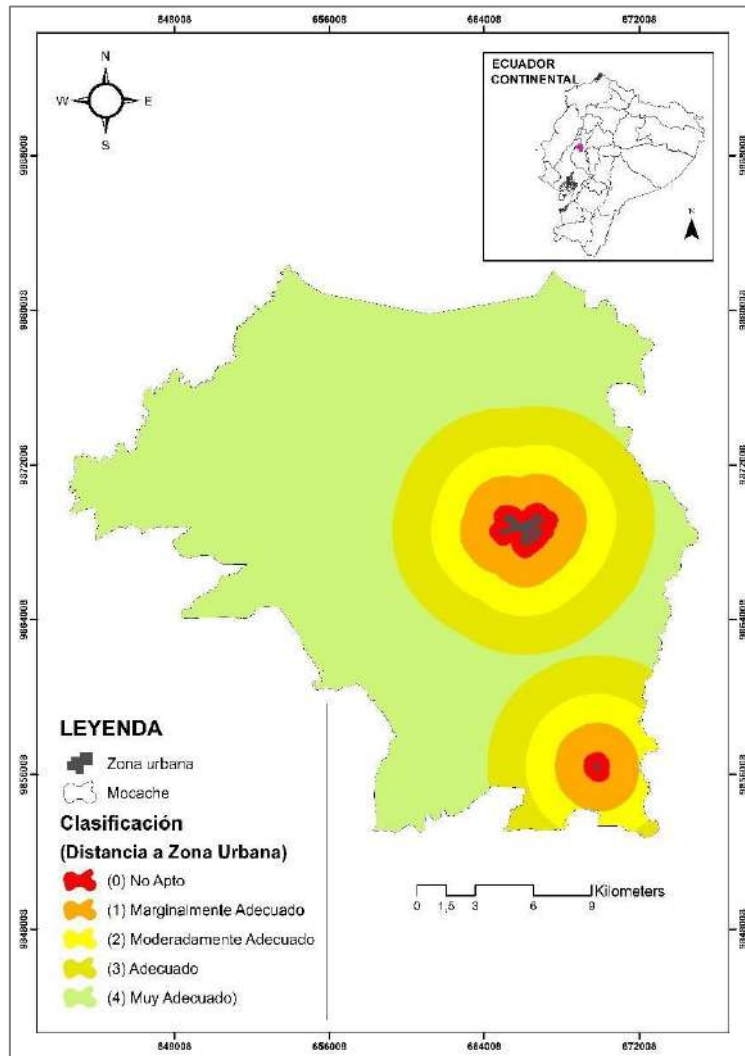
Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Áreas óptimas para el establecimiento del relleno sanitario

El nivel de idoneidad para el criterio distancia a la zona urbana dio como resultado que el 64,27% (35.607 ha) del territorio del cantón Mocache es muy adecuado para el emplazamiento del relleno sanitario, seguido el 17,36% (9.618 ha) del área de estudio es considerado como adecuado para este fin. En tercer lugar, se obtuvo un área moderadamente adecuada de 10,23% (5.669 ha) del territorio, además, el 6,57% (3.640 ha) del área del cantón corresponde al marginalmente adecuado. Por el contrario, el 1,57% (868 ha) del territorio corresponde a la zona no apta para este tipo de emplazamiento (Figura 3). Según (Mvula et al., 2023) los sitios con una distancia < 1000 m a centros

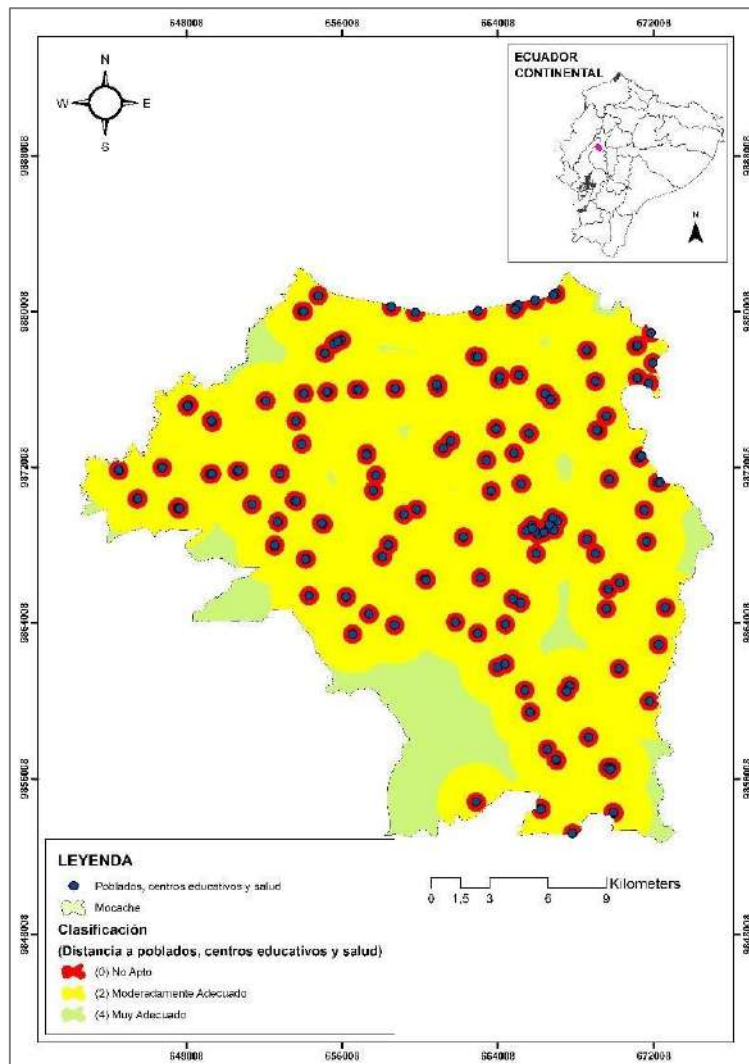
urbanos en Kitwe (Zambia) no son adecuados para un vertedero de desechos. A diferencia de (Asefa et al., 2021), que reportó el 88,62% del área total como inadecuada para el relleno sanitario en Harar (Etiopía), dado que las distancia de las edificaciones fue de 2 km.

**Figura 3.** Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio distancia a la zona urbana.



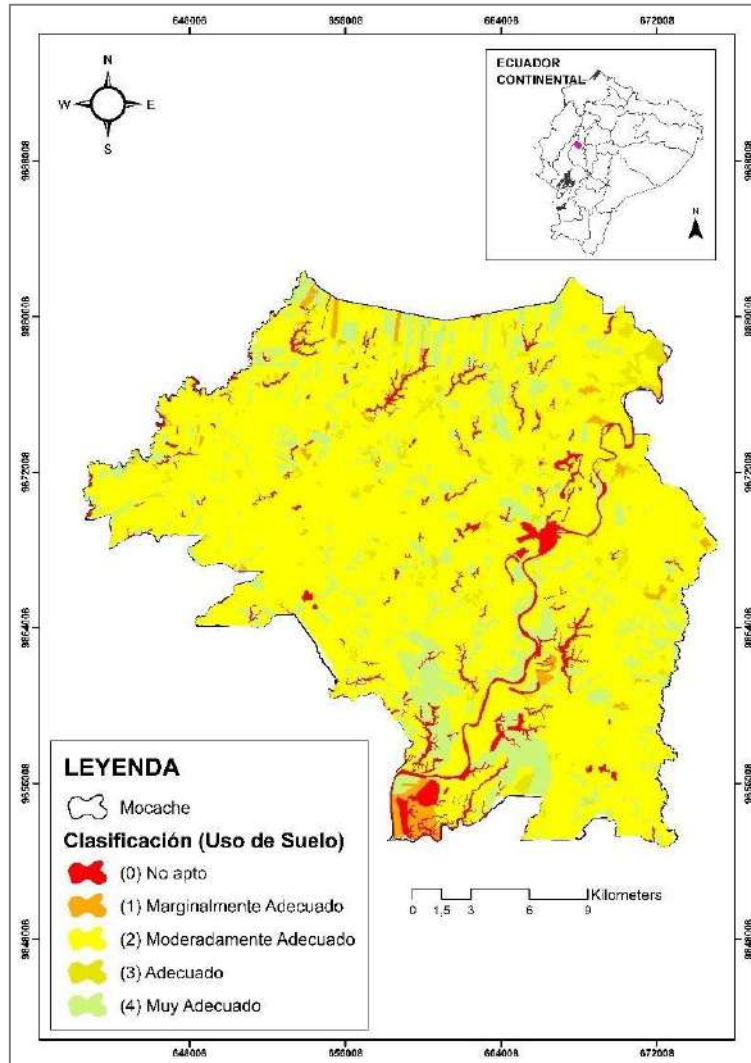
El 71,40% (39.557 ha) del territorio del cantón Mocache evidencia un nivel de idoneidad moderadamente adecuado para el establecimiento del relleno sanitario en función del criterio distancia a poblados, centros educativos y de salud. Por otro lado, se obtuvo un área de 9.228 ha (16,66%) como no apta. Por último, apenas el 11,94% (6.616 ha) del territorio corresponde a la zona muy adecuada para este fin (Figura 4). A diferencia de (Asefa et al., 2021) que reportó un resultado del 88,62% del territorio como inadecuado respecto a la distancia a zonas pobladas. En cambio, (Parastatidou et al., 2024) identificó que el 20% del área de estudio no es adecuada para la construcción de un relleno sanitario, mientras que el 80% es adecuada. Estos resultados son lógicos debido al bajo número de asentamientos ubicados en esa zona; sin embargo, el 80% caracterizado como adecuado (> 2000 m) se volverá más realista en las siguientes etapas.

**Figura 4.** Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio distancia a poblados, centros educativos y salud



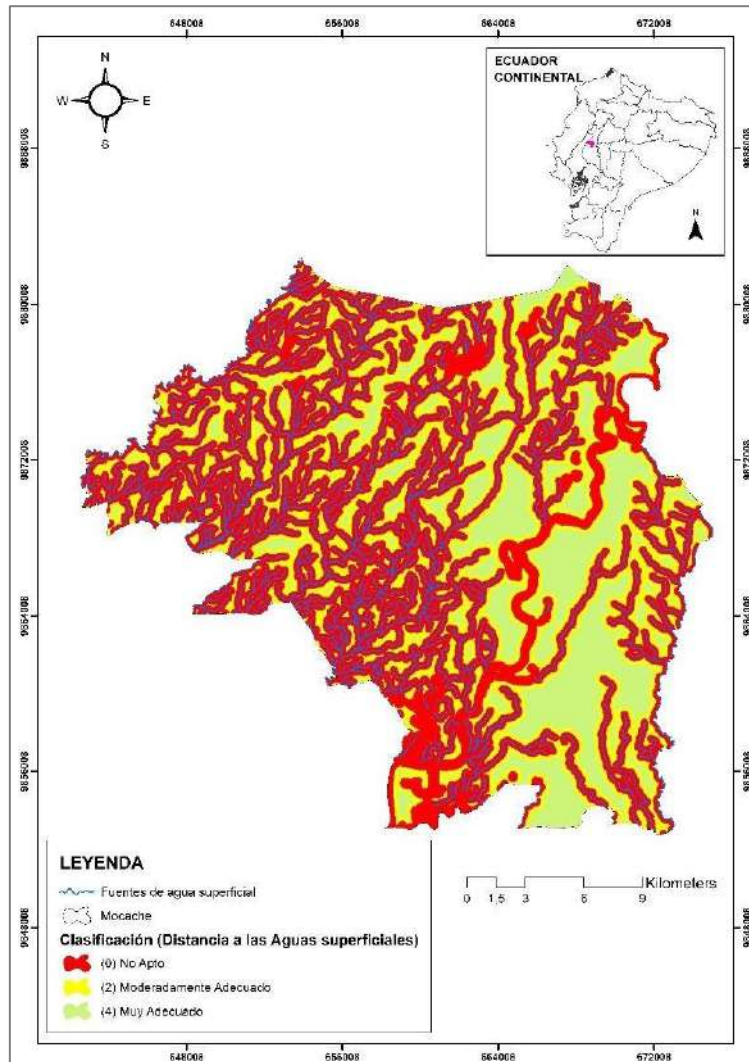
La mayor parte del territorio, equivalente al 76,36% (42.306,2 ha) reveló un nivel de idoneidad moderadamente adecuado para la instalación del relleno sanitario de acuerdo al criterio uso de suelo. En cambio, el 14,16% (7,847 ha) del área mostró ser muy adecuado para este tipo de emplazamiento. El 4,90% (2.713 ha) del área cantonal es no apto para este fin, mientras que las áreas con nivel de idoneidad adecuado y marginalmente adecuado revelaron una ocupación del 2,97% (1.643 ha) y 1,61% (891,8 ha ha) en orden, en torno a la instalación del relleno sanitario (Figura 5). En cambio, (Asefa et al., 2021) obtuvo que el 41,54% del área de estudio fue la menos adecuada para el establecimiento del sitio de disposición final de residuos, mientras que el 13,59% fue adecuada para la idoneidad del uso de la tierra y la cobertura de la tierra. La cobertura del suelo por uso del suelo es un factor crucial que necesita una consideración seria al ubicar un relleno sanitario para evitar el síndrome Not In My Back Yard (NIMBY) (Mvula et al., 2023).

Figura 5. Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio uso del suelo (reclasificado).



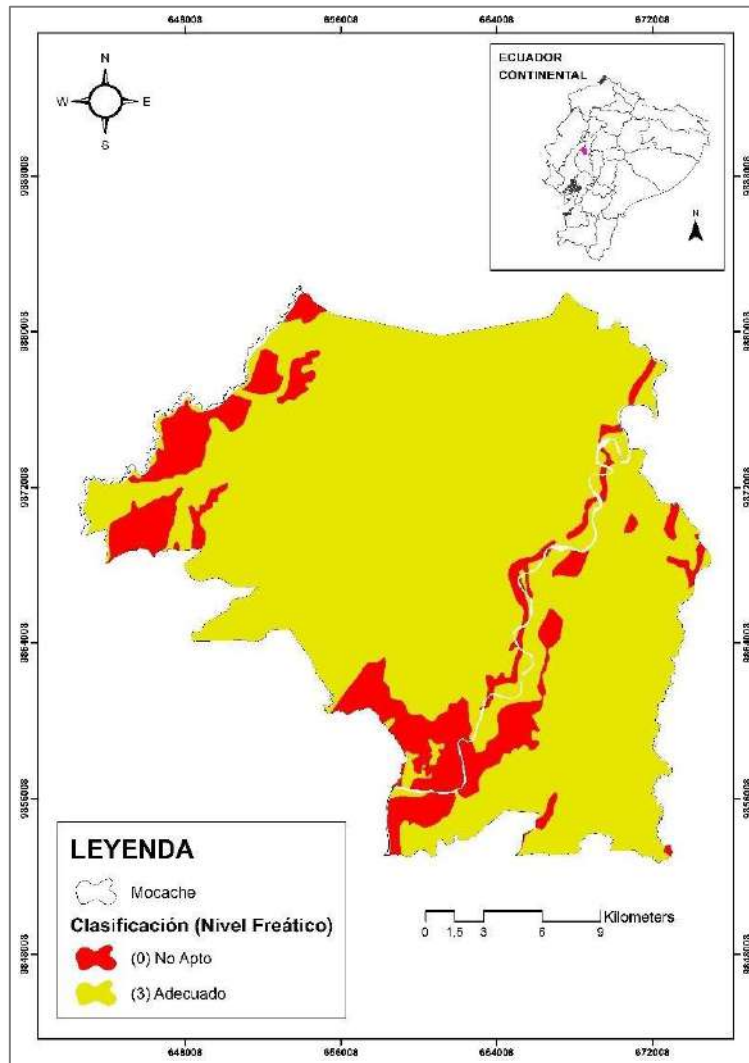
La idoneidad para el criterio distancia a fuentes de agua superficial mostró que la zona no apta para el establecimiento del relleno sanitario atañe al 56,67% (31.393 ha) del territorio cantonal. En cambio, la zona moderadamente adecuada corresponde al 25,96% (14.380 ha) del cantón, mientras que la zona muy adecuada para la instalación del relleno sanitario pertenece al 17,38% (9.628 ha) del territorio (Figura 6). En un estudio sobre idoneidad de rellenos sanitarios en Kitwe (Zambia) se determinó que el criterio ríos y arroyos obtuvo un área adecuada del 81% respecto a la totalidad del territorio (Mvula et al., 2023); al igual que lo identificado por (Parastatidou et al., 2024) en la región de Calcídica (Grecia), dónde el 92,5% del área se considera adecuada para el desarrollo de un vertedero. Esta marcada diferenciación de la idoneidad del territorio respecto a las fuentes de agua superficial se explica por el hecho de que la densidad de la red de ríos y arroyos en Kitwe y Calcídica es muy baja, en comparación con el área cubierta por ríos y esteros en Mocache, que abarca más del 50,0% del territorio, lo cual hace que este criterio sea aún más restrictivo.

**Figura 6.** Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio distancia a fuentes de aguas superficial.



El 86,65% (48.003 ha) del territorio del cantón Mocache con respecto al criterio nivel freático corresponde a la zona moderadamente adecuado para el emplazamiento del relleno sanitario. Por el contrario, la zona no apta para este tipo de emplazamiento pertenece al 13,35% (7.398 ha) del sitio de estudio (Figura 7). En un estudio desarrollado en Calcídica (Grecia) los manantiales de agua dulce se encuentran dentro del acuífero fracturado y excluyen una pequeña parte del área de estudio (0,3%), considerada como poco adecuada para el establecimiento de vertederos (Parastatidou et al., 2024). Las áreas con un nivel freático superior a 20 m por debajo del suelo fueron consideradas como adecuadas (Ali et al., 2021), en una investigación desarrollada en Memari (India). El nivel freático más profundo tiene menos posibilidades de contaminación del agua subterránea porque los contaminantes (lixiviados) necesitan un tiempo de viaje más largo para llegar a las fuentes de agua dulce.

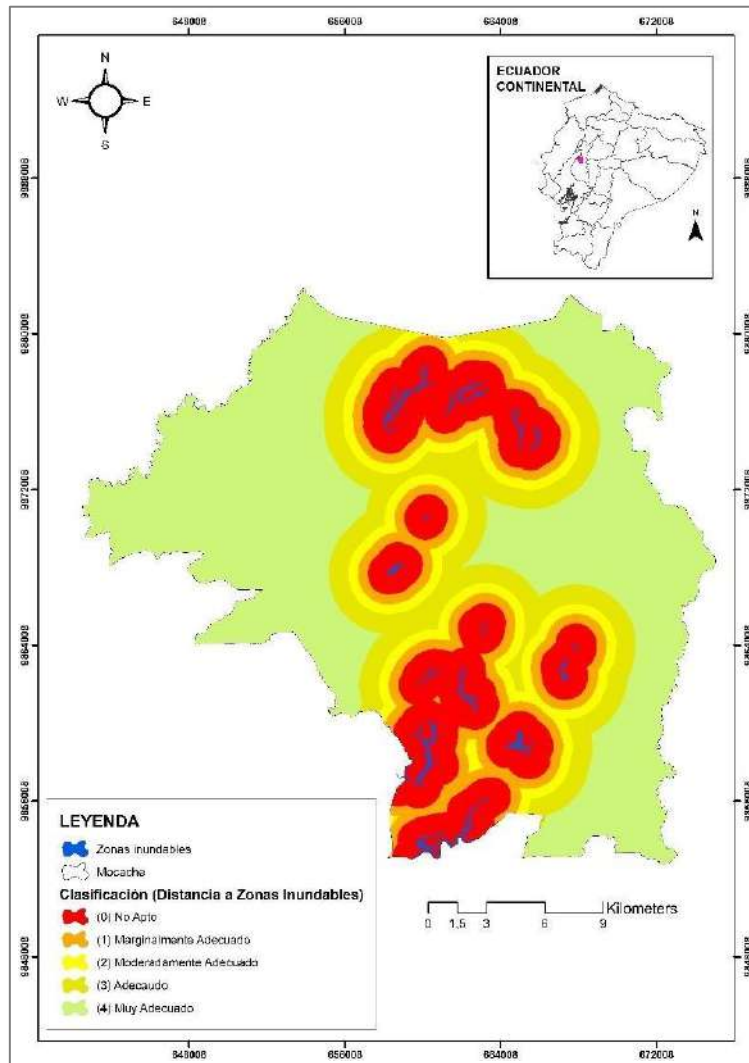
Figura 7. Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio nivel freático (reclasificado).



El criterio distancia a zonas inundables evidenció que el 47,67% (26.411 ha) del área del cantón es muy adecuado para el establecimiento del relleno sanitario. En cambio, el 19,75% (10.940 ha) del área total del cantón fue catalogada como no apto, seguido del 14,63% (8.104 ha) definida como área adecuada para este fin. De igual forma, el 9,49% (5.257 ha) del sitio de estudio concierne a la zona marginalmente adecuado y el 8,46% (4.689 ha) del territorio corresponde a la zona moderadamente adecuado para este tipo de infraestructura (Figura 8). En Calcídica (Grecia) el 68,4% del área de estudio es adecuada para el establecimiento de sitios para vertederos de residuos urbanos, según el criterio inundación (Parastatidou et al., 2024). En regiones con presencia de zonas susceptible a inundación, como en el caso de Mocache, es necesario definir zonas de restricción más amplias, debido a que es un criterio con características de estacionalidad, vinculados de forma directa a las precipitaciones y al tipo de suelo.

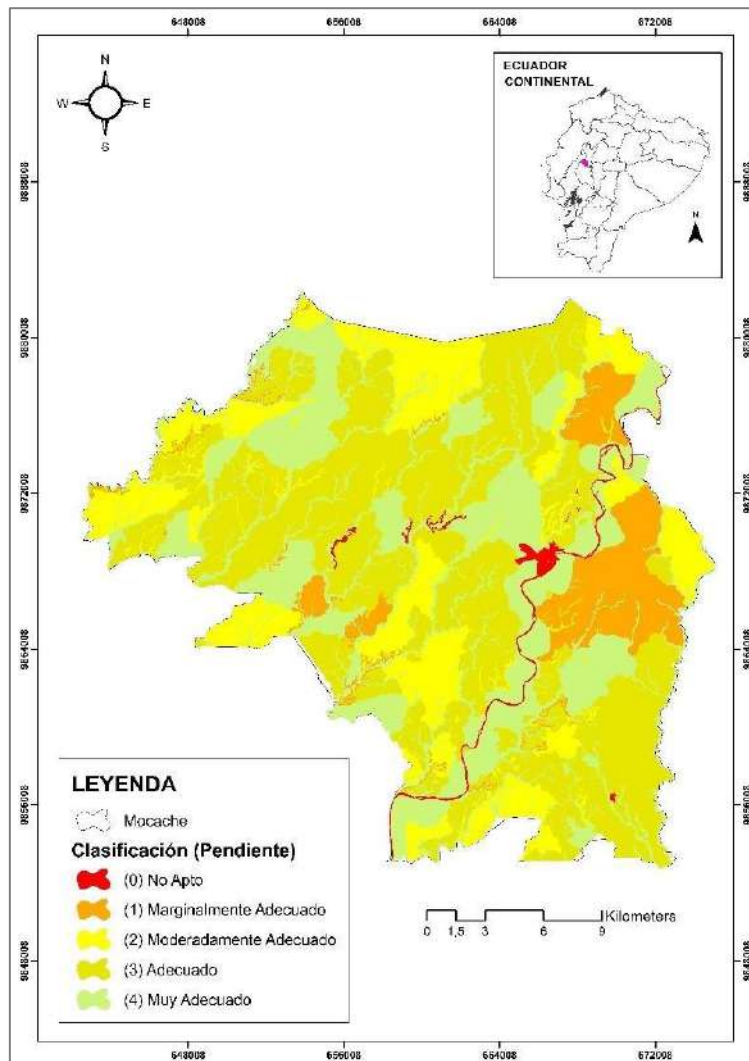


Figura 8. Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio distancia a zonas inundables.



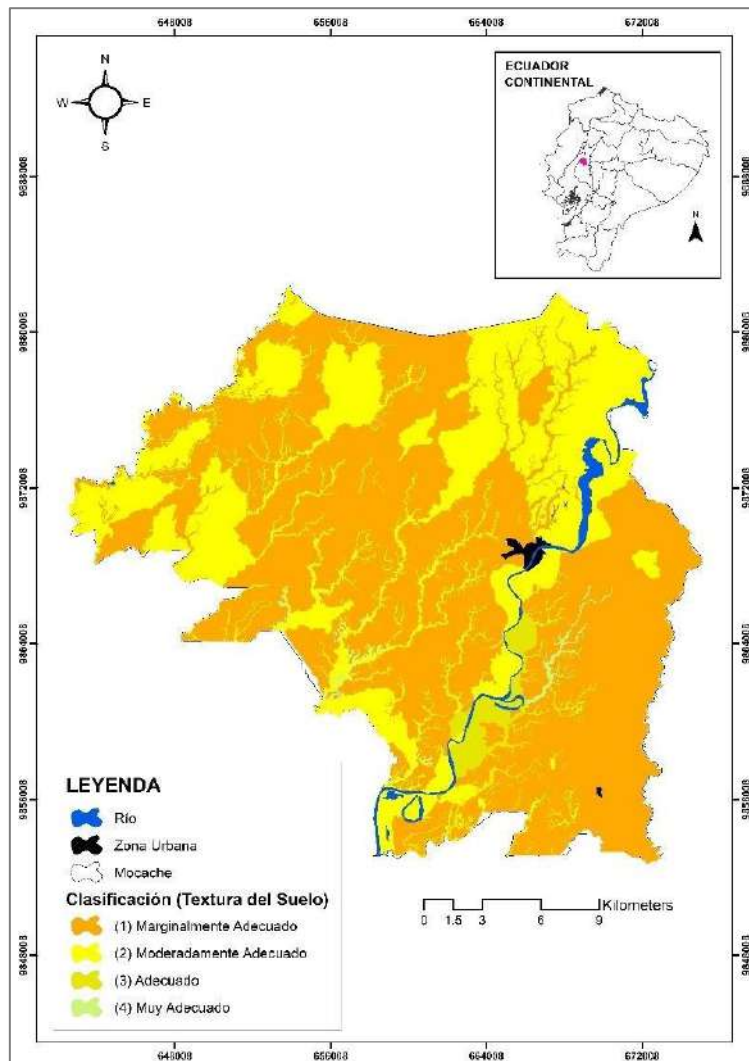
El criterio pendiente presentó un nivel de idoneidad adecuado para la instalación del relleno sanitario equivalente al 39,92% (22.118,1 ha) del territorio del cantón Mocache. De igual manera, el 30,34% (16.810 ha) del área cantonal pertenece a la zona muy adecuado, seguido el 19,26% (10.670 ha) del territorio como moderadamente adecuado. Por otra parte, se obtuvo que el 9,32% (5.165 ha) del sitio de estudio corresponde a la zona marginalmente adecuado y el 1,15% (637,9 ha) del cantón como área no apto para este fin (Figura 9). Por el contrario, en Harar, este de Etiopía, se reportó que la mayor parte del área de estudio (75%) está cubierta por sitios altamente adecuados para rellenos sanitarios en función del criterio pendiente del suelo, con valores entre 0° - 7° (Asefa et al., 2021). En Kitwe (Zambia) el 99% de las áreas presentaron una condición de adecuada según pendiente del suelo, dado que los niveles de pendiente en esta región son generalmente suaves (Mvula et al., 2023).

**Figura 9.** Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio pendiente del suelo (reclasificado).



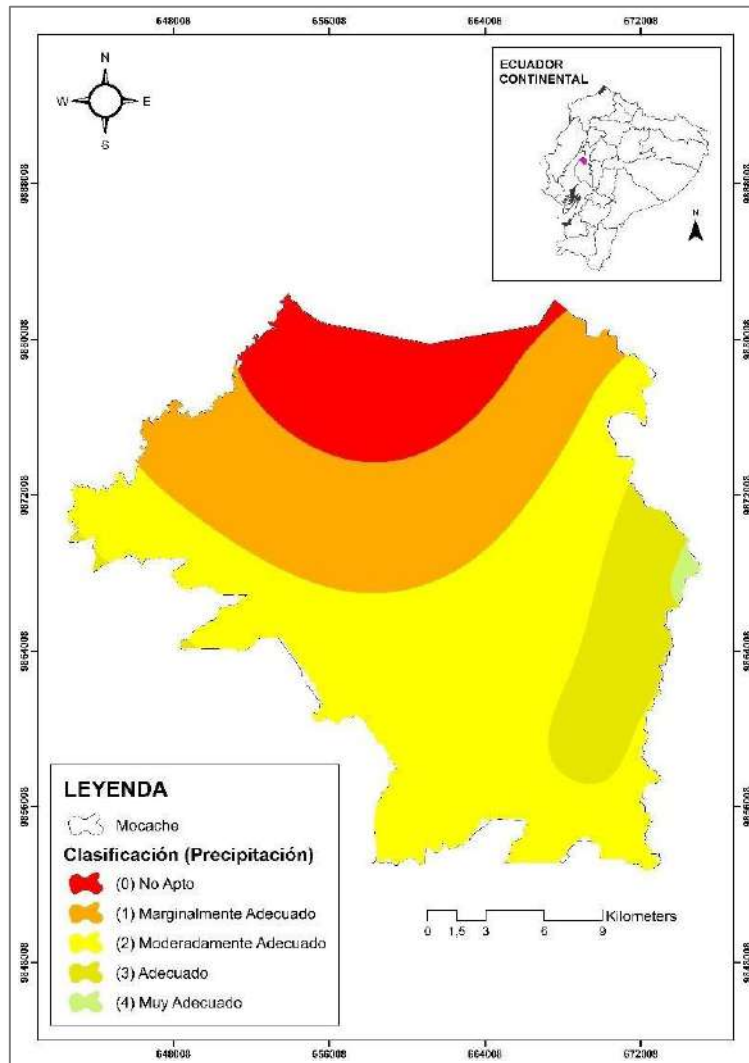
El 63,78% (35.336,9 ha) del área total de Mocache respecto al criterio textura del suelo corresponde a la zona marginalmente adecuada para la ubicación del relleno sanitario, seguido de la zona moderadamente adecuada con el 32,85% (18.200 ha) del territorio. Por el contrario, el área adecuada atañe al 2,64% (1.462 ha) del sitio de estudio y apenas el 0,73% (402,1 ha) del área cantonal incumbe a la zona muy adecuada, respectivamente para el establecimiento del relleno (Figura 10). En Chachapoyas y Huancas (Perú) se identificaron áreas muy adecuadas (42,16%) respecto al criterio de textura, caracterizado por suelos franco arenoso - arcilloso, (60 % de arena, 30 % de arcilla y 10 % de limos) (Silva et al., 2022b). Esta diferencia con respecto a Mocache se debe a la ubicación geográfica y la geología del suelo, entre ambas locaciones.

**Figura 10.** Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio textura del suelo (reclasificado).



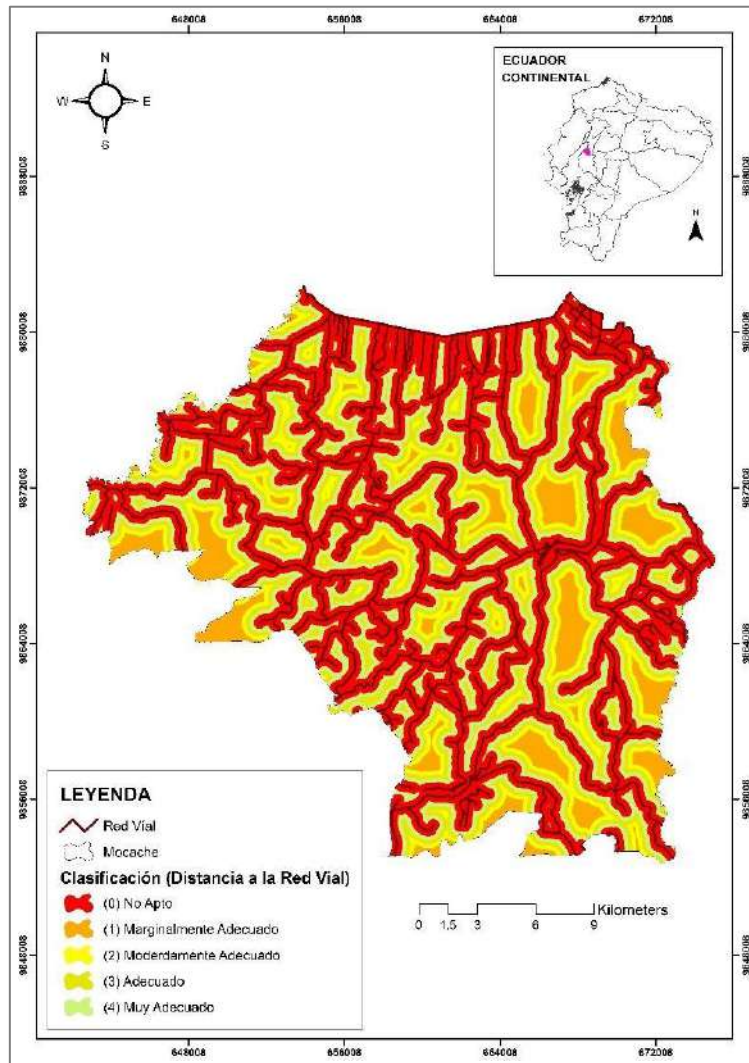
La zona moderadamente adecuada para el emplazamiento del relleno sanitario con respecto al criterio precipitación equivale al 46,49% (25.757 ha) del área del cantón Mocache, mientras que el 28,52% (15.800 ha) del territorio constituye la zona marginalmente adecuada. Por otra parte, el 13,96% (7.733 ha) del área del cantón pertenece a la zona no apta para para este tipo de emplazamiento, a su vez, el 10,62 % (5.886 ha) atañe al área adecuada y el 0,41% (225 ha) del lugar es considerado muy adecuado para este fin (Figura 11). Mientras que, en Chachapoyas y Huancas la precipitación media anual evidenció un área moderadamente adecuado del 85,1% con precipitaciones anuales acumuladas de 811 mm (Silva et al., 2022b). A diferencia de Mocache, en donde las precipitaciones anuales superan los 1500 mm.

Figura 11. Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio precipitación (reclasificado).



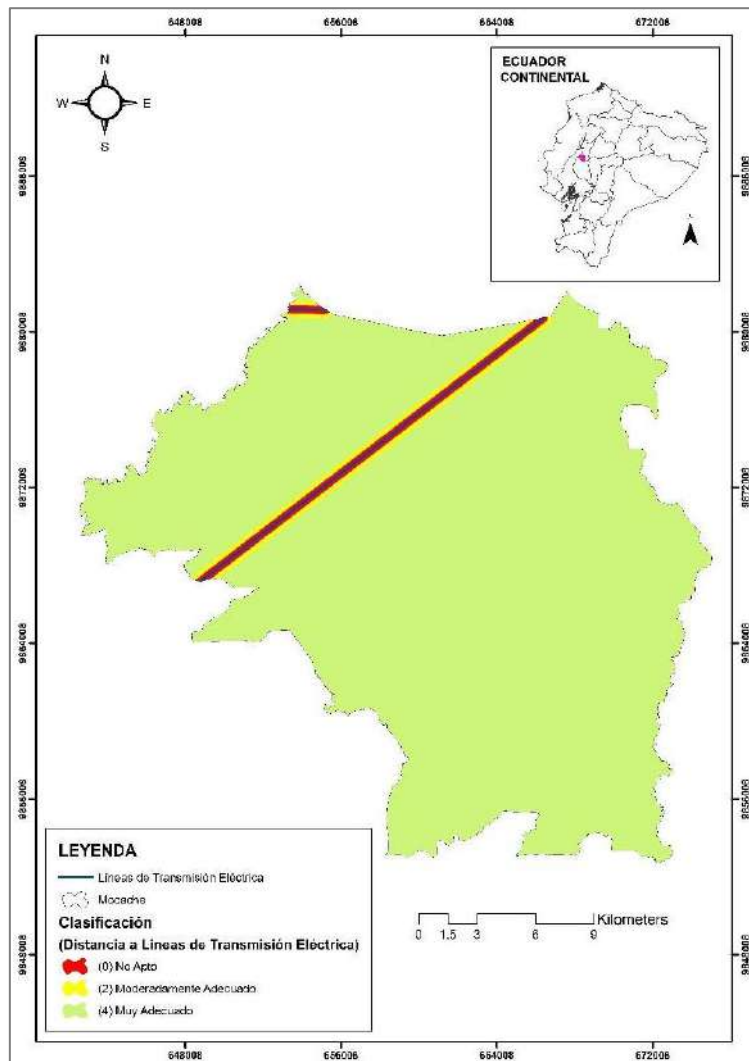
La idoneidad para el criterio distancia a red vial reveló que la zona no apta para la instalación de un relleno sanitario concierne al 48,11% (26.654 ha) del cantón Mocache. En cambio, la zona muy adecuada incumbe al 21,41% (11.860 ha) del cantón, seguido de la zona adecuada con el 13,68% (7.579 ha) del territorio. Por otro lado, el 8,82% (4.889 ha) del lugar de estudio pertenece a la zona marginalmente adecuada, de igual manera, el área moderadamente adecuada corresponde al 7,98% (4.419 ha) del área cantonal, con ligeras diferencias (Figura 12). En contraposición, (Ayaim et al., 2019) encontró que el 21,58% del área de estudio no es adecuada en relación con el criterio de idoneidad de la carretera. No obstante, entre el 18% y 56% del territorio de Kitwe (Zambia) se clasifica como más adecuado en función de la red vial. Esto se puede explicar por el hecho de que la red de carreteras en Kitwe es bastante densa y la accesibilidad es uno de los factores deseables para un vertedero idóneo (Mvula et al., 2023). En Harar (Etiopía), el 63,82% de la zona de estudio fue catalogada como muy adecuada según el criterio red vial (Asefa et al., 2021).

Figura 12. Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio distancia a la red vial.



El nivel de idoneidad del cantón Mocache con respecto al criterio distancia a líneas de transmisión eléctrica determinó que el 96,30% (53.349 ha) del área cantonal pertenece a la zona muy adecuada para la ubicación del relleno sanitario. Por el contrario, se obtuvo que el 1,88% (1.043 ha) del territorio corresponde al área moderadamente adecuada, seguido el 1,82% (1.009 ha) del cantón atañe a la zona no apta para el establecimiento del relleno sanitario (Figura 13). Las líneas eléctricas deben evitarse al seleccionar emplazamientos para relleno sanitario debido al riesgo de dañar las infraestructuras y sugirió que se debe mantener una distancia de al menos 30 metros a ambos lados de las líneas eléctricas de alta tensión (Asefa et al., 2021); no obstante, se debe considerar la necesidad de suministrar energía eléctrica a la infraestructura del relleno sanitario (Dolui y Sarkar, 2021).

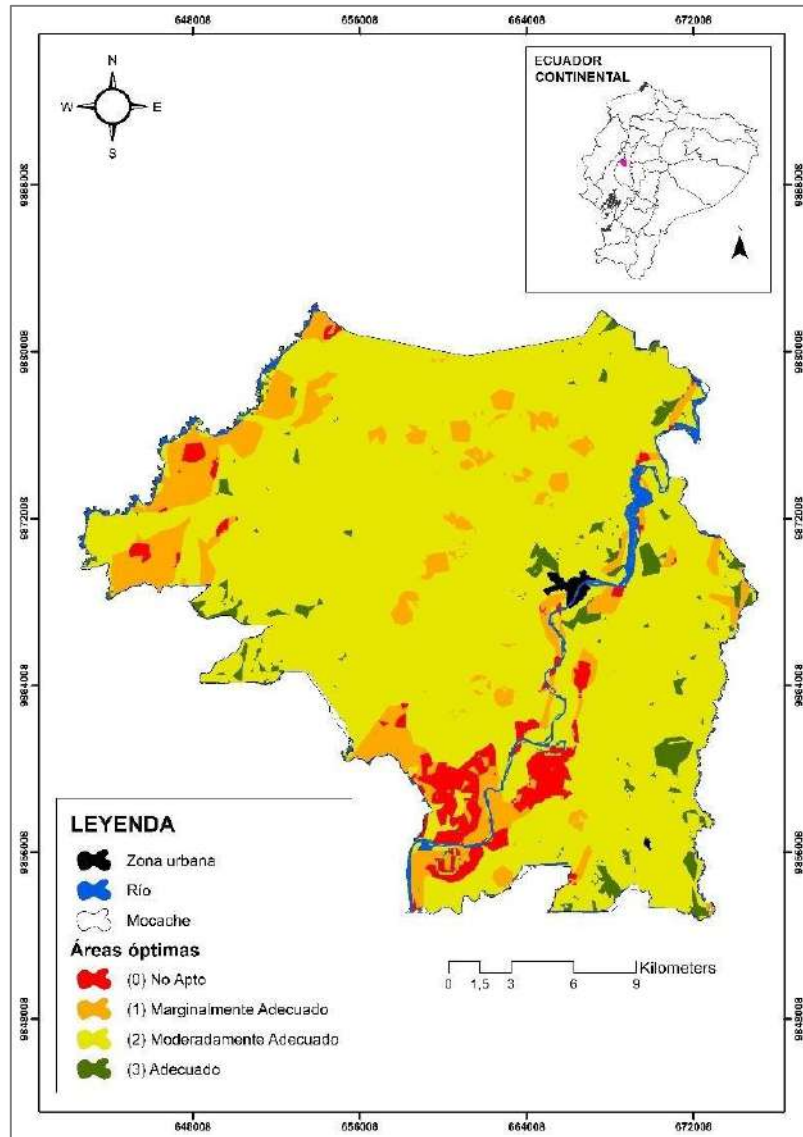
**Figura 13.** Área óptima para el establecimiento del relleno sanitario, según criterio distancia a líneas de transmisión eléctrica.



Luego de aplicada la suma ponderada para integración de factores dentro del entorno SIG, se obtuvo las áreas idóneas para el establecimiento del relleno sanitario. El 81,74% (45.287 ha) del área total de Mocache corresponde a la zona moderadamente adecuada, mientras que el 11,30% (6.260 ha) fue considerado como marginalmente adecuado, y como zona no apta al 3,95% (2.186 ha) del territorio de estudio. Sin embargo, sólo el 3,01% (1.668 ha) del cantón pertenece a la zona adecuada (Figura 14). Esto se asemeja mucho a lo identificado en el municipio de Ga South (Ghana), donde el 2,74% del área total se identificó como sitios adecuados equivalente a 9,39 km<sup>2</sup>, y el 2,62% del área fueron sitios muy adecuadas, con una extensión de 8,95 km<sup>2</sup> (Ayaim et al., 2019). A diferencia de Chachapoyas y Huanucas (Perú) en donde se contabilizaron doce polígonos altamente adecuados con áreas  $\geq 3,2$  ha (Silva et al., 2022b), al igual que en la Mancomunidad Alto Utcubamba (Perú), con presencia de condiciones aptas en el 0,069% (0,65 km<sup>2</sup>) del territorio (Santisteban et al., 2024). En cambio, en la región Calcídica (Grecia) el 12,7% del área total es apta para la posible construcción de un relleno sanitario (Parastatidou et al., 2024). La locación actual del relleno sanitario de Mocache corresponde a una zona moderadamente adecuada, al igual que los sitios de disposición final de la región de Asir

(Arabia Saudita), distrito de Peshawar (Pakistán) y Kitwe (Zambia), cuyos emplazamientos vigentes se encuentran dentro de las áreas menos adecuadas (Mallick, 2021) (Ali et al., 2023) (Mvula et al., 2023), requiriendo la reubicación en otros sitios del territorio en donde los efectos sobre el medio ambiente y la salud humana sean menores.

Figura 14. Área óptima final para el establecimiento del relleno sanitario.



#### 4. Conclusiones

El 45% de los criterios seleccionados para evaluar la idoneidad del emplazamiento del relleno sanitario en el cantón Mocache corresponden a restricciones y requerimientos legales estipulados en la normativa nacional vigente. En cambio, el 55% de estos criterios atañen a consideraciones técnicas de diseño y localización, definidas en la literatura científica, y corroboradas a través de estudios de campo. En este punto, conviene plantear la necesidad de que la normativa ecuatoriana incorpore una mayor cantidad de criterios de restricción para sitios de disposición final de desechos, a fin de que aporten a la obtención de áreas mucho más idóneas.

La evaluación multicriterio y la consulta a expertos revelaron que el factor ambiental fue el más importante a la hora de definir la locación del relleno sanitario, con un 77% de puntuación. Por otra

parte, el nivel freático con el 49,6% fue el criterio más relevante en la determinación del área para el relleno, seguido por el criterio distancia a poblados, centros educativos y salud, y distancia a zonas inundables, con el 14,6% y 13,9% en orden. Esto denota la necesidad e importancia de precautelar las fuentes de agua y la salud humana a la hora de establecer un relleno sanitario.

El 3,01% del territorio del cantón Mocache, equivalente a 1.668 ha, es “adecuado” para el emplazamiento del relleno sanitario. Además, se observa que diez emplazamientos cumplen con la extensión mínima (35 ha) requeridas para un relleno de tamaño mediano, todos ellos localizados en la región oriental del cantón. Esto implica que la probabilidad de seleccionar sitios idóneos para rellenos sanitarios en este territorio es muy limitada, y más aún, sino se toman en cuenta el entramado de criterios físicos, socioeconómicos y medioambientales existentes. Esto hace reafirmar el rol protagónico de la planificación territorial sostenible en la localización de sitios de disposición final de residuos urbanos.

En correspondencia con los resultados obtenidos, se acepta la hipótesis de investigación, misma que reza: “La localización actual del relleno sanitario del cantón Mocache es inadecuada, dado que ha sido definida sin considerar la idoneidad de los criterios físicos, socioeconómicos y ambientales, con lo cual se afecta la calidad ambiental local y la salud de la población del área de influencia directa”. Todo esto sabiendo que la locación real del relleno sanitario corresponde a un área con un nivel de idoneidad “moderadamente adecuado”, misma que no garantiza una operatividad sostenible de la instalación en el largo plazo.

El presente estudio proporciona un enfoque cuantitativo y cualitativo valioso para comprender la idoneidad de los rellenos sanitarios en Ecuador, que puede ser utilizado como un marco de referencia por parte de ingenieros, arquitectos, geólogos, hidrogeólogos, planificadores, autoridades y tomadores de decisiones para reconsiderar la forma en la que se están seleccionando los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos; además, que permita comprender y dimensionar los efectos que un relleno sanitario puede ocasionar al entorno y la salud humana.

La metodología propuesta en esta investigación apuesta por la importancia de un enfoque multidisciplinario en la planificación de la gestión de residuos y destaca la necesidad de prácticas de gestión de residuos sostenibles que prioricen la protección del medio ambiente, la salud pública y la participación de la comunidad. La implementación de estas prácticas de gestión de residuos sostenibles puede servir como modelo para otras ciudades y regiones que enfrentan desafíos similares y contribuir al esfuerzo por garantizar la ubicación óptima de rellenos sanitarios dentro del marco del desarrollo sostenible.

En torno a la problemática actual sobre la ubicación de los rellenos sanitarios, nace una idea ilusoria de que los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos funcionen sin sitios de disposición final, por lo menos en un futuro previsible dentro de una generación; sin embargo, incluso si se logran altos niveles de prevención, reutilización y reciclaje de residuos, siempre será necesario enviar algunos materiales de desecho para su eliminación final. No obstante, acaso ¿los avances tecnológicos y las técnicas de reciclaje de residuos podrán ayudar a eliminar la brecha por contar con instalaciones de disposición final en un futuro mediano?

En virtud de las notorias dificultades para lidiar con los sitios de disposición final de residuos, conviene incursionar en el concepto de “rellenos sanitarios sostenibles”, como una alternativa innovadora, que garantiza la asimilación de materiales de desechos de forma segura al medio



ambiente circundante, partiendo de una localización idónea y una eficaz operatividad. Dado que las evidencias científicas en este campo son aún escasas, queda por responder: ¿si los rellenos sanitarios sostenibles son una alternativa viable en el largo plazo? ¿Podrán ser implementados en los países en vías de desarrollo? ¿Cuál es el camino a seguir para su implementación?

### Referencias bibliográficas

- Aderoju, O. M., Dias, G. A., & Gonçalves, A. J. (2020). A GIS-based analysis for sanitary landfill sites in Abuja, Nigeria. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 551–574. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0206-z>
- Ali, I., Islam, A., Ali, S. M., & Adnan, S. (2023). Identification and selection of suitable landfill sites using GIS-based multi-criteria decision analysis in the Peshawar District, Pakistan. *Waste Management & Research*, 41(3), 608–619. <https://doi.org/10.1177/0734242X221124069>
- Ali, S. A., & Ahmad, A. (2020). Suitability analysis for municipal landfill site selection using fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technique. *Environmental Earth Sciences*, 79(10), 227. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08970-z>
- Ali, S. A., Parvin, F., Al-Ansari, N., Pham, Q. B., Ahmad, A., Raj, M. S., Anh, D. T., Ba, L. H., & Thai, V. N. (2021). Sanitary landfill site selection by integrating AHP and FTOPSIS with GIS: a case study of Memari Municipality, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 7528–7550. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11004-7>
- Alkaradaghi, K., Ali, S. S., Al-Ansari, N., & Laue, J. (2019). Landfill site selection using GIS and multi-criteria decision-making AHP and SAW methods: a case study in Sulaimaniyah Governorate, Iraq. *Conference of the Arabian Journal of Geosciences*, 289–292.
- Asefa, E. M., Damtew, Y. T., & Barasa, K. B. (2021). Landfill Site Selection Using GIS Based Multicriteria Evaluation Technique in Harar City, Eastern Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 15, 11786302211053174. <https://doi.org/10.1177/11786302211053174>
- Asefi, H., Zhang, Y., Lim, S., Maghrebi, M., & Shahparvari, S. (2020). A multi-criteria decision support framework for municipal solid waste landfill siting: a case study of New South Wales (Australia). *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08565-y>
- Ayaim, M. K., Fei-Baffoe, B., Sulemana, A., Miezah, K., & Adams, F. (2019). Potential sites for landfill development in a developing country: A case study of Ga South Municipality, Ghana. *Heliyon*, 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02537>
- Bedoya, S. M. (2023). Reflexiones frente a los rellenos sanitarios en Colombia: impacto, tratamiento y pautas para la mitigación de los daños ambientales. *Revista Jurídica Mario Alario D'Filippo*, 15(30), 277–288. <https://doi.org/10.32997/2256-2796-vol.15-num.30-2023-4249>
- Bilas, G., Karapetsas, N., Gobin, A., Mesdanitis, K., Toth, G., Hermann, T., Wang, Y., Luo, L., Koutsos, T. M., & Moshou, D. (2022). Land Suitability Analysis as a Tool for Evaluating Soil-Improving Cropping Systems. *Land*, 11(12), 2200.
- Brand, J. H., & Spencer, K. L. (2020). Will flooding or erosion of historic landfills result in a significant release of soluble contaminants to the coastal zone? *Science of The Total Environment*, 724, 138150. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138150>

- Bravo, M. E. G., & García, A. I. L. (2023). Análisis de la ubicación óptima de un relleno sanitario a través de una metodología multicriterio, en el municipio de León, Guanajuato, México. *Actas Del X Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos: Hacia La Circularidad y El Residuo Cero. Castelló de La Plana, 20, 21 y 22 de Junio de 2023*, 72.
- Burneo, D., Cansino, J. M., & Yñiguez, R. (2020). Environmental and socioeconomic impacts of urban waste recycling as part of circular economy. The case of cuenca (Ecuador). *Sustainability*, 12(8), 3406.
- Canlas, A. C. A. (2021). *Integration of GIS and AHP for sanitary landfill site suitability analysis: A case study of Batangas province*.
- Carević, I., Sibinović, M., Manojlović, S., Batočanin, N., Petrović, A. S., & Srejić, T. (2021). Geological Approach for landfill site selection: A case study of Vršac Municipality, Serbia. *Sustainability*, 13(14), 7810. <https://doi.org/10.3390/su13147810>
- Chafiq, T., Hmamou, M., Ouhammou, I., Labriki, A., ElHabchi, M., & Raji, M. (2023). Geographic analysis of landfill suitability in Fez, Morocco: a multi-criteria approach. *Discover Environment*, 1(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s44274-023-00016-y>
- Cobos, S. L., Guamán, J., & Zúñiga, J. (2023). Suitable site selection for transfer stations in a solid waste management system using analytical hierarchy process as a multi-criteria decision analysis: a case study in Azuay-Ecuador. *Environment, Development and Sustainability*, 25(2), 1944–1977.
- Cobos, S. L., & Solano, J. L. (2020). Sanitary landfill site selection using multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process: A case study in Azuay province, Ecuador. *Waste Management & Research*, 38(10), 1129–1141. <https://doi.org/10.1177/0734242X20932213>
- Cobos, S. L., Solano, J. L., & Gárate, P. C. (2021). Criterios de selección para un sitio de disposición final de residuos sólidos no Peligrosos. Revisión de Normas Ambientales Latinoamericanas y su Contraste con la Norma Ecuatoriana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37.
- Dávila, C. A. C. (2021). Criterios y métodos para seleccionar la ubicación de los rellenos sanitarios. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), 9–19. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.764>
- de Oliveira, F. D. G., Robey, N. M., Smallwood, T. J., Spreadbury, C. J., & Townsend, T. G. (2022). Landfill gas as a source of anthropogenic antimony and arsenic release. *Chemosphere*, 307(2), 135739. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135739>
- del Pilar Cárdenas, R., López, G. A., Talero, D., Cely, A. P., Murillo, L. M., Velasco, G. A., & Contreras, F. (2022). Impacto ambiental y riesgos potenciales generados en los rellenos sanitarios. Revisión narrativa de la literatura: Narrative literature review. *Revista Investigación En Salud Universidad de Boyacá*, 9(2), 100–117. <https://doi.org/10.24267/23897325.746>
- Desta, M. D., Tesseme, T., Yigezu, T. T., & Nigussie, A. B. (2023). *Evaluation of Landfill Site Suitability Using GIS, Remote Sensing, and the Multi-Criteria Decision-Making (AHP) Approach, Ethiopia*.
- Díaz, C. P., & Espinoza, I. L. (2020). El impacto climático de la basura: Análisis normativo de los residuos sólidos, la recuperación de suelos y la minería de rellenos sanitarios. *Revista de Derecho Ambiental*, 14, 71–95. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2020.54151>
- Dolui, S., & Sarkar, S. (2021). Identifying potential landfill sites using multicriteria evaluation modeling and GIS techniques for Kharagpur city of West Bengal, India. *Environmental*

- Challenges*, 5, 100243. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100243>
- Fazzo, L., Manno, V., Iavarone, I., Minelli, G., De Santis, M., Beccaloni, E., Scaini, F., Miotto, E., Airoma, D., & Comba, P. (2023). The health impact of hazardous waste landfills and illegal dumps contaminated sites: An epidemiological study at ecological level in Italian Region. *Frontiers in Public Health*, 11, 996960. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.996960>
- García, M. A., Castillo, L. A., Bastida, C. Á., Linares, I., & Martínez, V. (2022). Los rellenos sanitarios como fuente de contaminación del agua subterránea por infiltración de lixiviados: efectos en la salud y el medio ambiente. *Ideas En Ciencias de La Ingeniería*, 1(2), 1–15.
- Gautam, K., Pandey, N., Yadav, D., Parthasarathi, R., Turner, A., Anbumani, S., & Jha, A. N. (2024). Ecotoxicological impacts of landfill sites: Towards risk assessment, mitigation policies and the role of artificial intelligence. *Science of the Total Environment*, 927, 171804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171804>
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Guerra, A. R., & Cajas, K. A. B. (2022). Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): análisis de una década de gestión en países de Europa y América. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas: REMCB*, 43(1), 49–61. <https://doi.org/10.26807/remcb.v43i1.919>
- Hettiarachchi, H., Ryu, S., Caucci, S., & Silva, R. (2018). Municipal solid waste management in Latin America and the Caribbean: Issues and potential solutions from the governance perspective. *Recycling*, 3(2), 19. <https://doi.org/10.3390/recycling3020019>
- Hidalgo, J., Velastegui, A., Zwolinski, P., Riel, A., & Amaya, J. L. (2023). Formalization of recyclable waste transfer stations within the Grand Guayaquil. *Procedia CIRP*, 116, 456–461. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.077>
- Ibarra, B. E., Narváez, M. L., & de la Rosa, A. (2020). Análisis de la disposición de los desechos sólidos y generación de biogás en el relleno sanitario de Ambato, Ecuador. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, 13(3), 988–1006. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.68441>.
- INEC-AME. (2023). Estadística de información ambiental económica en gobiernos autónomos descentralizados municipales. Gestión de residuos sólidos 2022. In *Dirección de Estadísticas Agropecuarias y Ambientales - DEAGA: Vol. diciembre*.
- Jacintos, A., & Delgado, G. C. (2023). Advancing the Application of a Multidimensional Sustainable Urban Waste Management Model in a Circular Economy in Mexico City. *Sustainability*, 15(17), 12678. <https://doi.org/10.3390/su151712678>
- Junger, L., Hohensinner, S., Schroll, K., Wagner, K., & Seher, W. (2022). Land use in flood-prone areas and its significance for flood risk management—a case study of alpine regions in Austria. *Land*, 11(3), 392. <https://doi.org/10.3390/land11030392>
- Kamdar, I., Ali, S., Bennui, A., Techato, K., & Jutidamrongphan, W. (2019). Municipal solid waste landfill siting using an integrated GIS-AHP approach: A case study from Songkhla, Thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.027>
- Karimi, H., Hossini, H., & Amin, A. A. (2022). Municipal landfill site selection and environmental

- impacts assessment using spatial multicriteria decision analysis: a case study. In *Computers in Earth and Environmental Sciences* (pp. 235–244). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89861-4.00030-0>
- Khanna, S., & Chauhan, S. (2023). Environmental Impacts and Mitigation Strategies of the Current Landfill Site in Gurugram, Haryana. *Current World Environment*, 18(1), 350. <https://doi.org/10.12944/CWE.18.1.29>
- Khater, E.-S. G., Ali, S. A., Afify, M. T., Bayomy, M. A., & Abbas, R. S. (2022). Using of geographic information systems (GIS) to determine the suitable site for collecting agricultural residues. *Scientific Reports*, 12(1), 14567.
- Lopez, A., & Iannacone, J. A. (2021a). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en América Latina. *Paideia XXI*, 11(2), 453–474.
- Lopez, A., & Iannacone, J. A. (2021b). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en América Latina. *Paideia XXI*, 11(2), 453–474. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i2.4087>
- Lü, G., Batty, M., Strobl, J., Lin, H., Zhu, A.-X., & Chen, M. (2019). Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(2), 346–367.
- Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of The Total Environment*, 703, 135468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>
- MAATE. (2023). *Proyecto de gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva (GRECI)*.
- Macalam, F. J. T., Arreza, K. P., Magpantay, A. T., & Rabaño, K. Y. (2023). Landfill Site Suitability Assessment Using Geographic Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) in Butuan City, Philippines. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 5(1), 95–107. <https://doi.org/10.30564/jees.v5i1.5381>
- MAG-SIGTIERRAS. (2016). Levantamiento de cartografía temática a escala 1:25.000: capacidad de uso de la tierra, cartografía base, clima, hidrología, geopedología y sistemas productivos. In *ACOTECNIC-INGEOMÁTICA*.
- Mallick, J. (2021). Municipal solid waste landfill site selection based on fuzzy-AHP and geoinformation techniques in Asir Region Saudi Arabia. *Sustainability*, 13(3), 1538. <https://doi.org/10.3390/su13031538>
- Marder, M. (2022). *El vertedero filosófico: Una fenomenología de la devastación* (Primera, Vol. 2077). Ned ediciones.
- Margallo, M., Ziegler-Rodriguez, K., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Irabien, Á., & Kahhat, R. (2019). Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. *Science of The Total Environment*, 689, 1255–1275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.393>
- Meléndez, I. M. A. (2022). Caracterización de residuos sólidos municipales y diseño de relleno sanitario. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*, 4(7), 23–33. <https://doi.org/10.38186/difcie.47.03>
- Mohammed, H. I., Majid, Z., & Yamusa, Y. B. (2019). GIS based sanitary landfill suitability analysis for sustainable solid waste disposal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 220, 12056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/220/1/012056>

- Mohanty, S. S., Vyas, S., Koul, Y., Prajapati, P., Varjani, S., Chang, J.-S., Bilal, M., Moustakas, K., Show, P. L., & Vithanage, M. (2023). Tricks and tracks in waste management with a special focus on municipal landfill leachate: Leads and obstacles. *Science of The Total Environment*, 860, 160377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160377>
- Morales, R. Z. (2020). Factores ambientales para determinar el área de relleno sanitario en el distrito de San Clemente Pisco. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 2(2).
- Moreira, R. M., Dalmas, F. B., & Paranhos Filho, A. C. (2021). Aplicação de técnicas de geoprocessamento na seleção de áreas aptas à implantação de aterro sanitário no Portal do Pantanal. *Research, Society and Development*, 10(13), e135101320992–e135101320992. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.20992>
- Mvula, R. L. S., Mundike, J., & Nguvulu, A. (2023). Spatial suitability analysis for site selection of municipal solid waste landfill using hybrid GIS and MCDA approach: The case of Kitwe, Zambia. *Scientific African*, 21, e01885. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01885>
- Njoku, P. O., Edokpayi, J. N., & Odiyo, J. O. (2019). Health and Environmental Risks of Residents Living Close to a Landfill: A Case Study of Thohoyandou Landfill, Limpopo Province, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2125. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122125>
- Noriega, C. H. (2023). Revisión sistemática de la valorización del biogás de residuos sólidos del relleno sanitario Portillo Grande. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), e25264–e25264. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25264>
- Ozbay, G., Jones, M., Gadde, M., Isah, S., & Attarwala, T. (2021). Design and operation of effective landfills with minimal effects on the environment and human health. *Journal of Environmental and Public Health*, 2021(1), 6921607. <https://doi.org/10.1155/2021/6921607>
- Pande, C. B., Moharir, K. N., Varade, A. M., Abdo, H. G., Mulla, S., & Yaseen, Z. M. (2023). Intertwined impacts of urbanization and land cover change on urban climate and agriculture in Aurangabad city (MS), India using google earth engine platform. *Journal of Cleaner Production*, 422, 138541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138541>
- Parastatidou, E., Voudouris, K., & Kazakis, N. (2024). Determination of Site Suitability for a Sanitary Landfill Using GIS and Boolean Logic: The Case of the Regional Unit of Chalkidiki, Northern Greece. *Environments*, 11(8), 175. <https://doi.org/10.3390/environments11080175>
- Poma, P., Usca, M., Polanco, M., Toulkeridis, T., & Mestanza-Ramón, C. (2021). Estimation of biogas generated in two landfills in south-central Ecuador. *Atmosphere*, 12(10), 1365.
- Quinteros, P. R. A., González, J. A. K., Delgado, F. M., & Casanova, B. M. (2020). Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo–Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 26(4), 328–352.
- Rane, N. L., Mallick, S. K., Saha, A., Pande, C. B., Rane, J., Roy, R., Alshehri, F., & Radwan, N. (2024). Appraisal on suitable landfill site selection for municipal solid waste disposal using GIS and MIF methods. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103591. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103591>
- Rezaeisabzevar, Y., Bazargan, A., & Zohourian, B. (2020). Landfill site selection using multi criteria decision making: Influential factors for comparing locations. *Journal of Environmental Sciences*,

- 93, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.02.030>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process mcgraw hill, New York. *Agricultural Economics Review*, 70(804), 10–21236.
- Santisteban, J. A. Z., López, R. S., Rojas-Briceño, N. B., Fernández, D. G., Medina, A. J. M., Trauco, K. M. T., Fernandez, A. S. R., Crisóstomo, J. L., Oliva-Cruz, M., & Silva-López, J. O. (2024). Optimizing landfill site selection using fuzzy-AHP and GIS for sustainable urban planning. *Civil Engineering Journal*, 10(6), 1698–1719. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-06-01>
- Shammas, N. K., Wang, L. K., Wang, M.-H. S., & Chen, S. L. (2020). Ecological impact and management of solid waste landfill gas. In *Handbook of environment and waste management: Acid rain and greenhouse gas pollution control* (pp. 455–482). World Scientific. [https://doi.org/10.1142/9789811207136\\_0012](https://doi.org/10.1142/9789811207136_0012)
- Shevchuk, O. V., Azimov, O. T., & Tomchenko, O. V. (2021). Remote sensing monitoring of the landfill sites as a factor of adverse environmental impact. *Geoinformatics*, 2021(1), 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>
- Shi, L., Chen, H., Meng, H., Cheng, R., Dai, J., Zheng, X., & Zhang, Z. (2021). How environmental policy impacts technology adoption: A case of landfill leachate. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127484>
- Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. A. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(39), 58514–58536. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>
- Silva, J. O., Salas, R., Rojas, N. B., Gómez, D., Terrones, R. E., Iliquín, D., Barboza, E., Oliva, M., & Barrena, M. Á. (2022a). Analytic Hierarchy Process (AHP) for a Landfill Site Selection in Chachapoyas and Huancas (NW Peru): Modeling in a GIS-RS Environment. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 9733322. <https://doi.org/10.1155/2022/9733322>
- Silva, J. O., Salas, R., Rojas, N. B., Gómez, D., Terrones, R. E., Iliquín, D., Barboza, E., Oliva, M., & Barrena, M. Á. (2022b). Analytic Hierarchy Process (AHP) for a Landfill Site Selection in Chachapoyas and Huancas (NW Peru): Modeling in a GIS-RS Environment. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 9733322. <https://doi.org/10.1155/2022/9733322>
- Tyagi, V. K., & Ojha, C. S. P. (2023). Landfill leachate management. In V. K. T. ; C. Ojha (Ed.), *Landfill Leachate Management* (pp. 1–467). IWA, Publicaciones. <https://doi.org/10.2166/9781789063318>
- Valdivia, I. B., García, G. H., & Méndez, C. E. M. (2022). Los rellenos sanitarios, una solución paliativa a la problemática de residuos sólidos en Zamora, Michoacán, México. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 3(2), 1111–1126. <https://doi.org/10.56712/latam.v3i2.170>
- Vaverková, M. D. (2019). Landfill impacts on the environment. *Geosciences*, 9(10), 431. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100431>
- Vidal, J. M. E., Gómez, O. R. T., Tafur, J. D., & Torres, R. K. M. (2021). Sistemas de Información Geográfica y Localización de un Relleno Sanitario en Cerro de Pasco. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 217–227. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21774>
- Villa, M., López, A., Díez, R., García, A., & Lobo, A. (2024). Analysis of household waste production

- in Ecuador: Limitations for sustainable management in local communities. *Waste Management*, 190, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.016>
- Yildirim, V., Memisoglu, T., Bediroglu, S., & Colak, H. E. (2018). Municipal solid waste landfill site selection using multi-criteria decision making and GIS: Case study of Bursa province. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 26(2), 107–119.
- Zafra, C., & Romero, D. (2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 125–147.
- Zhi, Y., Ma, S., Qin, J., Zhao, Z., & Zhou, C. (2023). Assessing the city-level material stocks in landfills and the landfill mining potential of China. *Environmental Research*, 236(1), 116737. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116737>
- Zúñiga, P., Amaro, I. A., Bernal, R. de G., & Reyes, C. (2024). Evaluación de la Calidad del Agua Subterránea Cercana a un Relleno Sanitario. *Terra Latinoamericana*, 42. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1814>



Esta obra se encuentra bajo Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0. Internacional. Reconocimiento - Permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas siempre y cuando reconozca y cite al autor original. No Comercial – Esta obra no puede ser utilizada con fines comerciales, a menos que se obtenga el permiso.