UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de:

INGENIERA AMBIENTAL

TEMA

ANÁLISIS MULTICRITERIO BASADO EN SIG PARA IDENTIFICAR POTENCIALES ÁREAS PARA ESTABLECER UN RELLENO SANITARIO EN EL CANTÓN TENA DE LA PROVINCIA NAPO, ECUADOR.

AUTOR

CHIDA CHIDA KELY LISBETH

DIRECTORA DE PROYECTO

MSc. MARÍA DE DECKER

PUYO – ECUADOR

2019 - 2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Chida Chida Kely Lisbeth, con cédula de identidad 1501117020, declaro ser la autora principal del presente proyecto de investigación, que tiene como tema "ANÁLISIS MULTICRITERIO BASADO EN SIG PARA IDENTIFICAR POTENCIALES ÁREAS PARA ESTABLECER UN RELLENO SANITARIO EN EL CANTÓN TENA DE LA PROVINCIA NAPO, ECUADOR", mismo que se ha elaborado con el asesoramiento de la MSc. María de Decker. A la vez concedo los derechos de autor a la Universidad Estatal Amazónica, para que pueda realizar publicaciones sobre la misma de la forma que crea conveniente, así como su almacenamiento tanto en medios físicos como electrónicos.

_____

Chida Chida Kely Lisbeth

C.I. 1501117020

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Por medio del presente, María Katharina Elisabeth de Decker con C.I. 1752449593 certifica que Kely Lisbeth Chida Chida egresada de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Estatal Amazónica, desarrolló el presente trabajo de investigación titulado **"ANÁLISIS MULTICRITERIO BASADO EN SIG PARA IDENTIFICAR POTENCIALES ÁREAS PARA ESTABLECER UN RELLENO SANITARIO EN EL CANTÓN TENA DE LA PROVINCIA NAPO, ECUADOR"** previo a la obtención del título de Ingeniera Ambiental bajo mi supervisión.

MSc. María de Decker

DIRECTORA DEL PROYECTO

CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

Oficio No. 37-SAU-UEA-2020

Puyo, 27 de enero de 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El Proyecto de Investigación correspondiente a la egresada CHIDA CHIDA KELY LISBETH con C.I. 1501117020, con el Tema: **"Análisis multicriterio basado en SIG para identificar potenciales áreas para establecer un relleno sanitario en el cantón Tena de la provincia de Napo, Ecuador"**, de la carrera, Ingeniería Ambiental, Directora del proyecto MSc. María Katharina Elisabeth de Decker, ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 7%, Informe generado con fecha 22 de enero de 2020 por parte de la directora, conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco MSc.
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El Tribunal de sustentación del Proyecto de Investigación aprueba el proyecto de investigación **"ANÁLISIS MULTICRITERIO BASADO EN SIG PARA IDENTIFICAR POTENCIALES ÁREAS PARA ESTABLECER UN RELLENO SANITARIO EN EL CANTÓN TENA DE LA PROVINCIA NAPO, ECUADOR".**

Para constancia firman:

Dr. Samaniego Edison

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

MSc. Olalla Ana

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

MSc. Michler Holger

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a nuestro padre celestial por haberme dado la vida, la salud, la sabiduría y la voluntad para no desistir en este proceso universitario. También por haber puesto en mi camino a grandes personas que me cuidaron y motivaron para seguir adelante

A la universidad estatal amazónica por haberme abierto sus puertas, así como también a mis queridos docentes quienes me brindaron sus conocimientos y consejos para alcanzar mí desarrollo profesional.

Un agradecimiento muy especial a mi directora de proyecto Msc. María de Decker quien con su paciencia y conocimiento estuvo asesorándome y guiándome en la realización de este proyecto de titulación.

A mis padres quienes me apoyaron y aconsejaron en los momentos cuando más lo necesitaba y es por ellos que me encuentro culminando esta última etapa de mi vida universitaria.

A mis tíos(as) y abuelitos que siempre estuvieron motivándome y guiándome para no rendirme.

A mis amigos que formaron parte de mi vida universitaria, con quienes he compartido grandes momentos. Por las noches que pasamos en vela antes de la entrega de cualquier trabajo, por las acampadas, por todas las cenas, por los cumpleaños festejados, en fin, por todos aquellos momentos que quedaran grabados en mi memoria. Amigos futuros colegas muchas gracias.

DEDICATORIA

Con todo mi amor y cariño dedico el presente trabajo de titulación a mis padres Luis y Marcia quienes con su esfuerzo y dedicación me han permitido culminar mi carrera universitaria.

A mis hermanos por estar siempre ahí apoyándome y motivándome para no rendirme.

RESUMEN

Se aplicó un análisis multicriterio basado en los Sistemas de Información Geográfico (SIG) para identificar áreas potenciales para el emplazamiento del relleno del cantón Tena. Para ello se utilizaron 10 criterios tales como distancia al aeropuerto, distancia a vías, distancia a los asentamientos humanos, distancia a los recursos hídricos, pendiente, permeabilidad, susceptibilidad de inundación, uso de suelo, la precipitación y la profundidad del nivel freático. Para generar las capas temáticas se estandarizaron los criterios y se utilizó la herramienta ArcMap 10.5. A través del proceso analítico jerárquico (AHP) se ponderó cada criterio. Luego se utilizó la herramienta *Weighted Overlay* para combinar todas las capas estandarizadas (1 - 9) y ponderadas para obtener un mapa de idoneidad de los sitios adecuados para el relleno. Dicho mapa indicó ningún área como la mejor opción. Sin embargo, el 0,09% (361,13 ha) del área de estudio es una excelente opción para instalar el relleno sanitario, aunque también señaló otras áreas con muy buena (1,27%) y buena (6,72%) opción. Teniendo en cuenta el área requerida para el relleno sanitario (7 ha), se seleccionó un total de 13 posibles sitios, no obstante, desde el punto de vista económico, social y ambiental solamente se recomendaron 6 sitios como los más idóneos. Antes de la decisión final, los sitios recomendados requieren de estudios adicionales tales como estudios geológicos, geomorfológicos, edafológicos e hidrológicos.

Palabras claves: Relleno sanitario, SIG, análisis multicriterio, AHP, idoneidad, ponderación

ABSTRACT

A multicriteria analysis based on Geographic Information Systems (GIS) was applied to identify potential areas for the landfill site of the canton Tena. 10 criteria were used such as distance to the airport, distance to roads, distance to human settlements, distance to water resources, slope, permeability, susceptibility to flooding, land use, precipitation and water table depth. The criteria were standardized in order to generate thematic layers and the ArcMap 10.5 tool was used. Through the analytic hierarchy process (AHP) each criterion was weighted. The *Weighted Overlay* tool was then used to combine all the standardized (1-9) and weighted layers to obtain a suitability map of the appropriate sites for the landfill. This map indicated no area as the best option however, 0.09% (361, 13 ha) of the study area is an excellent option to install the landfill, although it also indicated other areas that are a very good (1.27%) and good (6.72%) option. Taking into account the required area for the landfill (7 ha), a total of 13 possible sites were selected, however from the economic, social and environmental point of view only 6 sites were recommended as the most suitable. Before the final decision, the recommended sites require additional studies such as geological, geomorphological, edaphological and hydrological studies.

Keywords: Landfill, GIS, multicriteria analysis, AHP, suitability, weights

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I 1

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN 3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 4
1.3. OBJETIVOS 5
1.3.1. Objetivo general 5
1.3.2. Objetivos específicos 5

CAPITULO II 6

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN 6

2.1. ANTECEDENTES 6
2.2. BASES TEÓRICAS 7
2.2.1. Residuo o desecho 7
2.2.2. Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) 8
2.2.3. Gestión integral de los residuos (GIR) 8
2.2.4. Manejo integral de los residuos solidos 8
2.2.5. Disposición final 8
2.2.6. Relleno sanitario 8
2.2.6.1. Tipos de relleno sanitario 9
2.2.6.1.1. Relleno sanitario mecanizado 9
2.2.6.1.2. Relleno sanitario semi-mecanizado 9
2.2.6.1.3. Relleno sanitario manual 9
2.2.6.2. Métodos de construcción de un relleno sanitario 9
2.2.6.2.1. Método de trinchera o zanja 10
2.2.6.2.2. Método de área 10
2.2.6.2.3. Método combinado (trinchera y área) 10
2.2.7. Sistemas de Información Geográfica 10
2.2.8. Aplicación de los SIG en el campo medioambiental 11
2.2.9. El modelo de datos raster 11
2.2.10. El modelo de datos vector 11
2.2.11. Shapefile 11

2.2.12. Zona de influencia (Buffer) 12
2.2.13. Análisis Multicriterio/ Evaluación multicriterio (EMC) 12
2.2.14. Weighted Overlay 12
2.3. MARCO LEGAL 12

CAPITULO III 13

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 13

3.1. LOCALIZACIÓN 13
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN 14
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN 14
3.3.1. Metodología para calcular el área requerida de terreno para instalar el nuevo relleno sanitario 14
3.3.1.1. Proyección de la población 14
3.3.1.2. Producción total 15
3.3.1.3. Volumen de residuos solidos 15
3.3.1.4. Volumen del relleno sanitario 16
3.3.1.5. Área requerida 16
3.3.1.6. Área total requerida 16
3.3.2. Metodología para identificar áreas potenciales para la instalación del nuevo relleno sanitario 17

CAPITULO IV 23

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 23

4.1. ÁREA REQUERRIDA PARA INSTALAR EL RELLENO SANITARIO 23
4.1.1. Proyección de la población 23
4.1.2. Producción total de residuos 24
4.1.3. Volumen de residuos solidos 25
4.1.4. Volumen del relleno sanitario 27
4.1.5. Área requerida 27
4.1.6. Área total requerida 28
4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO 31
4.2.1. Definición y estandarización de los criterios 31
4.2.2. Análisis de las capas temáticas 33

4.2.2.1. Distancia al aeropuerto 33
4.2.2.2. Distancia a vías 35
4.2.2.3. Distancia a los asentamientos 36
4.2.2.4. Distancia a recursos hídricos 37
4.2.2.5. Pendiente 39
4.2.2.6. Permeabilidad 40
4.2.2.7. Susceptibilidad de inundaciones 42
4.2.2.8. Uso de suelo 43
4.2.2.9. Precipitación 45
4.2.2.10. Profundidad del nivel freático 46
4.2.3. Ponderación de los criterios utilizando el método de proceso analítico jerárquico 47
4.2.4. Mapa de idoneidad 52
4.2.5. Identificación de potenciales sitios para el relleno 53

CAPITULO V 56

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 56

5.1. CONCLUSIONES 56
5.2. RECOMENDACIONES 57

CAPITULO VI **58**

6. BIBLIOGRAFÍA **58**

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de estandarización o de idoneidad 19
Tabla 2. Escala fundamental de comparación por pares 20
Tabla 3. Ejemplo de matriz de comparación por pares 20
Tabla 4. Proyección de la población urbana y rural 2020 - 2030 24
Tabla 5. Generación total de residuos sólidos 2020 - 2030 25
Tabla 6. Resumen del cálculo del área requerida del relleno sanitario 30
Tabla 7. Criterios para determinar la obtención de área para el relleno sanitario 31
Tabla 8. Clases de permeabilidad 41
Tabla 9. Leyenda cobertura y uso de tierra 44
Tabla 10. Matriz de comparación por pares 48
Tabla 11. Matriz normalizada y ponderación 49
Tabla 12. Ocupación territorial en relación con el valor de idoneidad 53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudios 13
Figura 2. Capa de distancia al aeropuerto 33
Figura 3. Capa de distancia a vías 35
Figura 4. Capa de distancia a los asentamientos humanos 36
Figura 5. Capa de distancia a recursos hídricos 37
Figura 6. Capa de pendiente 39
Figura 7. Capa de permeabilidad 40
Figura 8. Capa de susceptibilidad de inundación 42
Figura 9. Capa de uso de suelo 43
Figura 10. Capa de precipitación 45
Figura 11. Capa de profundidad del nivel freático 46
Figura 12. Mapa final de idoneidad para el relleno sanitario en el cantón Tena 52
Figura 13. Sitos alternativos con idoneidad de 2 puntos para instalar el relleno sanitario en el cantón Tena 54
Figura 14. Sitos recomendados para el relleno sanitación en el cantón Tena 55

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

La selección del sitio para construir un relleno sanitario es un punto clave dentro de la gestión de residuos sólido (Yilmaz & Atamaca 2006). Un relleno construido en el lugar incorrecto puede generar problemas ambientales como la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, problemas sociales como los conflictos con las comunidades y problemas económicos como el aumento en los costos de preparación del suelo, construcciones adicionales o en general problemas relacionados a la construcción del relleno en condiciones no óptimas. A fin de evitar dichos problemas es necesario que el sitio seleccionado cumpla con todos los requisitos legales y técnicos que establece cada país (Demesouka, Anagnostopoulos, & Siskos, 2019). En Ecuador la normativa que establece los requisitos para el sitio del relleno es el libro VI anexo 6 del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA) (Ministerio del ambiente (MAE), 2015).

El método más utilizado para identificar los sitios potenciales para el relleno es el análisis multicriterio basado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Boroushaki & Malczewski, 2010). Esta metodología permite transformar y combinar los datos geográficos (capas temáticas de cada criterio) con los juicios de valor (valor de importancia relativa) para generar información (mapa de idoneidad) que ayude a tomar decisiones. Además, es un método ventajoso porque gestiona el tiempo y los costos del análisis, reduce los errores y aumenta la precisión de la toma de decisiones (Gorsevski, Donevska, Mitrovski, & Frizado, 2012; Vučijak, Kurtagić, & Silajdžić, 2016). En las dos últimas décadas a nivel internacional muchos autores ya han empleado esta metodología, entre ellos: Sener (2004); Kabite, Suryabhagavan, Argaw, & Sulaiman, (2012); Khan & Samadder, (2015); Bosompem, Stemn, & Fei-Baffoe, (2016); Djokanović, Abolmasov, & Jevremović, (2016); Yıldırım & Güler, (2016); Barakat, Hilali, El Baghdadi, & Touhami, (2017); Tüdeş & Kumlu, (2017); Al-Anbari, Thameer, & Al-Ansari, (2018); Sureshkumar, Sivakumar, & Nagarajan, (2017); Kapilan, & Elangovan, (2018); Aksoy & San, (2019); Karimi, Amiri, Huang, & Karimi, (2019). Dentro de esos estudios, el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es el método multicriterio más utilizado para la ponderación de los criterios. A nivel nacional no existen muchos estudios con la implementación de dichas metodologías, entre ellos se podría mencionar a Gonzáles & Minga (2010); Molina (2018); Palacios (2018).

Autores como Cobos, Solano, Vera, & Monge (2017) también utilizaron el análisis multicriterio basado en SIG, sin embargo, para la ponderación de los criterios ellos optaron por el método de combinación lineal ponderada (WLC, por sus siglas en inglés)

El cantón Tena cuenta con un relleno sanitario que tiene una vida útil hasta junio del 2020. Por ese motivo el presente proyecto de titulación tiene como finalidad identificar áreas o sitos potenciales para establecer un nuevo relleno sanitario para el cantón Tena, a través de uso del análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica.

La estructura de este proyecto se describe a continuación:

En el capítulo 1, se describe el planteamiento del problema de investigación y su justificación, la formulación del problema y los objetivos que se pretenden alcanzar tanto el general como los específicos.

Capítulo 2 describe los aspectos históricos relacionados con los residuos y el relleno sanitario, los aspectos teóricos y la normativa legal relacionados con este proyecto.

En el capítulo 3, se describe el área de estudio, el tipo de investigación y la metodología que se va a aplicar en este estudio. La metodología se divide en dos partes; en la primera se describe y explica las fórmulas que se van a aplicar para calcular el área requerida para el relleno. En la segunda parte se describe la metodología del análisis multicriterio.

En el capítulo 4 se realiza un análisis y discusión de los resultados obtenidos en base a la metodología antes mencionada.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas en relación con los objetivos planteados. El capítulo concluye con las recomendaciones para la utilización de los resultados obtenidos y con una recomendación para mejorar futuras investigaciones relacionadas con este proyecto.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

En los últimos años a nivel mundial el crecimiento poblacional y el consumismo han sido los principales causantes del aumento de los residuos sólidos, esto unido a una mala gestión ha provocado impactos significativos que afectan no solo al medio ambiente sino también a la salud de la población. Sáez & Urdaneta (2014) mencionan que en muchos de los países de América Latina y el Caribe debido al aumento de la población y a la necesidad de satisfacer sus necesidades básicas, la conservación ambiental ha sido delegada a un segundo plano, siendo así que los recursos económicos destinados para la gestión de los residuos sólidos sean muy pocos e ineficientes, por ese motivo es que en muchos de los países los procesos de gestión de los residuos especialmente la disposición final es realizada con métodos o tecnologías inadecuadas. La Organización Panamericana de la Salud (OPS) (Sáez & Urdaneta, 2014) manifiesta que en América Latina y el Caribe el 23% de los residuos sólidos son dispuestos en rellenos sanitarios que cumplen con las normas ambientales, el resto de residuos en botaderos a cielo abierto y en rellenos controlados que no cumplen con las normas necesarias.

Ecuador es uno de los países que con el transcurso de los años ha mejorado su gestión de residuos sólidos, esto es debido a que en el Acuerdo Ministerial 061 reforma del libro VI del TULSMA, Art. 47 (MAE, 2015) se declara la gestión de los residuos sólidos como prioridad nacional y de interés público, siendo los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) los responsables de la gestión de desechos sólidos dentro del área de su jurisdicción. Sin embargo, con la finalidad de impulsar dicha gestión, se creó en el año 2010 el Plan Nacional de Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS) (Consejo Nacional de Competencias (CNC), 2019).

Según la Asociación de Municipios del Ecuador (AME) y el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en Ecuador a nivel nacional el 45,7% de los municipios dispone los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, el 28,8% en celdas emergentes y el 25,6% en botaderos (AME-INEC, 2017). En la provincia de Napo el 80% de los municipios realizan la disposición final de los residuos en un relleno sanitario y el 20% lo realiza en celdas emergentes (AME-INEC, 2017).

El ingeniero Espinosa técnico del departamento de gestión de desechos sólidos del GADM de Tena menciono que en el 2004 el cantón Tena construyo un relleno sanitario, pero debido a la ineficiente operación se convirtió en un botadero controlado, aunque en la actualidad muchas personas lo siguen considerando como relleno sanitario (P. Espinosa, comunicación personal, 24 de julio del 2019). En el 2013 el MAE y AME crearon el proyecto LCC-MAE-003 – 2013 para los cantones Junín, Tosagua y Bolívar (Provincia de Manabí) y cantón Tena (Provincia de Napo), con el propósito de realizar el cierre técnico de los botaderos y diseñar nuevos sitios de disposición final (relleno sanitario) de residuos sólidos, para ello se contrató al consultor Francisco de la Torre (De la Torre, 2013). En el cantón Tena se realizaron todos los estudios y diseños para el relleno sin embargo este no se llegó a construir y el relleno (botadero) continúo su operación hasta la actualidad. Espinosa también menciono que el GADM de Tena tiene hasta junio del 2020 para implementar un nuevo relleno (P. Espinosa, comunicación personal, 24 de julio del 2019). Motivo por el cual es necesario encontrar áreas o sitios idóneos para construir un relleno sanitario.

Giménez & Cardozo (2012) mencionan que la combinación del análisis multicriterio con los Sistema de información Geográfica (SIG) es una metodología muy útil a la hora de encontrar áreas o sitios potenciales para instalar rellenos sanitarios. A nivel internacional y nacional muchos autores ya han utilizado ese método (González & Minga, 2010; Cobos *et al*., 2017; Nascimento y Da Silva, 2014; Giménez & Cardozo, 2012; Mena, Morales, Ormazábal, & Gajardo, 2010; Molina, 2018; Palacios, 2018; Tejada, 2018; entre otros).

Considerando los aspectos antes mencionados, en este proyecto se pretende utilizar un análisis multicriterio y los SIG para encontrar áreas idóneas que cumplan con los criterios establecido en la normativa ambiental para la instalación de un relleno sanitario en el cantón Tena, provincia Napo. Los resultados generados en la presente investigación pueden ser utilizados por el GADM de Tena a fin de contribuir a su planificación respecto al lugar donde se podría instalar el nuevo relleno sanitario.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El actual relleno sanitario (Botadero) del cantón Tena, tiene un tiempo de vida útil estimado hasta junio del 2020, motivo por el cual urge la necesidad de buscar un sitio idóneo para instalar un nuevo relleno sanitario.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Identificar áreas potenciales para establecer un nuevo relleno sanitario para el cantón Tena, provincia de Napo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Calcular el área requerida para la construcción del nuevo relleno sanitario del cantón Tena.
- Establecer criterios que permita encontrar áreas potenciales en donde se puedan construir el nuevo relleno sanitario en el cantón Tena.
- Generar mapas con los diferentes criterios seleccionados.
- Modelar las áreas potenciales mediante el uso de ArcMap.
- Seleccionar los sitios que posea las mejores condiciones geográficas, climáticas y geofísicas.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES

Los residuos sólidos han existido desde los inicios de la humanidad cuando el ser humano nómada desechaba los residuos no comestibles por los caminos que recorría, dicha acción en ese entonces no generaba ningún inconveniente, sin embargo, con el paso evolutivo el ser humano se volvió sedentario y por ende aparecieron las primeras poblaciones. Debido a este cambio, los humanos ya no tenían la facilidad de desechar los residuos en cualquier lugar, sino que optaron por acumularlos en el lugar donde residían. Es ahí cuando la acumulación de los residuos se vuelve un inconveniente afectando a la salud de los habitantes de la población. Dicha acción empeoró con la llegada de las grandes ciudades y la revolución industrial, época en la que empezó la producción en masa de empaques no orgánicos y por ende el aumento de los residuos. Los líderes de esa época a fin de evitar los inconvenientes que generaban los residuos optaron por disponerlos en terrenos alejados de la ciudad apareciendo así lo primeros vertederos (García, 2014).

En América Latina antes de la llegada de los conquistadores, las culturas prehispánicas ya recolectaban y disponían los residuos en vertederos o botaderos ubicados en tierras pantanosas, con la llegada de los conquistadores se adoptaron medidas y costumbres europeas de esa época, una de ellas es el uso de equipos de transporte para recolectar y transportar los residuos hacia los vertederos. 500 años después de la llegada de los conquistadores (segunda mitad del siglo XX), se dio una gran transformación en el manejo de disposición final, al eliminar los vertederos y construir los famosos rellenos sanitarios. Desde 1949 el relleno sanitario empieza a ser utilizado en Estados Unidos como una solución para disponer los residuos sólidos, sin embargo, la calidad del tratamiento corresponde a lo que hoy en día se conoce como vertedero mecanizado. En 1967 dicha solución motivó a los gobiernos latinoamericanos a construir los rellenos como solución para la disposición final de los residuos (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), 2018)

En Ecuador antes de la carta Magna del 2008, los gobiernos municipales ya contaban con un servicio de recolección y disposición final de los residuos. Con la aprobación de la carta

magna y del COOTAD (Código Orgánico Organización Territorial Autonomía y Descentralización) se establece como competencia de los municipios la gestión de los residuos sólidos. El MAE como autoridad ambiental creó en el 2010 el PNGIDS, dicho programa tenía como finalidad eliminar los botaderos para el 2017 y optimizar los rellenos sanitarios (CNC, 2019).

Actualmente en el Ecuador existen 72 rellenos sanitarios, de los cuales 45 poseen licencia ambiental, 11 no la poseen y 16 están en trámite según los Registros de Información Ambiental Económica. Además, los rellenos en su mayoría carecen de infraestructura como: sistemas de tratamiento de lixiviados, chimeneas, pozos de monitoreo y cubiertas protectoras, convirtiéndolos en sitios potenciales de contaminación (CNC, 2019).

Seleccionar el sitio para el relleno es una tarea muy compleja y exigente ya que esta debe ser sostenible ambientalmente, económicamente accesible y socialmente aceptable (Eskandari, Homaee y Falamaki, 2016). Para ello los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta ideal debido a su capacidad para gestionar una gran cantidad de datos espaciales de diversas fuentes, por otro lado, el análisis multicriterio se encarga de asignar pesos de importancia (ponderación) a cada criterio; la combinación de estas herramientas permite desarrollar modelos para predecir la idoneidad de los sitios para el relleno (Barakat *et al*., 2017). En la actualidad a nivel internacional muchos investigadores han utilizados esta metodología mientras que a nivel nacional es una metodología no muy conocida.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Residuo o desecho

Residuo es aquella sustancia u objeto generado por una actividad productiva o de consumo de la que hay que desprenderse por no ser objeto de interés de la actividad principal (Castells, 2012)**.** Desecho según la real academia de la lengua es sinónimo de residuo, sin embargo, hay que recalcar que el residuo puede ser aprovechable es decir volver a darle uso mientras que el desecho no es susceptible de aprovechamiento (MAE, 2017).

2.2.2. Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Son los que se originan como resultado de las actividades domésticas y comerciales. Sin considerarlos peligrosos, son desechados para su disposición final o pueden ser aprovechados nuevamente (Sbarato, 2009).

2.2.3. Gestión integral de los residuos (GIR)

La gestión integral constituye el conjunto de acciones y disposiciones regulatorias, operativas, económicas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación, que tienen la finalidad de dar a los residuos sólidos no peligrosos el destino más adecuado desde el punto de vista técnico, ambiental y socio-económico, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos de tratamiento, posibilidades de recuperación y aprovechamiento, comercialización o finalmente su disposición final. Está dirigida a la implementación de las fases de manejo de los residuos sólidos (MAE, 2015).

2.2.4. Manejo integral de los residuos solidos

Es un conjunto de acciones encaminadas al manejo de los residuos sólidos desde su generación hasta su disposición final, tomando en cuenta los principios que garanticen un menor impacto al ambiente y la salud pública (Cooperativa de asistencia y socorro en todas partes (CARE por sus siglas en inglés) & Avina, 2012).

2.2.5. Disposición final

Fase final de la gestión integral de los residuos, en donde se disponen de forma permanente y sanitaria en lugares seleccionados y diseñados acorde a lo que establece la legislación ambiental vigente, para evitar daños a la salud y al medio ambiente (MAE, 2015). En la actualidad se considera a los rellenos sanitarios como el método más factible que garantiza una disposición segura y confiable de los residuos sólidos desde el punto de vista técnico, económico y ambiental (Rondón Toro, Szanto Narea, Pacheco, Contreras, & Gálvez, 2016).

2.2.6. Relleno sanitario

Es una técnica empleada para la disposición final de los residuos o desechos sólidos. Consiste en utilizar un área pequeña para disponer adecuadamente los residuos en celdas

dispuestas para ese fin sin afectar al ambiente, a la salud y seguridad de la población (MAE, 2015).

2.2.6.1. Tipos de relleno sanitario

2.2.6.1.1. Relleno sanitario mecanizado

Este tipo de relleno está diseñado para grandes ciudades y poblaciones que generan al día más de 40 toneladas de residuos sólidos. Es una obra de ingeniería bastante compleja que se caracteriza por el uso de maquinaria pesada para su operación (Jaramillo, 2002; Rondón Toro *et al*., 2016).

2.2.6.1.2. Relleno sanitario semi-mecanizado

Relleno diseñado para ciudades y poblaciones que generan entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos, requiere del uso de maquinaria pesada para apoyar el trabajo manual y para hacer una buena compactación de la basura, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno (Jaramillo, 2002; Rondón Toro *et al*., 2016).

2.2.6.1.3. Relleno sanitario manual

Relleno diseñado para poblaciones pequeñas que generan menos de 15 toneladas diarias de residuos. En este tipo de rellenos, las operaciones diarias de acomodo, compactación y cubrimiento de los residuos son realizadas por una cuadrilla de hombre que utilizan herramientas de uso manual. De manera ocasional se puede emplear el uso de maquinaria pesada para excavar trincheras o para acondicionar el suelo para depositar los residuos (Jaramillo, 2002; Rondón Toro *et al*., 2016).

2.2.6.2. Métodos de construcción de un relleno sanitario

El método constructivo y la operación de un relleno sanitario están determinados por la topografía del terreno, el tipo de suelo y la profundidad del nivel freático (Jaramillo, 2002; Rondón Toro *et al*., 2016).

2.2.6.2.1. Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en terrenos planos y en donde sea posible en excavar zanjas, que normalmente tienen una profundidad de dos o tres metros, aunque en la actualidad existen zanjas de hasta de siete (7) metros de profundidad, esto dependiendo de la profundidad del nivel freático. Los residuos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada (Jaramillo, 2002; Rondón Toro *et al*., 2016).

2.2.6.2.2. Método de área

Este método se utiliza en terrenos planos, donde no sea factible excavar zanjas o trincheras debido a que el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie y esto podría generar problemas de contaminación de las aguas subterránea. En este método, los residuos se depositan directamente sobre el suelo sin embargo antes se debe utilizar sistemas de impermeabilización para evitar la contaminación, el material para cubrir los residuos es transportado desde otros sitios o extraído de la capa superficial (Jaramillo, 2002; Rondón Toro *et al*., 2016).

2.2.6.2.3. Método combinado (trinchera y área)

Dependiendo de la topografía y las condiciones físicas del terreno, es posible combinar los métodos de construcción de relleno.

Considerando que el método de área y trinchera poseen técnicas similares de operación, se pueden combinar a fin de mejorar el aprovechamiento del terreno y el material de cobertura. A su vez también permite alargar la vida útil del relleno (Jaramillo, 2002).

2.2.7. Sistemas de Información Geográfica

Según el National Center for Geographic and Analysis (NCGIA) es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (Peña, 2010).

2.2.8. Aplicación de los SIG en el campo medioambiental

Los SIG son herramientas que sirven para tomar decisiones en la solución de problemas ambientales (Quiroz, 2010).

Entre las aplicaciones importantes está el uso de las herramientas de los SIG para generar rutas de recolección o para localizar sitios de disposición final de los residuos.

Los primeros estudios ambientales con SIG solo se los podía realizar utilizando el formato raster debido a que sus datos ambientales contaban con ese formato. Sin embargo, en la actualidad se los puede realizar utilizando el formato raster o el formato vector (Domínguez, 2000).

2.2.9. El modelo de datos raster

Gestiona la información continua en el espacio, divide el espacio en una matriz de celdas o píxeles y cada celda representa un valor de información o una región geográfica (Soto, Marín, & Vargas, 2014).

2.2.10. El modelo de datos vector

Gestiona la información discreta, los datos establecen un sistema de coordenadas representados en punto, línea y polígono (Soto *et al*., 2014). Un punto está representado por un par de coordenadas (X,Y), una línea por un conjunto de coordenadas que corresponden a sus vértices (X1Y1; X2Y2; X3Y3....) y un polígono por una línea cerrada y rellena que generan un área (Sastre, 2010).

2.2.11. Shapefile

Es un formato para el almacenamiento de datos geográficos vectoriales, en la actualidad es uno de los más utilizados, desarrollado por la empresa ESRI (Enviromental Systems Research Institute) y se compone de diversos ficheros, cada uno de los cuales contiene distintos elementos del dato espacial (Olaya, 2014).

2.2.12. Zona de influencia (Buffer)

Las zonas de influencia son polígonos creados a partir de una entidad a una distancia establecida. Con la herramienta *Buffer* se pueden crear zonas de influencia para puntos, líneas y polígonos (Pucha *et al*., 2017). La herramienta *Multiple Ring Buffer* como su nombre lo indica permite generar múltiples zonas de influencia.

2.2.13. Análisis Multicriterio/ Evaluación multicriterio (EMC)

Es una técnica que permite tomar decisiones a través del análisis de diversos criterios.

La EMC es una técnica donde se establece un objetivo, unas alternativas o posibles soluciones para cumplir este objetivo que son confrontadas por distintos criterios que son modelados a través de pesos los cuales califican y evalúan las alternativas para seleccionar la más óptima y por ultimo realizar un análisis de sensibilidad que es considerar posibles modificaciones al resultado final (Posada, 2015).

2.2.14. Weighted Overlay

Es una herramienta que se utiliza en los análisis de superposición designando un peso de importancia a cada capa, para resolver problemas (como la selección de sitios) que contengan varios criterios (Patiño *et al*., 2016).

2.3. MARCO LEGAL

- Constitución de la República del Ecuador (CRE), Registro oficial 449 del 20 de octubre 2008
- Código Orgánico Ambiental (COA), Registro Oficial Suplemento 983 del 12 abril 2017
- Código Orgánico Organización Territorial Autonomía y Descentralización (COOTAD), Registro Oficial Suplemento 303 del 19 de octubre 2010.
- Acuerdo No. 61, Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. Edición especial No. 316. Registro Oficial, lunes 4 de mayo del 2015.
- Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y disposición final de desechos sólidos no peligrosos. Libro VI, Anexo 6.

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN

El área de estudio es el cantón Tena, se encuentra localizado en el centro occidente de la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE) al sur de la provincia de Napo, con una superficie que cubre una extensión de 3897,41 Km^2**,** un rango altitudinal de 800 a 4.840 msnm, una temperatura media de 26 °C y una precipitación anual de 800 a 4000 mm (GADM de Tena, 2014). Según el INEC (2010) cuenta con una población de 60.880 habitantes y con una densidad poblacional de 0,15 hab/ha. Se estima una población de 79.182 habitantes para el año 2020 (Sistema Nacional de Información (SNI), 2017).

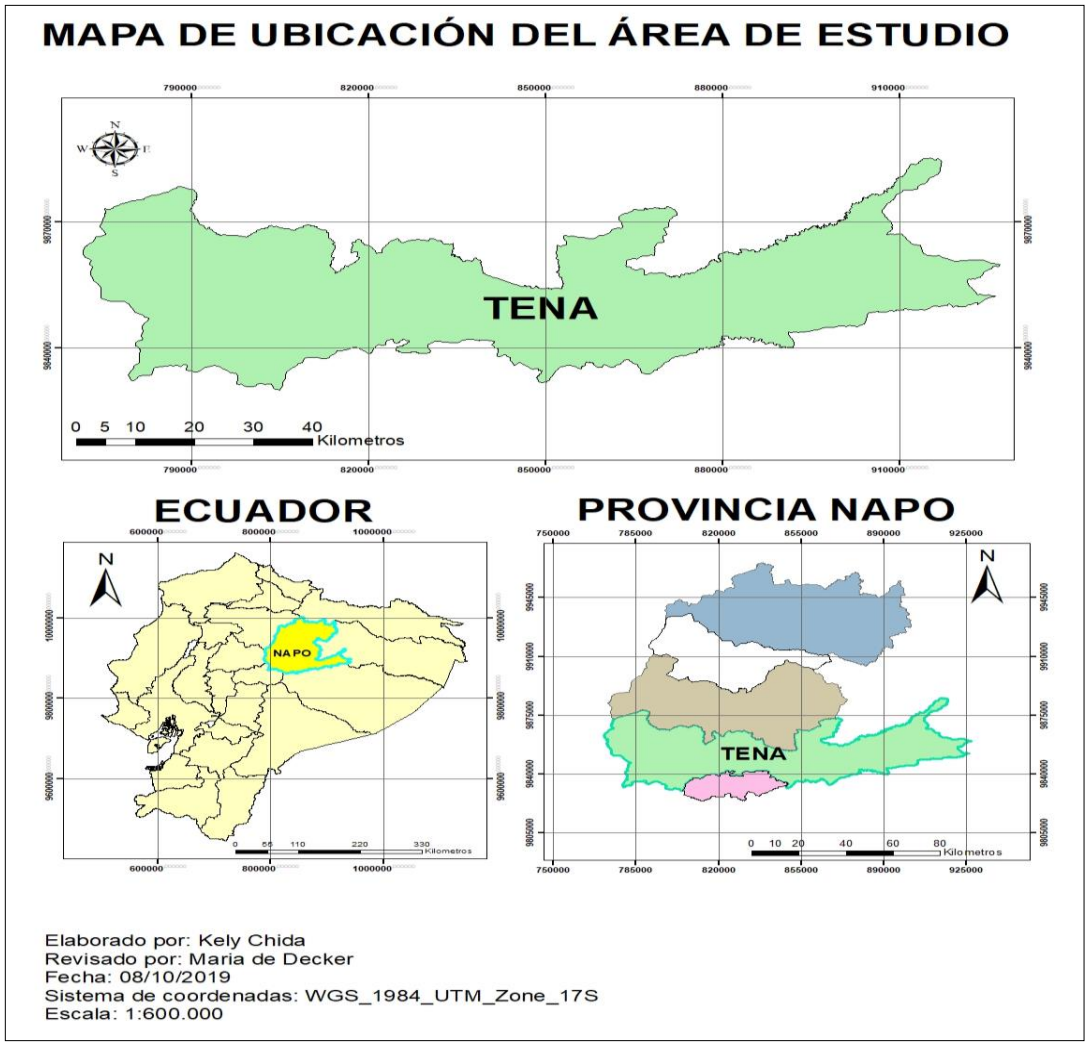


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio
Fuente: Elaboración propia

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

En este proyecto el tipo de investigación es exploratoria ya que los resultados alcanzados son una primera aproximación en la determinación de áreas potenciales para la instalación del nuevo relleno sanitario del cantón Tena.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.3.1. Metodología para calcular el área requerida de terreno para instalar el nuevo relleno sanitario

Para determinar el área requerida del relleno sanitario se aplicó las ecuaciones utilizadas en los estudios de Merat (2015).

Para ello será necesario contar con los siguientes datos:

- Número de habitantes (Se obtuvo de INEC)
- La producción per cápita (Se obtuvo del GAD Municipal de Tena)
- La tasa de crecimiento poblacional (Se obtuvo del INEC)

3.3.1.1. Proyección de la población

Es importante estimar la población futura para determinar la cantidad de residuos sólidos que se tendrán que disponer en el relleno. Según la legislación ambiental el tiempo mínimo de vida útil de un relleno sanitario es 10 años.

$$Pf = Pi \times (1 + r)^n \qquad (1)$$

Pf= Población futura

Pi= Población inicial

r= Tasa de crecimiento poblacional

n= Número de años (año inicial – año final)

3.3.1.2. Producción total

Al multiplicar la generación per cápita por el número de habitantes de la localidad se determina la generación total diaria de los residuos.

$$CRD = ppc * Pob \quad (2)$$

CRD: Cantidad de residuos sólidos producidos por día (Kg/día)

Pob: Población total

ppc: Producción per cápita.

3.3.1.3. Volumen de residuos solidos

El volumen diario de los residuos se calcula dividiendo la producción total diaria por la densidad de los residuos posteriormente se multiplica por 365 días para obtener el volumen anual de los residuos.

$$V_{diario} = \frac{CRD}{D_{rs}} \quad (3)$$

$$V_{Anual} = CRD * 365 \quad (4)$$

Donde

V_{diario}: Volumen de residuos sólidos a disponer en un día (m3 /día)

V_{Anual}: Volumen de residuos sólidos en un año (m3 /año)

CRD = Cantidad de residuos sólidos producidos (Tn/día)

Drs: Densidad de los residuos sólidos compactados (400 a 500 $\frac{Kg}{m^3}$) y del relleno estabilizado (500 a 600 $\frac{Kg}{m^3}$) (Jaramillo, 2002; Merat, 2015; Rondón *et al*., 2016)

3.3.1.4. Volumen del relleno sanitario

Para calcular el volumen del relleno se multiplica el volumen anual por el material de cobertura.

$$V_{RS} = V_{Anual} * m.c. \quad (5)$$

V_{RS} = Volumen del Relleno Sanitario (m^3 /año)

m.c. = Factor de material de cobertura (1,2 a 1,25) (Merat, 2015)

3.3.1.5. Área requerida

Para determinar el área requerida se divide el volumen del relleno sanitario por la altura media del relleno.

$$A_{RS} = \frac{V_{RS}}{h_{RS}} \quad (6)$$

A_{RS}: Área requerida

h_{RS}: Altura o profundidad media del relleno sanitario

3.3.1.6. Área total requerida

$$A_T = (A_{RS} * F) + A_{RS} \quad (7)$$

A_T: Área total requerida

F: Factor de aumento del área adicional. Está entre el 20% o 40% del área que se deberá rellenar (Jaramillo, 2002; Merar, 2015).

3.3.2. Metodología para identificar áreas potenciales para la instalación del nuevo relleno sanitario

En este estudio se utilizó el análisis multicriterio con la ayuda de los SIG para identificar las mejores áreas disponibles para instalar un relleno sanitario en el cantón Tena. A continuación, se explica paso a paso los métodos utilizados:

Definición de criterios: En este estudio se consideró los criterios establecidos por la norma de calidad ambiental para el manejo y disposición final de desechos sólidos no peligrosos, del libro VI anexo 6, 4.12. Normas generales del TULSMA (MAE, 2015):

a) Aeropuerto: Distancia mayor a los 13 km.
b) Vías: la normativa no establece una distancia mínima o máxima, sin embargo se tiene que considerar que las vías sean de fácil acceso para el transporte y recolección de los desechos sólidos. Para definir la distancia a las vías se investigó en estudios similares teniendo un rango de 200 a 400 m como distancia aceptable.
c) Asentamientos humanos: Distancia mayor a 500 m.
d) Recursos hídricos: Distancia mínima de 200 m.
e) Permeabilidad: Menor o igual a 1 x 10-7 cm/seg, aunque si es mayor se podrán utilizar alternativas impermeabilizantes.
f) Inundación: Evitar las zonas propensas a inundaciones.
g) Uso de suelo: El relleno no debe ubicarse en zonas boscosas que contengan especies nativas del área de estudio y también se debe evitar escoger las zonas agrícolas.

También se incorporó otros criterios que se encuentran disponibles en publicaciones con estudios similares:

a) Pendiente: Valor aceptable del 2 al 12%.
b) Precipitación: Para este criterio se tomó en cuenta la precipitación anual del área de estudio, siendo 1000 a 1500 mm el valor más aceptable.
c) Nivel freático: Profundidad mayor a 1,2 m.

Obtención de datos: Del Sistema Nacional de Información (SNI) (http://sni.gob.ec/coberturas), se obtuvieron los archivos shapefile de recursos hídricos, precipitación y áreas protegidas, mientras que del GADM de Tena se consiguió los archivos

de aeropuertos, red vial, asentamientos humanos, pendientes, permeabilidad (Velocidad de infiltración), inundación, uso de suelo y profundidad a nivel freático.

Integración de los criterios al SIG: Los datos obtenidos fueron usados para crear capas de los criterios antes mencionados, utilizando el programa ArcMap 10.5, mismo que permitió almacenar, integrar, manipular, analizar y visualizar los datos obtenidos (Yıldırım y Güler, 2016). Con la herramienta *Multiple Ring Buffer* (*ArcToolbox* / *Analysis Tools / Proximity*) se generaron múltiples zonas de influencia (Buffer) a los criterios de aeropuerto, vías, asentamientos humanos, recursos hídricos y áreas de inundación. Posteriormente con la ayuda de la herramienta *Intersect* (*Geoprocessing*) se realizó un corte utilizando la capa buffer de cada criterio con el área de estudio a fin de considerar solamente las áreas que se encuentren dentro del cantón Tena. Para los criterios de pendientes, permeabilidad, uso de suelo, precipitación y nivel freático solamente se les asignó un valor de reclasificación o de estandarización.

Estandarización de los criterios: Para la estandarización es necesario convertir el archivo de cada capa (criterio) a formato raster, para ello se utilizó la herramienta *Polygon to Raster* (*ArcToolbox / Conversion Tools / To Raster*) debido a que más adelante se necesita aplicar la herramienta *Weighted overlay* (*ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Overlay*) misma que trabaja solo con archivos raster. El objetivo de la estandarización en la toma de decisiones basada en SIG es proporcionar a todos los criterios una escala de calificación de idoneidad uniforme transformando o reescalando los datos originales (Yıldırım & Güler, 2016). Después con la ayuda de la herramienta *Reclassify* (*ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Reclass)* se incorporó los valores de idoneidad a cada capa (criterio). En este estudio se asignó valores de idoneidad en una escala del 1 al 9, siendo 1 la mejor opción y 9 la peor (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de estandarización o de idoneidad

Valores	Explicación
1	Es la mejor opción posible para la decisión final
2	Es una excelente opción para la decisión final
3	Es una muy buena opción para la decisión final
4	Es una buena opción para la decisión final
5	Es una opción decente para la decisión final
6	Es una opción desagradable para la decisión final
7	Es una mala opción para la decisión final
8	Es una opción no viable para la decisión final
9	La peor opción posible para la decisión
NO DATA	Excluido

Fuente: Antao (2015)
Modificado por Kubes (2019)

Calculo de ponderación de criterios ya establecidos: Para determinar el peso o ponderación del criterio, se utilizó el *proceso analítico jerárquico* (AHP), según Djokanovic *et al*. (2016) el AHP fue desarrollado por Saaty (1980) y es un método multicriterio ampliamente aceptado que puede utilizarse para resolver problemas complejos de toma de decisiones donde existan múltiples criterios o alternativas de solución. En la actualidad el método de AHP se ha utilizado para resolver problemas de ubicación espacial en donde se tienen en cuenta el análisis de la idoneidad de la tierra (Pimenta, Beltrão, Gemaque, & Tavars, 2019). Para ponderar los criterios, se construyó una matriz de comparación por pares, siendo esta la etapa más significativa de AHP (Tüdeş & Kumlu, 2017), esta comparación requiere el uso de una escala que varía del 1 al 9 dependiendo del grado de importancia de los criterios (Tabla 2). Para construir esta matriz se utilizó la herramienta Microsoft Excel.

Tabla 2. Escala fundamental de comparación por pares

Importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia grande
7	Importancia muy grande
9	Importancia extrema
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores

Fuente: Saaty (2008)

En esta matriz se compara cada criterio de la primera columna (numeradores) con cada uno de los criterios de la primera fila (denominadores) (Tabla 3), teniendo siempre en cuenta el valor de importancia. Cuando se comparan criterios iguales es decir C_1 con C_1 su valor de importancia será de 1, sin embargo cuando se compara C_1 con el C_2 (criterios diferentes) se tiene que establecer cuál de los dos criterios se considera más importante y se definen los valores de importancia acorde a la Tabla 2. El criterio que no es importante tendrá un valor de 1, aunque existen casos donde la comparación con criterios diferentes puede tener un valor de 1 es decir importancia igual. Además dentro de la matriz debe haber reciprocidad, es decir si C_{12} = x/1 entonces C_{21} = 1/x.

Tabla 3. Ejemplo de matriz de comparación por pares

		Denominador				
	Criterio	$\boldsymbol{C_1}$	$\boldsymbol{C_2}$	$\boldsymbol{C_3}$	**….**	$\boldsymbol{C_n}$
Numerador	$\boldsymbol{C_1}$	C_{11}	C_{12}	C_{13}	….	$\boldsymbol{C_{1n}}$
	$\boldsymbol{C_2}$	C_{21}	C_{22}	C_{23}	….	$\boldsymbol{C_{2n}}$
	$\boldsymbol{C_3}$	C_{31}	C_{32}	C_{33}	….	$\boldsymbol{C_{3n}}$
	….	….	….	….	….	….
	$\boldsymbol{C_m}$	C_{m1}	C_{m2}	C_{m3}	….	$\boldsymbol{C_{mn}}$

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la matriz de comparación por pares, se procedió a sumar los valores de cada columna de la matriz, posteriormente se divide cada elemento de la matriz por el total de la suma de cada columna. La matriz resultante de este proceso se denomina matriz

normalizada. Finalmente, para obtener el peso se calculó el promedio de todos los elementos de cada fila de la matriz normalizada, obteniendo así una matriz de pesos de los criterios (Saaty, 2008), si se quiere obtener los pesos en porcentajes, se multiplica por 100. Para comprobar si la matriz que se construyó con los valores asignados es consistente o sólida, se procedió a calcular el índice de consistencia, el índice aleatorio y la razón de consistencia. Para medir la consistencia se aplicó las siguientes ecuaciones (Saaty, 1980).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{8}$$

$$RI = \frac{1{,}98\ (n - 2)}{n} \tag{9}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{10}$$

Donde:

CI: Índice de consistencia

RI: Índice de consistencia aleatoria

CR: Razón de consistencia

n: número de columnas de la matriz o número de criterios en la matriz

Para obtener λ_{max} se multiplicó la matriz de comparación por pares por la matriz de pesos, utilizando la función MMULT. La función MMULT es una función de Excel que permite obtener el producto de dos matrices, Sintaxis: MMULT (matriz 1, matriz 2). Para ello el número de columnas de la matriz1 debe tener el mismo número de filas de la matriz2, y ambas matrices deben contener solo números (Microsoft, 2017). Posteriormente se dividió cada elemento del resultado obtenido por cada elemento de la matriz de pesos, el promedio del resultado obtenido representa λ_{max} (Aznar & Guijarro, 2012).

Para que los pesos obtenidos de cada criterio puedan ser utilizados en el análisis, la matriz debe ser consistente; para ello CR debe ser menor a 0,1 (Saaty, 1980).

Identificación de las áreas para el relleno sanitario: una vez obtenido los pesos de cada criterio, se utilizó la herramienta *Weighted Overlay (ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Overlay)* para generar el mapa de idoneidad y mostrar los sitios potenciales para el relleno sanitario (Al-Anbari *et al*., 2018). Los resultados generados se convirtieron en archivo vector con la ayuda de la herramienta *Raster to Polygon* (*ArcToolbox / Conversion Tools / From Raster*) para poder calcular el área de cada resultado. Para el cálculo del área se creó una nueva columna (*Add Field*) con el nombre de "área" en la tabla de atributos del nuevo vector con los valores de idoneidad, posteriormente se utilizó la herramienta *Calculate Geometry* (Clic derecho en la columna "área") y se seleccionó la unidad en hectáreas. Una vez calculado las áreas se seleccionó aquellas que cumplan con el área requerida para el relleno sanitario. Finalmente se vuelve hacer una revisión más intensiva del o las áreas obtenidas y se recomiendan las más aptas o idóneas.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ÁREA REQUERRIDA PARA INSTALAR EL RELLENO SANITARIO

4.1.1. Proyección de la población

Para cumplir con lo establecido en el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015), se realizó una proyección de la población urbana y rural desde el 2020 al 2030, utilizando la ecuación 1. En este estudio se consideró como año base el último censo realizado en el 2010 (INEC, 2010). Teniendo como datos iniciales lo siguiente:

Población actual total: 60.880 habitantes

Población urbana: 23.307 habitantes

Población rural: 37.573 habitantes

Tasa de crecimiento (TDC): 3,16% (INEC, 2010), se consideró una TDC constante (Jaramillo, 2002; Rondón *et al*., 2017).

En la Tabla 4 se presenta la proyección de la población siendo 113.423 Hab la población para el año 2030 (43.322 Hab en la zona urbana y 70.000 Hab en la zona rural), población base para la cual se diseña el relleno sanitario.

Tabla 4. Proyección de la población urbana y rural 2020 - 2030

Año	TDC	n (Número de años)	Población Urbana (Hab)	Población Rural (Hab)
2020	0,0316	10	31812,64	51284,86
2021	0,0316	11	32817,92	52905,47
2022	0,0316	12	33854,97	54577,28
2023	0,0316	13	34924,78	56301,92
2024	0,0316	14	36028,41	58081,06
2025	0,0316	15	37166,90	59916,42
2026	0,0316	16	38341,38	61809,78
2027	0,0316	17	39552,97	63762,97
2028	0,0316	18	40802,84	65777,88
2029	0,0316	19	42092,21	67856,46
2030	0,0316	20	43422,32	70000,73
		Total	113423,05	

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Producción total de residuos

En base a un estudio realizado por el GADM de Tena, se estimó que la zona urbana tiene una producción per cápita (ppc) de 0,89 kg/hab*día y la zona rural 0,50 kg/hab*día (De la Torre, 2013). Según Rondón *et al*. (2016) las áreas con un nivel socioeconómico alto tendrán una tasa de ppc alta, Jaramillo (2002) menciona que cada año la ppc aumenta entre el 0,5% y el 1%. Teniendo en cuenta lo antes mencionado en este estudio se consideró un incremento del 1% para la ppc urbana y 0,5% para la ppc rural.

Una vez obtenido la ppc y el número de habitantes se aplicó la ecuación 2 para hallar la producción diaria de los residuos urbanos y rurales. A continuación, para obtener la generación total de los residuos se realizó una suma entre la generación urbana y la rural, obteniendo como resultado que en el año 2020 se generan 53.781,54 kg de residuos al día, dicha operación se realizó hasta el año 2030 ya que este es el último año de operación del relleno sanitario, los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Generación total de residuos sólidos 2020 - 2030

Población Urbana (hab)	Población Rural (hab)	ppc Urbana (kg/hab*día)	ppc Rural (kg/hab*día)	Generación de residuos área Urbana (kg/día)	Generación de residuos área Rural (kg/día)	Generación total de residuos (kg/día)
31812,64	51284,86	0,89	0,50	28343,30	25438,25	53781,54
32817,92	52905,47	0,90	0,50	29531,33	26373,30	55904,64
33854,97	54577,28	0,91	0,50	30769,17	27342,73	58111,90
34924,78	56301,92	0,92	0,50	32058,89	28347,80	60406,69
36028,41	58081,06	0,93	0,51	33402,67	29389,81	62792,48
37166,90	59916,42	0,94	0,51	34802,78	30470,12	65272,89
38341,38	61809,78	0,95	0,51	36261,57	31590,14	67851,71
39552,97	63762,97	0,96	0,51	37781,51	32751,33	70532,84
40802,84	65777,88	0,96	0,52	39365,16	33955,20	73320,36
42092,21	67856,46	0,97	0,52	41015,19	35203,33	76218,52
43422,32	70000,73	0,98	0,52	42734,38	36497,33	79231,71

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Volumen de residuos solidos

Para calcular el volumen de residuos se aplicó la ecuación 3 y 4. En la ecuación 3 se dividió la generación total de residuos diarios por la densidad de los residuos. En este estudio se consideró una densidad de 600 kg/m^3, sin embargo, con la maquinaria adecuada se podría alcanzar una densidad mayor (Rondón *et al*., 2016).

$$V_{diario} = \frac{CRD}{D_{rs}} \quad (3)$$

Donde:

CRD = Cantidad de residuos sólidos producidos (kg/día)

Drs: Densidad de los residuos sólidos ($\mathrm{kg/m^3}$)

Volumen diario de residuos sólidos recolectados en el 2020

$$V_{diario\ 2020} = \frac{53.781{,}54\ kg/día}{600\ kg/m^3}$$

$$V_{diario\ 2020} = 89{,}64\ m^3/día$$

El volumen anual se calculó multiplicando el resultado de la ecuación 3 por 365 días.

$$V_{Anual} = CRD * 365 \quad (4)$$

Volumen anual de residuos sólidos recolectados en el 2020

$$\mathrm{V_{Anual\ 2020}} = 89{,}64\ \mathrm{m^3/día} * 365$$

$$\mathrm{V_{Anual\ 2020}} = 32\ 717{,}10\ \mathrm{m^3/año}$$

Dicha operación se realizó hasta el año 2030 ya que este es el último año de operación del relleno sanitario, los resultados se muestran en la tabla 6.

4.1.4. Volumen del relleno sanitario

Para calcular el volumen del relleno sanitario se aplicó la ecuación 5, donde se multiplicó el volumen anual de los residuos por el factor de material de cobertura (m.c.). Merat (2015) y Rondon *et al*. (2016) consideran un rango de 1,2 a 1,25 como valor de m.c. En este estudio se consideró un valor de 1,23 como m.c.

$$V_{RS} = V_{Anual} * m.c. \quad (5)$$

Donde:

V_{RS} = Volumen del Relleno Sanitario (m^3 /año)

V_{Anual}: Volumen de residuos sólidos en un año (m3 /año)

m.c. = Factor de material de cobertura (1,2 a 1,25) (Merat, 2015)

$$V_{RS\ 2020} = 32.717{,}1\ m^3/\text{año} * 1{,}23$$

$$V_{RS\ 2020} = 40.242{,}04\ m^3/\text{año}$$

Dicha operación se realizó hasta el año 2030 ya que este es el último año de operación del relleno sanitario, los resultados se muestran en la tabla 6.

4.1.5. Área requerida

Una vez obtenido el volumen de los residuos, se aplicó la ecuación 6 para determinar el área requerida para instalar el relleno sanitario. Teniendo en cuenta que en este estudio se asumió un relleno sanitario combinado de zanja y área, es necesario conocer el nivel freático para determinar su profundidad. Rondón *et al*. (2016) mencionan que con los medios necesarios se puede excavar zanjas de hasta 7 metros, sin embargo, esta profundidad también depende del nivel freático del lugar donde se vaya a instalar el relleno. Según De la Torre (2013) el nivel freático en el cantón Tena es muy variable, teniendo zonas o sectores donde este se encuentra a distancias menores a los 10 metros y mayores a los 15 metros. Sin embargo, en dicho estudio no se incluyó todos los sectores del cantón solamente algunos y en base a la poca disponibilidad de información en este estudio se asumió una profundidad de 3 metros y una altura de 7 metros, obteniendo una altura total de 10 metros. Después de encontrar y

seleccionar el área para el relleno será necesario realizar otros estudios para obtener valores exactos del nivel freático para poder aumentar la profundidad de manera que permita alargar la vida útil del relleno.

$$A_{RS} = \frac{V_{RS}}{h_{RS}} \quad (6)$$

Donde:

A_{RS}: Área requerida

V_{RS} = Volumen del Relleno Sanitario (m^3 /año)

h_{RS}: Altura o profundidad media del relleno sanitario

El área requerida para los residuos sólidos en el 2020 es:

$$A_{RS\ 2020} = \frac{40.242{,}04\ m^3/año}{10\ m}$$

$$A_{RS\ 2020} = 4.024{,}2\ m^2/año$$

Dicha operación se realizó hasta el año 2030 ya que este es el último año de operación del relleno sanitario, los resultados se muestran en la tabla 6.

4.1.6. Área total requerida

Para determinar el área total requerida, se aplicó la ecuación 7, en donde se multiplicó el área requerida por el factor de aumento del área adicional para la construcción de obras complementarias tales como: vías de penetración, áreas de aislamiento, caseta para portería e instalaciones sanitarias, patio de maniobras, etc (Jaramillo, 2002; Merat, 2015). En este estudio se consideró un factor de aumento de 30%.

$$A_T = (A_{RS} * F) + A_{RS} \quad (7)$$

Donde:

A_T: Área total requerida

A_{RS}: Área requerida

F: Factor de aumento del área adicional. Está entre el 20% o 40% del área que se deberá rellenar (Jaramillo, 2002; Merar, 2015).

El área total requerida para los residuos sólidos en el 2020 es:

$$A_{T\,2020} = (4.024{,}2\ m^2/\text{año} * 0{,}3) + 4.024{,}2\ m^2/\text{año}$$

$$A_{T\,2020} = 5.231{,}46\ m^2$$

Dicha operación se realizó hasta el año 2030 ya que este es el último año de operación del relleno sanitario, los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen del cálculo del área requerida del relleno sanitario

Año	Generación total de residuos (kg/día)	Volumen diario de RS (m^3/día)	Volumen anual de RS (m^3/año)	Volumen del relleno sanitario (m^3/año)	Altura o profundidad media del relleno sanitario (m)	Área requerida (m^2)	Área total requerida (m^2)
2020	53781,54	89,64	32717,1	40242,04	10	4024,2	5231,46
2021	55904,64	93,17	34008,65	41830,65	10	4183,06	5437,98
2022	58111,9	96,85	35351,41	43482,23	10	4348,22	5652,69
2023	60406,69	100,68	36747,4	45199,3	10	4519,93	5875,91
2024	62792,48	104,65	38198,76	46984,47	10	4698,45	6107,98
2025	65272,89	108,79	39707,68	48840,44	10	4884,04	6349,26
2026	67851,71	113,09	41276,46	50770,04	10	5077	6600,11
2027	70532,84	117,55	42907,48	52776,2	10	5277,62	6860,91
2028	73320,36	122,2	44603,22	54861,96	10	5486,2	7132,05
2029	76218,52	127,03	46366,26	57030,5	10	5703,05	7413,97
2030	79231,71	132,05	48199,29	59285,13	10	5928,51	7707,07
					Total (m^2)		70369,39
					Total (ha)		7,04

Fuente: Elaboración propia

Los datos se tabularon para obtener como resultado que se requiere de un área de 7 ha para la construcción del relleno sanitario.

4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO

4.2.1. Definición y estandarización de los criterios

Según la revisión de la literatura y el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015), los criterios empleados para este estudio se muestran en la tabla 7 con sus respectivos valores de estandarización.

Tabla 7. Criterios para determinar la obtención de área para el relleno sanitario

CRITERIOS	SUB - CRITERIOS	VALORES DE ESTANDARIZANCIÓN
Distancia al aeropuerto (km)	<13	9
	>13	1
Distancia a vías (m)	0 - 200	9
	200 - 400	1
	400 - 600	2
	600 - 800	3
	800 - 1000	4
	1000 - 1200	5
	1200 - 1400	6
	1400 - 1600	7
	>1600	9
Distancia a los asentamientos humanos (m)	<1000	9
	1000-1500	8
	1500-2000	7
	2000-2500	5
	2500-3000	2
	3000-3500	1
	3500-4000	2
	4000-5000	5
	>5000	9

Distancia a recursos hídricos (m)	0 - 200	9
	200 - 300	9
	300 - 400	7
	400-500	6
	500-600	5
	600-700	1
	700-800	5
	800-1000	7
	>1000	9
Pendientes (%)	0 - 2	9
	2 - 12	1
	12 - 25	5
	>25	9
Permeabilidad	Muy Lenta	1
	Lenta	2
	Moderadamente Lenta	4
	Moderada	5
	Moderadamente Rápida	8
	Muy Rápida	9
	Desconocida	9
	No Aplicable	9
Susceptibilidad de inundación	Sin Susceptibilidad	1
	Zonas Propensas A Inundación	9
Uso de suelo	Bosque	9
	Vegetación Arbustiva Y Herbácea	1
	Tierra Agropecuaria	5
	Cuerpo De Agua	9
	Zona Antrópica	9
	Otras Tierras	9

Precipitación (mm)	1000 - 1500	1
	1500 - 2000	3
	2000 - 3000	5
	3000 - 4000	7
	4000 - 5000	9
Profundidad del nivel freático	< 1,2	9
(m)	>1,2	1

Fuente: Elaboración propia

Según el Libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) se deben excluir las áreas protegidas. Sin embargo, en este estudio no se realizó un mapa de exclusión de dichas áreas debido a que en la información digital de pendiente, permeabilidad y usos de suelo ya se excluyeron las áreas protegidas.

4.2.2. Análisis de las capas temáticas

4.2.2.1. Distancia al aeropuerto

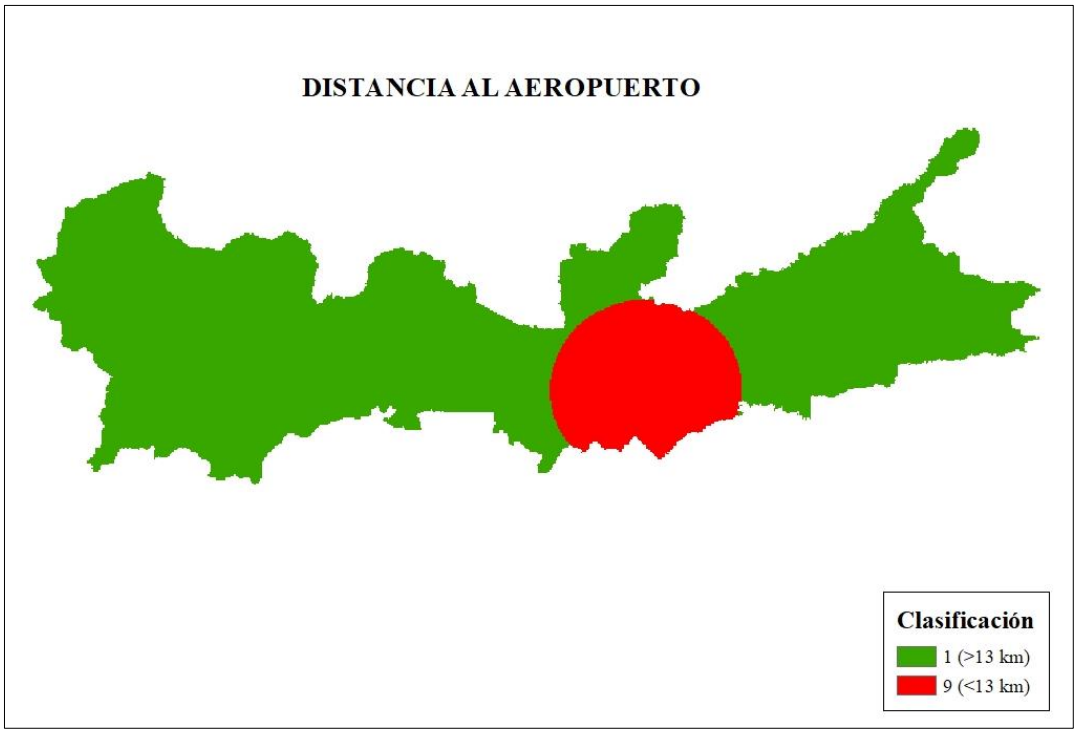


Figura 2. Capa de distancia al aeropuerto
Fuente: Elaboración propia

En los rellenos sanitarios los desechos orgánicos atraen a las aves y estas representan en grandes cantidades un riesgo para la seguridad de la aviación, motivo por el cual los rellenos

sanitarios deben ubicarse a una distancia adecuada de los aeropuertos (Djokanovic *et al*., 2016).

Dentro del área de estudio se encuentra el aeropuerto Jumandy ubicado en la comunidad de Zancudo, parroquia Ahuano, a 32 Km de la cabecera cantonal (GADM de Tena, 2014).

En la literatura existen diferentes valores relacionados con las distancias adecuadas desde los aeropuertos, como 1000 metros para aeropuerto nacionales y 3000 metros para aeropuertos internacionales según la secretaria del ambiente (SEAM) de Paraguay (Resolución Nº 282, 2004), sin importar el tipo de aeropuerto, 6000 metros según González (2017) y 8 km según la Reglamentación Aeronáutica Boliviana (RAB) 138.470 (Dirección General De Aeronáutica Civil (DGAC) & Unidad de Aeródromos y ayudas terrestres (AGA) , 2018). Sin embargo, en Ecuador el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) establece que el relleno sanitario debe ubicarse a una distancia mayor a los 13 kilómetros (km).

En este estudio se formaron dos buffers (Figura 2), el primero con una distancia menor a 13 km y un valor de idoneidad de 9 obteniendo como resultado que el 14,09% del territorio no es apto para instalar un relleno sanitario y el segundo buffer con una distancia mayor a los 13 km y una idoneidad de 1 representando el 85,91% del área de estudio, es decir el área que se considera la más adecuada y que cumple con los requisitos que establece la normativa ambiental.

4.2.2.2. Distancia a vías

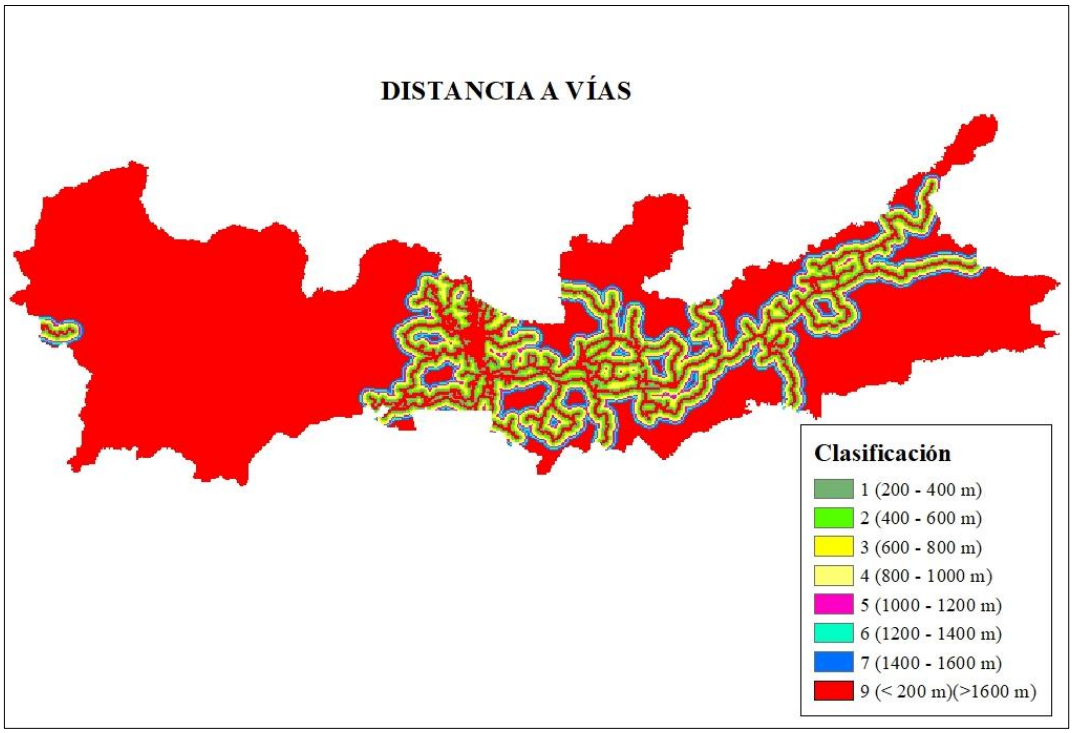


Figura 3. Capa de distancia a vías
Fuente: Elaboración propia

Según el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) los rellenos sanitarios deben ubicarse cerca de las vías permitiendo el fácil acceso de los vehículos recolectores de residuos. Por razones de estética se debe evitar construir los rellenos sanitarios dentro de los 200 metros de distancia de cualquier tipo de vía (Sureshkumar *et al*., 2017), a fin de minimizar el impacto visual y otros perjuicios resultantes de la localización de dicha construcción, mejorando así el bienestar de la población y el desarrollo turístico del área de estudio (Demesouka *et al*., 2019). También se debe evitar una distancia mayor a 1 km de las vías de acceso (Sener, 2004), ya que a mayor distancia mayor será el costo de transporte. Todavía más se deberá excluir aquellas áreas donde se necesite construir nuevas vías de acceso ya que esta generaría mayores impactos ambientales y un incremento en los costos de ejecución (Cobos *et al*., 2017). Para este criterio se tomó en cuenta todas las avenidas, calles y pasajes de tipo urbano y rural asfaltadas, lastradas o adoquinadas que tiene el cantón Tena, según el shapefile de la red vial obtenido del GADM de Tena.

De acuerdo con lo anteriormente expresado a las distancias de 0 – 200 metros y >1600 metros se les asigno un valor de idoneidad alto representando la peor opción para la instalación del relleno, a las distancias intermedias se les asignaron valores bajos que a medida que aumenta

la distancia el valor de idoneidad también aumenta. Obteniendo como resultado (Figura 3) que la idoneidad de 9 puntos representa el 75,9% del área de estudio es decir áreas que no son aptas para instalar un relleno sanitario. El porcentaje que le sigue es del 5% cuyo valor de idoneidad es de 1 punto es decir que representa la mejor opción para instalar el relleno sanitario, los valores de 2, 3, 4, 5, 6, 7 puntos obtuvieron porcentajes de 4,5%, 3,9%, 3,3%, 2,8%, 2,5%, 2,1% respectivamente.

4.2.2.3. Distancia a los asentamientos

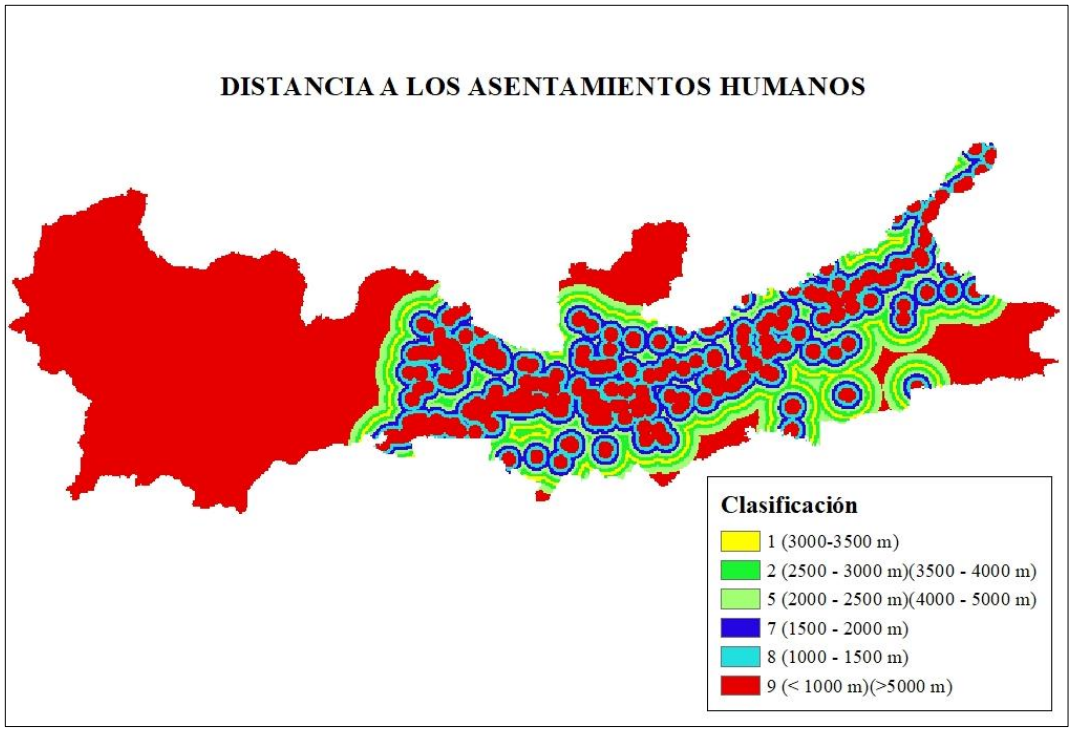


Figura 4. Capa de distancia a los asentamientos humanos
Fuente: Elaboración propia

Según el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) los rellenos sanitarios deben ubicarse a distancias mayores a los 500 metros de las viviendas más cercanas. Para este criterio se tomó en cuenta la zona urbana y los asentamientos menores de la zona rural. Según Sener (2004) no pueden construirse en sitios dentro de una distancia de menos de 1000 metros de los asentamientos; por otro lado, Barakat *et al*. (2017) consideran que la distancia significativa debe ser de 2000 metros. Sin embargo, Aksoy & San (2019) mencionan que el área propuesta para instalar el relleno debe estar lo suficientemente cerca de la ciudad para garantizar un vertido conveniente y para que los costos de transporte sean asequibles, pero también debe estar lo suficientemente lejos como para que no traiga problemas que puedan afectar a la salud de la población y al medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, en este estudio se consideró que el valor de idoneidad de las distancias menores a los 1000 metros es de 9 puntos, es decir que representa la peor opción para la instalación del relleno sanitario y haciendo referencia a lo que mencionan Aksoy & San (2019) a las distancias mayores a los 5000 metros también se les asigno un valor de idoneidad de 9 puntos y a las distancias de 3000 – 3500 se le asignó un valor de 1 punto representando la mejor opción.

Obteniendo como resultado (Figura 4) que el porcentaje más alto representa el 65,4% del área de estudio con una idoneidad de 9 los que restringe en gran cantidad el área que podría ser el más apto para instalar el relleno sanitario, la idoneidad de 1 obtuvo un porcentaje de 2,7%, sin embargo la idoneidad de 2 que representa una opción excelente para la decisión final, obtuvo un porcentaje de 5,9% del área de estudio, la idoneidad de 5 también se le considera una opción decente ocupando el 9,1% del área de estudio y a la idoneidad de 7 y 8 consideradas como opciones no aptas para la decisión final obtuvieron el 7,5% y 9,4% del territorio.

4.2.2.4. Distancia a recursos hídricos

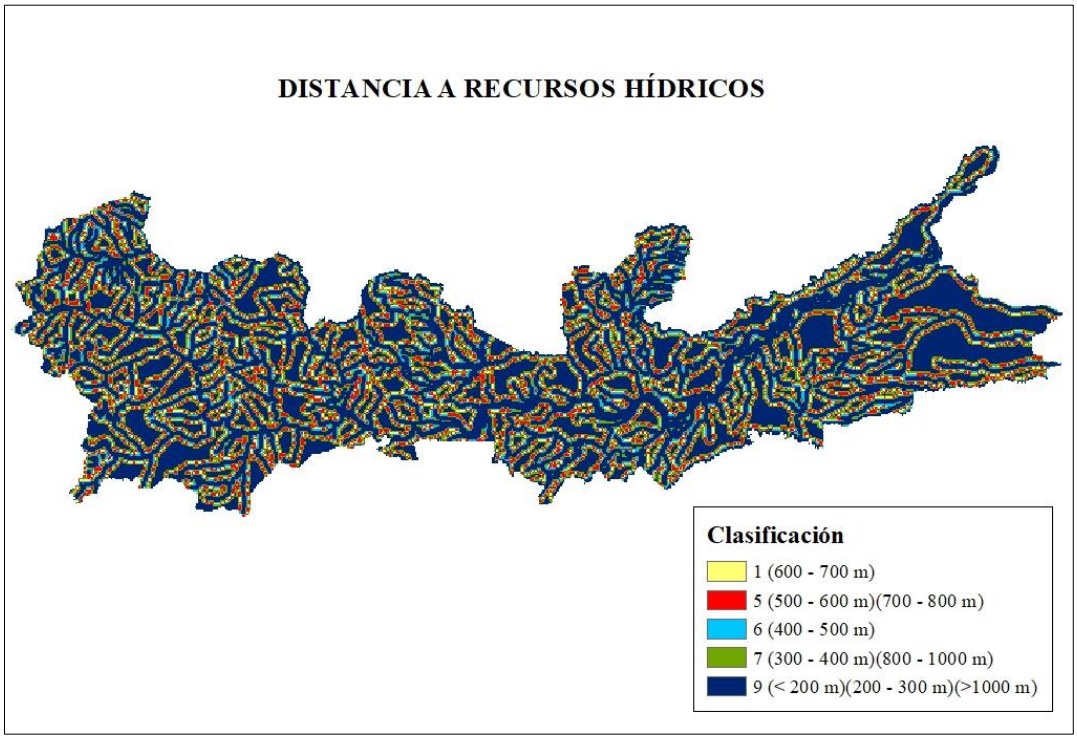


Figura 5. Capa de distancia a recursos hídricos
Fuente: Elaboración propia

El Libro VI, Anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) menciona que los rellenos sanitarios deben estar ubicados a una distancia mínima de 200 metros de la fuente superficial más próxima. Para este criterio como fuentes superficiales se tomó en cuenta a los ríos, lagunas y riachuelos presentes en el área de estudio. Según Barakat *et al*. (2017) las actividades que realiza el relleno sanitario tienen el potencial de alterar la cantidad de agua superficial a través del movimiento de lixiviados y la erosión de los residuos, motivo por el cual Cobos *et al*. (2017) menciona que para evitar la contaminación es necesario que el relleno sanitario se encuentre lo más lejos posible de un cuerpo de agua. Es por eso que Kabite, Suryabhagavan, Argaw, & Sulaiman. (2012) consideran que 300 metros desde un cuerpo de agua es la distancia mínima que se debe considerar, Bosompem *et al*. (2016) especifican que entre 500 a 2000 metros son distancias moderadas y distancias mayores a los 2000 son las más adecuadas.

En este estudio, las distancias menores a 300 metros del cuerpo de agua reciben un valor de idoneidad de 9 representando la peor opción para la decisión final, por otro lado a las distancias mayores a 1000 metros también se les asignó una valoración de 9, esto debido a que en los rellenos sanitarios los lixiviados necesitan tener un tratamiento para posteriormente ser descargados en el cuerpo hídrico más cercano y mientras más lejos se encuentre el cuerpo hídrico mayores serán los cosos de construcción (Kubes, 2019). Por ese motivo las distancias intermedias obtuvieron valores bajos mientras que las distancias cortas y grandes valores altos. Obteniendo como resultado (Figura 5) que el 52,6% del área de estudio corresponde a la valoración de 9 puntos, el 18,3% y 8,7% a la valoración de 7 y 6 puntos reduciendo en gran medida la disponibilidad de área para instalar el relleno sanitario ya que la valoración de 1 punto obtuvo el 6,9%, sin embargo, el 13,5% que representa una valoración de 5 puntos se sumaría a las posibles áreas a considerar para este proyecto.

4.2.2.5. Pendiente

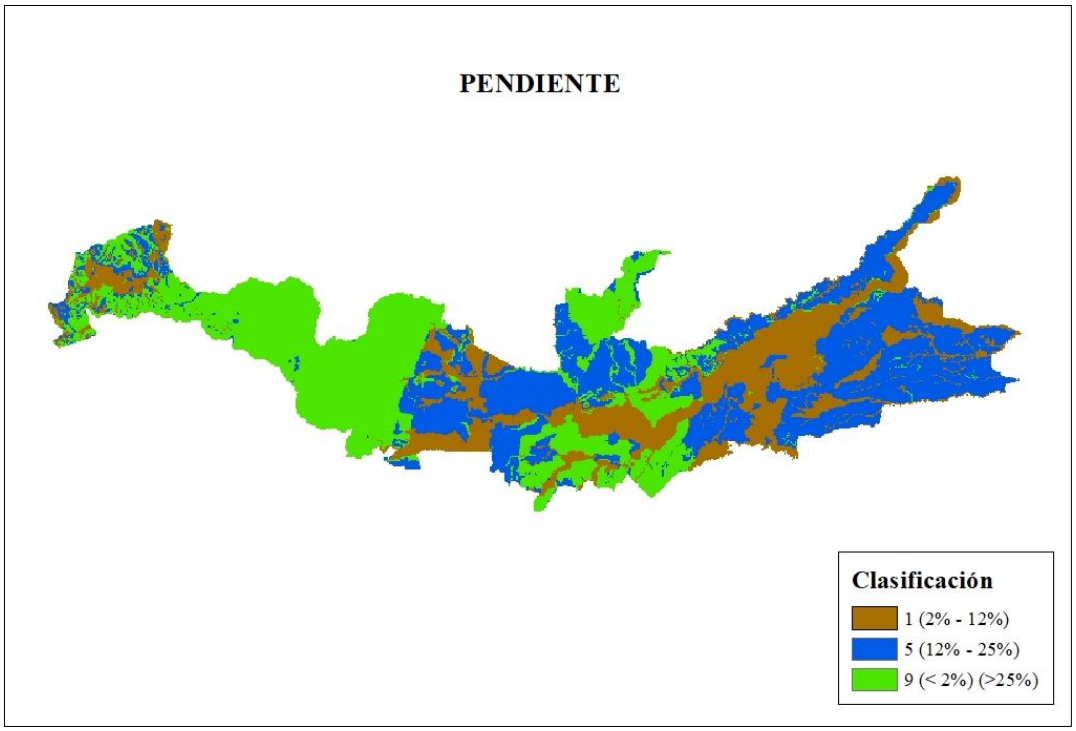


Figura 6. Capa de pendiente
Fuente: Elaboración propia

La pendiente es un criterio que no se encuentra establecido en la normativa ambiental Ecuatoriana, sin embargo se considera que es importante para el diseño de un relleno sanitario debido a que una gran pendiente representa inestabilidad del terreno, produciendo dificultades en la construcción y en el mantenimiento, aumentando el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (Demesouka, Vavatsikos, & Anagnostopoulos, 2014; Demesouka *et al*., 2019), deslizamientos de tierra y aumento en los costos de transporte ya que cuando la pendiente es empinada, los vehículos consuman más combustible (Kapilan & Elangovan, 2018). Por otro lado, una pendiente demasiado plana afectaría el drenaje de los lixiviados (Khan & Samadder, 2015), es por ello que la pendiente no puede ser ni muy plana ni muy empinada.

En la literatura existen diferentes valores relacionados con la pendiente que debe tener el terreno para instalar un relleno sanitario tal como 2 a 15 % según Kabite *et al*. (2012), 5% al 15% según El Maguiri, Kissi, Idrissi, & Souabi (2016), 8–16% según Khan & Samadder (2015), menor al 10% según Barakat *et al*. (2017) y menor al 25% según Karimi *et al*. (2019).

Teniendo en cuenta los antecedentes antes mencionados, en este estudio se asignó un valor de idoneidad de 9 puntos para aquellas pendientes menores al 2% y mayores al 25%, la pendiente con rango de 2% al 12% representa la mejor opción y para las pendientes que se encuentren ente el 12% al 25% se le asignó un valor de 5 puntos representando un valor decente, obteniendo como resultado (Figura 6) que el 19,06% del territorio puede ser utilizado para instalar el relleno sanitario aunque también se le puede sumar el 28,83% de territorio que representa una idoneidad de 5 puntos.

4.2.2.6. Permeabilidad

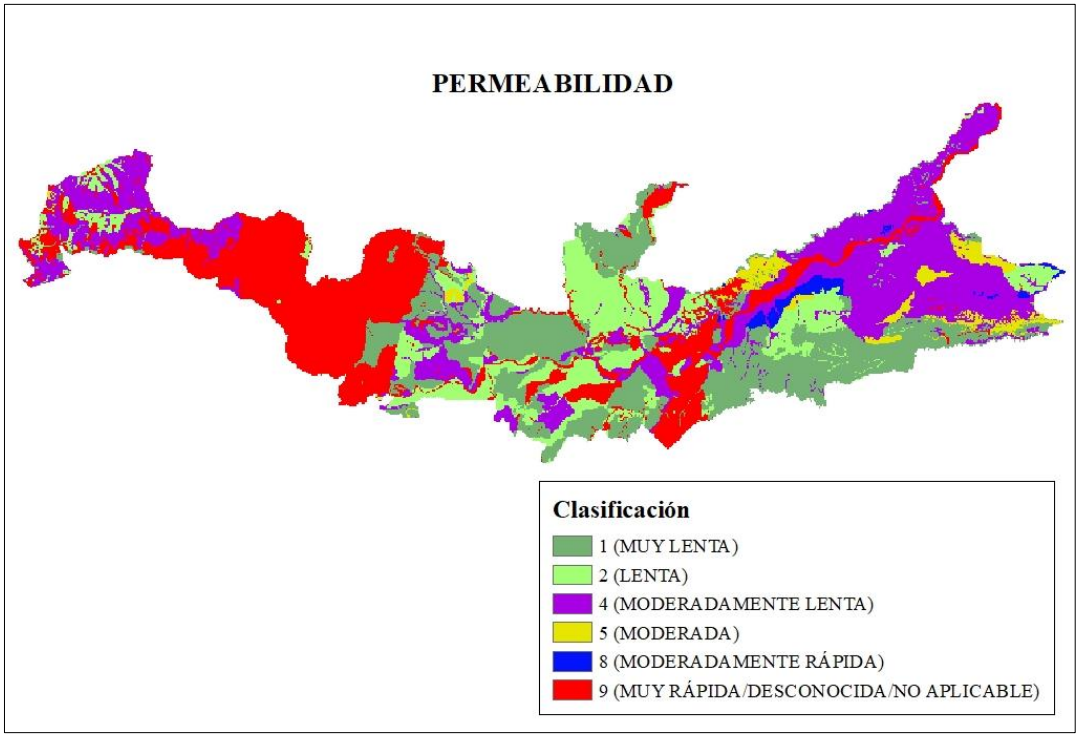


Figura 7. Capa de permeabilidad
Fuente: Elaboración propia

Según el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) los suelos aptos para instalar un relleno sanitario deben tener una permeabilidad menor o igual a $1x10^{-7}$ cm/s, esto a fin de garantizar un movimiento lento de los lixiviados hacia las aguas subterráneas (Khan & Samadder, 2015). Sin embargo, dicho valor no es un limitante ya que en la actualidad los rellenos sanitarios están equipados con sistemas de revestimiento de fondo para recoger el lixiviado y minimizar las fugas al subsuelo (Demesouka *et al*., 2014) e inclusive en la normativa ambiental ecuatoriana antes mencionada indica que en caso de que el valor de la permeabilidad sea mayor se podrán utilizar alternativas de impermeabilización. Según Díaz

& Vallejo (2017) los sistemas alternativos de impermeabilización que se podrían utilizar son las geomembranas, el geotextil, el canto rodado y capas de arcilla.

La permeabilidad del suelo se puede clasificar en base al coeficiente de permeabilidad y con la tasa de permeabilidad. La tasa de permeabilidad se representa con la velocidad de infiltración, para este criterio la información que se logró obtener esta presentada en función a la velocidad de infiltración del agua, información obtenida de la página del Ministerios de Agricultura y Ganadería (MAG) y del GADM de Tena. Aunque si se desea obtener el coeficiente simplemente se tienen que transformar las unidades es decir de mm/h a cm/s

Según el Departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (2006) en función a la velocidad de infiltración, la permeabilidad se clasifica de la siguiente forma:

Tabla 8. Clases de permeabilidad

Clases de permeabilidad	Rango (mm/h)
Muy rápida	> 250
Rápida	150 - 250
Moderadamente rápida	65 - 150
Modera	20 - 65
Moderadamente lenta	5 - 20
Lenta	1,5 - 5
Muy lenta	<1,5

Fuente: USDA (2006)

Según Soil Conservation Service (https://www.nrcs.usda.gov/) los suelos con un coeficiente de permeabilidad (k) menor 10^{-6} m/s o una velocidad de infiltración menor 0,5 cm/h (5 mm/h), son casi impermeables.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, en este estudio desde al rango de velocidad de 20 -65 mm/h se consideró como una posible opción para instalar el relleno sanitario con una idoneidad de 5 puntos, posteriormente a las velocidades menores obtuvieron una idoneidad baja y las velocidades mayores una valoración alta representando las peores opciones posibles. Obteniendo como resultado (Figura 7) que el 20,92% del territorio no es apto para

instalar un relleno sanitario ya que sus suelos son muy permeables teniendo una velocidad de infiltración muy rápida, la idoneidad que representa la mejor opción obtuvo el 18,59% de territorio, sin embargo, para aumentar la posibilidad de encontrar un sitio apto se puede agregar el 12,02%, 20,89% y el 2,46% del territorio que representan una idoneidad de 2, 4, 5 respectivamente.

4.2.2.7. Susceptibilidad de inundaciones

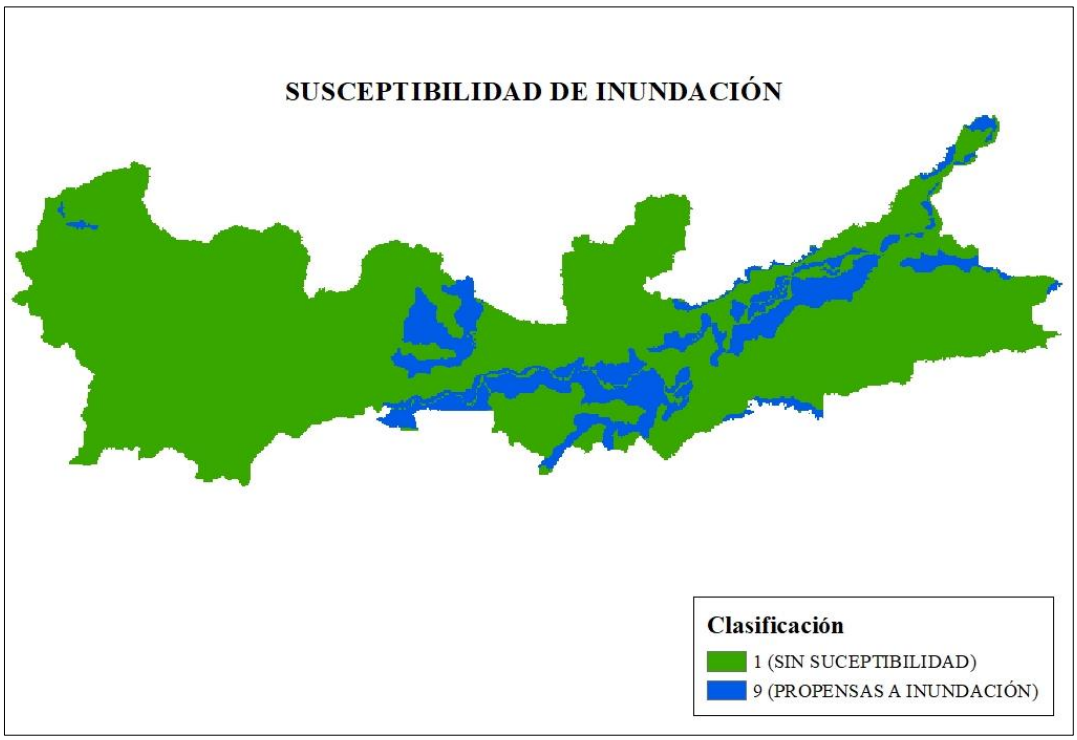


Figura 8. Capa de susceptibilidad de inundación
Fuente: Elaboración propia

El libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) menciona que el relleno no debe ubicarse en zonas propensas a inundaciones que pongan en riesgo la seguridad del personal o la operación del relleno sanitario. Debido a la falta de información para este criterio, solamente se tomó en cuenta las zonas de inundación o los planos aluviales de los principales ríos del área de estudio. Según Sener (2004) se puede instalar un relleno sanitario en las zonas de inundación de las corrientes secundarias, pero se debe construir un terraplén. Para ello se consideró un buffer de 0,1 km alrededor de las zonas de inundación dividiendo así a las zonas inundables y no inundables y asignándoles valores de idoneidad de 9 y 1 respectivamente. Obteniendo como resultado (Figura 8) que el 86% del área de estudio representa las áreas sin susceptibilidad a inundaciones para instalar el relleno sanitario mientras que el 14% representa zonas con riesgo a inundaciones

4.2.2.8. Uso de suelo

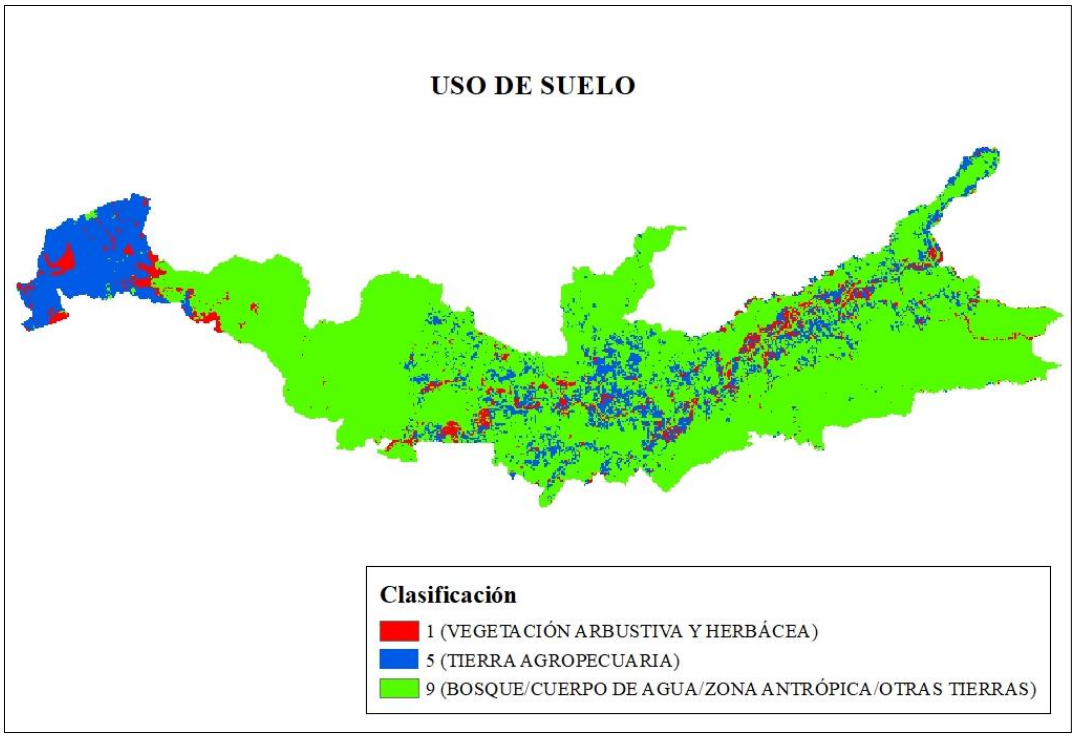


Figura 9. Capa de uso de suelo
Fuente: Elaboración propia

Según el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015) el relleno sanitario no debe ubicarse en zonas agrícolas ni a otros elementos del paisaje natural. Según Cárdenas-Moreno, Robles-Martínez, Colomer Mendoza, & Piña-Guzmán (2016) este criterio tiene el objetivo de reducir los impactos ambientales y los conflictos con la comunidad al evitar la oposición pública a la instalación de sitios de disposición final de residuos.

Debido a que la información obtenida de este criterio presentaba muchas clasificaciones se optó por reclasificarlas utilizando la clasificación que establece el MAE (2012) (Tabla 9).

Tabla 9. Leyenda cobertura y uso de tierra

Nivel I	Nivel II
Bosque	Bosque Nativo
	Plantación forestal
Vegetación arbustiva y herbácea	Vegetación arbustiva
	Páramo
	Vegetación herbácea
Tierra agropecuaria	Cultivo anual
	Cultivo semipermanente
	Cultivo permanente
	Pastizal
	Mosaico agropecuario
Cuerpo de agua	Natural
	Artificial
Zona antrópica	Área poblada
	Infraestructura
Otras tierras	Área sin cobertura vegetal
	Glaciar

Fuente: Ministerio del Ambiente (2012)

Utilizando el nivel superior de clasificación se obtuvo 6 clases de usos de suelo (Nivel I),

Según Karimí *et al*. (2017) un relleno sanitario no debe ubicarse en áreas destinadas a la agricultura, los bosques, los buenos pastos, las áreas urbanas y los cuerpos de agua, mientras que considera como lugares ideales a las áreas de pastos pobres y tierras desnudas. Por otro lado, Cobos *et al*. (2017) consideran que las áreas de cultivos y pastizales también pueden considerarse opciones posibles para instalar el relleno sanitario.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, en este estudio se consideró que la clase de bosque, cuerpo de agua, zona antrópica y otras tierras (depósitos de arena) no pueden ser utilizadas para instalar un relleno sanitario, por eso se les asignó un valor de idoneidad de 9 puntos, la clase tierras agropecuarias con una valoración de 5 puntos y la clase de vegetación arbustiva y herbácea con un valor de 1 como la mejor opción para la decisión final.

Obteniendo como resultado (Figura 9) que el 59,7% del área de estudio representa la peor opción posible reduciendo así la disponibilidad del área a considerarse optima obteniendo solamente el 3,6% de área, sin embargo, a esta de le puede sumar el porcentaje de 12,5% obtenido del valor de idoneidad de 5 puntos.

4.2.2.9. Precipitación

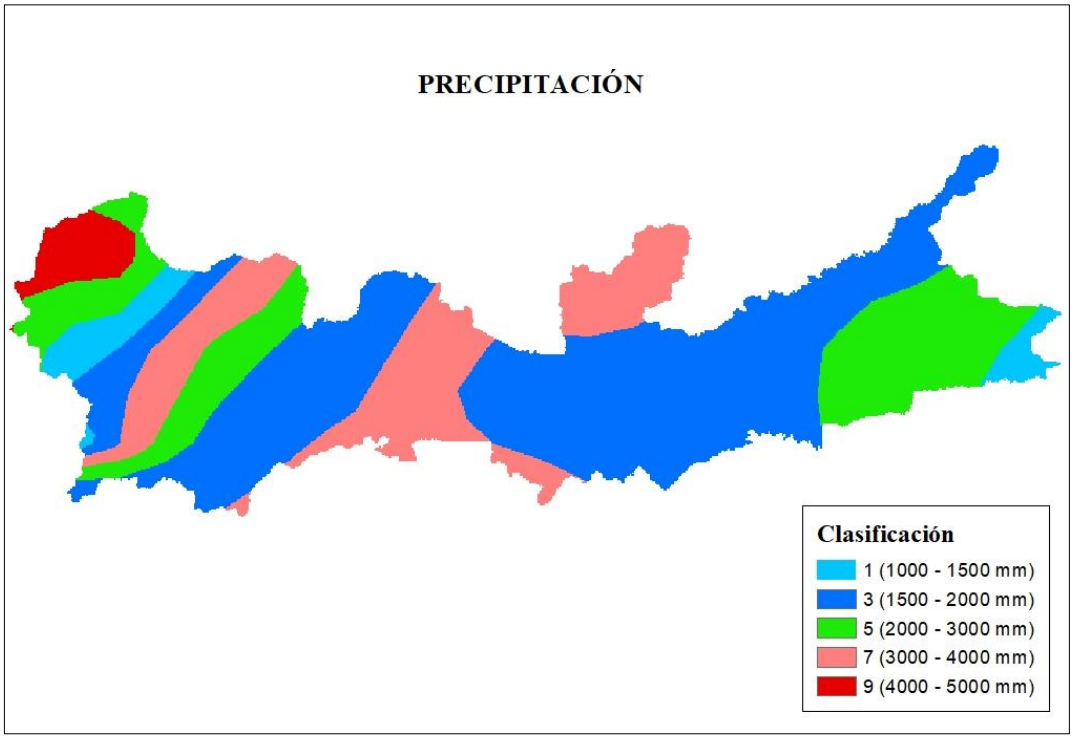


Figura 10. Capa de precipitación
Fuente: Elaboración propia

La precipitación es un criterio que no está establecido en la normativa ambiental, pero se considera importante ya que las zonas con precipitación alta son inadecuadas para establecer un relleno sanitario ya que a mayor precipitación mayor será la generación de lixiviados y su infiltración (Cobos *et al*., 2017). A su vez se aumenta el riesgo de contaminar las aguas superficiales y subterráneas por lo que para impedir dicha contaminación se deberá construir sistemas de drenaje eficientes, generando un gran impacto en los costos de construcción del relleno (Demesouka *et al*., 2014). Por ese motivo Cobos *et al*. (2017) consideran que las áreas con una precipitación de 0 a 999 mm son las más adecuadas y hasta 2499 mm se consideran áreas aceptables. Sin embargo, en el cantón Tena la precipitación oscila entre los 1000 mm hasta los 5000 mm (GADM de Tena, 2014), es por eso que para este estudio se les asignó un valor de idoneidad de 1 para aquellas áreas donde la precipitación sea de 1000mm a 1500mm representando la mejor opción para instalar el relleno sanitario, mientras la

precipitación aumenta la idoneidad también lo hace. Obteniendo como resultado (Figura 10) que el 4,7% del área de estudio representa la mejor opción posible, un porcentaje pequeño, pero si a este se le suma el 50% y 21,1% del área que representan una idoneidad de 3 y 5 respectivamente, aumentaría la posibilidad de encontrar un área aceptable para instalar el relleno sanitario. La idoneidad de 7 puntos obtuvo un 20,6% y el valor de 9 un porcentaje de 3,5%.

4.2.2.10. Profundidad del nivel freático

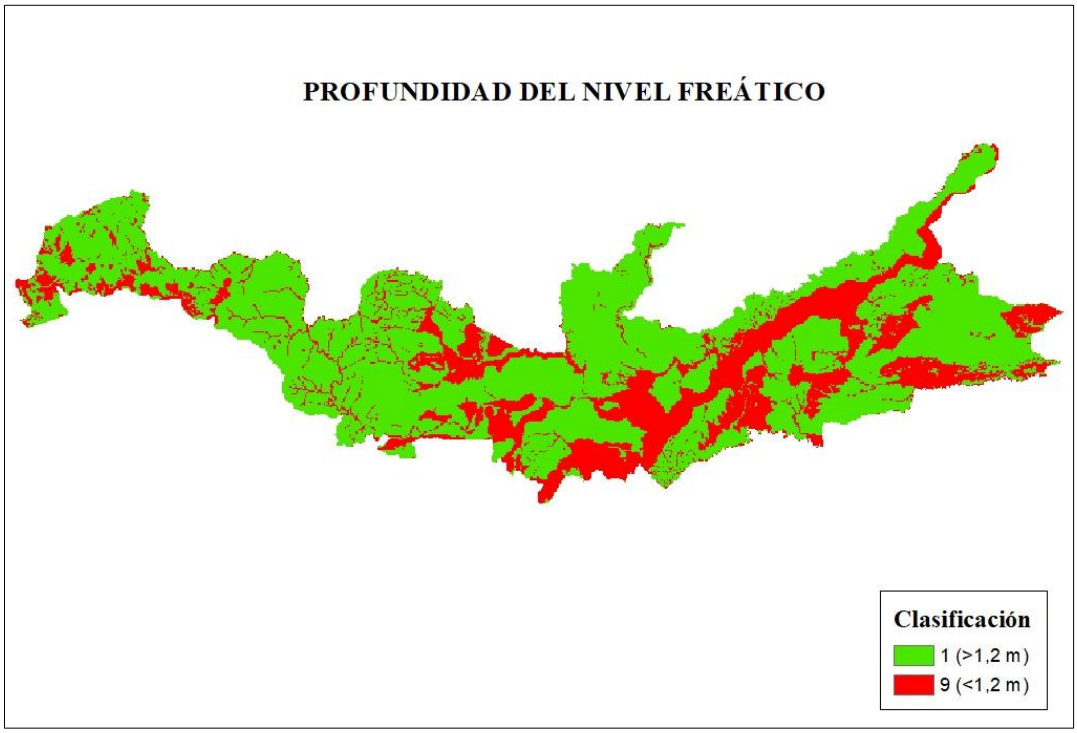


Figura 11. Capa de profundidad del nivel freático
Fuente: Elaboración propia

El nivel freático es un criterio que no está establecido en el libro VI anexo 6 del TULSMA (MAE, 2015), sin embargo, Barakat *et al*. (2017) consideran que la profundidad del nivel freático es un criterio muy importante para evitar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas a través de la infiltración de lixiviados. Por otro lado, Rondón Toro *et al*. (2016) mencionan que este es un criterio importante para definir el método constructivo y la operación del relleno sanitario. Teniendo en cuenta que en este estudio se escogió el método constructivo combinado de zanja y área es necesario conocer a que distancia se encuentra el nivel freático, aunque para determinar el área se asumió una profundidad mínima de 3 metros. Según el shapefile obtenido por el GADM de Tena, el nivel freático se encuentra a profundidades mayores a los 1,2 metros y menores a 1,2 metros. Motivo por el cual en este

estudio se asignó un valor de idoneidad de 1 como mejor opción para aquellas áreas con una profundidad mayor a los 1,2 metros y 9 para las áreas menores a 1,2 metros. Obteniendo como resultado (Figura 11) que el 54% del área de estudio representa la mejor opción para instalar el relleno sanitario mientras que el porcentaje restante representa el área que no es adecuada. Sin embargo, una vez definido el lugar para el relleno sanitario será necesario realizar otros estudios complementarios a fin de garantizar que la profundidad que se asumió para determinar el área del relleno sea la adecuada.

4.2.3. Ponderación de los criterios utilizando el método de proceso analítico jerárquico

En este estudio la matriz de comparación por pares se construyó teniendo en cuenta la opinión de expertos y en base a la literatura relacionada a este tema (datos recopilados) (Tabla 10). No hay que olvidar que los criterios de la primera columna son los numeradores, mientras que los criterios de la primera fila son los denominadores.

Tabla 10. Matriz de comparación por pares

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Distancia al aeropuerto (C1)	1	1/7	1/7	1/9	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/9
Distancia a vías (C2)	7/1	1	3/1	1/2	3/1	3/1	5/1	5/1	7/1	1/3
Distancia a los asentamiento humanos (C3)	7/1	1/3	1	1/3	3/1	3/1	5/1	6/1	7/1	1/3
Distancia a recursos hídricos (C4)	9/1	2/1	3/1	1	9/1	8/1	2/1	9/1	9/1	1
Pendiente (C5)	3/1	1/3	1/3	1/9	1	1/3	1/3	1/3	1	1/3
Permeabilidad (C6)	3/1	1/3	1/3	1/8	3/1	1	1/3	1/2	3/1	1/2
Susceptibilidad de inundación (C7)	3/1	1/5	1/5	1/2	3/1	3/1	1	3/1	1	1/3
Uso de suelo (C8)	3/1	1/5	1/6	1/9	3/1	2/1	1/3	1	3/1	1/3
Precipitación (C9)	1	1/7	1/7	1/9	1	1/3	1	1/3	1	1/5
Profundidad del nivel freático (C10)	9/1	3/1	3/1	1	3/1	2/1	3/1	3/1	5/1	1
Suma	46,00	7,69	11,32	3,90	29,33	23,00	18,33	28,50	38,00	4,48

Fuente: Elaboración propia

Después de construir la matriz de comparación por pares, y siguiendo los pasos descritos en la metodología, se calculó la ponderación a partir de la matriz normalizada (Tabla 11).

Tabla 11. Matriz normalizada y ponderación

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Ponderación
Distancia al aeropuerto (C1)	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	1,88%
Distancia a vías (C2)	0,15	0,13	0,27	0,13	0,10	0,13	0,27	0,18	0,18	0,07	16,15%
Distancia a los asentamiento humanos (C3)	0,15	0,04	0,09	0,09	0,10	0,13	0,27	0,21	0,18	0,07	13,44%
Distancia a recursos hídricos (C4)	0,20	0,26	0,27	0,26	0,31	0,35	0,11	0,32	0,24	0,22	25,17%
Pendiente (C5)	0,07	0,04	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,07	3,46%
Permeabilidad (C6)	0,07	0,04	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	0,02	0,08	0,11	5,42%
Susceptibilidad de inundación (C7)	0,07	0,03	0,02	0,13	0,10	0,13	0,05	0,11	0,03	0,07	7,30%
Uso de suelo (C8)	0,07	0,03	0,01	0,03	0,10	0,09	0,02	0,04	0,08	0,07	5,30%
Precipitación (C9)	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,05	0,01	0,03	0,04	2,67%
Profundidad del nivel freático (C10)	0,20	0,39	0,27	0,26	0,10	0,09	0,16	0,11	0,13	0,22	19,20%

Fuente: Elaboración propia

Desde el enfoque del AHP los resultados de la comparación por pares utilizada para obtener prioridades entre los criterios, mostraron que: La distancia a los recursos hídricos es el criterio más importante con una ponderación de 25,17% debido a que es necesario que el relleno se ubique a una distancia no muy larga para poder descargar los lixiviados tratados, pero tampoco deben ubicarse muy cerca a fin de evitar la contaminación cuando existan precipitaciones o inundaciones.

El nivel freático también obtuvo una ponderación alta de 19,20% debido a que es necesario que el relleno se instale en áreas donde el nivel freático no se encuentre cerca de la superficie. Las distancias a las vías también es importante a fin de reducir los costos de transporte y el impacto ambiental (Cobos *et al*., 2017), es por eso que obtuvo una ponderación de 16,15%.

Debido a la importancia que el relleno sanitario se ubique a una distancia considerable de los asentamientos humanos, se consideró una ponderación de 13,44%.

La susceptibilidad de inundación es un criterio que obtuvo una ponderación de 7,3%, se consideró una ponderación un poco baja debido a que en este estudio se supuso a las zonas inundables como no aptas para instalar el relleno sanitario.

La permeabilidad presenta una ponderación baja de 5,42% debido a que si el relleno sanitario se ubica en un terreno que tenga una permeabilidad moderada se podrá utilizar sistemas de impermeabilización para evitar la infiltración de los, lixiviados tal como lo explica (Rondón Toro *et al.*, 2016; Cobos *et al*., 2017; Díaz & Vallejo, 2017; MAE, 2015). Considerando el criterio técnico de Cobos *et al*., (2017) quienes asignaron una valoración de importancia muy baja al uso de suelo en relación con los otros criterios, en este estudio se consideró una ponderación de ponderación de 5,3%.

Teniendo en cuenta que los alrededores de la zona urbana presentan pendientes desde el 2% al 25% (Figura 6) y que al criterio de los asentamientos se le asignó una valoración alta se consideró a la pendiente una ponderación baja de 3,46%.

Según el GADM de Tena (2014) la precipitación anual en el cantón es muy alta ya que esta oscila entre los 1000 – 5000 mm, teniendo valores bajos en las zonas cercanas a la cordillera de los andes, motivo por el cual se considera a este criterio una ponderación de 2,67%.

El aeropuerto Jumandy de Tena no funciona en su totalidad, debido a que la mayoría de las personas o turistas extranjeros prefieren trasladarse vía terrestre, en la actualidad las instalaciones del aeropuerto solo se utilizan como escuelas de aviación y aerotaxis (Medina, 2017). Adicional, el valor que establece la normativa ambiental respecto a la distancia de este criterio (13 km) es muy alta en relación con otros países (entre 1 y 3 km), por ese motivo obtuvo la ponderación más baja de 1,88%.

La siguiente etapa de la determinación de los pesos incluye el cálculo de CR.

Índice de consistencia

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{11}$$

$$\mathrm{CI} = \frac{11{,}3 - 10}{10 - 1}$$

$$\mathrm{CI} = 0{,}145$$

Índice de consistencia aleatoria

$$RI = \frac{1{,}98\ (n - 2)}{n} \tag{12}$$

$$\mathrm{RI} = \frac{1{,}98\ (10 - 2)}{10}$$

$$\mathrm{RI} = 1{,}584$$

Razón de consistencia

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{13}$$

$$\mathrm{CR} = \frac{0{,}145}{1{,}584}$$

$$\mathrm{CR} = 0{,}09$$

En este estudio, CR es de 0,09, que es menor a 0,1, es decir que la matriz es consistente y por lo tanto los pesos obtenidos pueden ser utilizados para el análisis.

4.2.4. Mapa de idoneidad

Utilizando la herramienta *Weighted Overlay* se combinaron las diversas capas generadas en ArcMap en formato raster y ponderadas por el AHP, para generar un mapa que muestre los sitios con diferentes niveles de idoneidad para instalar el relleno sanitario dentro del cantón Tena (Figura 12).

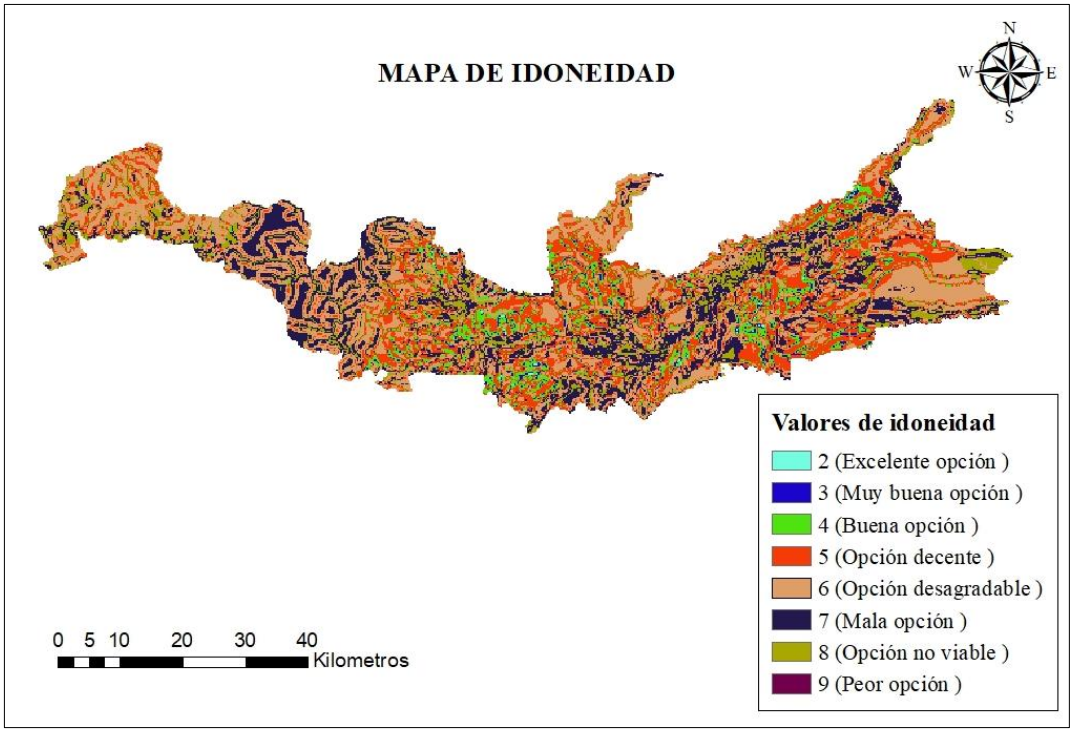


Figura 12. Mapa final de idoneidad para el relleno sanitario en el cantón Tena
Fuente: Elaboración propia

El Mapa de idoneidad final mostró que dentro del cantón Tena no existen sitios con una idoneidad de 1, no obstante, se distinguieron diferentes áreas apropiadas para el relleno sanitario (Figura 12). Como resultado el 47,41% del área de estudio no es adecuada, el 19,41% tiene una idoneidad moderada para la ubicación del relleno, de hecho, solo el 0, 09% del área es una excelente opción para instalar o construir el relleno sanitario. Esto demostró que, a pesar de la gran extensión del área de estudio, los sitios adecuados para el relleno sanitario siguen siendo limitados (Barakat *et al*., 2017).

Tabla 12. Ocupación territorial en relación con el valor de idoneidad

Idoneidad	Porcentaje de ocupación territorial	Área (ha)	Área (km^2)
2	0,09%	361,13	3,6
3	1,27%	4948,26	49,48
4	6,72%	26203,33	262,03
5	19,41%	75699,71	756,99
6	26,6%	103755	1037,55
7	15,12%	58933,55	589,34
8	5,61%	21888,86	218,89
9	0,08%	331,04	3,31

Fuente: Elaboración propia

En este estudio en vista de que no se obtuvieron sitios con un valor de idoneidad de 1, se consideró como posibles sitios para instalar el relleno sanitario aquellos con una idoneidad de 2 puntos.

4.2.5. Identificación de potenciales sitios para el relleno

Utilizando la herramienta *Calculate Geometry* se calculó el área en hectáreas (ha) de dichos sitios a fin de seleccionar aquellos que cumplan con el área minina requerida para el relleno (7 ha) durante toda su vida útil. Se seleccionaron un total de 13 posibles sitios, que se muestran en la Figura 13, obteniendo como resultado sitios con áreas entre 9,68 ha y 19,36 ha.

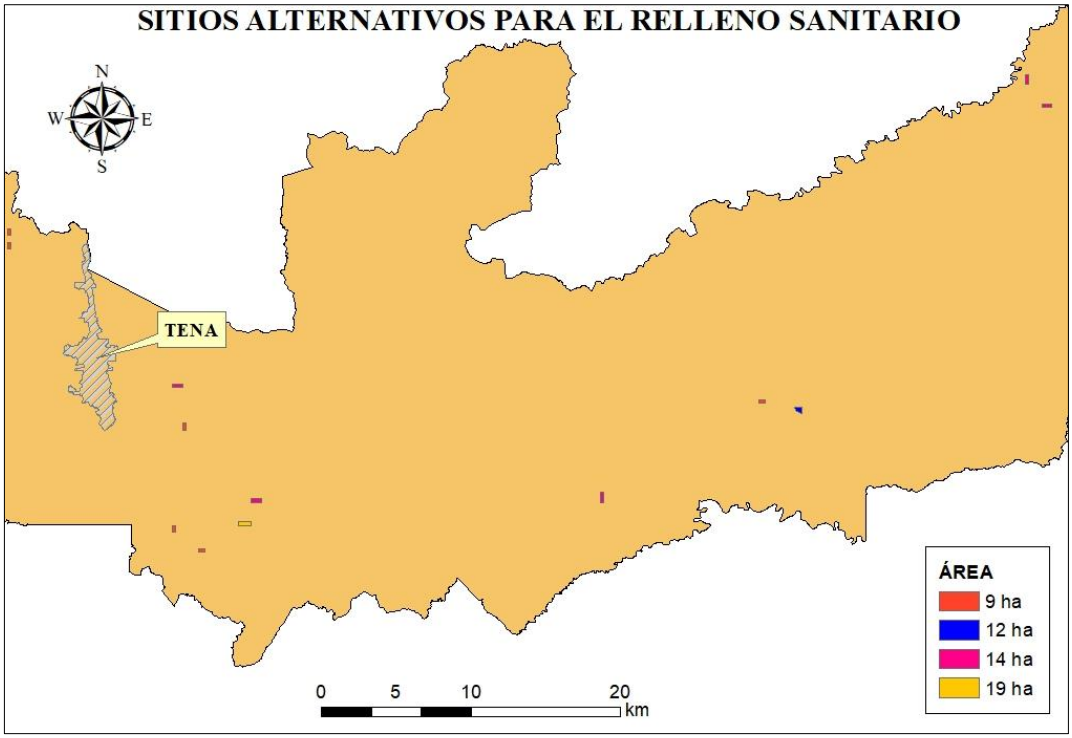


Figura 13. Sitos alternativos con idoneidad de 2 puntos para instalar el relleno sanitario en el cantón Tena
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se volvió a revisar los sitios antes mencionados y desde el punto de vista económico, social y ambiental, incluido las condiciones geográficas, climáticas y geofísicas solamente se recomiendan 6 como los posibles sitios para el relleno sanitario, tal como se muestra en la Figura 14. Los 6 sitios se seleccionaron como los más adecuados debido a su cercanía a las vías de acceso, distancia adecuada a la zona urbana, a los recursos hídricos, profundidad adecuada al nivel freático, baja pendiente y permeabilidad. A continuación, se presenta algunas características de los sitios recomendados:

Los sitios Nº 1, 2 y 4 cuentan con una superficie de alrededor de 9 ha, mientras que los sitios Nº 3 y 5 tienen una superficie de alrededor de 14 ha y el sitio Nº 6 una superficie de 19,36 ha, áreas suficientemente grandes para el relleno aumentando así su vida útil.

Los sitios Nº 1 y 2 se encuentran ubicado en la parroquia Muyuna, el uso de suelo para los dos sitios es de tierra agropecuaria, con precipitaciones de 3000 a 4000 mm anuales. Los sitios Nº 3, 4, 5 y 6 están ubicados en la parroquia Puerto Napo, con una precipitación de 1500 a 2000 mm anuales, el uso de suelo para los sitios Nº 3, 5 y 6 es una combinación de bosque y tierra agropecuaria mientras que el sitio Nº 4 es tierra agropecuaria y vegetación arbustiva y herbácea. La pendiente en el sitio Nº 1 es de 2 al 12% y para los sitios Nº 2, 3,4,

5 y 6 una pendiente de 12 al 25%. En la permeabilidad los sitios Nº 1, 3 y 4 son prácticamente impermeables ya que presentan una velocidad de infiltración muy lenta, los sitios Nº 2, 5 y 7 con permeabilidad lenta y el sitio Nº 6 una permeabilidad moderadamente lenta, como ya se mencionó anteriormente la permeabilidad no es un limitante debido a que en la actualidad existes sistemas que impiden la infiltración de los lixiviados.

Los 7 sitios restantes de descartaron por que se encontraban en las parroquias Puerto Misahualli, Ahuano y Chontapunta, es decir que se encontraban muy lejos de la zona urbana y según el estudio realizado por el GADM de Tena, la zona urbana genera más residuos que la zona rural (De la Torre, 2013), es por ese motivo que el relleno no debe ubicarse muy lejos. Otro criterio que se tomó en cuenta para descartar estos sitios fue la pendiente ya que estos presentaban pendientes mayores al 25%, También se consideró al uso de suelo, los 7 sitios se encontraban dentro de Bosques que bien pueden ser una plantación forestal o un bosque nativo.

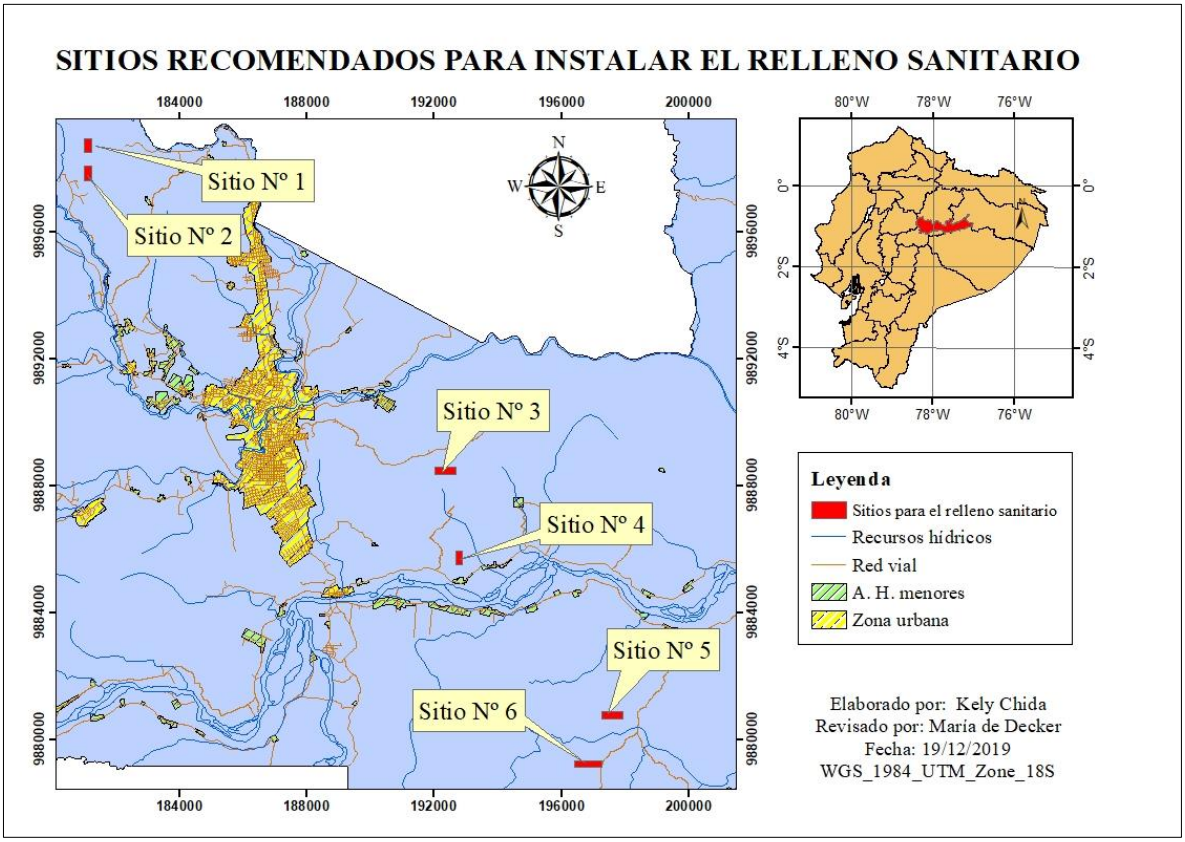


Figura 14. Sitos recomendados para el relleno sanitario en el cantón Tena
Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El área requerida para el nuevo relleno sanitario se calculó teniendo en cuenta la tasa de crecimiento poblacional y el crecimiento anual de la ppc en la zona urbana y rural, también se asumió una densidad de compactación de 600 kg/m^3 y una altura o profundidad de 10 metros, obteniendo como resultado que el relleno sanitario requiere de una superficie mínima de 7 ha, sin embargo dicho valor puede variar dependiendo de los valores de profundidad del nivel freático ya que se desconoce el valor exacto de todo el cantón. Otro factor que puede alterar el área del relleno es la densidad ya que mientras mejor sea la maquinaria de compactación mejor será la densidad de compactación.

En este estudio se evaluaron 10 criterios para buscar sitios potenciales para el relleno sanitario: Distancia al aeropuerto, distancia a vías (incluye las avenidas, calles y pasajes de tipo urbano y rural asfaltadas, lastradas o adoquinadas), distancia a los asentamientos humanos (incluye la zona urbana y los asentamientos menores), distancia a los recursos hídricos (incluye los ríos, lagunas y riachuelos), pendiente, permeabilidad, susceptibilidad de inundación, uso de suelo, la precipitación y la profundidad del nivel freático, mismos que se los estandarizaron utilizando una escala de 1 al 9 siendo 1 la mejor opción y 9 la peor opción.

Para la ponderación de los criterios se aplicó el método de análisis multicriterio AHP, construyendo una matriz de comparación por pares teniendo en cuenta la importancia relativa de cada criterio y para comprobar la consistencia de la matriz se evaluó la razón de consistencia misma que tuvo un valor de 0,09 el cual se consideró aceptable para ejecutar el análisis. Los criterios que obtuvieron una ponderación alta fueron: distancia a los recursos hídricos, profundidad del nivel freático, distancia a vías y distancia a los asentamientos humanos.

Para crear las capas temáticas de cada criterio se utilizó el programa ArcMap 10.5, y con la ayuda de la herramienta *Weighted Overlay* se generó un mapa de idoneidad para el

relleno, obteniendo como resultado que de toda el área de estudio solamente el 0,09% del área representa una excelente opción para instalar el relleno sanitario.

Dentro del cantón Tena no se encontró sitios que representen la mejor opción para el relleno sanitario, es por ello que se seleccionaron como posibles sitios los que presentaban una idoneidad de 2 puntos. Teniendo en cuenta el área requería para el relleno se seleccionaron 13 sitios y desde el punto de vista económico, social, ambiental, incluido las condiciones o características geográficas, climáticas y geofísicas, solamente se recomendaron 6 sitios, 2 de ellos se ubican en la parroquia Muyuna y los 4 restantes en la parroquia Puerto Napo.

La metodología aplicada en este estudio resultó ser la adecuada para cumplir con los objetivos planteados, ya que permitió tomar decisiones en base al mapa de idoneidad con todos los valores de estandarización, para seleccionar sitios más óptimos de disposición final de residuos. Entre otros beneficios, esta metodología permite ahorrar tiempo y costos de ejecución.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda que los resultados generados en el presente estudio puedan ser considerados por la municipalidad de Tena a fin de mejorar la planificación del sitio para el nuevo relleno sanitario ya que el antiguo relleno presenta riesgos ambientales y considerando que la vida útil está por finalizar.

Antes de definir el sitio final para el relleno, se recomienda realizar algunos estudios adicionales a los sitios recomendados a fin de evitar conflictos sociales y riesgos de contaminación. Especialmente estudios de campo tales como estudios geológicos, geomorfológicos, edafológicos, hidrológicos, etc.

Si se desea mejorar el análisis, se recomienda incluir criterios de dirección de viento o datos sobre las aguas subterráneas, en este estudio no se incluyeron debido a que no se consiguió dicha información.

CAPITULO VI

6. BIBLIOGRAFÍA

Aksoy, E., & San, B. T. (2019). Geographical information systems (GIS) and multi-criteria decision analysis (MCDA) integration for sustainable landfill site selection considering dynamic data source. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *78*(2), 779-791. doi: https://doi.org/10.1007/s10064-017-1135-z

Al-Anbari, M., Thameer, M., & Al-Ansari, N. (2018). Landfill Site Selection by Weighted Overlay Technique: Case Study of Al-Kufa, Iraq. *Sustainability*, *10*(4), 999. doi: https://doi.org/10.3390/su10040999

Antao, M. (2015). *The Use Of Analytical Hierarchy Process In Spatial Decision Support System For Land Use Management.* (Master of Science in Geospatial Technologies), Universidad Nova de Lisboa, Portugal. Recuperado de https://run.unl.pt/handle/10362/14547

Anzar, B. J., & Guijarro, M. F. (2012). *Nuevos métodos de valoración: Modelos multicriterio.* Valencia, España: Editorial Universidad politécnica de Valencia.

Asociación de Municipios del Ecuador (AME) & Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2017). *Gestión de Residuos Sólidos: GAD Municipales 2017*. Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-2017-gad/

Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2018). Antecedentes, limitaciones, barreras y problemática del manejo de los residuos en la región. En V. Ojeda. (Ed.), *Gestión integral de residuos sólidos urbanos* (pp. 2-12). Recuperado de http://www.aidisnet.org/libros/

Barakat, A., Hilali, A., El Baghdadi, M., & Touhami, F. (2017). Landfill site selection with GIS-based multi-criteria evaluation technique. A case study in Béni Mellal-Khouribga Region, Morocco. *Environmental earth sciences*, *76*(12), 413. doi: https://doi.org/10.1007/s12665-017-6757-8

Boroushaki, S., & Malczewski, J. (2010). ParticipatoryGiS: A Web-based Collaborative GIS and Multicriteria Decision Analysis. *Journal of the Urban & Regional Information Systems Association*, *22*(1), 23-32.

Bosompem, C., Stemn, E., & Fei-Baffoe, B. (2016). Multi-criteria GIS-based siting of transfer station for municipal solid waste: The case of Kumasi Metropolitan Area, Ghana. *Waste Management & Research*, *34*(10), 1054-1063. doi: https://doi.org/10.1177/0734242X16658363

Cárdenas, M. P. R., Robles, M. F., Colomer, M. F. J., & Piña, G. A. B. (2016). Herramientas para la evaluación de riesgos sobre el ambiente y la salud, por la disposición final de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *32*, 47-62. doi:10.20937/RICA 2016.32.05.04

Cooperativa de asistencia y socorro en todas partes (CARE) & Avina. (2012). Programa Unificado de Fortalecimiento de Capacidades. Módulo 9 Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS). Ecuador, enero de 2012

Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Ediciones Díaz de Santos.

Cobos, S., Solano, J., Vera, A., & Monge, J. (2017). EJE 02-02 Análisis multicriterio basado en GIS para identificar potenciales áreas de emplazamiento de un relleno sanitario mancomunado en la provincia del Azuay. *Memorias Universidad Del Azuay*, *1*(16), 51 - 62. Recuperado de http://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/48

Consejo Nacional de Competencias. (2019). *Informe sobre mapeo de actores generadores de información a nivel territorial e identificación de fuentes de información de la competencia de desechos sólidos: dirección de monitoreo y evaluación a GAD.* Recuperado de http://www.competencias.gob.ec/wpcontent/uploads/2019/07/Manejo-desechos-solidos.pdf

De la Torre, F. (2013). *Estudio de impacto ambiental del relleno sanitario del cantón Tena. LCC-MAE- 003 – 2013*. Recuperado de https://maenapo.files.wordpress.com/2015/03/esia-gestion-de-residuos1.pdf

Demesouka, O. E., Anagnostopoulos, K. P., & Siskos, E. (2019). Spatial multicriteria decision support for robust land-use suitability: The case of landfill site selection in Northeastern Greece. *European Journal of Operational Research, 272*(2), 574-586. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.005

Demesouka, O. E., Vavatsikos, A. P., & Anagnostopoulos, K. P. (2014). GIS-based multicriteria municipal solid waste landfill suitability analysis: A review of the methodologies performed and criteria implemented. *Waste Management & Research, 32*(4), 270-296. doi: https://doi.org/10.1177/0734242X14526632

Díaz, B. L. Y., & Vallejo, V. A. C. (2017). *Propuesta para el diseño del nuevo relleno sanitario para el municipio de Aguachica – Cesar* (tesis de pregrado). Universidad católica de Colombia. Bogotá, Colombia.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) & Unidad de Aeródromos y Ayudas Terrestres (AGA). (2018). *Programa nacional de gestión del peligro aviario y fauna en aeropuertos de Bolivia*. Recuperado de https://www.dgac.gob.bo/wp-content/uploads/2018/11/PROGRAMA_NACIONAL_PPF_DGAC.pdf

Djokanović, S., Abolmasov, B., & Jevremović, D. (2016). GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo, Serbia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *75*(3), 1273-1299. doi: 10.1007/s10064-016-0888-0

Domínguez, J. (2000). *Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG).* Informes Técnicos Ciemat. Nº 943 ,1-30.

El Maguiri, A., Kissi, B., Idrissi, L., & Souabi, S. (2016). Landfill site selection using GIS, remote sensing and multicriteria decision analysis: case of the city of Mohammedia, Morocco. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75*(3), 1301-1309. doi: https://doi.org/10.1007/s10064-016-0889-z

Eskandari, M., Homaee, M., & Falamaki, A. (2016). Landfill site selection for municipal solid wastes in mountainous areas with landslide susceptibility. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(12), 12423-12434. doi: https://doi.org/10.1007/s11356-016-6459-x

García, J. (2014). *La historia de la basura ¿Hemos cambiado?* Recuperado de https://www.cienciahistorica.com/2014/09/25/la-historia-de-la-basura-hemos-cambiado/

Giménez, M., & Cardozo, C. (2012). Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG) en el área metropolitana del Alto Paraná. *Actas 7mo Congreso de Medio Ambiente AUGM*. La Plata, Argentina. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26832

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Tena. (2014). Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial: Diagnóstico. Recuperado de https://tena.gob.ec/index.php/tena/plan-de-desarrollo

González, M., & Minga, F. (2010). *Definición de sitios para el tratamiento y disposición final de residuos sólidos en cinco parroquias rurales del cantón Loja, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG)* (tesis de pregrado). Universidad nacional de Loja, Loja, Ecuador. Recuperado de https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/5711

González, P. C. (2017). *Análisis medioambiental para la localización de un relleno sanitario en la Región Metropolitana de Santiago, Chile* (tesis de pregrado), Universidad Academia de Humanismo Cristiano. Chile.

Gorsevski, P. V., Donevska, K. R., Mitrovski, C. D., & Frizado, J. P. (2012). Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: a case study using ordered weighted average. *Waste management*, *32*(2), 287-296. doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.023

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). *Resultados del censo 2010 de población y viviendo en el Ecuador: Fascículo provincial de Napo.* Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/

Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios Manuales*. Universidad de Antioquia, Colombia. Recuperado de https://issuu.com/gonzaloviteri/docs/guia_construccion_relleno_sanitarios

Kabite, G., Suryabhagavan, K. V., Argaw, M., & Sulaiman, H. (2012). GIS-based solid waste landfill site selection in addis ababa, Ethiopia. *International journal of Ecology and environmental sciences*, *38*(2-3), 59-72.

Kapilan, S., & Elangovan, K. (2018). Potential landfill site selection for solid waste disposal using GIS and multi-criteria decision analysis (MCDA). *Journal of Central South University*, *25*(3), 570-585. doi: https://doi.org/10.1007/s11771-018-3762-3

Karimi, H., Amiri, S., Huang, J., & Karimi, A. (2019). Integrating GIS and multi-criteria decision analysis for landfill site selection, case study: Javanrood County in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(11), 7305-7318. doi: https://doi.org/10.1007/s13762-018-2151-7

Khan, D., & Samadder, S. R. (2015). A simplified multi-criteria evaluation model for landfill site ranking and selection based on AHP and GIS. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, *23*(4), 267-278. doi: https://doi.org/10.3846/16486897.2015.1056741

Kubes, N. M. E. (2019). *Análisis Multicriterio basado en SIG para identificar potenciales áreas para establecer un relleno sanitario en el cantón Rumiñahui de la provincia Pichincha, Ecuador* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.

Medina, A. (31 de marzo de 2017). Aeropuerto de Tena movió 1 530 pasajeros en el 2016. *El comercio.* Recuperado de https://www.elcomercio.com/actualidad/aeropuerto-jumandy-tena-cancelacion-vuelos.html

Mena, F. C., Morales, H. Y., Ormazábal, R. Y., & Gajardo, V. J. (2010). Localización de un relleno sanitario en la comuna de Parral, Chile, a través de evaluación multicriterio. *Interciencia*, *35*(9), 684-689. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=339/33914212009

Merat, C. (2015). *Desarrollo de un manual de construcción de un relleno sanitario piloto de residuos sólidos urbanos con sistemas naturales de alta velocidad* (Tesis de pregrado). Escuela politécnica superior de Sevilla. Andalucía, España.

Microsoft. (2017). *MMULT (Función MMULT).* Recuperado de https://support.office.com/es-es/article/MMULT-funci%C3%B3n-MMULT40593ed7-a3cd-4b6b-b9a3-e4ad3c7245eb

Ministerio del Ambiente. (2012). *Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, Quito-Ecuador*. Recuperado de http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/Folleto%20mapa-parte1.pdf

Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial No. 061: Reforma al Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. *Registro Oficial Suplemento* Nº 316. Quito, Ecuador.

Ministerio del Ambiente. (2017). Código Orgánico Ambiental. *Registro Oficial Suplemento* Nº 983. Quito, Ecuador.

Molina, C. W. B. (2018). *Análisis de ubicaciones de un nuevo relleno sanitario en la ciudad de Loja, Ecuador* (Tesis de maestría). Recuperado de https://issuu.com/unigis_latina/docs/tesis_molina3

Nascimento, V. F., & Silva, A. M. da. (2014). Identifying problems for choosing suitable areas for installation of a new landfill through GIS technology: A case study. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *64*(1), 80-88. doi: https://doi.org/10.1080/10962247.2013.833558

Olaya, V. (2011). *Sistemas de información geográfica*. España. Recuperado de https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Palacios, I. (2018). Evaluación multicriterio para la ubicación de un relleno sanitario en la ciudad de Macas, a través de la ponderación de sus variables con el proceso analítico jerárquico, AHP. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa, 3*(3), 83-94.

Patiño, R. H. R., León, G. A. L., & Ávila, A. M. A. (2016). Análisis de idoneidad del suelo para construcción de colegios públicos integrando SIG y PAJ en el área urbana de

Bogotá. *Redes de Ingeniería*, *7*, 16-24. Recuperado de https://go.galegroup.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA566262036&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=2248762X&p=IFME&sw=w

Peña, J. (2010). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio.* Editorial Club Universitario.

Pimenta, L. B., Beltrão, N. E. S., Gemaque, A. M. D. S., & Tavares, P. A. (2019). Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações (Campo Grande)*, *20*(2), 407-420.

Posada, H. (2015). *Evaluación multicriterio y SIG., como herramientas para la gestión territorial: Caso de estudio ubicación del terminal de transporte en Zipaquirá Cundinamarca* (Trabajo de grado como requisito para optar al título de: Especialista en Gestión Territorial y Avalúos). Universidad Santo Tomás, Bogotá. Recuperado de http://repository.usta.edu.co/handle/11634/2270

Pucha, C. F., Fries, A., Cánovas, G. F., Oñate, V. F., González, J. V., & Pucha, C. D. (2017). *Fundamentos de SIG: Aplicaciones con ArcGIS*. Franz Pucha Cofrep. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/318447525

Quiroz, Y. (2010). Los SIG como herramienta para la toma de decisiones en la solución de problemas ambientales y dentro de la formación profesional en ciencias ambientales. *Temas de Ciencia y Tecnología*, *14*(41), 33-40.

Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, J. F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Naciones Unidas, CEPAL. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation.* New York, London: McGraw-Hill International Book Company

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, *1*(1), 83-98.

Sáez, A., & Urdaneta J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia, 20*(3), pp. 121 – 135. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=737/73737091009

Sastre., O. P. (2010). *Sistemas de información geográfica (SIG) técnicas básicas para estudios de biodiversidad.* Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de http://librosysolucionarios.net/sistemas-de-informacion-geografica-sig-tecnicas-basicas-para-estudios-de-biodiversidad-pablo-sastre-olmos/

Sbarato, R. D. (2009). *Aspectos Generales de la Problemática de los Residuos Sólidos Urbanos.* Córdoba, Argentina: Encuentro Grupo Editor.

Secretaria del Ambiente (SEAM) (2004). Resolución Nº 282, para la cual se implementa los criterios para la selección de áreas para disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios. Paraguay.

Sener B (2004) *Landfill site selection by using Geography Information System* (Master's Dissertation). Middle East Technical University

Sistema Nacional de Información (2017). *Proyecciones referenciales de población a nivel cantonal por grupos de edad 2010-2020.* Recuperado de http://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (2006). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Washington, DC., United States of America: s.n.

Soto, D. D. E., Marín, M. M. I., & Vargas, F. A. (2014). Caracterización de formatos de almacenamiento, transporte y visualización de datos geográficos. *Lámpsakos*, (12), 23-33. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4996729

Sureshkumar, M., Sivakumar, R., & Nagarajan, M. (2017). Selection of alternative landfill site in Kanchipuram, India by using GIS and multicriteria decision analysis. *Applied Ecology and Environmental Research*, *15*(1), 627-636.

Tejada, P. J. (2018). *Modelo de localización óptima para relleno sanitario en el municipio de Villagarzón* (Tesis de maestría). Recuperado de https://issuu.com/unigis_latina/docs/rejada

Tüdeş, Ş., & Kumlu, K. B. Y. (2017). Solid Waste Landfill Site Selection in the Sense of Environment Sensitive Sustainable Urbanization: Izmir, Turkey Case. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *245*(8). IOP Publishing. doi: https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082063

Vučijak, B., Kurtagić, S. M., & Silajdžić, I. (2016). Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina. *Journal of Cleaner Production*, *130*, 166-174. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.030

Yıldırım, Ü., & Güler, C. (2016). Identification of suitable future municipal solid waste disposal sites for the Metropolitan Mersin (SE Turkey) using AHP and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, *75*(2), 101.

Yılmaz, A., & Atmaca, E. (2006). Environmental geological assessment of a solid waste disposal site: a case study in Sivas, Turkey. *Environmental Geology*, *50*(5), 677-689. doi: https://doi.org/10.1007/s00254-006-0241-1

ANEXO

Anexo 1. Porcentaje territorial según los valores de idoneidad del criterio

Criterio	Idoneidad	Porcentaje
Distancia al aeropuerto	1	85,91%
	9	14,09%
Distancia a vías	1	5%
	2	4,50%
	3	3,90%
	4	3,30%
	5	2,80%
	6	2,50%
	7	2,10%
	9	75,90%
Distancia a los asentamientos humanos	1	2,70%
	2	5,90%
	5	9,10%
	7	7,50%
	8	9,40%
	9	65,40%
Distancia a recursos hídricos	1	6,90%
	5	13,50%
	6	8,70%
	7	18,30%
	9	52,60%
Pendiente	1	19,06%
	5	28,83%
	9	27,88%
Permeabilidad	1	18,59%
	2	12,02%
	4	20,89%
	5	2,46%

	8	0,88%
	9	20,92%
Susceptibilidad de inundación	1	86,00%
	9	14,00%
Uso de suelo	1	3,60%
	5	12,50%
	9	59,70%
Precipitación	1	4,70%
	3	50%
	5	21,10%
	7	20,60%
	9	3,50%
Profundidad del nivel freático	1	54,06%
	9	21,71%

Fuente: Elaboración propia