

ARTÍCULO ORIGINAL



Evaluación espacial multicriterio para la ubicación de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos

*Multi-Criteria Space Evaluation for the Location
of an Urban Solid Waste Treatment Plant*



Raúl González-Lozano

rglozano@vcl.geocuba.cu • <https://orcid.org/0000-0003-3919-2946>

EMPRESA DE SERVICIOS GEODÉSICOS Y AMBIENTALES, GEOCUBA, CUBA

Recibido: 2020-04-01 • Aceptado: 2020-04-27

RESUMEN

La localización de instalaciones no deseables deviene como un tema controvertido en las sociedades modernas. En la actualidad se han instaurados principios denominados de justicia y equidad social que pretenden establecer pautas para el desarrollo de procesos de localización de entidades con externalidades negativas. Entre este tipo de instalaciones se encuentran las Plantas de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos, estructuras que aunque útiles generan un rechazo por parte de la Sociedad. El presente trabajo persigue como objetivo la selección de un espacio geográfico óptimo para la ubicación de una PTRSU atendiendo a una serie de criterios resultantes de la investigación sobre el tema. Para ello se emplea la Evaluación Espacial Multicriterio en la conjugación de los factores integrantes del análisis general. Como resultado de la investigación se seleccionan tres áreas que cumplen con los criterios espaciales establecidos y presentan condiciones de idoneidad para el emplazamiento de una Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos dando cumplimiento al objetivo planteado.

PALABRAS CLAVE: evaluación espacial multicriterio; planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos; proceso analítico jerárquico.



ABSTRACT

The location of undesirable facilities becomes a controversial issue in modern societies. Currently, there are established principles of justice and social equity that aim to establish guidelines for the development of processes for locating entities with negative externalities. Among this type of facilities are the Urban Solid Waste Treatment Plants, structures that although useful generate a rejection by society. The present work pursues the objective of selecting an optimal geographical space for the location of a Solid Urban Waste Treatment plant, based on a series of criteria resulting from research on the subject. To do this, Multicriteria Spatial Evaluation is used in the conjugation and the integrating factors of the general analysis. As a result of the research, three areas are selected that meet the established spatial criteria and present suitability conditions for the location of a Solid Urban Waste Treatment Plant, in compliance with the proposed objective.

KEYWORDS: *hierarchical analytical process; multicriteria spatial evaluation; solid urban waste treatment plant.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más acuciantes que sufre hoy el medio ambiente, resultado directo de la propia evolución de la actual Sociedad de consumo, es la producción de los residuos. Las actividades que el hombre realiza son de muy diversa índole y en función de las mismas se generan distintos tipos de residuos de diferente composición, estado o peligrosidad. De acuerdo con estas características, el tratamiento, gestión y almacenamiento de los distintos residuos varían, dando lugar a la necesidad de crear toda una serie de infraestructuras y mecanismos de gestión con el fin de evitar cualquier deterioro ambiental.

De acuerdo con (Minambiente, 2002 cit. en Urbano, 2019) se define la Gestión Integral de Residuos Sólidos como el conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista ambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento, posibilidades de recuperación, aprovechamiento, comercialización y disposición final. Como parte de la última etapa de este conjunto de operaciones se establece, como aspecto esencial, la selección de un sitio para la disposición final de los residuos. Un empleo eficiente de los residuos sólidos urbanos, durante la etapa de disposición final, se logra mediante la construcción de una Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos (PTRSU), sin embargo, esta debe cumplir como condición necesaria, desde el punto de vista geográfico, la correcta ubicación espacial.

El objetivo principal del proceso de selección de un sitio para emplazar una PTRSU es la identificación de áreas que minimicen los impactos negativos del proyecto en el medio natural inmediato y en la salud humana (Mohammed, Majid, Yusof y Yamusa, 2017), por lo que la localización en el territorio de las instalaciones para estas funciones, es un problema de gran importancia práctica y de fuerte contenido geográfico (Bosque-Sendra, Delgado y Espinosa, 1999). Esto supone que el éxito de la implantación de un sistema de tratamiento para los residuos sólidos urbanos dependa fundamentalmente de que se elija el más adecuado, que el lugar de ubicación del mismo sea el mejor posible y que las operaciones de control ambiental se realicen todas correctamente (Campos, s.f.).

En la literatura consultada se observa una serie de antecedentes internacionales que implementan soluciones diversas para enfrentar el problema de localizar un sitio óptimo para la disposición final de desechos peligrosos. Las soluciones más empleadas se orientan hacia el empleo de la combinación de metodologías de Evaluación Espacial Multicriterio (EEMC) y las bondades de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Ariola, 2019; Castellanos, 2018; Chabuk, Al-Ansari, Hussain, Knutsson, Push y Laude, 2017; Chabuk, Al-Ansari, Hussain, Knutsson y Pusch, 2016; Ding, Zhu, Wu, Fu y Liu, 2018; Durán y González, 2019; Pingus, 2017; Randazzo, Cusumano, Renda, Perricone, Oliveri, Zarccone y Stefano, 2018; Urbano, 2019). Según (Rodríguez-Hernández, 2013), la evaluación espacial multicriterio es un proceso donde datos geográficos son combinados y transformados en una decisión; es mucho más difícil que la evaluación multicriterio convencional, pues un gran número de factores necesitan ser identificados y considerados con una alta correlación entre los mismos. Esta tecnología proporciona un marco para gestionar y analizar objetivos contradictorios en diferentes tipos de problemas de análisis espacial, por ejemplo, planificación y desarrollo urbano, contaminación ambiental, recursos naturales y forestales (Imtiaz, *et al.*, 2013 cit. en Mohammed, *et al.*, 2017). Análisis más profundos de los antecedentes que argumentan la viabilidad del uso de SIG y EEMC para la ubicación de sitios de disposición final de desechos peligrosos se observan en trabajos de revisión, por ejemplo (Aburas, Abdullah, Ramli y Ash'aari, 2015; Mohammed, *et al.*, 2017).

Cuba, como país en vías de desarrollo, no está exenta del problema causado por el exceso en la generación de residuos sólidos urbanos. En la bibliografía consultada se observan trabajos previos orientados al estudio de los residuos sólidos urbanos desde diferentes aristas que evidencian la existencia de esta problemática y su agravamiento en los últimos años en Cuba (Cárdenas-Ferrer, Santos-Herrero, Contreras-Moya, Rosa-Domínguez y Domínguez-Núñez, 2019; Cruz, 2018; Fleites, 2018; Reynaldo, Igarza y Fernández, 2019; Rodríguez, 2018). Por esta razón actualmente se desarrolla una política para la implantación de varias PTRSU en diversos territorios de la Nación que contribuyan a dar una salida eficiente a un problema de tal naturaleza. Dentro de este proceso, es menester la correcta selección de sitios para la construcción de las plantas, de tal forma que se minimicen los impactos al medio ambiente y al hombre. Una de las regiones preseleccionadas como candidatas para la construcción de una PTRSU, por las condiciones físico-químicas de sus residuos, así como por las características

de la generación de los mismos entre su población, es el municipio de Santa Clara, en la provincia Villa Clara (Cruz, 2018).

Para la ejecución de las operaciones espaciales necesarias durante el análisis para la ubicación de la PTRSU en la ciudad de Santa Clara, y como parte de la metodología de trabajo desarrollada, se construyó una base de datos geoespacial con dos grupos bien diferenciados de datos. Estos son: los datos fundamentales, que se obtienen a partir de los mapas topográficos digitales; y los temáticos, que se obtienen a partir de otras bases de datos geoespaciales de temáticas diversas (Quintana, Pérez, Criado, Ramos y Fernández, 2008; Sarria, 2004).

Como objetivo principal del presente artículo, se establece la obtención de los sitios de ubicación más factibles para el establecimiento de una Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Santa Clara, provincia Villa Clara, Cuba. Finalmente, con el desarrollo del presente trabajo se obtiene un mapa de factibilidad espacial que contribuye a la solución de la problemática de encontrar sitios aptos para la ubicación de una PTRSU en el municipio Santa Clara.

METODOLOGÍA

Desde el punto de vista metodológico se ha seguido un patrón predecible y estructurado dictado por el proceso establecido en la metodología de la investigación para el desarrollo del enfoque cuantitativo (Sampieri, Collado y Lucio, 2014). El alcance de la investigación es explicativo.

Los datos geoespaciales fundamentales, empleados en el trabajo, lo constituyen los siguientes objetos geográficos: *Viales* (autopistas, carreteras), *Contornos* de provincia Villa Clara y municipios pertenecientes a esta, *Asentamientos poblacionales* de provincia Villa Clara, *Relieve* y *Redes técnicas* (electricidad de alta tensión y acueductos).

Los datos geoespaciales temáticos están compuestos por: *Mapa de agroproductividad* de la provincia de Villa Clara; *Mapa de suelos* de la provincia Villa Clara y *Mapa de vegetación*.

Para la creación de la base de datos geoespacial del estudio de localización óptima, se tuvo en cuenta esquema tecnológico general que se muestra en la figura 1.

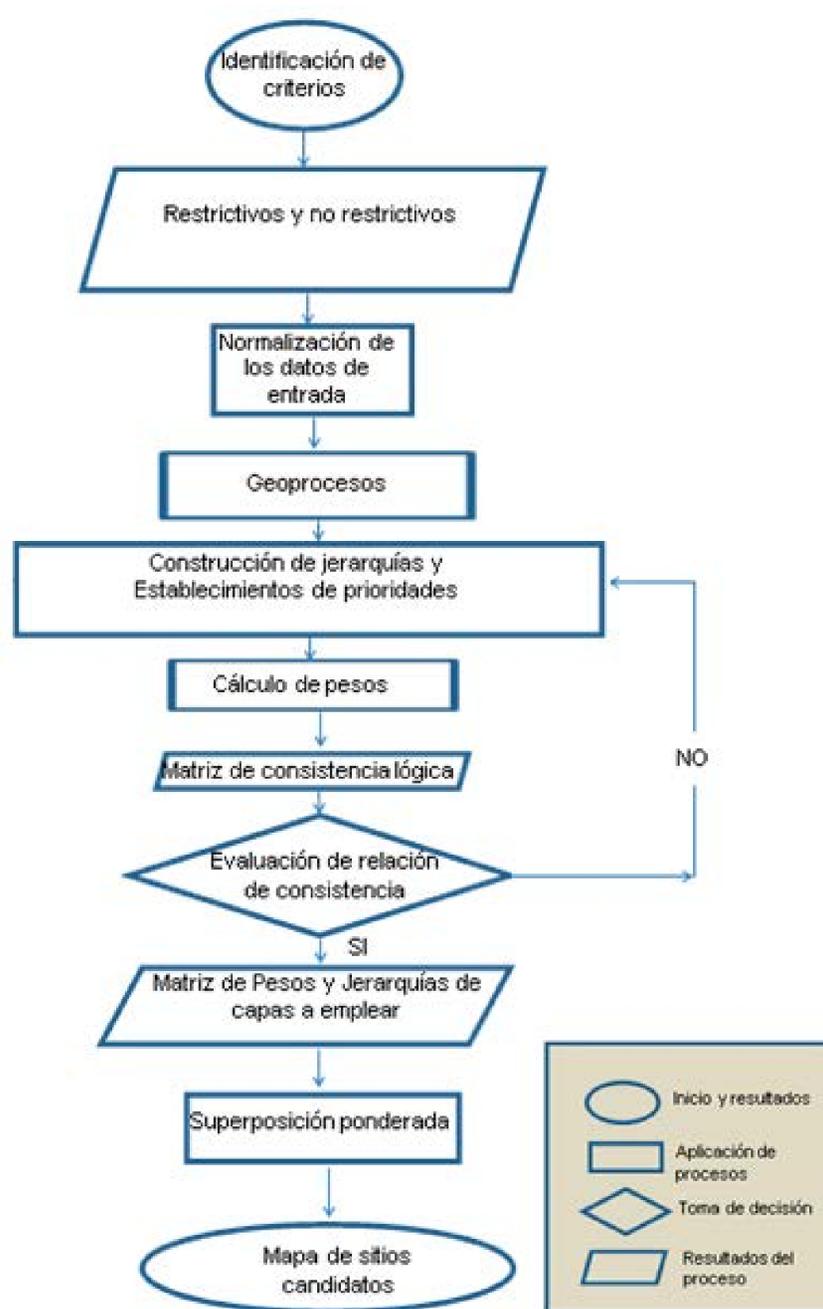


Figura 1. Esquema tecnológico para selección de sitios candidatos para el emplazamiento de la PTRSU.

ANÁLISIS MULTICRITERIO (Y MULTIOBJETIVOS)

Los análisis multicriterio y los modelos de decisión multiobjetivo ofrecen la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todas las facetas de los problemas de planificación, particularmente debido a que varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales pueden ser considerados cabalmente (Nijkamp y Van Delft, 1977 cit. en Delgado, 2008). La evaluación multicriterio —y multiobjetivo— es un conjunto de técnicas utilizadas en la toma de decisiones multidimensional para evaluar una serie de alternativas, que satisfacen uno o varios objetivos, a la luz de múltiples criterios (Delgado, 2008). Este tipo de análisis se emplea como complemento a la aplicación de modelos de asignación —localización, para la selección final entre las variantes calculadas (Bosque-Sendra, s.f.).

MODELOS DE ASIGNACIÓN-LOCALIZACIÓN

Este tipo de modelo se desarrolla a partir de una doble necesidad. Por un lado, encontrar la localización óptima de centros de diversa índole, y por otro, determinar la asignación de demanda a dichos centros (Buzai, 2011). En términos generales cabe indicar, de acuerdo a (Ramírez y Bosque-Sendra, 2001 cit. en Buzai, 2011), que los modelos de localización-asignación responden a las siguientes características:

- son modelos matemáticos ya que se considera a este lenguaje como apto para captar la realidad;
- son modelos meso-espaciales porque los aspectos a resolver se encuentran claramente delimitados en un territorio;
- son modelos normativos porque se debe buscar la mejor solución a un determinado problema.

En síntesis, estos modelos intentan evaluar las localizaciones actuales de los centros de servicio con base en la distribución de la demanda y la generación de alternativas para lograr una distribución espacial más eficiente y/o equitativa. Además, buscan las ubicaciones óptimas de localización y determinan las mejores vinculaciones de la demanda, entendida en términos de asignación (Buzai, 2011; Escribano y Bosque-Sendra, 2012; Galán; Pérez, 2017; Bosque-Sendra, s.f. ; Bosque-Sendra y Delgado, 2006; Bosque-Sendra, *et al.*, 1999).

Según (Bosque-Sendra, s.f.), existen dos tipos de soluciones dentro de los modelos de asignación-localización:

- La enumeración exhaustiva de todas las soluciones posibles, el procedimiento planteado en la programación matemática;
- Métodos heurísticos o aproximados que no calculan todas las soluciones; encuentran una que puede ser próxima a la óptima verdadera.

DISEÑO Y APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN ESPACIAL MULTICRITERIO EN LA SELECCIÓN DE POSIBLES ÁREAS PARA LA UBICACIÓN DE UNA PTRSU

En la selección inicial de los sitios candidatos se empleará la Evaluación Espacial Multicriterio que es uno de los métodos de mayor importancia en el interior de los procedimientos de análisis espacial (Buzai, 2015; Fuenzalida, Buzai, Jiménez y León, 2015; Rodríguez-Hernández, 2013; Smith, Goodchild y Paul A. Longley, 2015; Solarte y Orozco, 2015). Corresponde al

mayor avance producido tomando como base la superposición de mapas en el marco de una geografía que puede ser definida como ciencia que estudia la diferenciación areal (Fuenzalida, *et al.*, 2015).

Para la aplicación del análisis multicriterio se emplea el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) en su versión original. Para el cálculo de prioridades se emplea el Método del Autovector Principal por la Derecha (EGVM, por sus siglas en inglés) propuesto por Saaty. El AHP es según (Saaty, 2008) una teoría de la medida a través de comparaciones por pares que se basa en los juicios de los expertos para derivar escalas de prioridad. Es una técnica de decisión multicriterio propuesta por T.L. Saaty entre los años 1977 y 1980 que combina aspectos tangibles e intangibles para obtener, en una escala de razón, las prioridades asociadas con las alternativas del problema (Gómez, 2008; Rodríguez-Hernández, 2013; Hurtado; y Bruno; Jiménez, Casas y Urmeneta, 2003; Saaty, 1990, 2008).

Según (Lozano y Betancourt, 2017) para aplicar el AHP se pueden seguir los siguientes pasos:

- **Identificación de criterios**

En esta fase se determinan las variables o criterios que intervendrán en el modelo, se establecen las fuentes para derivar los métodos de edición y alistamiento de la información.

- **Análisis y estandarización de la información**

Luego de identificado los criterios se procede a la normalización de la información dada la existencia de incompatibilidades en la misma: diferencias de sistema de coordenadas, escalas, etc.

- **Construcción de jerarquías y establecimiento de prioridades**

Esta fase es quizás la fase más importante del proyecto y depende directamente de ella la confiabilidad del resultado, pues de acuerdo a la investigación realizada y con el apoyo de la construcción de matrices de influencia a partir del criterio de expertos, es posible construir un modelo de jerarquías.

- **Cálculo de pesos**

Una vez jerarquizados los criterios, se procede al cálculo de los pesos de cada variable. Estos valores son evaluados a través de la prueba de consistencia lógica que a un nivel de confianza del 90% nos indica si los valores que estamos otorgando a los subcriterios son adecuados para la construcción del modelo. De esta fase se obtiene la matriz de pesos y jerarquías total.

- **Determinación de sitios candidatos para localizar la PTRSU**

Finalmente y como aplicación del diagrama se obtiene una serie de localizaciones candidatas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS

Para la identificación de los criterios que se emplearon en el análisis de localización, se consultó a expertos integrantes del equipo de trabajo. De esta manera se logra mediante el aná-

lisis colectivo e individual arribar a la determinación del grupo de variables que con mayor significación influían en las consideraciones de la EMC (ver tabla 1).

Tabla 1. Variables consideradas en la Evaluación Espacial Multicriterio.

Variables	Totalmente restrictivas	Escala
Distancia euclidiana a vías de acceso	No	1:2000
Pendiente del terreno	No	1:10000
Distancia euclidiana a zonas habitadas por personas	No	1:2000
Vegetación, Flora y Fauna	Si	1:2000
Distancia euclidiana a redes de acueducto	No	1:2000
Categoría agro-productiva elevada	Sí	1:2000
Franja de prohibición de construcciones bajo líneas de alta	Sí	1:2000
Zonas habitadas por personas	Sí	1:2000
Uso de suelos (agua)	Sí	1:2000
Franja hidrorreguladora	Sí	1:2000

ANÁLISIS Y ESTANDARIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Dado el hecho de que las informaciones recopiladas provienen de varias medidas y tiene diferentes escalas, se realizó una normalización para hacerlas comparables entre ellas. Para ello, se clasificó la información en tablas que indican las diferencias de jerarquía y su ponderación, mediante la elaboración de las matrices de concertación con expertos. Una vez obtenidas las matrices de importancia, se realizó la prueba de consistencia lógica para hacer la validación absoluta del modelo por método comparativo (Lozano y Betancourt, 2017). Una de las ventajas del AHP es que permite medir la consistencia del decisor al emitir sus juicios. Se define la consistencia de una matriz de comparaciones pareadas $A=(a_{ij})$, $i,j = 1,\dots,n$, como la transitividad cardinal entre los juicios, esto es, cuando $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik} \forall i,j,k$ (Jiménez, *et al.*, 2003). Según (Morales y Hernández, 2015) para obtener los resultados de la consistencia lógica, es necesario determinar el valor de la Relación de Consistencia (RC). Se considera que el vector de prioridades tiene una inconsistencia aceptable cuando la RC es menor del 10 % (5 % y 8 % para $n=3$ y $n=4$ respectivamente) (Saaty, 1980, 1994 cit. en Jiménez, *et al.*, 2003). Para calcular el valor de RC, fue necesario hallar la variable Lambda (λ), que corresponde al máximo valor propio de la matriz de comparaciones, calculada con la expresión:

$$\lambda_{max} = V * B \quad (I)$$

Donde:

- V = Corresponde al vector de prioridades o el peso de cada variable con respecto a los demás criterios.
- B = Corresponde a la sumatoria de los elementos de cada columna de la matriz de comparaciones los cuales expresan la importancia de cada criterio con respecto al correspondiente de cada fila.

Una vez hallado el valor de Lambda (λ), se calculó el valor del Índice de Consistencia (IC), a través de la expresión:

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (II)$$

Donde n corresponde al número de criterios.

Este valor indica el grado de desviación de los pesos determinados para los diferentes criterios con respecto al grado de importancia determinado para los criterios; de donde se puede decidir cuál es la mejor para la aplicación del modelo AHP.

Luego, para tener plena seguridad de la elección de la matriz de jerarquías, es necesario calcular el valor de la RC el cual se halla a través de la expresión:

$$RC = IC / RI \quad (III)$$

(Jiménez, *et al.*, 2003 cit. en Morales y Hernández, 2015) define RI como el índice aleatorio o valor esperado para el tamaño de la matriz $n=4$, los valores de RI han sido calculados a partir de un gran número de matrices recíprocas positivas de orden n generadas aleatoriamente.

Para la determinación de la importancia relativa de los criterios considerados, se aplicó el método *Delphi*, a los miembros del equipo de trabajo dentro de la Agencia de Medio Ambiente y Ayuda a la Navegación. También se recibió las opiniones de algunos miembros de la empresa cliente. Con el análisis de las distintas opiniones se comprobó las desviaciones entre los pesos asignados a cada criterio y se observaron las tendencias. Con todo este material se pasó al análisis de experto donde participaron cuatro miembros del equipo de trabajo constituidos por un geógrafo, un biólogo, un agrónomo y un hidrógrafo geodesta. Del análisis se obtiene una matriz de importancia con un índice de consistencia de aproximadamente 0,06; valor inferior al 8% establecido en la literatura (ver tabla 2).

Tabla 2. Matriz de importancia de los criterios analizados.

	Pendiente	Distancia a viales	Distancia zonas habitadas	Redes acueducto	Suma	Pesos	Pesos cada variable * suma de variable
Pendiente	1.000	0.667	0.667	1.250	3.583	0.218	0.783
Distancia a viales	1.500	1.000	1.000	1.111	4.611	0.281	1.296
Distancia zonas habitadas	1.500	1.000	1.000	1.111	4.611	0.281	1.296
Redes acueducto	0.800	0.900	0.900	1.000	3.600	0.219	0.790
Suma	4.800	3.567	3.567	4.472	16.406	1.000	4.165
n	4		λ (Lambda)	IC	RC		
IR	0.9000		4.1647	0.0549	0.0610		

Como resultado de los cálculos de la matriz se observa la igualdad de pesos entre dos pares de criterios:

- Distancia a viales y distancia a zonas habitadas (0,28)
- Pendiente del terreno y redes de acueducto (0,21)

Cálculo de pesos de los criterios

Dado que luego de jerarquizar un total de cuatro variables se obtienen valores aceptables de consistencia lógica, con un grado de confianza inferior a un 8%, es posible proceder a la construcción de un modelo de EMC. De acuerdo a la metodología AHP, el siguiente paso consiste en aplicar el mismo tratamiento hecho a los criterios, a los subcriterios de cada una de las variables. En la tabla 3 se procede a mostrar los resultados.

Tabla 3. Criterios y pesos calculados de forma respectiva.

Pendiente	Pesos	D. Viales	Pesos	Distancia de Zonas Habitadas	Pesos	Redes Acueducto	Pesos
0-2	0,460	0-1000	0,3693	0-300	0,4115	0-500	0,3693
2-6	0,38	1000-2000	0,3101	300-600	0,2681	500-1000	0,3101
6-12	0,278	2000-3000	0,1630	600-900	0,1949	1000-3000	0,1630
12-18	0,149	3000-4000	0,1282	900-1200	0,1002	3000-4500	0,1282
>18	0,075	>4000	0,0293	>1200	0,0250	>4500	0,0293

Aplicación de un modelo de cálculo a partir de la EMC para determinar sitios candidatos para ubicar la PTRSU

Para la ejecución del cálculo de los sitios candidatos por niveles de aptitud se realiza la suma lineal ponderada de los elementos en formato raster que caracteriza los distintos criterios.

$$S = \sum_{i=1}^n P_{wi} * M_{ri} \quad (IV)$$

Donde:

- S : Suma de valores.
- P_{wi} : Peso ponderado de cada criterio i .
- M_{ri} : Mapa ráster numérico de cada criterio i .

Básicamente el algoritmo es el siguiente: dos mapas en formato ráster son reclasificados a escalas de rangos comunes. A cada mapa se le asigna un peso de acuerdo a su importancia. Este valor es multiplicado por cada celda del mapa luego el resultado obtenido es sumado con las celdas correspondientes del otro mapa que han sido ponderadas de igual manera. Finalmente la salida es un mapa que contiene la suma lineal ponderada de los ráster de entrada.

Resultado preliminar del análisis

En una primera aproximación al análisis se ejecuta el cálculo sobre cuatro variables de entrada con rangos comunes de 1 a 5. A partir de esto se obtiene un mapa ráster de salida a escala 1:2000, con una categorización de 1 a 5, donde los mayores niveles de aptitud corresponden al módulo de los valores de mayor rango. Esta salida se somete a una serie de geoprocursos para depurar los sitios preliminares a partir de los criterios de restricción y luego se transforma a formato vectorial y se generaliza. Al final de estas transformaciones queda un mapa binario con sitios de aptitud 4 y 5 (máximas). El resultado gráfico de lo anteriormente expuesto se puede apreciar en la figura 2.

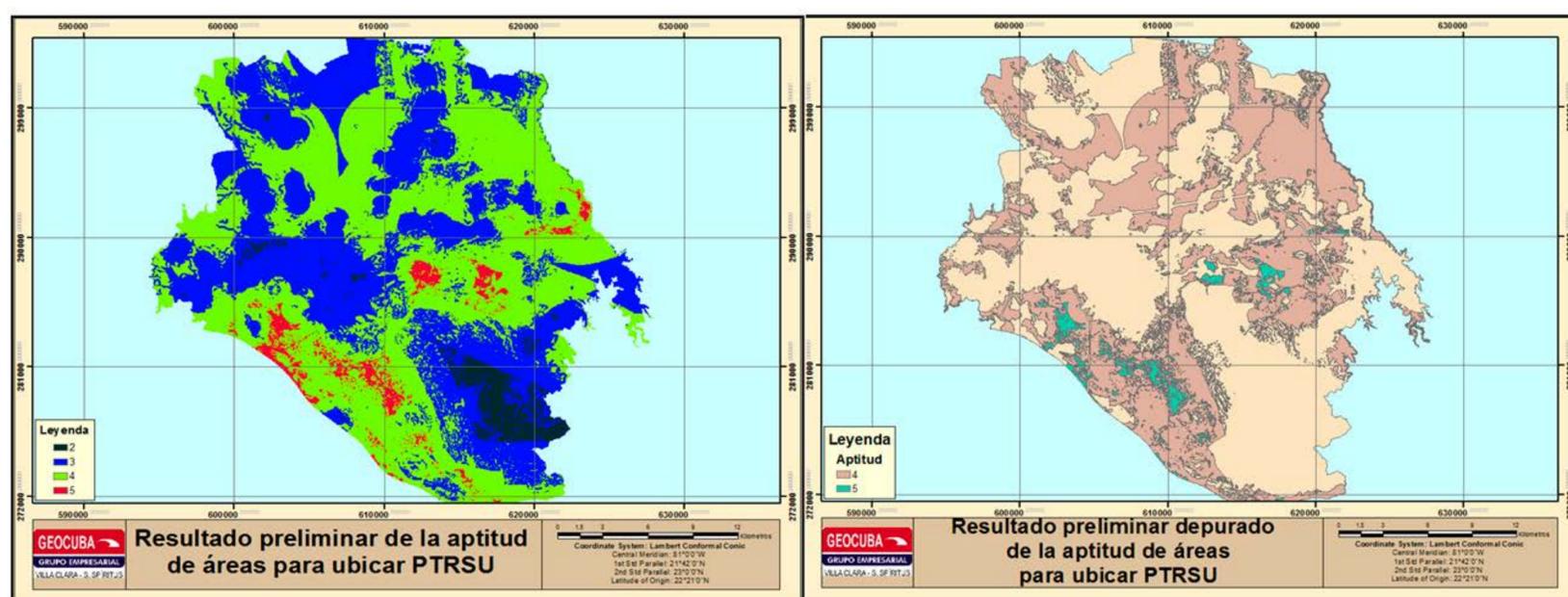


Figura 2. Resultado preliminar (1) y preliminar depurado (2) del estudio para la selección de sitios óptimos.

Sitios preseleccionados para ubicación de PTRSU

Como consecuencia del análisis anterior se obtuvo una serie de espacios geográficos con niveles de factibilidad elevados para la implantación de una PTRSU, bajo el análisis de las condiciones de entrada. Entre todas las variantes posibles se eligieron tres áreas con características que favorecen su elección como sitio de instalación. El área de cada polígono es 30ha garantizado el espacio suficiente para la instalación de cualquiera de las tecnología que pudiesen intervenir en la inversión. El área número uno (1) corresponde a un rectángulo cuyo centroide tiene como coordenadas $X=606128$ y $Y=282918$, proyectadas en el sistema de coordenadas planas rectangulares *Cuba Norte* con proyección Cónica Conforme de Lambert sobre el elipsoide de Clarke de 1886 y Datum NAD 27. Este sitio se corresponde con la posición actual del vertedero municipal de Santa Clara. El área número dos corresponde a un rectángulo cuyo centroide tiene como coordenadas $X=603223$ y $Y=283680$, proyectadas en el sistema de coordenadas planas rectangulares *Cuba Norte* con proyección Cónica Conforme de Lambert sobre el elipsoide de Clarke de 1886 y Datum NAD 27. El área corresponde a un espacio ubicado al oeste de loma *Gobernadora*. Esta área presenta un suelo de tipo esquelético (serpentinita) con propiedades pobres para el desarrollo de la vegetación. En el espacio más apartado hacia el sur del polígono se aprecia la presencia de restos de matorral xeromorfo espinoso sobre serpentinita (cua-

bal) en un estado de conservación malo por la antropización del área debido al cambio de uso de suelo. El área número tres corresponde a un rectángulo cuyo centroide tiene como coordenadas $X=599297$ y $Y=289030$, proyectadas en el sistema de coordenadas planas rectangulares *Cuba Norte* con proyección Cónica Conforme de Lambert sobre el elipsoide de Clarke de 1886 y Datum NAD 27. Esta superficie presenta suelos que pueden ser aprovechados para labores agrícolas sin embargo no se encuentra dentro de las regiones con mayor índice de agroproductividad del municipio.

En la figura 3 se observa una imagen con los sitios referidos.



Figura 3. Sitios elegidos por el equipo de trabajo.

Análisis de distancia por viales a los sitios seleccionados desde municipios adyacentes

Dentro de los requisitos de localización aportados por el cliente, se encuentra el de considerar la distancia a algunos municipios candidatos a aportar Residuos Sólidos Urbanos (RSU) para el funcionamiento eficiente de la planta a instalar. La selección por parte del cliente se fundamenta en elementos como densidad de población, recolección de desechos, la distancia intermunicipal, interés para la Administración Provincial, etc. Finalmente como posibles municipios proveedores de RSU se tienen a Caibarién, Camajuaní, Placetas, Ranchuelo, Sagua la Grande y Remedios. Por demanda del cliente este es el principal criterio a considerar para proponer una ubicación definitiva a la PTRSU. A continuación se muestran los resultados del análisis, donde se le denomina *Ruta 1* a la establecida entre los municipios y el emplazamiento número 2 (Oeste de Loma *Gobernadora*), *Ruta 2* a la determinada entre los municipios y el emplazamiento número 1 (vertedero municipal), *Ruta 3* a la establecida entre los municipios y el emplazamiento número 3 (Norte de empresa *Almacenes Universales*). En la tabla 4 y 5 se muestran dos de los estadígrafos que describen las distancias y tiempos calculados.

Tabla 4. Resumen de distancia de recorrido desde municipios candidatos a localizaciones propuestas.

Nombre de ruta	Promedio (Dist. por ruta)	Sumatoria (Dist. por ruta)
Ruta 1	44,6 km	267,6 km
Ruta 2	42,9 km	257,4 km
Ruta 3	46,65 km	279,9 km

Tabla 5. Resumen del tiempo de recorrido desde municipios candidatos a localizaciones propuestas.

Nombre de ruta	Promedio (Tiempo por ruta)	Sumatoria (Tiempo por ruta)
Ruta 1	38 min	229 min
Ruta 2	38 min	230 min
Ruta 3	43 min	260 min

CONCLUSIONES

El presente trabajo se ha desarrollado mediante el empleo de datos pertenecientes a distintas instituciones estatales y otros existentes bajo estándares de datos libres. Como resultado del estudio se confirma que el problema de minimizar los impactos ambientales a partir de la determinación de sitios óptimos, que se empleen en la disposición final de residuos sólidos urbanos, se aborda internacionalmente de forma mayoritaria desde una perspectiva multicriterio y constituye una preocupación actual en muchos países del mundo.

Los resultados obtenidos corroboran que la metodología de Evaluación Espacial Multicriterio en conjunción con el Proceso de Análisis Jerárquico y soportada sobre plataformas de Sistemas de Información Geográfica es apropiada en la determinación de sitios factibles para ejecutar la etapa de disposición final de los residuos sólidos urbanos. Es necesario tener en cuenta que los criterios a considerar dentro de la metodología multicriterio han de variar en función del tipo de tratamiento final que se le dará a los residuos, por lo que será esta etapa la que determine definitivamente como se debe acometer la selección y uso de categorías a emplear en los análisis.

Se recomienda para trabajos futuros, el estudio de la influencia de otros criterios a tener en cuenta para el análisis, como por ejemplo conceptos de paisaje sonoro y/o visual, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Como agradecimiento por el apoyo en el desarrollo de este trabajo se incluyen a los especialistas de la Agencia de Medio Ambiente y Ayuda a la Navegación de la Empresa Geocuba Villa Clara-Sancti Spíritus. De igual manera se agradece el aporte del MSc. Enardo Pena, por su contribución en el tema relacionado con el Análisis de redes.

REFERENCIAS

- Aburas, M. M., Abdullah, S. H., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2015). A Review of Land Suitability Analysis for Urban Growth by using the GIS-Based Analytic Hierarchy Process. *Asian Journal of Applied Sciences*, 03(06).
- Ariola, P. M. D. (2019). Identificación de sitios con aptitud para el emplazamiento de un centro de tratamiento y disposición final de Residuos Sólidos Urbanos en el área metropolitana de la Ciudad de Santa Fe. (Maestría), Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Buzai, G. D. (2011). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía*, 20.
- Buzai, G. D. (2015). Geografía global y neogeografía. La dimensión espacial en la ciencia y la sociedad. *Polígonos. Revista de geografía*.
- Campos, A. P. Criterios para la gestión de los residuos sólidos urbanos en la ordenación del territorio. *Geographicalia*.
- Cárdenas-Ferrer, T. M., Santos-Herrero, R. F., Contreras-Moya, A. M., Rosa-Domínguez, E., & Domínguez-Núñez, J. (2019). Propuesta Metodológica Para el Sistema de Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en Villa Clara.
- Castellanos, C. D. M. (2018). Evaluación de la selección espacial para la ubicación actual del relleno sanitario Doña Juana (RSDJ) aplicando metodología MCDA-SIG. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.
- Cruz, A. A. P. (2018). Procedimiento para la caracterización de la generación de los residuos sólidos urbanos en Santa Clara. (Trabajo de Diploma), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
- Chabuk, A., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Knutsson, S., Push, R., & Laude, J. (2017). Combining GIS Applications and Method of Multi-Criteria Decision-Making (AHP) for Landfill Siting in Al-Hashimiyah Qadhaa, Babylon, Iraq. *Sustainability*, 9(11).
- Chabuk, A. J., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Knutsson, S., & Pusch, R. (2016). Landfill Siting Using GIS and AHP (Analytical Hierarchy Process): A Case Study Al-Qasim Qadhaa, Babylon, Iraq. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. doi: 10.17265/1934-7359/2016.05.002
- Delgado, M. G. (2008, 2008). Integración de técnicas de Evaluación Multicriterio y SIG.
- Ding, Z., Zhu, M., Wu, Z., Fu, Y., & Liu, X. (2018). Combining AHP-Entropy Approach with GIS for Construction Waste Landfill Selection—A Case Study of Shenzhen. *Int. J. Environ. Res. Public Health*.
- Durán, C. E. S., & González, O. N. (2019). Identificación de sitios con potencial para la disposición final de residuos sólidos urbanos en el municipio de Tepic, Nayarit, México. *Rev. Int. Contam. Ambie*.
- Escribano, D. O., & Sendra, J. B. (2012). Implementación de modelos de localización-asignación espacial como servicios OGC WPS. *Jornadas de SIG Libre*.

- Fleites, A. A. (2018). Base teórica-conceptual de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. (Trabajo de Diploma), Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.
- Fuenzalida, M., Buzai, G. D., Jiménez, A. M., & León, A. G. d. (2015). Geografía, geotecnología y análisis espacial: Tendencias, métodos y aplicaciones.
- Galán, S. M. (Sin Fecha.) Los SIG en la ingeniería, una cuestión de orden y espacio.
- Gómez, J. C. O. (2008). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica* Año XIV.
- Rodríguez-Hernández, S. V (2013). Método de evaluación geoespacial multicriterio basada en datos históricos para la gestión del riesgo por ciclones tropicales. (Doctorado), Instituto Técnico Militar “José Martí”, Cuba.
- Hurtado, T., & Bruno, G. (Sin Fecha) El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. UNMSM.
- Jiménez, J. M. M., Casas, A. A., & Urmeneta, M. T. E. (2003). El índice de consistencia geométrico para matrices incompletas en AHP. XVII Reunión Asepelt-España.
- Lozano, R. G., & Betancourt, H. T. (2017). Evaluación multicriterio como soporte para la elaboración del mapa de vulnerabilidad ante la contaminación del manto freático en la provincia de Villa Clara, Cuba. VIII Convención de Agrimensura.
- Mohammed, H. I., Majid, Z., Yusof, N. B., & Yamusa, Y. B. (2017). GIS-based and Multi-Criteria Evaluation Method for optimised landfill site selection: A review.
- Morales, R. C., & Hernández, O. A. M. (2015). Evaluación multicriterio como soporte para la selección de la mejor ruta de la vía férrea entre Yopal y Bogotá. (Ingeniero Catastral y Geodesta), Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Pérez, A. E. (2017). Relajación Lagrangiana, métodos heurísticos y metaheurísticos en algunos modelos de Localización e Inventarios. (Máster en Investigación en Matemáticas), Universidad de Valladolid.
- Pingus, A. W. E. (2017). Localización óptima de un relleno sanitario empleando Sistemas de Información Geográfica en el distrito de Chachapoyas, región Amazonas, 2017. Perú.
- Quintana, S. M., Pérez, E. O., Criado, A. C. V., Ramos, B. M., & Fernández, L. M. (2008). LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental.
- Randazzo, L., Cusumano, A., Renda, P., Perricone, M., Oliveri, G., Zarcone, G., & Stefano, P. D. (2018). Landfill site selection for municipal solid waste by using AHP method in GIS environment: Waste management decision-support in Sicily (Italy).
- Reynaldo, M. O. U., Igarza, L. M. Z., & Fernández, I. V. (2019). Gestión ambiental urbana del ciclo de vida de los residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Holguín, Cuba. CUADERNO URBANO. Espacio, cultura, sociedad.
- Rodríguez, C. G. (2018). Diseño de la ruta de recolección de residuos sólidos urbanos de la zona comunal # 1 del municipio de Santa Clara. (Trabajo de Diploma), Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26.

- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. d. P. B. (2014). Metodología de la investigación. (Sexta ed.).
- Sarria, F. A. (2004). SIG aplicados al análisis y cartografía de riesgos climáticos. II Curso de verano de la Asociación Española de Climatología.
- Sendra, J. B. (Sin Fecha). Algoritmos para resolver modelos de localización - asignación. Universidad de Alcalá. España.
- Sendra, J. B., & Delgado, M. G. (2006). Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG. *Cuadernos Geográficos*, 15.
- Sendra, J. B., Delgado, M. G., & Espinosa, V. r. (1999). Localización de centros de tratamientos de residuos : una propuesta metodológica basada en un SIG. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 295-323.
- Smith, M. J. d., Goodchild, M. F., & Paul A Longley. (2015). *Geospatial Analysis A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*
- Solarte, N. M. G., & Orozco, D. G. (2015). Sistema de información geográfica para la planificación y promoción del turismo en Salamina, Caldas. (Especialista en Sistemas de Información Geográfica), Universidad de Manizales.
- Urbano, I. A. B. (2019). Identificación de áreas óptimas para la localización de un relleno sanitario en las subregiones norte y oriente del Valle del Cauca. *Revista Entorno Geográfico*, 32.
- Chodrow, P. S. (2017). Structure and information in spatial segregation. *PNAS*, 114 (44), 11591–11596.
- Furno, A., Fiore, M., & Stanica, R. (2017). Joint Spatial and Temporal Classification of Mobile Traffic Demands. *IEEE INFOCOM 2017- IEEE Conference on Computer Communications*, 1-9.
- Lizarraga, C. (2012). Expansión metropolitana y movilidad: el caso de Caracas. *EURE*, 38 (113), 99-125.
- Loaiza Cerón, W., & Carvajal Escobar, Y. (2014). Índice de Segregación Espacial y Socioeconómico (ISES) en las comunas de Santiago de Cali. *Cuaderno de Vivienda y Urbanismo*, 7 (13), 84-101.
- Medina, P., Goles, E., Zarama, R., & Rica, S. (2017). Self-Organized Societies: On the Sakoda Model of Social Interactions. *Hindawi Complexity*, 16.
- Olteanu, M., & Lamirel, J.-C. (2019). When clustering the multiscale fingerprint of the city reveals its segregation patterns. *International Workshop on Self-Organizing Maps*, 140-149.
- Olteanu, M., Hazan, A., Cottrell, M., & Randon-Furling, J. (2018). Multidimensional Urban Segregation. *Investigación de Operaciones*.
- Olteanu, M., Randon-Furling, J., & Clark, W. (2019). Segregation through the multiscale lens. *Proceeding of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 116 (25), 12250-12254.

Olteanu, M., Randon-Furling, J., & Clark, W. (2019). Spatial analysis in high resolution geo-data. *European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESSAN)*.

Randon-Furling, J., Olteanu, M., & Lucquiaud, A. (2018). From urban segregation to spatial structure detection. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0, 1-17.

Schelling, T. C. (1971). Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143-186.

Copyright © 2020 González-Lozano, R.



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.