

Localización de un centro de transferencia de residuos sólidos urbanos en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, México, utilizando mapas de calor y centro de gravedad

RESUMEN: El uso de rellenos sanitarios se ha convertido en México en una técnica de eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) que no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública. Sin embargo, en Martínez de la Torre, Veracruz, se cuenta con un relleno sanitario que ha sobrepasado su capacidad, convirtiéndose en un tiradero a cielo abierto (TCA), por lo tanto, este ha sido clausurado debido al incumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 en su apartado "7. Características constructivas y operativas del sitio de disposición final".

Debido a lo anterior la Procuraduría del Medio Ambiente (PMA) busca desaparecer los TCA para su posterior remediación y realizar actividades para una gestión adecuada de los RSU. El Plan de Gestión Estatal elaborado por la PMA se lleva a cabo con base en el reordenamiento regional ecológico de rellenos sanitarios y Centros de Transferencia de Residuos (CTR). Los CTR tienen la característica de no almacenar los desechos, lo que exige que siempre haya un vehículo de transferencia en condiciones de recibir los residuos de los recolectores.

El objetivo de este artículo es especificar la localización óptima de un Centro de Transferencia de RSU utilizando mapas de calor, desarrollado a través de un algoritmo en Python.

PALABRAS CLAVE: Localización, CTR, Mapas de calor, Python and RSU.



Colaboración

Mónica Gutiérrez Hernández; Saúl Antonio Rivera González; Yodaira Borroto Pentón; Luis Carlos Sandoval Herazo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2022

Fecha de aceptación: 21 de diciembre de 2022

ABSTRACT: The use of landfills in Mexico has become a technique of urban solid waste disposal (MSW) that does not cause discomfort or danger to public health and safety. However, in Martínez de la Torre, Veracruz, there is a sanitary landfill that has exceeded its capacity, becoming an open-pit landfill (TCA), therefore, this has been closed due to non-compliance with the NOM-083-SEMARNAT-2003 in its section "7. Constructive and operational features of the final disposal site".

Due to the above, the Office of the Environment seeks to eliminate open dumps (OD) for subsequent remediation and carry out activities for proper management of MSW. The State Management Plan developed by WFP is based on the ecological regional reordering of landfills and Waste Transfer Centres (WTCs). WTCs have the characteristic of not storing waste, which requires that there is always a transfer vehicle in a position to receive waste from collectors.

The objective of this article is to specify the optimal location of the RSU transfer station using heat maps and the gravity center algorithm through Python.

KEYWORDS: Location, WTCs, Heatmaps, Python y MSW.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) presenta un desafío cada vez más complejo y creciente en términos globales. La disposición de RSU en basureros genera lixiviados, un líquido altamente contaminante que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro, representando un riesgo potencial para los ecosistemas y seres vivos, incluyendo asentamientos urbanos [1].

Para 2020, la generación de RSU per cápita fue de 0.944 kilogramos por habitante por día, reporta el “Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020”, es decir, se generaron 120,128 toneladas de RSU al día en México. El Estado de México 16,739 t/d y la Ciudad de México son las entidades juntas que producen al día una de cada cinco toneladas en el País, seguidos de Jalisco con 7,961 t/d, Veracruz con 7813 t/d y Guanajuato con 6,031 t/d [2].

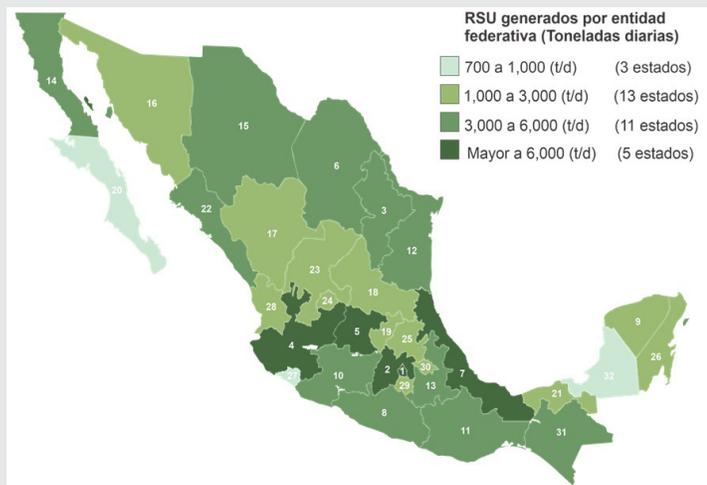


Figura 1. Generación de RSU por entidad federativa. Fuente: Elaboración propia, basado en el diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos, 2020.

En el estado de Veracruz, se estiman 150 Sitios Disposición Final (SDF) de los cuales la PMA reporta 25 Rellenos Sanitarios (RS) en operación, de los cuales sólo 5 operan con la normativa vigente. De acuerdo a la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) se plantea dejar de operar los TCA y construir RS que constituyen una infraestructura idónea para el confinamiento, tanto por razones de salud pública como ambientales, y de conservación de los recursos naturales debido a que se han encontrado hasta 200 compuestos diferentes, algunos de ellos tóxicos y cancerígenos [3].

Actualmente en el país en materia de legislación ambiental la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SE-MARNAT-2003, indica las especificaciones de protección ambiental para un sitio de disposición final

de residuos sólidos urbanos y de manejo especial [4].

Se destaca la necesidad de utilizar tecnologías eficientes para la gestión de RSU. El escenario actual en México muestra deficiencias relacionadas con el monitoreo de rellenos sanitarios en operación. En México el 87% de los tiraderos de basura son a cielo abierto y sólo 13% son rellenos sanitarios, según datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática.

Como parte de las acciones que realiza la Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente (PMA), el día 14 de octubre de 2021 se realizó una orden de inspección, derivada de una denuncia ciudadana al Municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, con el objetivo de verificar el cumplimiento de las normas ambientales en el sitio de disposición final de este lugar. En Martínez de la Torre, se cuenta con un relleno sanitario que ha sobrepasado su capacidad, convirtiéndose en un tiradero a cielo abierto (TCA), por lo tanto, este ha sido clausurado debido al incumplimiento de las normas ambientales.

Con el fin de disminuir la contaminación del aire, agua y suelo, la PMA elaboró el “Plan de gestión estatal de residuos sólidos urbanos y de manejo especial” [6], el cual busca desaparecer los TCA para su posterior remediación y realizar actividades para una gestión adecuada de los RSU. El Plan de Gestión Estatal se lleva a cabo con base en el reordenamiento regional ecológico de rellenos sanitarios y Centros de Transferencia de Residuos (CTR).

Los CTR se utilizan para el tratamiento de materiales y su recuperación, así como la transferencia de residuos sólidos de un vehículo de recolección a otro con una carga útil mayor para su transporte a un sitio de disposición final o a una instalación de reciclaje para su tratamiento en lugares como centros, incineradores, compostaje, etc [5].

La localización de una planta como parte del diseño de la cadena de suministro es una decisión de naturaleza estratégica, vista como un compromiso de recursos a largo plazo y, por lo general, no muy flexible [7]. Existen diversos métodos a utilizar cuando se piensa en la localización de un sitio. Para este fin intervienen diversos factores, por ello es de suma importancia justificar el método que se utilizará para determinar la ubicación óptima de la estación de transferencia.

MATERIAL Y MÉTODOS

Consultando la literatura, existen diversos métodos y procedimientos para tomar la decisión de en donde se debe localizar un sitio, sin embargo, dentro de los más significativos, se encuentran los métodos analíticos y heurísticos.

En los métodos analíticos, los modelos desarrollados se conforman de la información basada en relaciones cuantitativas (frecuencias, patrones, promedios y correlaciones [8]) entre los factores considerados. Los métodos heurísticos, por otro lado, tienen en cuenta la evaluación de distintos factores de localización, como la simulación, mapas de calor y método de centro de gravedad [7].

Para determinar la localización óptima de la estación de transferencia y cumplir con el objetivo de este artículo se utilizarán mapas de calor y el algoritmo de centro de gravedad desarrollado a través de Python.

Centro de gravedad

El algoritmo asociado a este procedimiento tiene en cuenta el origen (donde se recibe el producto) y el destino (donde se dirige el producto). Para Medina & Hernández [9] estas relaciones dependen de la distancia recorrida y de la cantidad o peso del material transferido hacia la instalación. Por lo tanto, se necesita encontrar un punto central que minimice el costo promedio total de transporte (TTC).

Se supone que este costo es proporcional al costo (por unidad de transporte), al volumen transportado y la distancia recorrida. Según Medina & Hernández [9], estos se pueden determinar de la siguiente manera:

$$CTT = \sum c_i v_i d_i \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

c_i = es el costo unitario de transporte correspondiente al punto i .

v_i = es el volumen o peso de material transportado desde o hacia i .

d_i = es la distancia entre el punto i y el lugar donde se encuentra la instalación.

Heatmaps o mapas de calor

Los mapas de calor como concepto no son nuevos, el mapa de densidad de demanda de calor de 1987 para la ciudad de Sheffield en el Reino Unido se produjo utilizando datos de radiación de sensores remotos. El objetivo era planificar un lugar para una estación de cogeneración, cuyo calor se puede utilizar para el suministro de calor centralizado [10].

Los heatmaps o mapas de calor siguen siendo representaciones gráficas que utilizan colores, de diferentes parámetros que se analizan en un campo o espacio específicos [11].

Lenguaje de programación

Un lenguaje de programación es un lenguaje utilizado para controlar el comportamiento de una má-

quina, especialmente una computadora. Consta de reglas sintácticas y semánticas que definen su estructura y el significado de sus elementos [12].

Python se considera un lenguaje multiparadigma debido a sus capacidades de programación funcional, imperativa y orientada a objetos [13].

A continuación, se muestra en la Fig. 2 un esquema de los pasos a seguir de la metodología propuesta por Salazar [14] para establecer la localización óptima de un sitio, utilizando mapas de calor y el algoritmo de centro de gravedad a través de Python.

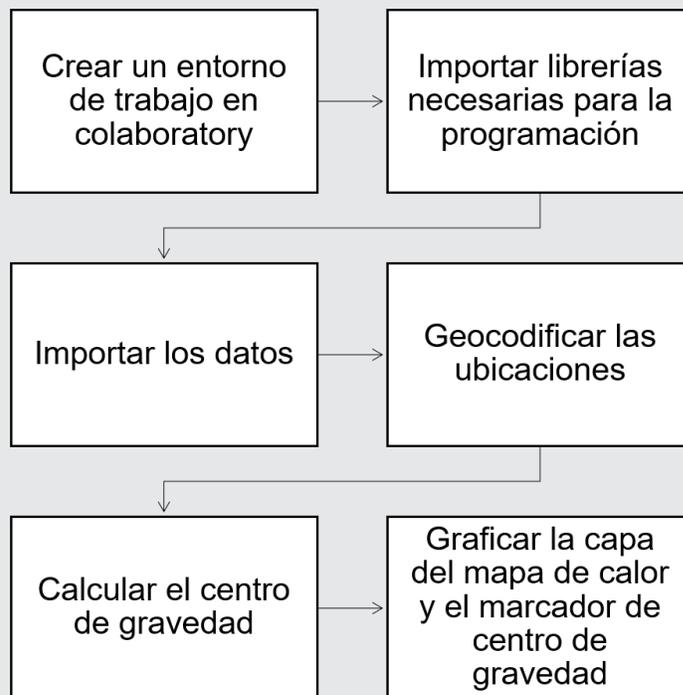


Figura 2. Diagrama de metodología.

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología de localización de Salazar, 2021.

Crear un entorno de trabajo en Colaboratory

Colaboratory es un producto de Google Research. Permite a cualquier usuario escribir y ejecutar código arbitrario de Python en el navegador. Es especialmente adecuado para tareas de aprendizaje automático, análisis de datos y educación.

Importar librerías necesarias para la programación Geopy, Statistics, Folium, y Numpy, son librerías que conjuntamente permiten geocodificar varias ubicaciones, hallar medidas centrales como soporte de los modelos, graficar sobre un sistema de geolocalización, emplear la capa de mapas de calor y georeferenciar el centro de gravedad del modelo, así como efectuar operaciones matriciales en Python.

Pandas es un paquete de Python que proporciona estructuras de datos rápidas, y flexibles, diseñadas

para que el trabajo con datos estructurados y de series de tiempo sea fácil e intuitivo.

Importar los datos

Una de las ventajas de utilizar Python, es su capacidad de integrarse con cualquier fuente de datos. En el caso de este estudio, toda la información se encuentra en un archivo de Excel.

Geocodificar las ubicaciones

Para este paso se utilizará el servicio de la librería Geopy (Llamado Nominatim), el cual puede geocodificar las ubicaciones propuestas.

Calcular el centro de gravedad, graficar la capa del mapa de calor y el marcador de centro de gravedad

Para este paso se deberán tener los datos ordenados, ya que la base del algoritmo son las coordenadas, además se utilizará la librería folium que permite la graficación sobre un sistema de geolocalización. Para todo ello se deberán calcular la media de las latitudes y las longitudes para centrar el mapa.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran las ubicaciones propuestas para la localización de la estación de transferencia de RSU, la cual fue importada al modelo desarrollado en Python.

Tabla 1. Datos comparativos.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud	Peso	Generación	Población
0	Martínez de la Torre	20.02888	-96.99845	80,076.61	0.74	108,211.63
1	San Rafael	20.19428	96.88515	22,675.87	0.74	30,643.07
2	Tlapacoyan	19.95914	-97.19375	45,237.49	0.74	61,131.74
3	Misantla	19.9475	-96.86152	49,121.65	0.74	66,380.61
4	Colipa de Cuatla	19.8882	-96.76074	5,028.42	0.87	5,753.34
5	Landero y Coss	19.75554	-96.85631	5,028.42	0.87	5,753.34
6	Yecuatla	19.8882	-96.76074	9,493.86	0.87	10,862.54
7	Vega de Alatorre	20.00308	-96.63201	17,658.30	0.87	20,204
8	Nautla	20.1051	-96.78605	8,853.62	0.87	10,130.00
9	Juchique de Ferrer	19.8882	-96.76074	12,107.67	0.822	14,729.52
10	Papantla	20.47111	-97.34167	41,733.05	0.743	56,168
11	Tenochtitlan	19.83051	-96.9068	4,094.96	0.822	4,982

Fuente: Elaboración propia.

Al ejecutar el modelo desarrollado por completo, se muestran en las figuras 3, 4 y 5 los siguientes mapas de calor, en los cuales se permiten tener diversas visualizaciones de densidad. Los centros de gravedad son ubicados en tres sitios (Ver Figura 3), 1) El tiradero de Papantla; 2) El ejido San Pedro Buenavista, Atzalan, Ver.; 3) La Palma, Misantla, Ver.

Entre más calor haya en el sitio, este será el idóneo para la instalación de la estación de transferencia de RSU. El mayor calor que existe en el mapa se encuentra en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, por lo que este sería la ubicación óptima. Se puede mostrar en las visualizaciones de ubicación que en el resto de los sitios propuestos se encuentra un color tenuemente morado, y entre me-

nos se capte el color, significa que no se considera apta la ubicación para la instalación de la CTR.

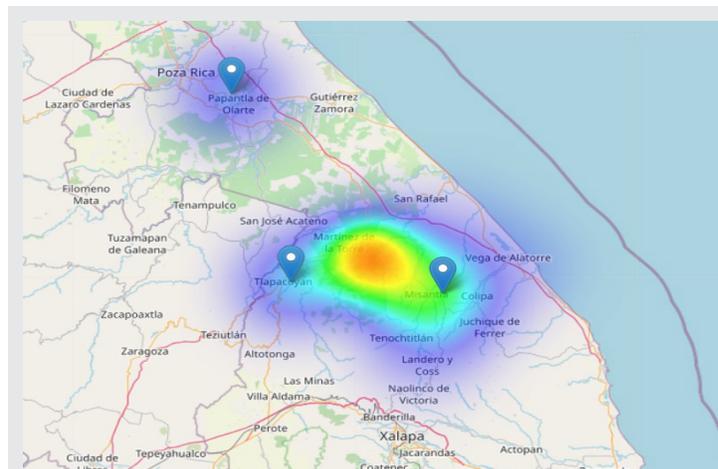


Fig. 3 Visualización de las ubicaciones. Fuente: Elaboración propia.

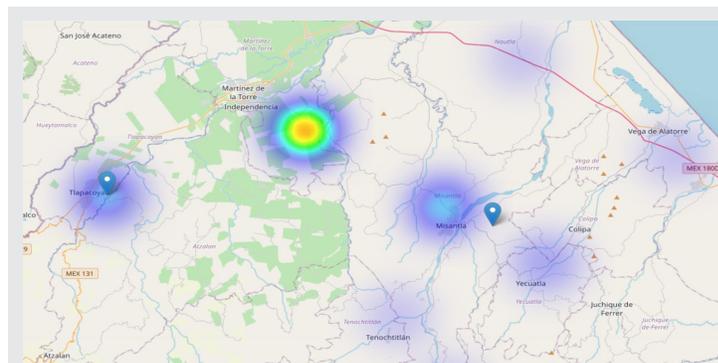


Fig. 4 Visualización de las ubicaciones más cercanas. Fuente: Elaboración propia.

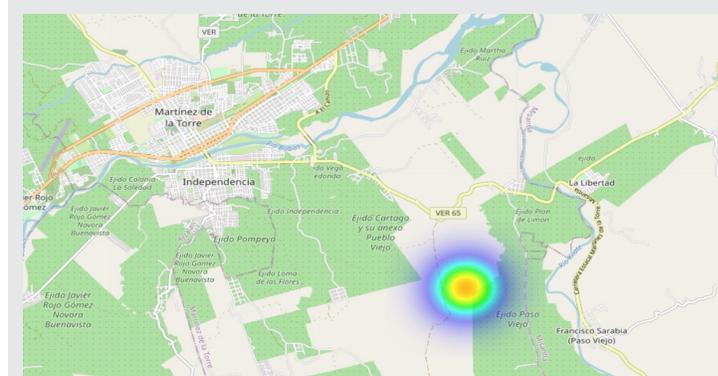


Fig. 5 Visualización de la ubicación exacta. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En el presente documento, se presenta evidencia para establecer la localización de un Centro de Transferencia de RSU. Se ha desarrollado un modelo en lenguaje de programación Python utilizando mapas de calor y centros de gravedad, el cual determina que Martínez de la Torre es la mejor opción basado en el mapa de calor. Sin embargo, el modelo de centro de gravedad estuvo diseñado para poder

encontrar hasta 4 clusters o ubicaciones óptimas. Debido a la cantidad de municipios solo se determinó 3 posibles ubicaciones con base a sus coordenadas geográficas, pesos y distancias. La selección de un sitio óptimo tiene criterios de optimización, sin embargo, también se encuentran otro tipo de variables a considerar de índole ambiental y legal.

Es decir, este tipo de proyectos deben cumplir con las especificaciones dadas en la NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, contar con la acreditación del predio para realizar convenios con gobierno del estado y ser evaluados para una Manifestación de Impacto Ambiental. Cabe recalcar que la aceptación social de este tipo de proyectos debe ser unánime.

Ha sido de vital importancia encontrar la localización idónea del CTR, ya que el manejo de la misma disminuye los costos de transporte por tonelada por día, desgaste de vehículos, combustible, entre otros. Los Centros de Transferencia no solamente disminuyen los costos, sino que también se realizan otras actividades de aprovechamiento de materiales que generan un ingreso para el mantenimiento de dicho Centro de Transferencia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. Costa, R. G. de S. M. Alfaia, & J. C. Campos (2019), "Landfill leachate treatment in Brazil - An overview,". *Journal of Environmental Management*, 232, pp. 110-116, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.006.

[2] SEMARNAT (2020), *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos 2020*. CDMX, MX: INECC.

[3] A. Fernández (2006), "Contaminación por lixiviados". *Consumer*.

[4] SEMARNAT (2003), "NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003". *Diario Oficial de la Federación, México*.

[5] T. Eshet, M. G. Baron, M. Shechter & O. Ayalon (2007), "Measuring Externalities of Waste Transfer Stations in Israel Using Hedonic Pricing". *Waste Management*, vol. 27, (5) pp. 614-625, DOI: 10.1016/j.wasman.2006.03.021.

[6] Secretaría de Medio Ambiente (2020), "Plan de Gestión Estatal de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial de la Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente". *Gobierno del estado de Veracruz*.

[7] M. Travadelo, A. Bortoluzzi, M. Maina, A. Justo & N. Micheloud (2016), "Localización de planta

de empaque asociativa de productores frutícolas del centro de Santa Fe, Argentina" *Agroalimentaria*, vol. 23, (44) pp. 123-131, ISSN: 1316-0354.

[8] Santander Universidades (2021) "Investigación cualitativa y cuantitativa: características, ventajas y limitaciones".

[9] J. G. Medina, R. Hernández (2004), "Localización de instalaciones. Un enfoque cuantitativo". *Conciencia tecnológica*. ISSN: 1405-5597.

[10] P. Curran, & T. Hobson (1987), "Landsat MSS imagery to estimate residential heat-load density". *Environment and Planning A*, volume 19, pages 1597-1610, DOI: 10.1068/a191597.

[11] S. Banchini (2019), "Los 'heatmaps' o mapas de calor en el geomarketing". *Investigación y Marketing, España*, N°.145.

[12] P. D. Cumba (2012), "Análisis de python con django frente a ruby on rails para desarrollo ágil de aplicaciones web". *Caso de práctica: Dech, Riobamba*.

[13] I. Challenger, Y. Díaz & R. A. Becerra (2014), "El lenguaje de programación Python". *Ciencias Holguín*, vol. XX, núm. 2, abril-junio, 2014, pp. 1-13. E-ISSN: 1027-2127.

[14] B. Salazar (2021), "Mapas de calor y Algoritmo de Centro de Gravedad utilizando Python" *Ingeniería Industrial Online*.