

Tipo de artículo: Artículo original

Estimación de los factores geométricos que influyen en la estabilidad de taludes para rellenos sanitarios

Estimation of the geometric factors that influence the stability of slopes for sanitary landfills

Yadira Isabel Alcívar Rosado^{1*} , <https://orcid.org/0000-0002-0939-4689>

Denny Augusto Cobos Lucio² , <https://orcid.org/0000-0003-2094-9689>

Ronald Pastor Delgado Alvia³ , <https://orcid.org/0000-0002-2669-7542>

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

² Facultad Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

³ Facultad Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

* Autor para correspondencia: alcivar-yadira8549@unesum.edu.ec

Resumen

La presente investigación de tipo cuantitativa tuvo como objetivo estimar los parámetros geométricos de los taludes para rellenos sanitarios. Se evaluaron diferentes relaciones de taludes en suelo cohesivo y no cohesivo. Se utilizaron las normas ASTM 2487, NEC-15 y los datos de un estudio de suelo realizado en Jipijapa. Se calcularon los factores de seguridad de falla crítica en el software GeoStudio y fueron verificados por el método de Fellenius manualmente. También se realizó un análisis de factor pseudo-estático en GeoStudio. Los suelos cohesivos fueron los más idóneos para el diseño de taludes de relleno sanitario ya que soportan $FS \geq 1.5$ y un FS pseudo-estático ≥ 1 . El método de las dovelas corroboró los datos de GeoStudio con un $FS 1.58 \geq 1.50$ y un error relativo de $5\% \leq 5\%$. Para el segundo caso $1.60 \geq 1.50$ un porcentaje $6\% \leq 5\%$, estando el error relativo cercano dentro del rango recomendado. Los suelos cohesivos presentaron una mayor resistencia a las variaciones sísmicas según el FS pseudo-estático con un valor ≥ 1 , confirmando su idoneidad para su uso en taludes de rellenos sanitarios. Finalmente, se elaboró una tabla con todos los suelos cohesivos y no cohesivos con sus respectivos FS y FS pseudo-estático.

Palabras clave: Taludes; parámetros; rellenos sanitarios; suelo.

Abstract

The present quantitative research aimed to estimate the geometric parameters of the slopes for sanitary landfills. Different slope relationships were evaluated in cohesive and non-cohesive soil. ASTM 2487, NEC-15 standards and data from a soil study conducted in Jipijapa were used. Critical failure safety factors were calculated in the GeoStudio software and verified by the Fellenius method manually. A pseudo-static factor analysis was also performed in GeoStudio. Cohesive soils were the most suitable for the design of landfill slopes since they support $FS \geq 1.5$ and a pseudo-static $FS \geq 1$. The voussoir method corroborated the GeoStudio data with a $FS 1.58 \geq 1.50$ and a relative error of $5\% \leq 5\%$. For the second case $1.60 \geq 1.50$ a percentage $6\% \leq 5\%$, the relative error being close to within the recommended range. The cohesive soils presented greater resistance to seismic variations according to the pseudo-static F_s with a value of ≥ 1 , confirming their suitability for use on slopes for sanitary landfills. Finally, a table was made with all the cohesive and non-cohesive soils with their respective FS and pseudo-static FS.

Keywords: Slopes; parameters; landfills; soil.

Recibido: 12/12/2020

Aceptado: 20/01/2021



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Introducción

Los rellenos sanitarios son una pieza clave para el desarrollo de planificaciones de la gestión de residuos, debido a su sencillez, bajo coste y rentabilidad, es el método de eliminación de residuos más difundido y utilizado. No obstante, a medida que pasa el tiempo, los programas de reducción y reutilización de residuos disminuirán la cantidad de desechos (Colomer-Mendoza et al., 2013).

A raíz de los riesgos para el medio ambiente y la salud que suelen ocasionar los vertederos, las naciones y organismos internacionales, han desarrollado normativas específicas para el diseño, ubicación y operación de los vertederos. Sin embargo, antes de que aplicaran las normativas, ya existían bastantes rellenos sanitarios construidos sin ningún tipo de control.

La palabra o término “relleno sanitario” se usa para describir el depósito diseñado y construido con todas las normas nacionales que sirvan para colocar los residuos sólidos. Además, en países en vías de desarrollo como el nuestro se usa el termino de manera errónea para dar nombre a cualquier botadero de basura abierto, que no fue diseñado para cumplir los estándares necesarios para llamarse “relleno sanitario” (Gharabaghi et al., 2008).

Cabe decir que lo accidentes geotécnicos de los vertederos se deben a diversas causas tales como propiedades mecánicas deficientes, heterogeneidad de residuos, sedimentación, fermentación, lixiviados, pero la principal es la excesiva altura o inclinación del talud. Es por ello por lo que en los últimos 20 años se han desarrollado investigaciones locales (Zambrano, 2018), nacionales (Toala, 2017) e internacionales en relación con los de taludes de rellenos sanitarios (Zania et al., 2008; Ering y Sivakumar, 2016; Kiersnowska et al., 2016).

Los problemas de estabilidad de taludes en los rellenos sanitarios ha sido objeto de estudio debido a su inestabilidad en muchas partes del mundo. Es por ello que Gharabaghi et al 2008 manifiesta que “un análisis de equilibrio limite convencional para calcular los factores de seguridad para la estabilidad de las pendientes laterales de un vertedero”, puede ser útil como herramienta para considerar la viabilidad de un proyecto de relleno sanitario. Sin embargo, Yu y Batlle 2011 dicen que un factor de seguridad en un análisis 3D de estabilidad de taludes es mayor que uno realizado en 2D.

Esta iniciativa nace ante la necesidad de brindar una solución a los deslizamientos de los taludes de vertederos de desechos que tanto daño han causado en otras partes del mundo (Merry et al., 2005; Koelsch et al., 2005; Zhan et al., 2008).

Por tales motivos es necesario evaluar los taludes que se ejecuten en la ciudad de Jipijapa porque se está desarrollando un estudio de ampliación para el vertedero.



En base a lo expuesto anteriormente, se hace necesario el uso de un software para el análisis de taludes. Para la presente investigación, se utilizó el software GeoStudio porque facilita el cálculo de estabilidad de taludes. Además, se basa en el método de equilibrio límite y el análisis Pseudo-estático de los taludes. También hace uso de los modelos propuestos por Fellenius, Janbú, Spencer, Bishop entre otros (GEOSLOPE, 2015).

Además, se utilizó información tomada de los estudios de suelo de la NAVFAC 1982 y de las pruebas llevadas a efecto en el laboratorio de suelo de la UNESUM, siendo estos últimos insumos del estudio de ampliación del relleno sanitarios de Jipijapa.

Por todos los motivos citados, esta investigación tiene como objetivo general estimar los parámetros geométricos de los taludes para relleno sanitarios.

Materiales y métodos

Para ejecutar los análisis se escogieron dos metodologías: el primero en el software GeoStudio con el procedimiento de Fellenius donde se estimó la estabilidad de los taludes y posteriormente su radio de falla crítico. Además, se comprobaron los resultados del software manualmente con el método de las dovelas en Excel para determinar y analizar el factor de seguridad de los taludes.

Para estimar las propiedades de los suelos, se utilizó la tabla desarrollada por la Navfac 1982. Además, se contó con la información obtenida en una investigación sobre el relleno sanitario de Jipijapa. Con ambos estudios se realizó una tabla de propiedades de suelos unificada.

Para determinar las propiedades de los suelos para el diseño sísmico, además de los datos de Navfac 1982, se utilizaron datos de los estudios de suelo realizados por Galo Baque Parrales en el año 2017 en la ciudad de Jipijapa (Galo, 2017). En el cálculo de los coeficientes Pseudo-estático, los coeficientes sísmicos se eligieron con base en la norma técnica NEC-15. Se calculó el factor de zona y el coeficiente de perfil del suelo. Dado el caso que Jipijapa-Manabí se halla en de la zona VI teniendo como Z:

$$Z = 0.50g$$

Para escoger el coeficiente de perfil según el tipo de suelo, se utilizó el criterio de varios estudios donde se dice que el suelo en Jipijapa y en la provincia de Manabí es de tipo D. Teniendo un valor de Fa:

$$F_a = 1.12$$

Después de haber determinado los coeficientes se procedió a calcular el coeficiente horizontal.

$$K_h = 0.60(amax)/g$$



Donde:

$$a_{\max} = Z \cdot F_a$$

$$a_{\max} = 0.50g \cdot 1.12$$

$$a_{\max} = 0.56g$$

$$Kh = 0.60 (a_{\max})/g$$

$$Kh = 0.60 \cdot 0.56g/g$$

$$Kh = 0.336g/g$$

El científico Terzaghi afirma que las fuerzas sísmicas se mueven sobre un eje horizontal, en consecuencia, las fuerzas verticales no se toman en cuenta en el análisis de estabilidad de taludes, en nuestro caso por fines de seguridad se tomó un valor de:

$$Kv = 0.10g/g$$

Resultados y discusión

Después de haber establecido las características de las distintas clases de suelos, se llevaron a efecto los procedimientos necesarios para determinar qué relación de taludes se pueden considerar estables, iniciando con los suelos cohesivos SM con datos de densidad mínima y con un diseño geométrico que muestra una relación de talud 6: 1.10 m.

Posteriormente, en el software GeoStudio se realizó el modelo matemático y el cálculo del “fs”, mismo que tiene programado el equilibrio límite igualando las fuerzas y los momentos de equilibrio.

Para ejecutar los cálculos se accedió desde la opción Slope/W en donde se ejecutan las metodologías para establecer el factor de seguridad. Posteriormente, se ingresa un nombre, descripción y tipos de estudios a realizar, para el presente caso el método Ordinario establecido por Fellenius.

Después de haber elegido el método se estableció la superficie de deslizamiento y se seleccionó la dirección del “círculo de falla (izquierda a derecha)”. Luego se elige la opción “círculo y radio” que sirvió para ingresar el radio crítico para el análisis. Es aconsejable mantener una distribución constante del Fs, que se establecen en el software. En la pestaña “Avanzado” se escogieron las características de las dovelas y los distintos puntos de vista para establecer la cantidad de dovelas que se analizaron, el número de iteraciones



donde se coloca 100, porque es el número de ocasiones que el software efectuó el análisis de estabilidad. Una vez delimitados los rangos permisibles para el “fs” de la falla crítica, se elige 0.001 para obtener un mejor resultado.

Luego, en la pestaña “Pagina” se delinearon las medidas ancho y alto en mm de la hoja de trabajo. A continuación, se especificaron las unidades de cálculo y la escala: escala horizontal y vertical 1:200 (Figura 1), unidades de ingeniería: métrico y unidad de fuerza: kilonewtons. A partir de ahí se referenciaron las coordenadas del talud (X,Y) y se ingresaron las propiedades mecánicas de los tipos de suelos que se analizaron (Ver tabla 1).

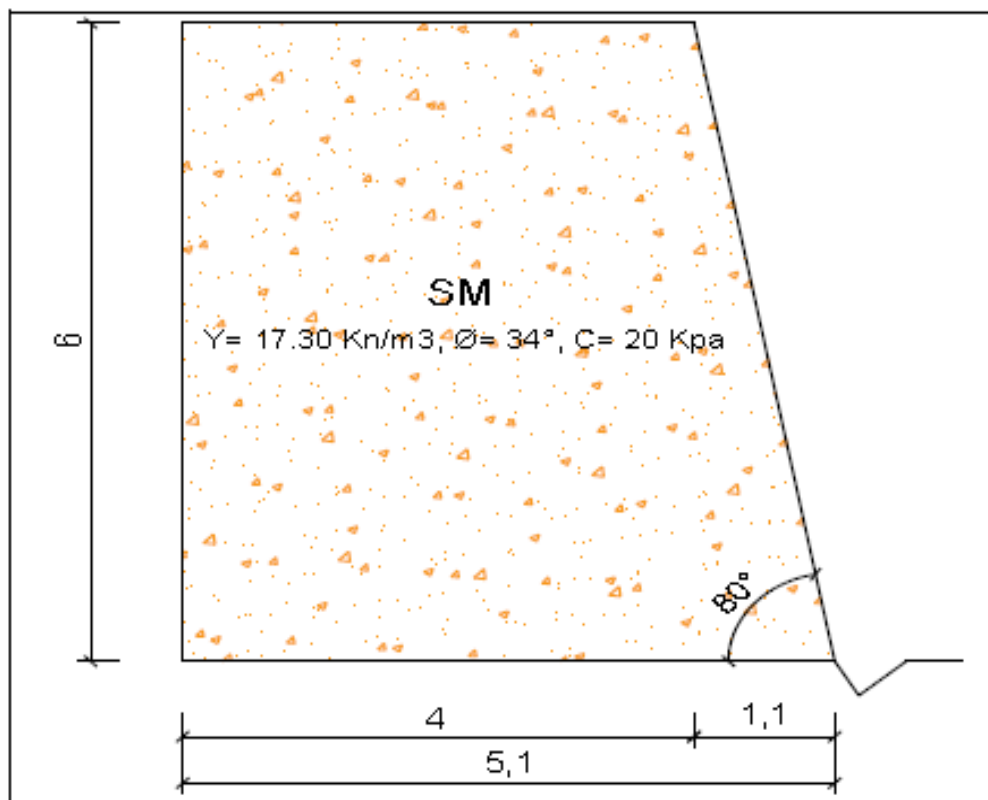


Figura 1 Geometría del talud

Tabla 1 Datos del talud a evaluar

Tipo de suelo	Densidad (Kn/m ³)	Ø (°)	Cohesión (Kpa)
---------------	-------------------------------	-------	----------------



SM	17.3	34	20
----	------	----	----

Se midieron los puntos para marcar el perímetro del talud según la base izquierda y se definieron las coordenadas X e Y, de todos los puntos del perfil del talud. (ver tabla 2)

Tabla 2: Puntos de contorno del talud.

Puntos de contorno		
Punto	Sentido X (m)	Sentido Y (m)
1	0	0
2	0	6
3	4	6
4	5.10	0

Después de haber establecido los puntos X, Y, se digitaron en el software de acuerdo con la geometría del talud. Luego, las regiones del talud se delimitaron por un polígono y el material fue asignado con sus características. Después se establecieron líneas y puntos para definir los radios de análisis. Finalmente, el cálculo se puede ejecutar en el software GeoStudio, lo que resulta “fs” de falla crítica de 1.50 estando ≥ 1.50 considerándose dicho talud firme o estable como muestra la figura 2.

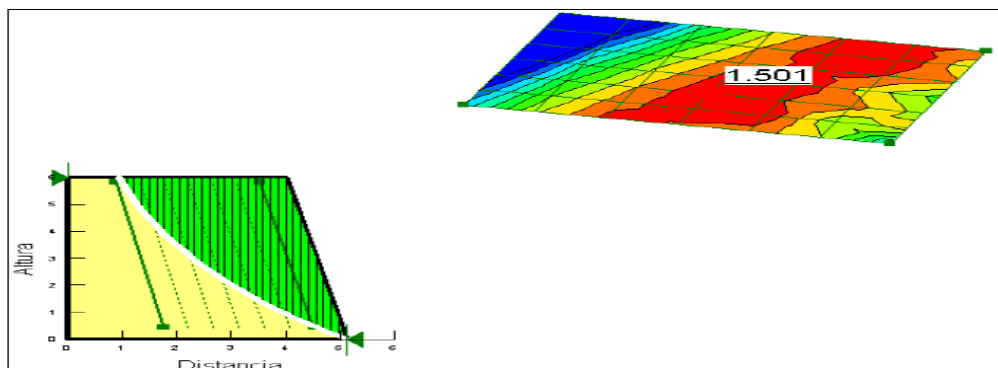


Figura 2: Cálculo del factor de seguridad.

Los cálculos realizados en GeoStudio fueron verificados, mediante el método manual de Fellenius. La estabilidad del talud se evaluó con suelo tipo SM con densidad mínima y máxima, para la densidad mínima



con una relación de talud de 6: 1.10 m. Luego de haber realizado los cálculos correspondientes para determinar el factor de seguridad por el método manual, se logró lo siguiente:

$$F_s = \frac{299.31}{188.46} = 1.58 \geq 1.5$$

El talud propuesto con relación de talud 6:1.10 m, reporta un coeficiente de seguridad de 1.58. Por tanto, siendo mayor a 1.5 el talud se considera estable. Luego de haber evaluado la densidad mínima, se procedió a evaluar la densidad máxima con que la que se pueden ejecutar taludes con suelo tipo SM. En la verificación de los cálculos realizados se evaluó la relación 6:1.77 m

$$F_s = \frac{344.12}{214.33} = 1.60 \geq 1.5$$

El talud propuesto con relación de altura 6:1.77 m, nos dio un factor de seguridad de 1.60, considerándolo estable.

Para el cálculo del error relativo porcentual se utilizaron los siguientes valores:

Valor real caso 1 (Fs “SM”): 1.58

Valor experimental caso 1 (Fs “SM”): 1.50

$$Er = \frac{1.58 - 1.50}{1.58} * 100 = 5\% \leq 5\% \text{ ok}$$

Valor real caso 2 (Fs “SM”):1.60

Valor experimental caso 2 (Fs “SM”): 1.50

$$Er = \frac{1.60 - 1.50}{1.60} * 100 = 6\% \leq 5\%$$

Finalmente se ejecutó el análisis pseudo-estático y se ingresaron los coeficientes vertical y horizontal en el software y se evaluó con tipo de suelo SM. A continuación, se verificó el factor de seguridad pseudo-estático obteniendo la figura 3.



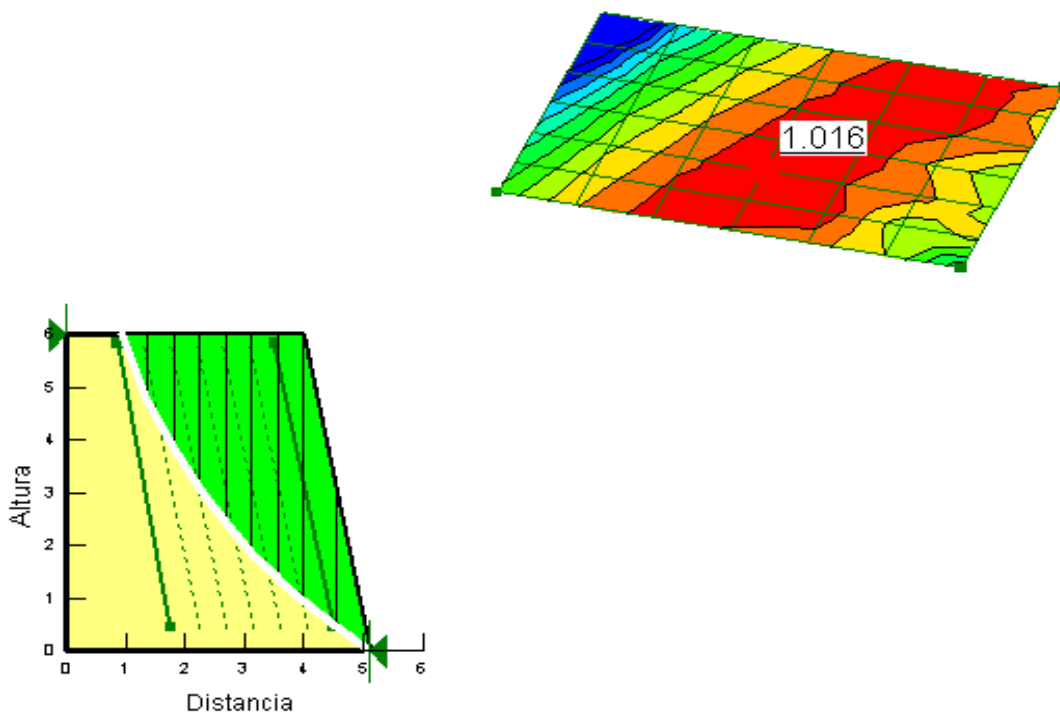


Figura 3: Cálculo del factor de seguridad pseudo-estático.

Determinados los coeficientes se procede a tabularlos para facilitar su análisis. En las tablas 3 y 4 se detallan las características y valores, según el tipo de suelo se puede observar que muestran diferentes valores para las dimensiones de los taludes, así como la relación y los factores de seguridad. En la figura 4 se aprecia una comparación entre los fs, fs pseudo-estático calculados y los que indica la norma.

Tabla 3 Relación de taludes y factores de seguridad en suelos cohesivos.

Tipo de suelo	Densidad (Kn/m3)	Ángulo de fricción ϕ°	Cohesión saturada (kpa)	Suelos Cohesivos			
				Dimensión de los taludes (m/m)	Relación para evaluación preliminar de talud (m/m)	Factor de seguridad	Factor de seguridad Pseudo-estático



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

SM	Mínima	17,30	34	20	6: 1,10	1:5,45	1,501	1,02
	Máxima	19,60			6: 1,77	1:3,39	1,502	1,03
SC	Mínima	16,5	31	11	3,90:1,35	1:2,89	1,506	1,00
	Máxima	19,6			3,65:1,60	1:2,28	1,508	1,00
ML	Mínima	14,9	32	11	4,30:1,40	1:3,07	1,501	1,02
	Máxima	18,9			3,80:1,60	1:2,37	1,502	1,01
CL	Mínima	14,9	28	22	7:1,50	1:4,66	1,503	1,14
	Máxima	18,9			5,50:1,15	1:4,78	1,502	1,06
OL	Mínima	12,6	27	13	5,10:1,40	1:3,64	1,506	1,00
	Máxima	15,7			4:1,00	1:4,00	1,505	1,00
MH	Mínima	11,00	25	20	8:1,25	1:6,40	1,50	1,09
	Máxima	14,90			6:1,30	1:4,62	1,503	1,04
CH	Mínima	11,80	19	11	4:1,10	1:3,64	1,505	1,04
	Máxima	16,50			3,50:1,85	1:1,89	1,503	1,02
OH	Mínima	10,5	18	22	9,80:1,75	1:5,60	1,507	1,00
	Máxima	15,70			6,05:1,45	1:4,17	1,50	1,00

Tabla 4: Relación de taludes y factores de seguridad en suelos no cohesivos.

Suelos No cohesivos							
Tipo de suelo	Densidad (Kn/m3)	Ángulo de fricción Ø°	Cohesión saturada (kpa)	Dimensión de los taludes (m/m)	Relación para evaluación de talud (m/m)	Factor de seguridad	Factor de seguridad Pseudo-estático



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)**

GW	Mínima	19,60	38	0	3,25:6	1:0,54	1,502	0.807
	Máxima	21,20			3,25:6	1:0,54	1,502	0.806
GP	Mínima	18,10	37	0	3:5,85	1:0,51	1,505	0.800
	Máxima	19,60			3,10:6	1:0,52	1,504	0.801
GM	Mínima	18,90	34	0	3:6,50	1:0,46	1,501	0.779
	Máxima	21,20			3:6,50	1:0,46	1,501	0.769
GC	Mínima	18,10	31	0	2,93:7	1:0,42	1,500	0.760
	Máxima	20,40			2,93:7	1:0,42	1,500	0.761
SW	Mínima	17,30	38	0	3,70:7	1:0,53	1,508	0.810
	Máxima	20,40			3,70:7	1:0,53	1,508	0.805
SP	Mínima	15,70	37	0	3,60:7	1:0,51	1,510	0.803
	Máxima	18,90			3,60:7	1:0,51	1,510	0.800



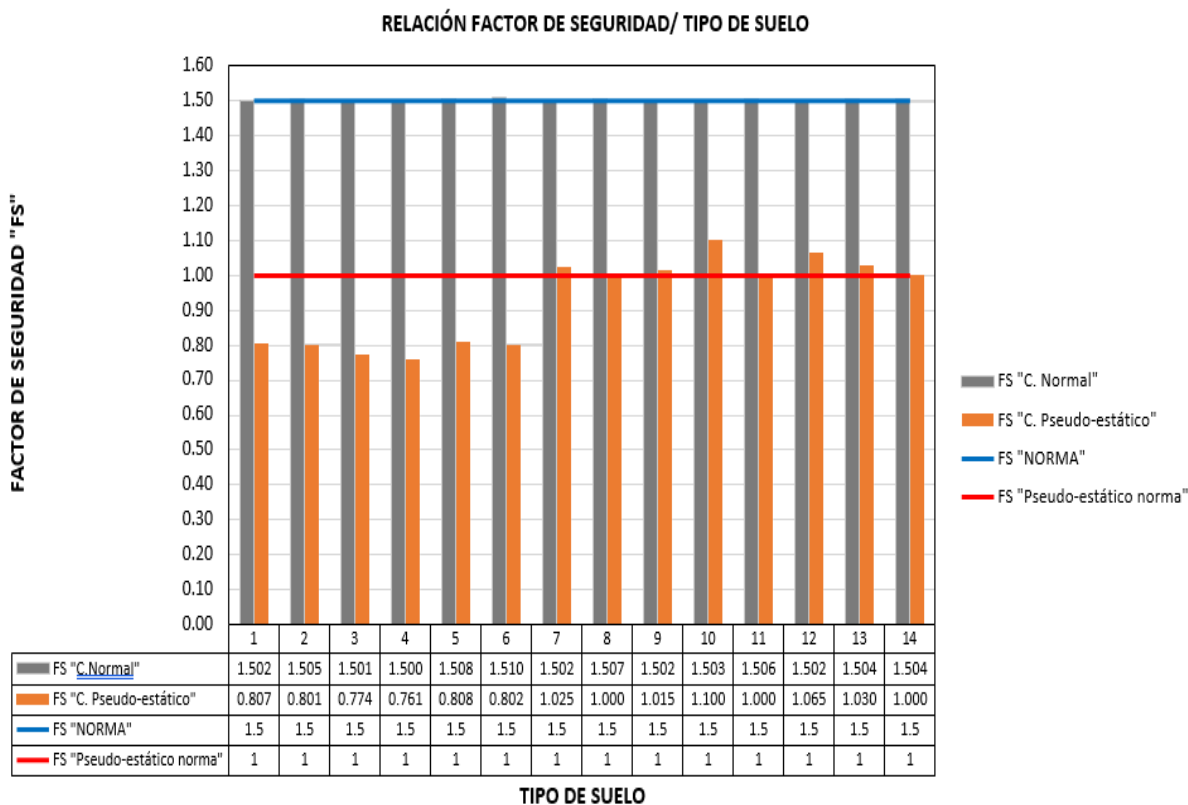


Figura 4: Comparación entre los factores de seguridad en base al tipo de suelo.

Conclusiones

Los métodos más viables y de rápida aplicación para la determinación del factor de seguridad al volcamiento en masa de los taludes es el propuesto por Fellenius, que se lo realiza con aplicación manual o computacional.

Los suelos óptimos para la formación de taludes incluido los de rellenos sanitarios son los cohesivos porque se desempeñan con los factores de seguridad de $FS \geq 1.5$ y un FS pseudo-estático ≥ 1 .

El método de las dovelas validó los resultados obtenidos en el software GeoStudio con un valor de $1.58 \geq 1.50$ y un error relativo de $5\% \leq 5\%$ dentro del primer caso. Para el segundo caso $1.60 \geq 1.50$ un porcentaje $6\% \leq 5\%$, estando el error relativo cercano al mínimo recomendado.

Los suelos cohesivos son los más resistente a los efectos sísmicos según el análisis pseudo-estático ya que está dentro de lo que establece la norma NEC-15 con un $F_s \geq 1$, siendo estos óptimos en taludes de excavación o de área para vertederos o rellenos sanitarios.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Conflictos de intereses

El autor de la presente investigación declara que no posee conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Conceptualización: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio, Ronald Pastor Delgado Alvia.

Curación de datos: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio, Ronald Pastor Delgado Alvia.

Análisis formal: Yadira Isabel Alcívar Rosado.

Investigación: Yadira Isabel Alcívar, Rosado Ronald Pastor Delgado Alvia.

Metodología: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio.

Software: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio.

Supervisión: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio.

Validación: Yadira Isabel Alcívar Rosado.

Visualización: Yadira Isabel Alcívar Rosado.

Redacción – borrador original: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio, Ronald Pastor Delgado Alvia.

Redacción – revisión y edición: Yadira Isabel Alcívar Rosado, Denny Augusto Cobos Lucio, Ronald Pastor Delgado Alvia.

Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento externa, ha sido financiada por el autor.

Referencias

Colomer Mendoza, F. J., Esteban Altabella, J., García Darás, F., & Gallardo Izquierdo, A. (2013). Influence of the design on slope stability in solid waste landfills.

GALO, B. P. (2017). Caracterización físico - mecánicas del suelo para cimentación en edificaciones de categoría baja, sector By Pass – John F. Kennedy, ciudad de Jipijapa. Jipijapa: Universidad Estatal del Sur de Manabí.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

- Gharabaghi, B., Singh, M. K., Inkratas, C., Fleming, I. R., & McBean, E. (2008). Comparison of slope stability in two Brazilian municipal landfills. *Waste management*, 28(9), 1509-1517.
- Zambrano Dueñas, Y. R. (2018). Diseño de la cimentación y barrera de fondo para el relleno sanitario del cantón Portoviejo (Bachelor's thesis, JIPIJAPA-UNESUM).
- Toala, F. M., Loor, M., Pérez, L., Carrión, P., Álvarez, A., Reyes, B., & Herrera, G. (2017). Estabilidad de taludes para un diseño de un relleno sanitario manual para una población de 5000 habitantes. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 103-110.
- Zania, V., Tsompanakis, Y., & Psarropoulos, P. N. (2008). Seismic distress and slope instability of municipal solid waste landfills. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(2), 312-340.
- Ering, P., & Sivakumar Babu, G. L. (2016). Slope stability and deformation analysis of Bangalore MSW landfills using constitutive model. *International Journal of Geomechanics*, 16(4), 04015092.
- Kiersnowska, A., Fabianowski, W., Kawalec, J., Koda, E., & Osiński, P. (2016). Stability analysis of the old sanitary landfill slope reinforced with HDPE geogrid after a long time of service.
- Yu, L., & Batlle, F. (2011). A hybrid method for quasi-three-dimensional slope stability analysis in a municipal solid waste landfill. *Waste management*, 31(12), 2484-2496.
- Merry, S. M., Kavazanjian Jr, E., & Fritz, W. U. (2005). Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure. *Journal of Performance of constructed Facilities*, 19(2), 100-107.
- Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., & Damanhuri, E. (2005, October). Stability of landfills-The Bandung dumpsite disaster. In *Proceedings Sardinia*.
- Zhan, T. L., Chen, Y. M., & Ling, W. A. (2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering Geology*, 97(3-4), 97-111.
- GEOSLOPE. (2015). Slope stability analysis GeoStudio. Canada: GeoSlope International.

