



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 51 • 2024 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagaj.org.ar/>
Bogado G.O., Reinert, H.O., Francisca F.M. y Schvezov C.E.
Aptitud de suelos tropicales compactados para la construcción de barreras aislantes en rellenos sanitarios en Misiones Argentina
e014, <https://doi.org/10.59069/24225703e014>

Aptitud de suelos tropicales compactados para la construcción de barreras aislantes en rellenos sanitarios en Misiones Argentina

Suitability of compacted tropical soils for the construction of landfill liners in Misiones Argentina

 Gustavo Orlando Bogado^{1*}   Hugo Orlando Reinert² 
 Franco Matías Francisca³   Carlos Enrique Schvezov⁴ 

*Contacto

Recibido: 25 de agosto de 2023 • Aceptado: 23 de febrero de 2024 • Publicado: 1 de marzo de 2024

Resumen

Las barreras de fondo y laterales de los rellenos sanitarios tienen como principal objetivo evitar la migración de líquidos provenientes del interior hacia el exterior. Para la utilización de estas barreras es necesario considerar diferentes propiedades. En muchos casos, con el objetivo de disminuir los costos, se utiliza suelos locales en reemplazo de algunos materiales industrializados. Sin embargo, debido a la gran variabilidad en las propiedades hidromecánicas del suelo, se requiere que el diseño considere las condiciones locales de cada sitio. Las propiedades analizadas son la conductividad hidráulica, resistencia a la compresión simple y el potencial de hinchamiento. En este artículo se considera la posibilidad de la utilización de los suelos residuales compactados teniendo en la variabilidad de los parámetros de compactación y se determina los entornos óptimos para cumplimentar especificaciones internacionales para la conductividad hidráulica de barreras geológicas para rellenos sanitarios.

Palabras clave: suelos compactados, compactación, conductividad hidráulica, barrera de fondos.

Abstract

The main objective of bottom and side barriers in sanitary landfills is to prevent the migration of leachates from the interior to the exterior. These liners should be designed by taking into account different properties. In many cases, to reduce costs, local soils are used as construction materials

1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Misiones. Argentina.

2 Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Misiones. Argentina.

3 Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

4 Instituto de Materiales de Misiones. Posadas. Argentina.

for this purpose. However, due to the great variability in the hydromechanical properties of soils, the design of lines should consider the local conditions of each location. The properties analyzed are hydraulic conductivity, Unconfined Compressive Strength and swelling potential. This article analyzes the possibility of using compacted residual soils and evaluates the variability of compaction parameters to determine the optimal construction conditions to meet international specifications for geological barriers for landfills.

Keywords: soils compacted, landfill, compaction, hydraulic conductivity.

INTRODUCCIÓN

Las barreras de fondo de los rellenos sanitarios generalmente son construidas con suelos naturales arcillosos de alta resistencia y baja conductividad hidráulica. Es común la utilización de bentonita, que en algunos lugares es difícil encontrar naturalmente, debido a esto, cobra principal interés el estudio de materiales locales. El principal objetivo de las barreras en rellenos sanitarios es que se evite la migración de compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en el lixiviado de los residuos sólidos urbanos para prevenir la contaminación de suelos y aguas subterráneas (Musso et al., 2012; Francisca y Glatstein, 2010). La conductividad hidráulica adoptada para una barrera de fondo en un relleno sanitario debe ser inferior a $K=10^{-7}$ cm/s. (Daniel y Benson, 1990; Daniel, 1993; Benson y Trast, 1995; Sharma y Reddy, 2004; Guney et al., 2008; Osunibi y Nwaiwu, 2005, Albright et al., 2006; Kang y Shackelford, 2010; Francisca y Glatstein, 2010; Guney et al., 2014; Jayawardhana et al., 2016; Öncü y Bilsel; Zhan et al., 2022). Además, las barreras hidráulicas deben satisfacer otros requisitos como durabilidad, resistencia mecánica, entre otros, (Daniel y Benson, 1990; Sharma y Reddy, 2004; Francisca y Mozejko, 2022).

Los suelos compactados en muchos casos cumplen con las especificaciones mencionadas anteriormente, sin embargo, es necesario realizar estudios para la determinación de zonas óptimas en la curva Proctor para posteriormente realizar el control en campo (Daniel y Benson, 1990; Sharma y Reddy, 2004; Osunibi y Nwaiwu, 2006). En particular porque la mineralogía de la fracción fina del suelo influye significativamente en la conductividad hidráulica alcanzada (Montoro y Francisca; 2010; Musso et al., 2013).

La gran variabilidad de las propiedades geotécnicas de los suelos residuales o tropicales es debido a su formación. La formación de los suelos está caracterizada por procesos de alteración fisicoquímicos, biológicos de su estructura y de los minerales primarios presentes en la roca madre. (Siviero et al., 2023). La meteorización depende del clima, topografía y condiciones de drenaje (Ayete, 1996; Fookes 1997; Singh, 2005; Wesley, 2009). La gran cantidad de rocas existentes (rocas ígneas, rocas sedimentarias y metamórficas) y la composición particular en un lugar determinado resultan en una amplia variedad de suelos residuales que se desarrollan como consecuencia de la meteorización de las rocas que produce la alteración de los minerales (Blight y Leong, 2012). Los suelos tropicales en general tienen una permeabilidad sus-

tancialmente más alta que los suelos sedimentarios (Wesley, 2010). Esto es debido a sus características microestructurales, tales como, la agregación de las partículas de arcilla en grupos y la capacidad de los enlaces entre las partículas para crear una estructura muy abierta. El remoldeo y compactación de suelos residuales tiende a destruir esta estructura y generalmente resulta en una disminución significativa en la permeabilidad. Cabe señalar también que la permeabilidad generalmente no se correlaciona bien con el tamaño de partícula como ocurre en limos y arenas y en algunas arcillas sedimentarias (Wesley, 2010). Esto indicaría que es posible lograr la conductividad hidráulica para barreras por medio de la compactación de los suelos residuales. Taha y Kabir (2005) indican que los suelos residuales tropicales de la Península de Malasia son aptos para su uso en rellenos sanitarios y se logran las conductividades hidráulicas requeridas, en este caso los mismos provienen de la meteorización del granito.

Osinubi y Nwaiwu (2006) determinaron zonas de compactación óptima de suelos residuales compactados para ser utilizados en barreras, precedente de Nigeria, los autores, determinaron zonas aceptables en el plano de compactación teniendo en cuenta como parámetro de diseño la conductividad hidráulica, deformaciones por contracción volumétrica y resistencia a la compresión no confinada. Los investigadores indican que los suelos lateríticos pueden ser utilizados para construir revestimientos y cubiertas para rellenos sanitarios. Sin embargo, el control de compactación común no es adecuado para garantizar la calidad de construcción deseada de revestimientos y cubiertas de suelo laterítico. Un criterio basado en el control de densidad-contenido de agua y conductividad hidráulica (enfoque moderno) ofrecerá un modelo de barrera eficiente con respecto a la normativa internacional. Sin embargo, un plan para asegurar la calidad de la construcción para sistemas de barrera basados en suelos lateríticos debe incluir el desarrollo de una zona de compactación general basada en una baja conductividad hidráulica, una deformación por contracción volumétrica compatible que evite la fisuración de la barrera y una resistencia al corte adecuado (Daniel y Benson, 1990).

En este trabajo se analiza el diseño de barreras de fondo para rellenos sanitarios, teniendo en cuenta distintas propiedades geotécnicas de suelos residuales para definir la zona aceptable en de compactación de los mismos. El propósito de este estudio es evaluar la aptitud de los suelos tropicales en Misiones, Argentina, para el considerarlos como material de construcción para las barreras de fondo y laterales en re-

llos sanitarios, considerando, como fluido permeante al agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos compactados

Los suelos analizados son del tipo residual y corresponden a la meteorización del basalto, los suelos residuales fueron ampliamente estudiados en (Bogado et al., 2019; Francisca y Bogado, 2019).

En cuanto a la geología de la región, la Provincia de Misiones está ubicada en el borde oeste de la Cuenca del Paraná. De acuerdo con el informe geológico realizado por C.A.R.T.A (1964) (Compañía Argentina de Relevamientos To-

pográficos y Aerofotogramétricos) sobre rocas aflorantes, los tipos litológicos presentes en la región están reunidos en: areniscas continentales, rocas efusivas básicas, terrenos residuales, sedimentos aluviales antiguos y recientes. La escala temporal de este conjunto abarca desde el límite Jurásico superior-Cretácico inferior hasta llegar a los términos aluviales recientes. Posteriormente al relevamiento de C.A.R.T.A (1964), las areniscas continentales y las efusivas básicas (basaltos) fueron denominadas por Gentili y Rimoldi (1979) como Formación Cruzú Cuatiá, la cual a su vez está integrada por dos miembros: uno de naturaleza magmática (basaltos) para el que se propuso la denominación Posadas y otro de naturaleza clástica (areniscas) interestratificado con el primero y nombrado como Miembro Solari.

Los suelos residuales poseen como mineral principal es

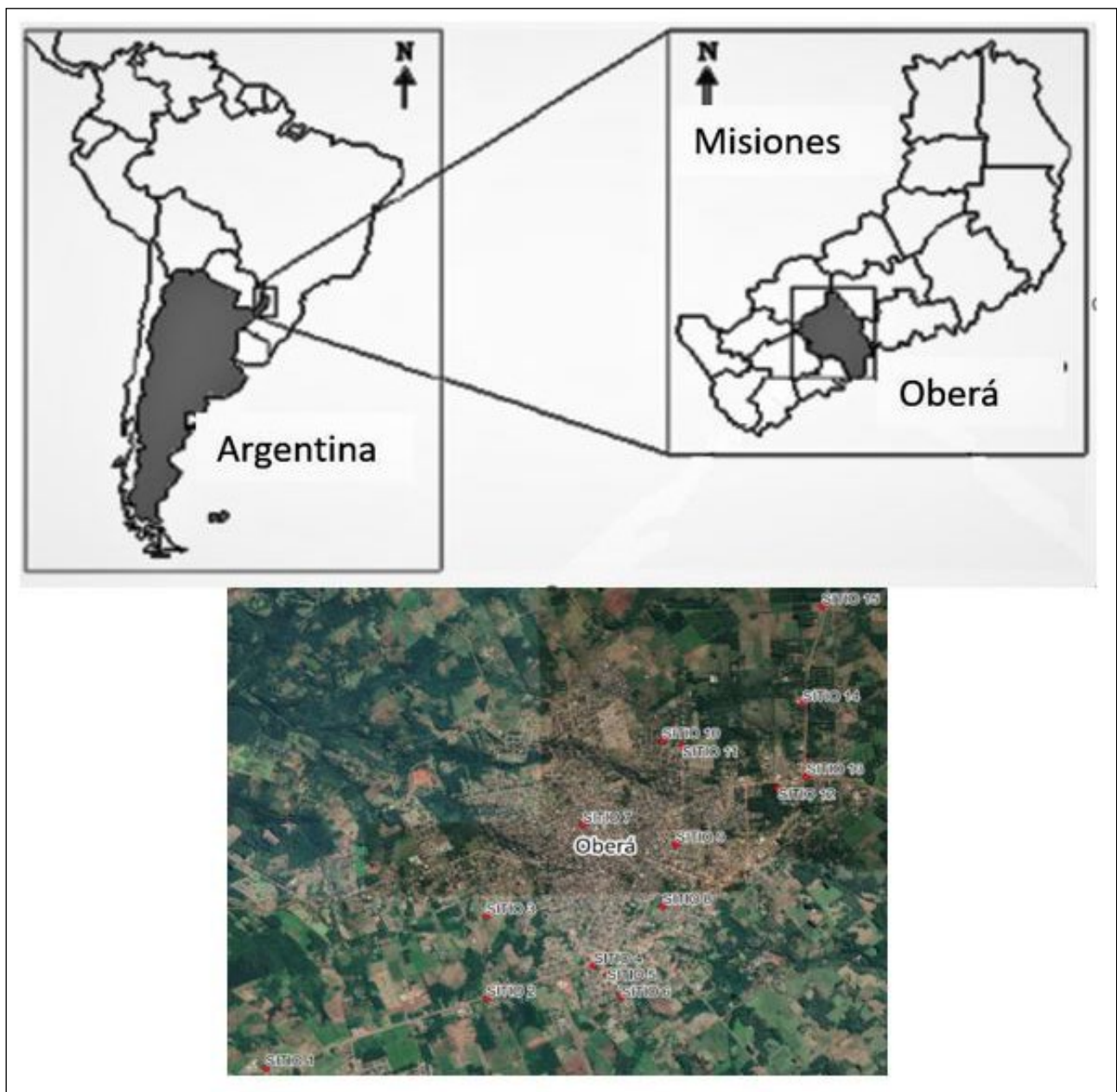


Figura 1. Ubicación de los sitios ensayados.

Tabla 1. Propiedades geotécnicas de identificación de los suelos residuales estudiados.

Propiedades	unidad	Media	desviación
Limite liquido	[%]	55,30	5,62
Limite plástico	[%]	36,80	4,13
IP (índice de plasticidad)	[%]	18,09	4,41
%pasa tamiz 200	[%]	89,00	0,05

la caolinita. Las muestras analizadas provienen de distintos puntos de la Ciudad de Oberá de la Provincia de Misiones, en Argentina (Figura 1). Las profundidades de la extracción de las muestras varían de 1 a 5 metros, en los 20 puntos seleccionados. En la Tabla 1 se indican los valores estadísticos de las principales propiedades físicas de las muestras analizadas, los suelos se clasifican según el sistema unificado de suelos como ML-CL. (L: Limos Inorgánicos de baja plasticidad. CL: Arcillas inorgánicas de baja plasticidad)

Descripción de los experimentos

Se realizaron ensayos de compactación mediante los lineamientos de la norma IRAM 10511 (1972) y ASTM D698 (2015). Para determinar la zona aceptable se analizaron tres propiedades en las muestras de suelo, la conductividad hidráulica, resistencia al corte y el potencial de hinchamiento. A continuación, se detalla cada procedimiento.

Ensayo Proctor: una vez realizada la toma de muestra se realizó la compactación. Los suelos fueron secados a temperatura ambiente y posteriormente se realizó la rutina de ensayo. Esta norma específica dos tipos de energía TIPO I (estándar) TIPO III (modificada), habiéndose también realizado ensayos con energía reducida (50% de la energía del ensayo Proctor estándar).

Conductividad hidráulica vertical: Los ensayos de conductividad hidráulica se realizaron mediante la norma (ASTM D5856, 2015), se realizaron mediciones a largo plazo hasta que se produzca la estabilidad de conductividad hidráulica. Las muestras fueron moldeadas, según la humedad y densidad obtenida en la curva de compactación, en algunos casos la humedad se diferencia en valores no mayores al 2%.

Ensayos de hinchamiento: Se realizaron siguiendo los lineamientos de la (Norma VN-E6, 1984), ensayando muestras de suelo a humedad óptima y densidad seca máxima determinada en el ensayo de compactación Proctor tipo I y III.

Resistencia a la compresión simple: Se realizaron ensayos en la cámara triaxial (ASTM D7181,2020) en muestras de suelo compactadas con la humedad óptima y densidad seca máxima correspondiente al ensayo Proctor tipo I y III, lo que permitió obtener parámetros resistentes en tensiones totales a la condición de ensayo (humedad y densidad seca). Los puntos obtenidos de cada ensayo se grafican el espacio densidad seca- humedad γ_d -w de la curva proctor, posterior-

mente, se obtuvieron las zonas óptimas de compactación para cada propiedad estudiada, siguiendo los lineamientos de (Daniel y Benson, 1991; Osinubi y Nwaiwu, 2006). finalmente se obtuvo la zona óptima para todas las propiedades, los valores mínimos para que se logre la verificación de los parámetros son los especificados a continuación:

- Conductividad hidráulica $k < 1 \times 10^{-7}$ cm/s.
- Resistencia a la compresión simple $RCS > 200$ kPa.
- Hinchamiento $u < 3\%$.

En cada grafico se indica la humedad (w) y densidad (γ_d) como aceptable o no de acuerdo a los valores indicados anteriormente.

RESULTADOS

Suelos compactados

En la Figura 2 se grafican las curvas de compactación selectas, donde se observan los porcentajes óptimos para los tres tipos de compactación utilizados, Tipo I, Tipo III y compactación reducida. Se indica claramente la disminución de la humedad óptima y aumento de la densidad seca, con el aumento de la energía de compactación. En la Figura 2 también se grafica el Sr (Grado de saturación)

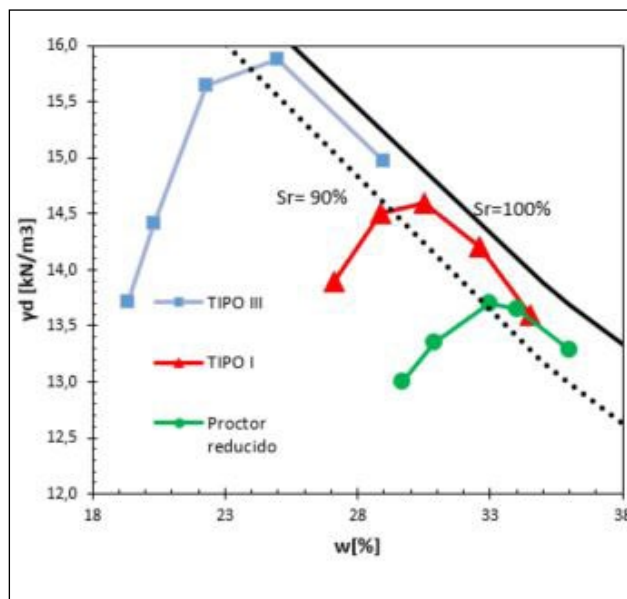


Figura 2. Ensayos de compactación – curva de compactación. (Se incluyen las curvas de saturación al 90% y 100%)

Conductividad hidráulica

La Figura 3 muestra en los resultados de γ_d -w del ensayo de compactación para todas las muestras ensayadas, donde además se han agrupado las muestras con conductividad hidráulica $k < 1 \times 10^{-7}$ cm/s. Los resultados obtenidos muestran valores aptos para las muestras compactadas desde el óptimo a la rama húmeda, mientras que en las muestras

compactadas en la rama seca por lo general no se obtuvo el valor de conductividad hidráulica recomendado (los valores resultaron próximos a 1×10^{-5} cm/s). Estos resultados indican que la estructura formada en la rama seca es de poros más grandes y cementaciones débiles para humedades menores al 24 %, no se obtuvieron valores de conductividad hidráulica adecuados. Además, se grafica la zona de valores óptimos en el espacio γ_d -w, para la conductividad hidráulica. Con respecto a la compactación, las muestras compactadas con la energía tipo III mostraron conductividades hidráulicas inferiores a $k=1 \times 10^{-7}$ cm/s, lo que demuestra que el suelo ensayado en condiciones de compactación adecuadas permitiría satisfacer los criterios de baja conductividad hidráulica requerido para las barreras de rellenos sanitarios.

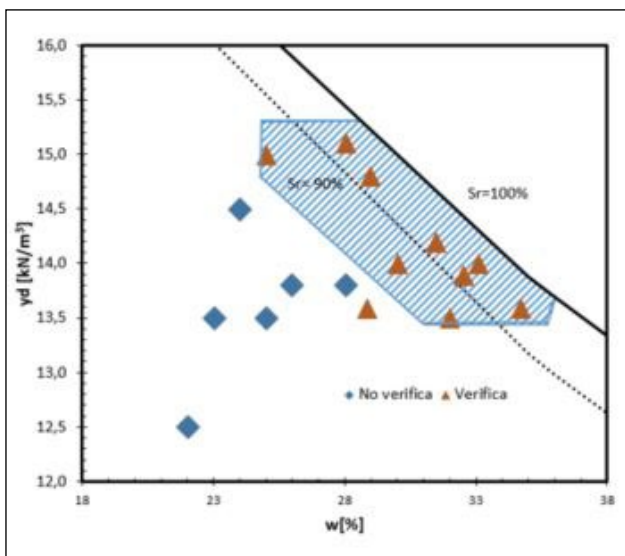


Figura 3. Identificación de la zona óptima de compactación donde la conductividad hidráulica del suelo es inferior a 1×10^{-7} cm/s

Resistencia a la compresión simple

En la Figura 4 se presentan en el espacio γ_d -w los resultados de las muestras que fueron ensayadas para determinar la resistencia a la compresión simple (RCS). En esta misma figura se indican el sector donde las muestras ensayadas arrojaron valores de $RCS > 200$ kPa, lo cual se corresponde, en general, con muestras con densidades secas mayores a $13,5$ kN/m³.

Para humedades mayores al 29 % la región que agrupa las muestras que desarrollaron la resistencia antes indicada, muestra que la densidad seca límite es función de la humedad de compactación, lo que se justifica en la necesidad de tener una densidad mayor para lograr la resistencia requerida y la menor resistencia que en general los suelos finos compactados desarrollan en la rama húmeda. Los resultados obtenidos indicarían que la compactación tipo III es la más adecuada para tener valores aptos.

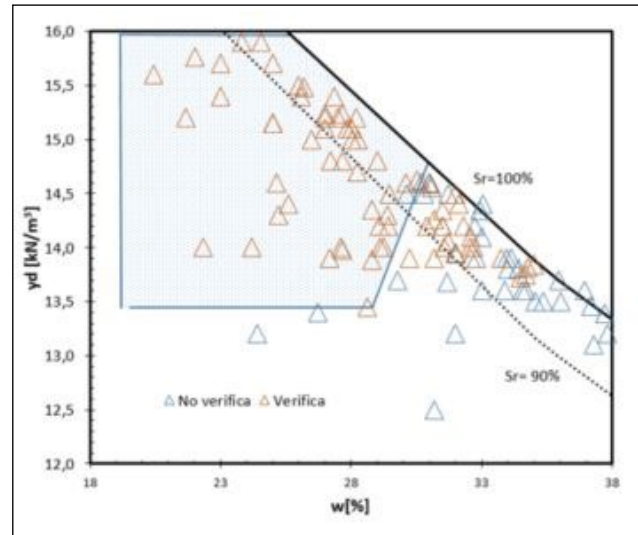


Figura 4. Identificación de la zona óptima de compactación donde la RCS es superior a 200 kPa.

Potencial de hinchamiento.

Los ensayos de hinchamiento indicaron la baja posibilidad a que se tengan valores de hinchamientos mayores al 3% (Figura 5). En general las arcillas ensayadas desarrollaron un bajo hinchamiento en todas las condiciones de ensayo. El bajo potencial de hinchamiento se debe principalmente a que los minerales presentes en los suelos lateríticos ensayados no son del tipo motmorillonitas y expansivos. En general el principal mineral arcilloso de estos suelos es la caolinita de acuerdo con resultados previamente publicados en (Bogado et al., 2019).

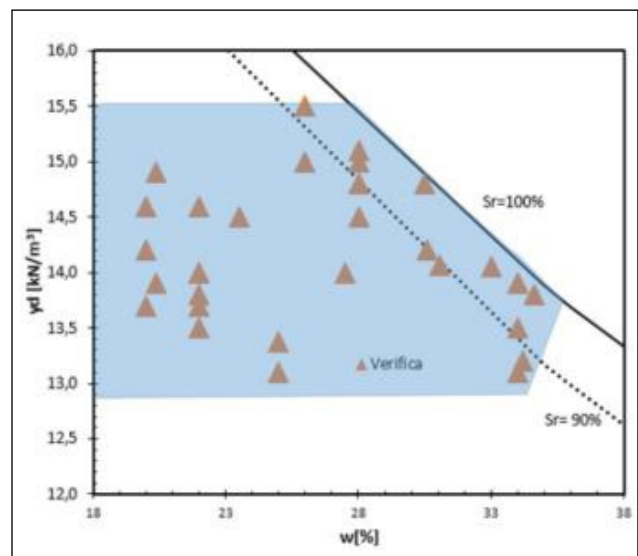


Figura 5. Identificación de la zona óptima de compactación donde el hinchamiento es inferior al 3%.

Análisis de los resultados

La Figura 6 presenta una superposición de las zonas identificadas como aptas para la compactación según los

criterios de conductividad hidráulica (Figura 3), resistencia a la compresión simple (Figura 4) e hinchamiento (Figura 5). A partir de esta superposición se pudo determinar la zona óptima en los cuales la compactación cumple con los requisitos mínimos necesarios para que el material pueda ser considerado apto para la construcción de barreras en rellenos sanitarios. Básicamente este criterio se obtiene para los suelos compactados con la energía del ensayo tipo III (energía modificada). La zona abarca un intervalo de humedad desde (25% al 31%) y densidades secas mayores a 13,9 kN/m³. Estos resultados indicarían que la compactación está delimitada para un pequeño rango, dado las necesidades de los proyectos de barreras de rellenos sanitarios y la necesidad de realizar un buen control para que la barrera funcione correctamente.

Es importante destacar que estudios similares realizados con otros suelos residuales, arrojaron rangos de humedad óptimos de compactación diferentes Osinubi y Nwaiwu (2005, 2006) y humedades menores en el entorno del (12,5 al 16.0 %). Estos resultados demuestran la importancia de realizar estudios específicos en cada emplazamiento con el objeto de poder determinar a partir de información técnica-científica la aptitud de los suelos del lugar para la construcción de barreras y así poder lograr proyectos sustentables aprovechando los suelos locales.

En este caso teniendo en cuenta la cantidad de sitios, se cuenta evidencia que a escala local los suelos residuales de Misiones son aptos para el uso en rellenos sanitarios, teniendo en cuenta los parámetros especificados como, conductividad hidráulica, hinchamiento y resistencia a la compresión simple.

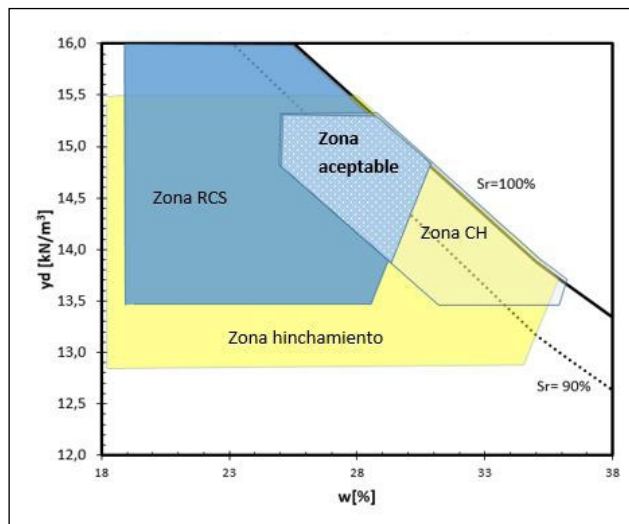


Figura 6. Identificación de la zona óptima de compactación de acuerdo con la superposición de criterios de conductividad hidráulica, resistencia al corte e hinchamiento.

Conclusiones

En este artículo se analiza la posibilidad de utilización de los suelos lateríticos compactados del Norte de Argenti-

na para la construcción de barreras en rellenos sanitarios. A partir de los resultados podemos obtener las siguientes conclusiones.

- Los suelos residuales poseen bajo índice de hinchamiento, por lo tanto, los cambios de volúmenes son mínimos menores al 3%.
- La conductividad hidráulica, posee valores menores a la especificada internacionalmente para el rango de humedades superiores al óptimo.
- En cuanto a la resistencia a la compresión simple, muestras con densidades secas mayores a 13,5 kN/m³ y humedades menores a la óptima.
- Fue posible determinar la zona óptima de compactación donde se satisfacen los requerimientos recomendados. Los resultados obtenidos indicaron que la zona delimitada concuerda con las densidades secas y humedades obtenidas por el ensayo Proctor tipo III (energía modificada), siempre y cuando la humedad a compactar se encuentre dentro del rango 25 a 31 % de humedad.

Limitaciones y futuras investigaciones

En este trabajo se evaluó en primera instancia la resistencia a la compresión simple, el hinchamiento y la conductividad hidráulica. Para futuras investigaciones se trabajará en este entorno para evaluar de dispersión y/o interacción con diferentes fluidos provenientes de los rellenos sanitarios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET, Universidad Nacional de Misiones por los fondos asignados al proyecto 16/I1359-PI y 16/I1387-PI.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y diseño del estudio. La preparación y análisis de datos fueron realizados por Gustavo Bogado y Hugo Reinert. El primer borrador fue escrito por Gustavo Bogado. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe un conflicto de intereses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Abichou, T., Tyler, S.

- W., y Rock, S. A. (2006). Field performance of three compacted clay landfill covers. *Vadose Zone Journal*, 5(4), 1157-1171. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0134>
- ASTM, D698-(2015) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))
- ASTM, D5856-(2015) Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter.
- ASTM D7181-(2020) Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.
- Ayetey, J. K., Frempong, E. M. (1996). Engineering soils mapping in the tropical terrain: The Ghana experience. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (54), 33-43. <https://doi.org/10.1007/BF02600652>
- Benson, C. H., Trast, J. M. (1995). Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. *Clays and clay minerals*, 43(6), 669-681. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1995.0430603>
- Blight, G. E., y Leong, E. C. (Eds.). (2012). *Mechanics of residual soils*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12014>
- Bogado, G. O., Reinert, H. O., y Francisca, F. M. (2019). Geotechnical properties of residual soils from the North-east of Argentina. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(2), 112-121. <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1326682>
- CARTA (1964), Informe Geológico de la Provincia de Misiones, Compañía Argentina Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos.
- Daniel, D. E., Benson, C. H. (1990). Water content-density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12), 1811-1830. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:12\(1811\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1811))
- Daniel, D. E. (1993). *Clay liners*. In *Geotechnical practice for waste disposal* (pp. 137-163). Springer, Boston, MA.
- Daniel, D. E., y Wu, Y. K. (1993). Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 223-237. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:2\(223\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(223))
- Fookes, P. G. (Ed.). (1997). Tropical residual soils: A Geological Society Engineering Group working party revised report. *Geological Society of London*. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1990.023.001.01>
- Francisca, F. M., y Glatstein, D. A. (2010). Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate. *Applied Clay Science*, 49(3), 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.05.003>
- Francisca, F. M., y Bogado, G. O. (2019). Weathering effect on the small strains elastic properties of a residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 4031-4041. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00891-4>
- Francisca, F. M., Mozejko, C. A. (2022). Hydraulic and mechanical behavior of compacted silts modified by waste steel slag. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 32, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100323>
- Gentili, C. Rimoldi, H., (1979). Mesopotamia. II Simposio de Geología Regional Argentina. *Academia Nacional de Ciencias en Córdoba*, Vol. I: pp 185-222.
- Günaydin, O. J. E. G. (2009). Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks. *Environmental Geology*, 57, 203-215. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1300-6>
- Guney, Y., Cetin, B., Aydilek, A. H., Tanyu, B. F., y Koparal, S. (2014). Utilization of sepiolite materials as a bottom liner material in solid waste landfills. *Waste Management*, 34(1), 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.008>
- Jayawardhana, Y., Kumarathilaka, P., Herath, I., y Vithanage, M. (2016). Municipal solid waste biochar for prevention of pollution from landfill leachate. In *Environmental materials and waste* (pp. 117-148). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00006-8>
- Kang, J. B., y Shackelford, C. D. (2010). Membrane behavior of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10), 1368-1382. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000358](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000358)
- Mitchell, J. K., y Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Vol. 3, p. USA). New York: John Wiley & Sons.
- Montoro, M. A., y Francisca, F. M. (2010). Soil permeability controlled by particle-fluid interaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(6), 851-864. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9348-y>
- Musso, T. B., Francisca, F. M., Parolo, M. E., y Roehl, K. E. (2013). Potential use of calcareous mudstones in low hydraulic conductivity earthen barriers for environmental applications. *Environmental technology*, 34(17), 2465-2476. <https://doi.org/10.1080/09593099.2013.828888>

doi.org/10.1080/09593330.2013.772660

- Musso, T. B., Pettinari, G. R., y Francisca, F. M. (2012). Aptitud de dos sedimentitas rojas cretácicas del departamento Confluencia, Neuquén, para ser usadas como barreras aislantes en rellenos sanitarios. *Revista de Geología aplicada a la Ingeniería y el Medio Ambiente*, (29)
- Öncü, Ş., Bilsel, H. (2017). Effect of zeolite utilization on volume change and strength properties of expansive soil as landfill barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(9), 1320-1330. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0483>
- Osinubi, K. J., y Nwaiwu, C. M. (2006). Design of compacted lateritic soil liners and covers. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(2), 203-213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(203))
- Osinubi, K. J., y Nwaiwu, C. M. (2005). Hydraulic conductivity of compacted lateritic soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(8), 1034-1041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:8\(1034\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:8(1034))
- Sharma, H. D., y Reddy, K. R. (2004). *Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*. John Wiley & Sons.
- Siviero, N. R., Schvezov, C.E., Bogado G.O. (2023) Materiales autóctonos de la provincia de Misiones. Primera Edición. ISBN: 978-987-88-9394-5
- Taha, M. R., y Kabir, M. H. (2005). Tropical residual soil as compacted soil liners. *Environmental Geology*, 47(3), 375-381. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0475-7>
- VN-E6-1984 Determinación del valor soporte e hinchamiento de suelos. *Normas vialidad Nacional Argentina*.
- Watabe, Y., Yamada, K., y Saitoh, K. (2011). Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite. *Géotechnique*, 61(3), 211-219. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.087>
- Wesley, L. D. (2009). *Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-54905-6
- Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical engineering in residual soils*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470943113>
- Zhan, L. T., Ni, J. Q., Feng, S., Kong, L. G., y Feng, T. (2022). Saturated hydraulic conductivity of compacted steel slag-bentonite mixtures—A potential hydraulic barrier material of landfill cover. *Waste Management*, 144, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.004>