

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Cuerpo Editorial		I
Comisión Directiva		II
Síntesis de zeolita na-p en solución alcalina a partir de una toba vítrea parcialmente zeolitizada	<i>Locati, F - Marfil, S. - Lescano, L. - Madsen, L. - Cravero, F - Castillo, L. - Barbosa, S. - Maiza, P.</i>	1
Los terremotos, la profundidad del hipocentro y la energía liberada. La influencia en las construcciones	<i>Pizarro, Nery F. - Tornello, Miguel E. - Gallucci, Ángel Rubén</i>	9
Correlación entre parámetros de compactación y propiedades geotécnicas en suelos tropicales misioneros	<i>Bogado, Gustavo O. - Pintos, Nicolás A. - Reinert, Hugo O. - Bressan, Daniel A.</i>	19
Instrucciones para autores		27
Formulario de suscripción o compra		31



Correlación entre parámetros de compactación y propiedades geotécnicas en suelos tropicales misioneros

Correlation between compaction parameters and geotechnical properties for tropical soils

Bogado, Gustavo O. ¹✉ - Pintos, Nicolás A. ¹ - Reinert, Hugo O. ¹ - Bressan, Daniel A. ¹

Recibido: 26 de octubre de 2017 • Aceptado: 30 de diciembre de 2017

Resumen

La compactación mecánica es el método utilizado con mayor frecuencia para la mejora de las propiedades de suelo principalmente en suelos del tipo arcilloso. En condiciones de laboratorio, los parámetros de compactación se determinan mediante ensayos Proctor. Sin embargo, el tiempo consumido en la realización del mismo es grande y limitado en etapas previas al proyecto, por lo cual, es razonable obtener correlaciones para el diseño preliminar entre los parámetros de compactación y parámetros geotécnicos. En este estudio, se describen y examinan modelos empíricos para determinar cuáles de las propiedades índices poseen un ajuste considerable con las características de compactación para suelos residuales provenientes de la Provincia de Misiones. Se recopilaron diferentes modelos de estimación de los parámetros de compactación. A partir de 60 ensayos de laboratorios ejecutados se analizó su variabilidad y se obtuvieron diferentes combinaciones de propiedades índices, por medio de análisis de regresión lineal múltiple. Para concluir este trabajo se propone una correlación lineal entre L_L (límite líquido.), L_P (límite plástico) incorporando PT_{200} (pasante tamiz N°200).

Palabras clave: *suelos residuales compactados, compactación, propiedades físicas, correlación.*

Abstract

Mechanical compaction is the method most frequently used for the improvement of soil properties mainly in soils of the clay type. Under laboratory conditions, compaction parameters are determined by Proctor tests. However, the time consumed in the realization of the same is expensive and limited in preliminary projects, therefore, it is reasonable to obtain correlations for the preliminary design between the parameters of compaction and geotechnical parameters. In this study, empirical models are described and examined to determine which of the index properties have a considerable adjustment with compaction characteristics for residual soils. Different models of compaction parameter estimation were compiled. From 60 laboratory tests performed, their variability was analyzed and different combinations of index properties were obtained by means of multiple linear regression analysis. To conclude this work is proposed a linear correlation between L_L , L_P and incorporating (PT_{200}).

Keywords: *compactated residual soil, compaction, physical properties, correlation.*

1. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de Oberá, Universidad Nacional de Misiones, Argentina.

✉ gustavobogado777@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La compactación produce la densificación y mejoramiento de las propiedades del suelo y es ampliamente utilizada en muchas aplicaciones de ingeniería geotécnica para mejorar la resistencia al corte, consolidación y permeabilidad (Mitchell y Soga, 2005). La estructura alcanzada por el suelo compactado dependerá de la humedad de compactación, es decir, si se compacta por la rama seca (humedad menor a la óptima) o rama húmeda. Existen estudios publicados en la literatura donde se correlacionan los parámetros de compactación de los suelos con las propiedades geotécnicas (Al-Khafaji, 1993; Blotz et al., 1998; Gurtug y Sridharan, 2002; Günaydin, 2009; Sridharan y Nagaraj, 2005; Ören, 2014; Najjaral et al., 2015). La Tabla 1 compila los diferentes parámetros geotécnicos utilizados por varios autores como variables independientes para estimar la humedad óptima y densidad seca máxima, entre los cuales se encuentran; límite líquido (L_L), límite plástico (L_P), energía de compactación (E_c) y grado de Saturación (S_r). Al-Khafaji (1993) investigó las características de compactación de 88 muestras locales de Irán e informó que los parámetros de compactación se correlacionaron con un alto ajuste con el límite de líquido (L_L) y el contenido de arcilla (c). Günaydin (2009) realizó estimaciones de parámetros de compactación mediante análisis de regresión simple en 126 muestras, en los cuales determinó diferentes coeficientes de correlación (r^2). Cuando se utilizó el L_L como parámetro independiente de estimación, los coeficientes r^2 fueron 0,82 y 0,73 para ω_{opt} y γ_{dmax} , respectivamente. En cambio, el mismo autor obtuvo coeficientes menores ($r^2 < 0.3$) cuando

utilizó el L_P como parámetro independiente. Günaydin (2009) también realizó análisis de regresión múltiple en las muestras y concluyó que las mejores predicciones podrían ser hechas cuando los L_L y L_P son variables independientes. Todas estas ecuaciones muestran que los parámetros de compactación pueden ser estimados usando diferentes parámetros geotécnicos como variables independientes. Sin embargo, no se reportan correlaciones para el caso de suelos residuales. Haciendo hincapié en lo mencionado anteriormente, se realizaron ensayos de compactación para elaborar un registro de las propiedades estudiadas, con el fin de proporcionar información base sobre el comportamiento de los suelos de la provincia y estimar posibles correlación entre los parámetros de compactación y las propiedades geotécnicas.

En el presente trabajo se propone una correlación lineal multivariable incorporando como variable independiente el pasante tamiz N° 200 (PT_{200}) a las variables comúnmente utilizadas (límites de Atterberg), el cual es una rutina rápida de ejecutar y se encuentra directamente relacionado con el contenido de finos. El objetivo del presente estudio es establecer correlaciones empíricas entre las características de compactación y parámetros índices de los suelos residuales presentes en el norte de Argentina. En primer lugar, se analiza la variabilidad de las propiedades geotécnicas para luego correlacionar las diferentes propiedades. Los resultados del presente trabajo son de gran utilidad para estimar valores de humedad y peso unitario de compactación en la región, principalmente para estudios previos al proyecto, en los cuales existen limitaciones económicas para la caracterización de los materiales.

Tabla 1. Resumen de correlaciones (x indican el parámetro utilizado como variable).

Referencia	γ_d [kN/m ³]	ω_{opt} [%]	L_L [%]	L_P [%]	E_c [kNm]	S_r [%]
Al-Khafaji (1993)	x	x	x	x	-	-
Pandian et al.(1997)	-	x	x	-	-	x
Sridharan y Nagaraj (2005)	x	x	-	x	-	-
Gunayin (2009)	x	x	x	x	-	-
Blotz et al. (1998)	x	x	x	-	x	-
Nagaraj et al.(2015)	x	x	-	x	-	-

MARCO GEOLÓGICO

La geología de la región central de Misiones fue descrita de manera exhaustiva por Gentili y Rimoldi (1979). Una descripción detallada de la estratigrafía típica de la región central-sur de la provincia de Misiones en la cual se obtuvieron las muestras para la ejecución de los ensayos, con su respectiva descripción litológica se encuentra en Bogado et al. (2017). Particularmente, en la provincia de Misiones la formación Serras Geral representa la unidad expuesta más antigua de Misiones; sus afloramientos se distribuyen ampliamente en todo el territorio de la Provincia, incluye dos miembros uno de naturaleza magmático (miembro Posadas) y otro de origen sedimentario clástico (miembro Solari). La formación Apóstoles, está formada por arena fina de color rojizo en que los niveles inferiores asumen una coloración roja, variando su granulometría en profundidad disminuyendo el tamaño del grano hacia la superficie asumiendo una mayor representatividad la fracción limosa hasta pasar a constituir limos arenosos y arcillas en superficie (Gentili y Rimoldi, 1979).

Los suelos utilizados en este estudio pertenecen a la formación Apóstoles, cuyas profundidades de extracción rondan 2-6 metros, también denominado laterítico, según la relación sílice/ sesquióxidos mayor a 2 (Fookes, 1997; Bogado et al., 2017). Los mismos resultan del proceso de lixiviación de sílice-álcali y la acumulación de hierro hidratado y óxidos de aluminio denominados sesquióxidos (Fookes, 1997). La formación de los suelos residuales está caracterizada por procesos de alteración físico-químicos y biológicos de su estructura y de los minerales primarios presentes en la roca madre. La meteorización física actúa cambiando el material parental sin producir cambios en las propiedades químicas o mineralógicas, entre algunos procesos físicos se encuentran; la descompresión de juntas, expansiones y contracciones térmicas, crecimientos de cristales y actividad orgánica (Mitchell y Soga, 2005). La meteorización química es mucho más compleja e implica cambios químicos en el contenido mineral de la roca madre causada por la acción de filtraciones de agua, oxígeno y dióxido de carbono (Wesley, 2009).

Los cambios físicos y químicos producen un material altamente complejo y con una gran dispersión. Las variaciones de las propiedades geotécnicas fueron reportadas en (Bogado *et al*, 2017) y los minerales característicos presentes en los suelos residuales en (Bogado y Francisca, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los estudios realizados

En este trabajo se realizaron 60 ensayos de compactación

con su respectiva caracterización de parámetros índices. Los suelos fueron obtenidos de la zona centro y sur de la provincia de Misiones, como lo indica la Figura 1. Los ensayos de compactación fueron realizados siguiendo los lineamientos de la Norma (IRAM 10511, 1972) para Proctor tipo I y III. Además, se efectuaron ensayos de límites de Atterberg (IRAM 10501, 2007), y pasante tamiz N° 200 (IRAM 10507, 1986). En la Figura 2 se muestran imágenes de los suelos empleados en este estudio, como así también algunas probetas compactadas y retiradas del molde de compactación.



Figura 1. Ubicación geográfica de muestras obtenidas.

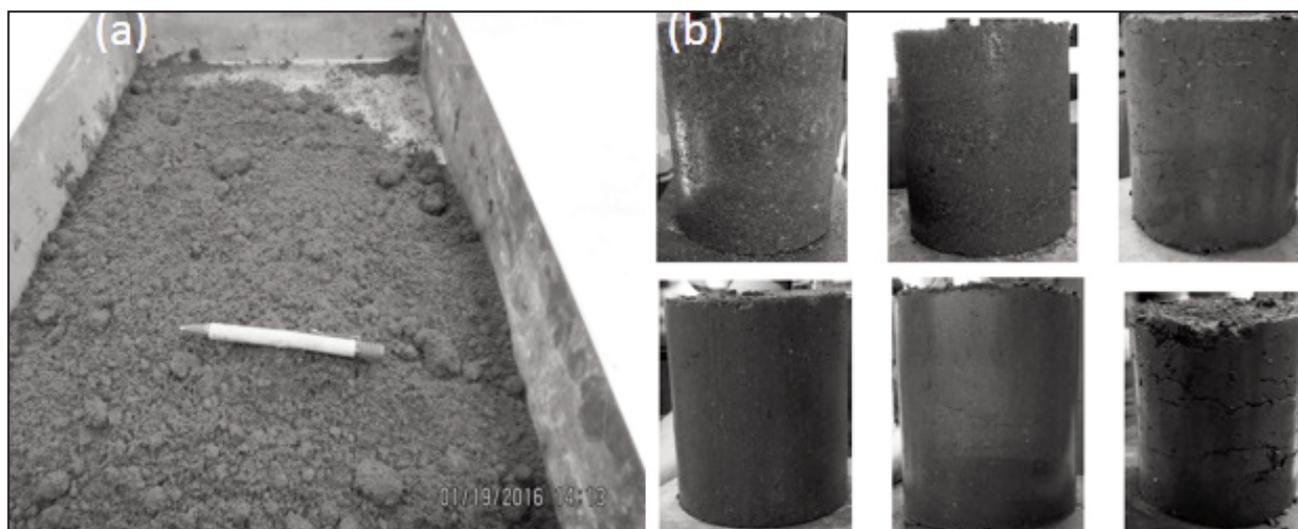


Figura 2. Fotografías de suelo laterítico. a) suelo humedecido. b) muestras compactadas.

Variabilidad y análisis estadístico de datos

Los suelos residuales presentan gran variabilidad espacial en las propiedades físicas ya que estas dependen del clima, topografía, grado de meteorización y la naturaleza de la roca madre (Rahardjo et al., 2004). Las propiedades geotécnicas varían espacialmente tanto en dirección horizontal como en profundidad producto del proceso de meteorización. Una manera de obtener el rango de variación de propiedades es por medio de la ecuación 1 y 2, calculando la media (SD_w) y la covarianza (COV) de los suelos como lo indica (Phoon y Kulhawy, 1999a). Valores de covarianza elevados $COV > 70$ indican una gran dispersión en los resultados.

$$SD_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w(z_i))^2} \quad (1)$$

$$COV_w = \frac{SD_w}{t} \quad (2)$$

Donde: SD_w = desviación estándar de la propiedad inherente, n = número de datos, $W(z_i)$ = fluctuación de la propiedad con la profundidad z_i , t = valor medio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad de las propiedades y distribuciones probabilísticas

La Tabla 2 muestra los valores estadísticos calculados para los resultados de laboratorio obtenidos. Los valores medios de humedad óptima para suelos residuales compactados $\omega_{op} = 28.49\%$ y el peso unitario seco $\gamma_{dmax} = 14.80 \text{ kN/m}^3$ para energía Proctor estándar (Tipo I). En el caso del Proctor (tipo III), $\omega_{op} = 24.77\%$ y $\gamma_{dmax} = 15.70 \text{ kN/m}^3$.

Harr (1977) realizó un estudio sobre las variaciones típicas de los coeficientes de variación COV, el autor detalla que el límite líquido posee una variación, $COV_{LL} = 10-20\%$, límite plástico, $COV_{LP} = 10-20\%$ e índice de plasticidad, $COV_{IP} = 20-30\%$. Los resultados obtenidos se encuentran dentro de la misma variación, por lo tanto, los parámetros medidos son factibles de utilizarse para realizar un análisis de correlación. Por otro

lado, Francisca et al. (2008) relacionaron el tamaño muestral (N) y el coeficiente de variación (COV) para distintos valores del índice de precisión p (relación entre el intervalo de confianza superior e inferior), de acuerdo con esta relación la cantidad de mediciones utilizadas en este trabajo (60), muestran un valor de precisión razonable.

La Figura 3 muestra los histogramas para el límite líquido y plástico, humedad óptima y peso unitario máximo, además, en la respectiva figura se grafica el peso unitario probabilístico acumulado. En todas las propiedades, los histogramas se ajustan a una distribución del tipo Normal, con parámetros de media y variancias indicados en el gráfico.

Correlación entre parámetros de compactación y límites de consistencia (modelo literatura)

La Figura 4 muestra los resultados para la humedad óptima y la densidad seca máxima calculados a partir de las correlaciones recopiladas de la literatura con los datos propios de laboratorios de los suelos lateríticos de Misiones. En ambos casos es posible notar la gran dispersión que las estimaciones dado que las mismas fueron obtenidas para otros suelos de diferentes formaciones y en algunos casos específicos como Al-Khafali (1993) para suelos aluvionales. Los mejores ajustes obtenidos fueron mediante la ecuación de Nagaraj et al., (2015) la cual relaciona los parámetros de compactación con el límite plástico.

ANÁLISIS Y DISCUSIONES

Modelo propuesto para suelos residuales

Considerando la gran dispersión de los resultados obtenidos mediante los diferentes modelos recopilados en la literatura, para este estudio se considera la implementación de un análisis de regresión lineal múltiple utilizando como variable independiente L_L , L_p y PT_{200} . En la Tabla 3 se resumen 15 ecuaciones con su respectivo coeficiente de correlación ajustado. Los valores de coeficiente de correlación resultaron $r^2 > 0.30$ para todas las ecuaciones. Es posible notar valores de $r^2 > 0.41$ para las ecuaciones en las que son variables independientes el L_L y L_p . Por otro lado las ecuaciones en la que se incorporaron el parámetro PT_{200} indican fuertes correlaciones, $r^2 > 0.45$ tanto para el Proctor Tipo I como para el Tipo III.

Tabla 2. Resumen de las propiedades estadísticas (*Proctor tipo I, **Proctor tipo III).

Propiedad	Unidad	Cantidad	Media	Desviación	COV[%]
L_L	[%]	30	55.30	5.62	9
L_p	[%]	30	36.80	4.13	10
IP	[%]	30	18.09	4.41	24
PT_{200}	[%]	30	89.00	0.05	6
ω_{opt}^*	[%]	60	28.49	2.08	7
γ_{dmax}^*	[kN/m ³]	60	14.80	0.70	5
ω_{opt}^{**}	[%]	60	24.77	3.53	14
γ_{dmax}^{**}	[kN/m ³]	60	15.70	0.80	5

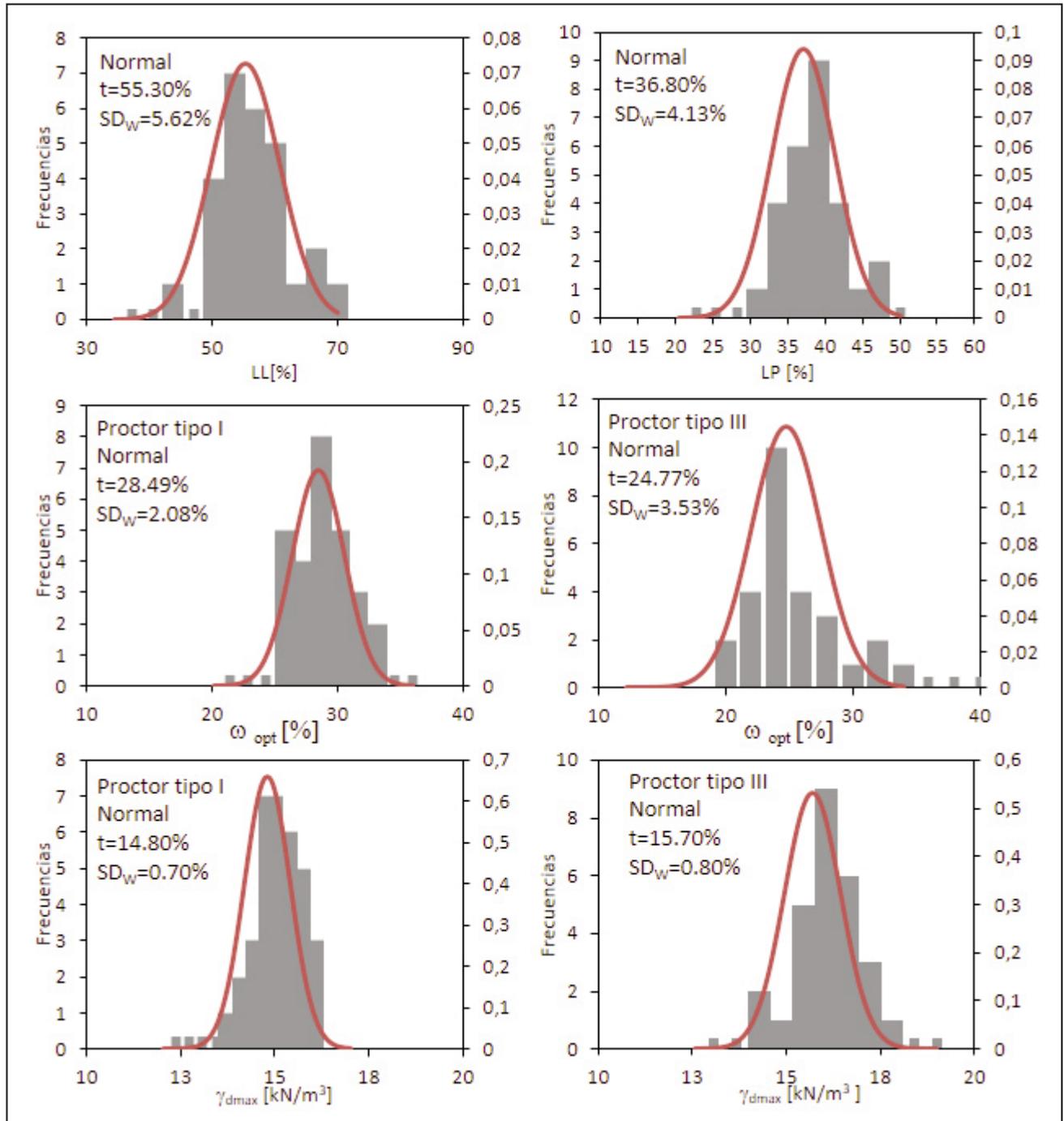


Figura 3. Histograma y distribución estadística.

En la Figuras 6 se grafican los datos medidos y los modelos de correlaciones propuestos. Principalmente se aprecia un ajuste razonable de los modelos propuestos con los datos observados, para los rangos de variación que posee γ_{dmax} (14-18 kN/m^3) y ω_{opt} (16- 35 %).

CONCLUSIONES

En este trabajo se correlacionaron parámetros de compactación de suelos residuales compactados proveniente de la Provincia de Misiones con las propiedades índices. En primer lugar se realizó una revisión actualizada de diferentes correlaciones en la literatura. Considerando que con dichas correlaciones no se obtuvo una correlación satisfactoria, se optó por

el uso de un análisis de regresión lineal múltiple a los resultados. A partir del análisis es posible afirmar las siguientes conclusiones:

- Las correlaciones recopiladas en la Tabla 1 no se pueden extrapolar a los suelos residuales de la provincia de Misiones dado la compleja génesis que posee los mismos.
- El análisis de correlación y regresión lineal dieron como mejor resultado las ecuaciones en las cuales se utiliza como variable independiente (L_L , L_p , PT_{200}), dado que las mismas poseen coeficientes de correlación (t^2) mayores. Esta correlación es muy factible dado que el PT_{200} es una rutina rápida de ejecutar y se encuentra directamente relacionado con el contenido de finos.

Tabla 3. Ecuaciones de análisis de regresión lineal múltiple (*Proctor tipo I, **Proctor tipo III)

Modelo	Ecuación	r ²
M1	$\gamma_{dmax} = 16.903 + 0.033 L_L - 0.11 L_P + 0.004 PT_{200}^*$	0.45
M2	$\gamma_{dmax} = 17.152 + 0.033 L_L - 0.10 L_P^*$	0.55
M3	$\gamma_{dmax} = 16.734 - 0.0325 L_L^*$	0.44
M4	$\gamma_{dmax} = 17.702 - 0.074 L_P^*$	0.52
M5	$\gamma_{dmax} = 20.747 + 0.0157 L_L - 0.0518 L_P - 0.0433 PT_{200}^{**}$	0.40
M6	$\gamma_{dmax} = 17.84 + 0.0156 L_L - 0.0769 L_P^{**}$	0.60
M7	$\gamma_{dmax} = 17.542 - 0.03135 L_L^{**}$	0.24
M8	$\gamma_{dmax} = 18.09 - 0.061 L_P^{**}$	0.32
M9	$\omega_{opt} = 15.533 - 0.103 L_L + 0.2732 L_P + 0.0092 PT_{200}^*$	0.53
M10	$\omega_{opt} = 21.681 - 0.102 L_L + 0.326 L_P^*$	0.49
M11	$\omega_{opt} = 22.944 - 0.097 L_L^*$	0.35
M12	$\omega_{opt} = 19.99 - 0.221 L_P^*$	0.46
M13	$\omega_{opt} = -17.134 - 0.086 L_L + 0.161 L_P + 0.455 PT_{200}^{**}$	0.74
M14	$\omega_{opt} = 13.37 - 0.0845 L_L + 0.425 L_P^{**}$	0.41
M15	$\omega_{opt} = 15.015 - 0.175 L_L^{**}$	0.40
M16	$\omega_{opt} = 11.97 - 0.394 L_P^{**}$	0.38

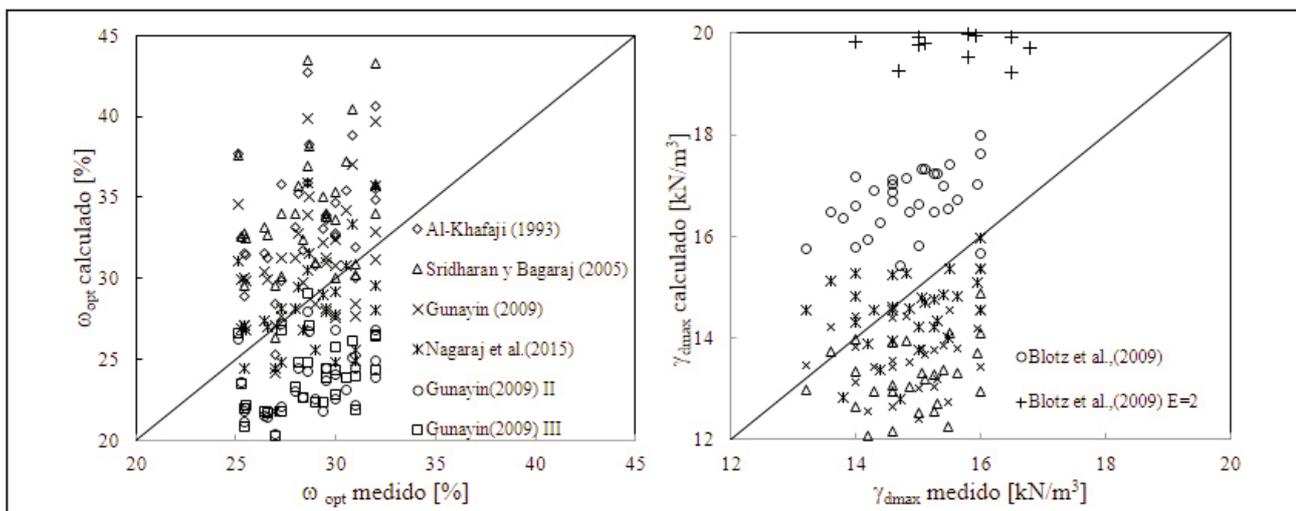


Figura 4. Relación entre; a) γ_{dmax} medido y γ_{dmax} calculado mediante correlaciones de la literatura. b) ω_{opt} medido y ω_{opt} calculado mediante correlaciones de la literatura.

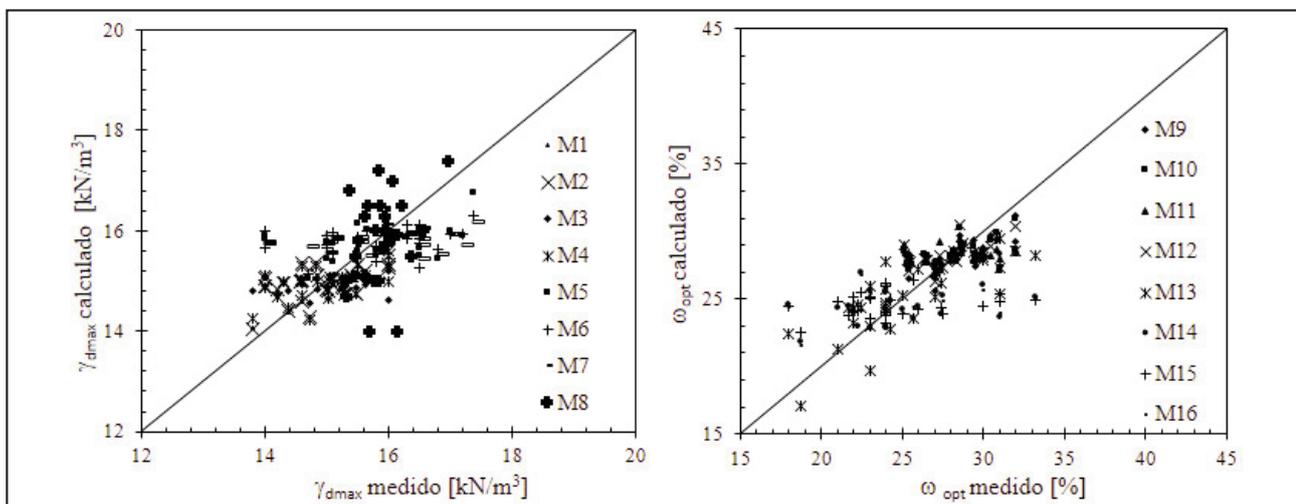


Figura 5. Relación entre; a) γ_d medido y calculado, b) ω_{opt} medido y calculado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Misiones - Facultad de Ingeniería por el financiamiento de las Becas de Iniciación a la Investigación de los alumnos de la Carrera de Ingeniería Civil, Melina Elizabeth Morgenstern y Ingrid

Beatriz Drewes, en el marco del Proyecto de Investigación "Estudio del Comportamiento Geomecánico de Suelos Residuales Lateríticos Compactados" identificado con el Código 16/I145. Se agradece al Grupo consultor Mesopotámico por su gentileza de facilitar parte de los datos de ensayos utilizados en esta investigación.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AL-KHAFI A.N., 1993.
Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits.
Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 26(4), 359-368.
- BLOTZ L.R., BENSON C.H., BOUTWELL G.P., 1998.
Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(9), 907-912.
- BOGADO G.O., FRANCISCA F.M., 2017.
Caracterización geo-mecánica de un perfil de meteorización residual.
Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 4(1), 49.
- BOGADO G.O., REINERT H.O., FRANCISCA F.M., 2017.
Geotechnical properties of residual soils from the North-east of Argentina.
International Journal of Geotechnical Engineering, 1-10.
- FOOKES P.G. (Ed.), 1997.
Tropical residual soils: A Geological Society Engineering Group working party revised report.
Geological Society of London.
- FRANCISCA, F. M., ROCCA, R. J., DAHBAR, P., & VERRA, M. 2008.
Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loésicos de Córdoba.
XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (Vol. 15).
- GENTILI C.A., RIMOLDI H.R., 1979.
Geología Regional Argentina -Mesopotámica.
Volumen I. Academia Nacional de Ciencias. p. 186-223. Buenos Aires.
- GÜNA YDIN O., 2009.
Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks.
Environmental Geology, 57(1), 203.
- GURTUG Y., SRIDHARAN A., 2002.
Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils.
Geotechnique, 52(10), 761-763.
- HARR, M.E., 1977.
Mechanics of Particulate Media.
New York; McGraw Hill
- IRAM 10511, 1972.
Método de ensayo de compactación en laboratorio.
- IRAM 10507, 1986.
Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda".
- IRAM 10507, 1986.
Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda.
- IRAM 10501, 2007.
Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad.
- IRAM 10503, 2007.
Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la densidad de los sólidos de un suelo.
- MITCHELL J.K., SOGA K., 2005.
Fundamentals of soil behavior.
John Wiley & Sons.
- NAGARAJ H.B., REESHA B., SRAVAN M.V., SURESH, M.R. (2015).
Correlation of compaction characteristics of natural soils with modified plastic limit.
Transportation Geotechnics, 2, 65-77.

ÖREN A.H., 2014.

Estimating compaction parameters of clayey soils from sediment volume test.
Applied Clay Science, 101, 68-72.

PHOON K.K., KULHAWY F.H., 1999.

Characterization of geotechnical variability.
Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 612-624.

RAHARDJO H., AUNG K.K., LEONG E.C., REZAUR R.B., 2004.

Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering.
Engineering Geology, 73(1), 157-169.

SRIDHARAN A., NAGARAJ H.B., 2005.

Plastic limit and compaction characteristics of fine-grained soils.
Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 9(1), 17-22.

WESLEY L.D., 2009.

Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils.
John Wiley & Sons.