

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS,
VARIABILIDAD Y MODELOS DE
DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES
PARA LAS PROPIEDADES PLÁSTICAS
DE LOS SUELOS FINOS BOLIVIANOS

STATISTICAL PARAMETERS, VARIABILITY AND PROBABILITY DISTRIBUTION
MODELS FOR THE PLASTIC PROPERTIES OF BOLIVIAN FINE SOILS

Fecha de recepción: 03-06-2022 | Fecha de aceptación: 18-09-2022

Autor (es):

¹Alberto Benítez Reynoso

²Laura Karina Soto Salgado

¹Ingeniero Civil, M. Sc., Ph. D., Dr. Sc.,
Docente (Grado y Posgrado), Investigador
y coordinador de programas doctorales
UAJMS, Post Doctorado e Ingeniería.

²Ingeniera Civil, Docente Investigador
- Dpto. Topografía y Vías de
Comunicación, Universidad Autónoma
Juan Misal Saracho.

Correspondencia del autor(es): albere3716@gmail.com¹,
laraksosal@gmail.com², Tarija- Bolivia.

RESUMEN

Se establece la variabilidad de las propiedades plásticas de los suelos finos de Bolivia y del Valle Central de Tarija (arcillas), expresadas en términos de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad, para lo cual se estiman los parámetros estadísticos más relevantes y se elige los modelos de distribución de probabilidades o funciones de densidad más idóneas para el límite líquido e índice de plasticidad, variables de mucha importancia a tiempo de cuantificar la incertidumbre en términos de probabilidad y riesgo, de utilidad en el diseño de estructuras en contacto con este tipo de suelos.

ABSTRACT

The variability of the plastic properties of the fine soils of Bolivia and the Central Valley of Tarija (clays) is established, expressed in terms of the liquid limit, plastic limit and plasticity index, for which the most relevant statistical parameters are estimated and the most suitable probability distribution models or density functions for the liquid limit and plasticity index are chosen, variables of great importance in time to quantify the uncertainty in terms of probability and risk, useful in the design of structures in contact with this type of soil.

Palabras Claves: Variabilidad, Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad, Parámetros Estadísticos, Probabilidad.

Keywords: Variability, Liquid Limit, Plastic Limit, Plasticity Index, Statistical Parameters, Probability.

1. INTRODUCCIÓN

Para usar los métodos estadísticos y probabilistas en Ingeniería Geotécnica, es necesario comprender la variabilidad de las propiedades de los mismos, expresados en términos de sus variables más representativas. Por esta razón, es importante estimar los parámetros estadísticos más relevantes tales como la media aritmética, la desviación típica, el coeficiente de variación y otros (Benítez, A., 2021).

En ese contexto, en este primer artículo se determinan los parámetros estadísticos mencionados de las propiedades plásticas de los suelos finos de Bolivia, expresadas en términos del límite líquido (**LL**), límite plástico (**LP**) e índice de plasticidad (**IP**).

Asimismo, la selección de modelos de distribución de probabilidades, para estas tres variables, son de mucha relevancia cuando se debe estimar la incertidumbre en términos de probabilidad, la cual es de mucha utilidad, particularmente en el diseño de cimentaciones que se apoyan en suelos finos expansivos (arcillas) o cualquier otra estructura en contacto con este tipo de suelos, por ejemplo, un pavimento rígido (Benítez, 2021).

En consecuencia, se plantean las siguientes preguntas:

¿Qué valores adoptan los parámetros estadísticos de las propiedades plásticas (**LL**, **LP** e **IP**) de los suelos bolivianos en sus seis provincias fisiográficas y el Valle Central de Tarija?

¿Qué modelos de distribución de probabilidades o funciones de densidad describen apropiadamente el comportamiento de las variables **LL**, **LP** e **IP**?

Luego, los objetivos son:

Estimar los parámetros estadísticos más relevantes del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos finos de Bolivia y del Valle Central de Tarija.

Seleccionar los modelos de distribución de probabilidades más idóneos o que mejor describen el comportamiento probabilista del límite líquido e índice de plasticidad de finos de Bolivia y el Valle Central de Tarija.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Bolivia tiene seis provincias fisiográficas o geológicas, a saber:

- I. Cordillera Occidental;
- II. Altiplano;
- III. Cordillera Oriental;
- IV. Sub-andino;
- V. Llanura Chaco-Beniana;
- VI. Escudo Brasileño.

(Los números romanos identifican a las seis provincias fisiográficas o geológicas y serán mantenidos como tales en todo el trabajo).

Considerando estas provincias fisiográficas (mapa Figura 6), se han seleccionado los proyectos viales (carreteras) más relevantes, que cuentan con información experimental representativa, relativas a las variables consideradas en la investigación (Asociación San Jacinto - Sofrelec y Consa, S.R.L., 1978 y Ministerio de Obras Públicas-ABC, 1970-2015).

Lo antedicho significa que, dentro de las metodologías usadas, hay una primera etapa, que es la empírica (Bunge, 2011).

Siempre, en el ámbito de las metodologías usadas, hay una segunda etapa llamada racional o teórica (Bunge, 2021) que ha permitido realizar lo siguiente:

- ⊕ Estimación de los parámetros estadísticos de cada una de las siete series utilizadas (muestras) se la hizo con base en las ecuaciones que nos proporciona la estadística (Ang and Tang, 2007; Magnan, J.P.; Benítez, A., 2021, 2020, 2019, 2017, 2015, 2012, 2010, 2004, 2001, 1997).
- ⊕ Selección de los modelos de distribución de probabilidades o funciones de densidad más idóneas para cada una de las series (muestras) utilizadas, para esta selección se ha usado el criterio de la comparación del histograma empírico con el modelo teórico (Ang and Tang, 2007; Magnan, J.P., 1982; Benítez, A., 2021, 2020, 2019, 2017, 2015, 2012, 2010, 2004, 2001, 1997).

3. RESULTADOS

En los cuadros N° 1, N° 2 y N° 3 se presentan los resultados obtenidos de los parámetros estadísticos más importantes, los cuales explican la variabilidad de las propiedades plásticas de los suelos en el territorio boliviano en sus seis provincias fisiográficas, de (I) a (VI) y el Valle Central de Tarija (VCT).

SERIE	n	x	s	cv	cs	ck	Min	Max
(I)	117	27.22	6.74	0.25	3.42	1.02	15.8	47.2
(II)	123	31.96	8.42	0.26	4.48	2.62	18.7	62.7
(III)	75	28.92	7.54	0.26	3.37	2.22	17.0	54.0
(IV)	66	30.32	6.28	0.21	5.40	9.81	20.6	57.7
(V)	283	29.08	7.31	0.25	4.78	1.06	14.3	53.1
(VI)	212	34.53	15.30	0.44	4.41	- 1.68	12.5	72.6
VCT	89	51.82	8.31	0.16	4.28	5.12	38.35	83.5

Cuadro N° 1 Parámetros estadísticos límite líquido

SERIE	n	x	s	cv	cs	ck	Min	Max
(I)	117	18.58	3.97	0.21	4.04	1.61	12.0	31.8
(II)	123	17.59	3.48	0.20	4.68	1.94	12.9	29.1
(III)	75	19.49	3.14	0.16	2.04	1.30	14.0	29.0
(IV)	66	17.25	2.50	0.15	5.87	9.17	14.2	28.0
(V)	283	16.96	2.90	0.17	0.86	- 0.71	10.2	26.0
(VI)	212	15.50	5.05	0.33	4.99	- 1,23	8.5	27.5
VCT	89	27.95	6.05	0.22	14.69	37.99	19.19	62.7

Cuadro N° 2 Parámetros estadísticos límite plástico

SERIE	n	x	s	cv	cs	ck	Min	Max
(I)	117	8.64	3.61	0.42	2.35	0.11	1.5	19.7
(II)	123	14.36	5.61	0.39	3.04	1.37	3.3	33.6
(III)	75	9.43	4.95	0.52	3.32	1.60	3.0	25.0
(IV)	66	13.06	4.48	0.34	3.56	4.59	4.6	29.6
(V)	283	12.11	5.53	0.46	6.02	3.82	1.3	33.8
(VI)	212	19.03	10.57	0.56	3.86	- 1.60	2.3	48.8
VCT	89	24.55	7.13	0.29	3.51	2.82	12.0	50.0

Cuadro N° 3 Parámetros estadísticos índice de plasticidad

Fuente: Elaboración Propia

En los Cuadros N° 1, N° 2 y N° 3:

n = Tamaño de la muestra;

\bar{x} = Media aritmética;

s Desviación típica;

cv = Coeficiente de variación;

cs = Coeficiente de asimetría;

ck = Coeficiente de kurtosis;

Min = Valor mínimo de la serie estadística o muestra;

Max = Valor máximo de la serie o muestra,

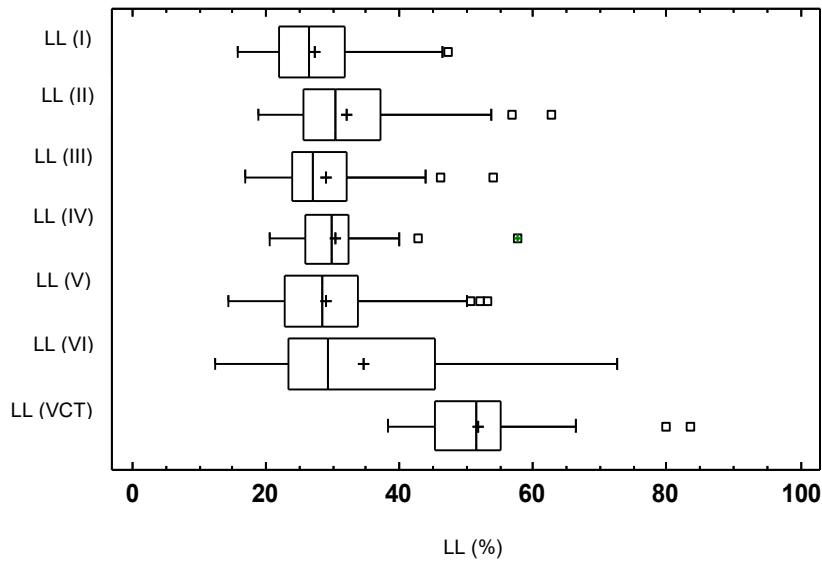


Figura 1: Diagrama de Box – Límite Líquido (LL)
Fuente: Elaboración Propia

Las figuras 1, 2 y 3 representan los diagramas de Box para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para los suelos de las seis provincias fisiográficas y el Valle Central de Tarija, respectivamente.

En estos diagramas se explican por sí solos los siguientes elementos: valor inferior adyacente, cuartil inferior, mediana, media cuartil superior y valor superior adyacente.

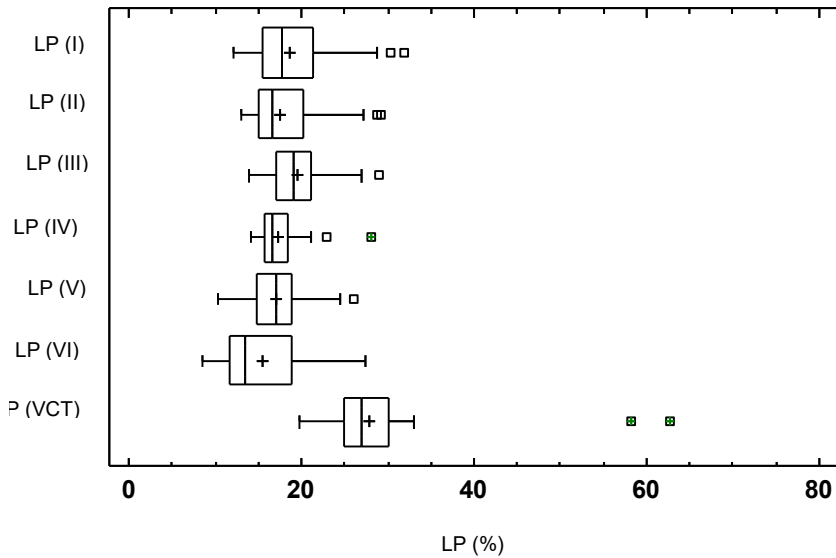


Figura 2: Diagrama de Box – Límite Plástico (LP)
Fuente: Elaboración Propia

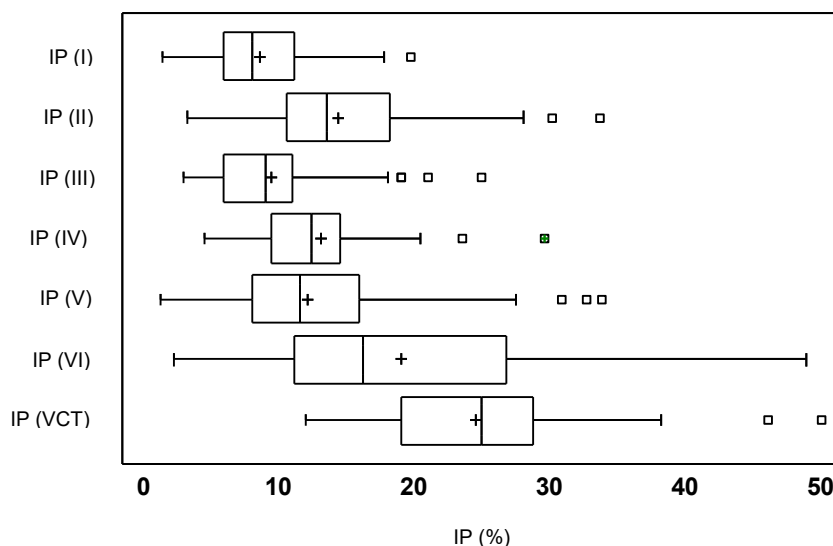


Figura 3: Diagrama de Box – Índice de Plasticidad (IP)

Fuente: Elaboración Propia

Los cuadros N° 4 y N° 5 presentan los modelos de distribución de probabilidades o funciones de densidad más idóneos para el límite líquido y el índice de plasticidad, respectivamente, de cada una de las siete series o muestras estudiadas

SERIE	n	MODELO (LL)
(I)	117	Valores Extremos Grandes
(II)	123	Valores Extremos Grandes
(III)	75	Valores Extremos Grandes
(IV)	66	Log-Logístico
(V)	283	Gaussiano Inverso
(VI)	212	Gaussiano Inverso
VCT	89	Valores Extremos Grandes

Cuadro N° 4 Modelos de distribución de probabilidades LL

Fuente: Elaboración Propia

SERIE	n	MODELO (IP)
(I)	117	Gamma de Tres Parámetros
(II)	123	Gamma
(III)	75	Gaussiano Inverso
(IV)	66	Log-Logístico
(V)	283	Gamma
(VI)	212	Gamma
VCT	89	Gaussiano Inverso

Cuadro N° 5 Modelos de distribución de probabilidades IP

Fuente: Elaboración Propia

Como ejemplo de selección de los modelos, en las figuras 4 y 5 se ha representado la comparación del histograma empírico y el modelo teórico para el límite líquido y el índice de plasticidad de la serie (II), obteniéndose, como modelos más idóneos, el de Valores Extremos Grandes y Gamma, respectivamente,

La misma lógica se ha seguido en la selección de los modelos para las demás series, presentados en los cuadros antedichos.

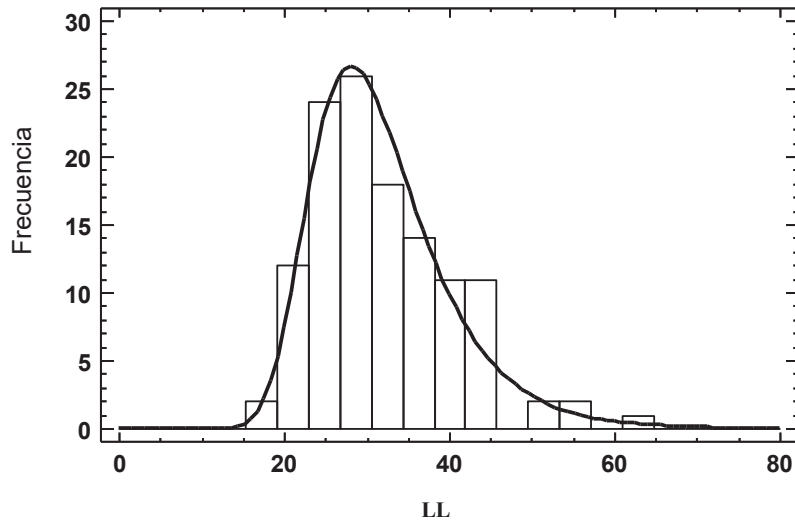


Figura 4: Comparación Histograma Empírico – Modelo Teórico Serie (II), LL, Modelo Valores Extremos Grandes Fuente: Elaboración Propia

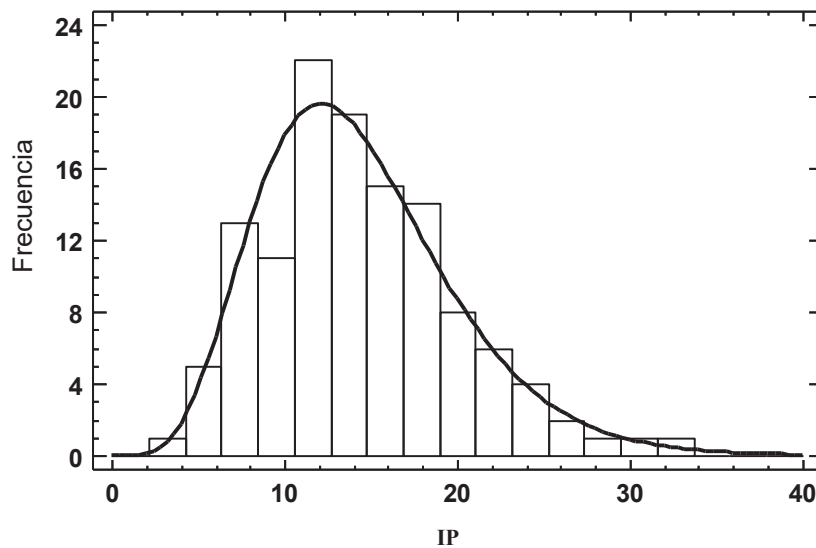


Figura 5: Comparación Histograma Empírico – Modelo Teórico Serie (II), IP, Modelo Gamma Fuente: Elaboración Propia

4. CONCLUSIONES

- ⊕ La gran cantidad de información utilizada (mediciones experimentales), ha permitido establecer la variabilidad de los límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), lo cual es extremadamente útil en diferentes ámbitos de la Ingeniería Geotécnica.
- ⊕ Los valores de los coeficientes de variación indican que la variabilidad más grande se presenta en la variable índice de plasticidad, que no es medida directamente, sino que se estima como la diferencia de los otros dos límites.
- ⊕ Los modelos de distribución de probabilidades, seleccionados para cada una de las series, constituyen una herramienta poderosa para cuantificar la incertidumbre y/o riesgo en cada caso.

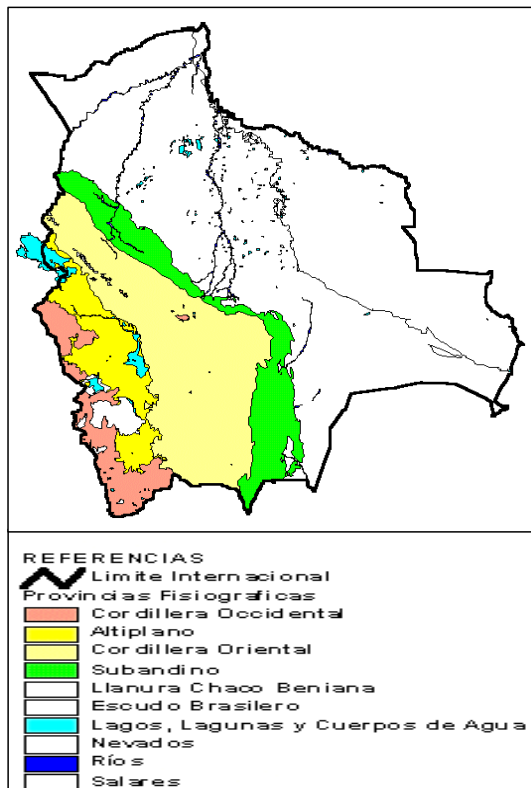


Figura 6: Mapa de Bolivia y sus Provincias Fisiográficas

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◻ Asociación San Jacinto – Sofrelec y Consa, S.R.L. (1978). Estudio de pre factibilidad del proyecto múltiple San Jacinto – Planillas de Laboratorio. Tarija, Bolivia,
- ◻ Ang and Tang (2007). Probability Concepts in Engineering – Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- ◻ Benítez, A. (2020). Geotechnical and mechanical properties of soils: correlations, mathematical models and implications in structural and geotechnical engineering with emphasis in Bolivian soils. Post Doctorate Thesis, Atlantic International University, USA.
- ◻ Benítez, A. (2021). Propiedades Geotécnicas y Mecánicas de los Suelos –Correlaciones y Modelos Matemáticos (Con Énfasis en Suelos Bolivianos). ISBN: 978-9917-0-0876-7, SENAPI: 1-1231/2021, DL.: 9-1-1960-2021, Tarija (Bolivia).
- ◻ Benítez, A (2019). Modelos Matemáticos Generales para la Predicción del CBR (California Bearing Ratio) en los Suelos Bolivianos. Revista Universitaria de Divulgación Científica "VENTANA CIENTÍFICA", Vol. 9 N° 15, pp. 9-24, junio, 2019, Tarija.
- ◻ Benítez, A. (2017). Propiedades mecánicas de las arcillas bolivianas: modelos matemáticos, correlaciones e implicaciones en la Ingeniería Estructural. PRIMER CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 26-28 de octubre, Tarija (Bolivia).
- ◻ Benítez, A. (2015). Estimación de algunas propiedades geotécnicas de los suelos mediante análisis multivariado (regresión múltiple) y su utilidad en la Ingeniería Civil: Suelos Finos del Oriente Boliviano. Revista INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN (órgano oficial de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia), N° 5, pp. 36-43. Depósito Legal: 4-3-10-14.

- 🔖 Benítez, A. (2012). Propiedades mecánicas de los suelos, correlaciones, modelos matemáticos e implicaciones en la ingeniería vial. XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 22-26 de octubre, Córdoba.
- 🔖 Benítez, A. (2010). Modelos multivariados en la estimación de algunas propiedades mecánicas de los suelos y sus implicaciones en la ingeniería vial. XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (6 al 9 de octubre) publicación en CD e impresa (libro del Congreso) ISBN: 978-950-42-0129-8, Mendoza (Argentina).
- 🔖 Benítez, A. (2004). Generalización de las relaciones entre los procesos del ciclo hidrológico para la cuenca internacional del río de La Plata: "Enfoque Sistémico y Análisis Multivariado". Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla, España.
- 🔖 Benítez, A. (2001). Criterios hidrológicos aplicados a la Ingeniería Vial, un breve análisis metodológico y conceptual. Revista Rutas, No. 78 – II época, mayo-junio, pp. 33-40, Madrid, España.
- 🔖 Benítez, A. (1997). Modelos matemáticos para la estimación de propiedades mecánicas de los suelos y su aplicación al diseño de firmes. Los suelos del valle Central de Tarija. Revista Rutas, No. 59 – II época, marzo-abril, pp. 73-78, Madrid, España.
- 🔖 Bunge, M. (2011). La investigación científica. Siglo Veintiuno Editores, México.
- 🔖 Magnan, J.P., 1982. Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, París.
- 🔖 Ministerio de Obras Públicas-ABC (1970-2015). Varios estudios de carreteras a nivel de diseño final o TESA. La Paz.