

## Incertidumbre en los parámetros físicos y mecánicos de los suelos de la Formación Pampeano en la Ciudad de Buenos Aires

Uncertainty in the physical and mechanical parameters of soils from the Pampeano Formation in Buenos Aires city

### Mauro Codevilla

AOSA SA, Humberto Primo 722, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, mcodevilla@aosa.com.ar  
Universidad de Buenos Aires, Av. Gral. Las Heras 2214, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

### Pedro Fernández & Nicolás Tasso

SRK Consulting, Chile 300, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina  
Universidad de Buenos Aires, Av. Gral. Las Heras 2214, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

**RESUMEN:** La incertidumbre en los parámetros geotécnicos, crucial para predecir el comportamiento del suelo, está influenciada por la calidad de las mediciones experimentales, la variabilidad inherente de los suelos y la precisión de los modelos utilizados para derivar parámetros de ensayos específicos (Phoon & Kulhawy 1999a). Comprender esta incertidumbre es esencial para formular métodos de cálculo basados en análisis de confiabilidad, un paradigma de diseño próximo a integrarse en las normas argentinas de diseño de fundaciones, actualmente conocidas como CIRSOC 402 en su versión preliminar. Este artículo analiza la variabilidad en las propiedades físicas y mecánicas de la Formación Pampeano utilizando datos de más de 1000 perforaciones en la Ciudad de Buenos Aires. Se examina específicamente propiedades físicas como la humedad natural, el peso unitario, el número de golpes y los límites de Atterberg, así como parámetros de resistencia mecánica como la cohesión y el ángulo de fricción interna efectivos. Este estudio busca mejorar la previsibilidad y la fiabilidad de la evaluación geotécnica en la región.

**ABSTRACT:** Geotechnical parameter uncertainty, crucial for predicting soil behavior, is influenced by the quality of measurements, the inherent variability of soils, and the accuracy of models employed to derive parameters from specific tests (Phoon & Kulhawy 1999a). Understanding this uncertainty is essential for formulating calculation methods grounded in reliability analysis – a forthcoming design paradigm set to be integrated into the Argentine foundation design standards, currently known as CIRSOC 402 in its draft version. This paper analyzes the physical and mechanical properties of the Pampeano Formation using data from over 1000 boreholes in Buenos Aires City. It specifically examines physical properties such as natural moisture, unit weight, blow counts, and Atterberg limits, as well as mechanical strength parameters like effective cohesion and internal friction angle. This study aims to enhance the predictability and reliability of geotechnical assessment in this region.

**KEYWORDS:** Geotechnical uncertainty – Reliability analysis – Pampeano Formation – Soil variability – Physical properties of soil.

## 1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería geotécnica, al igual que otras ramas de la ingeniería o ciencias aplicadas, formula su metodología de análisis con base en un conjunto de ecuaciones e hipótesis de cálculo en correspondencia con cada problema en estudio (fundaciones, excavaciones, taludes, etc.).

Los resultados obtenidos dependen fuertemente de los parámetros de entrada, los cuales se determinan en forma experimental mediante la ejecución de ensayos. Por lo que, la incertidumbre en la determinación de estos parámetros se verá reflejado en el resultado final que se quiera informar. Esta incertidumbre se puede asociar a tres fuentes básicas (Phoon & Kulhawy 1999a): i) la variabilidad inherente del suelo, ii) el error de medición y iii) la incertidumbre de modelo, todas ellas asociadas a distintos procesos según la Figura 1.

La variabilidad inherente del suelo depende de los procesos de intemperismo y acciones antrópicas producidos luego de la

deposición de los estratos, mientras que el error de la medición comprende la habilidad y experiencia del operador que realiza la medición y el equipo utilizado. Por otro lado, la incertidumbre del modelo, si existiese, hace referencia a la bondad de la ecuación de ajuste utilizada para determinar la propiedad del suelo objetivo.

Este trabajo busca analizar las variabilidades mencionadas en la determinación de los parámetros físicos y mecánicos de la Formación Pampeano, utilizando una base de datos de más de 1.000 perforaciones y 92 ensayos triaxiales sobre testigos de reducida alteración realizados en la Ciudad de Buenos Aires y alrededores. Los parámetros físicos analizados son: la humedad natural ( $w$ ), el límite líquido ( $LL$ ), el límite plástico ( $LP$ ); mientras que los parámetros mecánicos son: la cohesión efectiva ( $c'$ ) y el ángulo de fricción interna pico ( $\phi_{pico}$ ). También se incorpora el número de golpes SPT ( $N_{SPT}$ ). Este trabajo amplía las investigaciones publicadas con anterioridad (Fernández & Codevilla 2023, Fernández 2021) y permite avanzar con la realización de estándares para el diseño de estructuras geotécnicas.

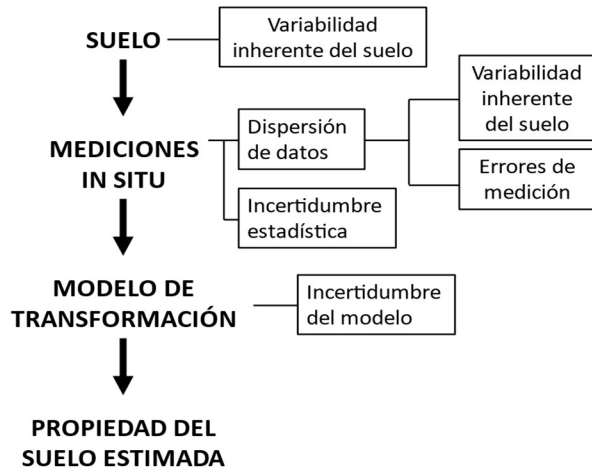


Figura 1: Cuadro resumen de las incertidumbres en la determinación de una propiedad del terreno (Phoon & Kulhawy 1999a).

## 2 VARIABILIDAD INHERENTE DEL SUELO

Cada propiedad in situ de un suelo ( $\xi$ ) puede definirse como la sumatoria de dos términos, según el esquema indicado en la Figura 2:

$$\xi(z) = t(z) + w(z) \quad (1)$$

El primero se encuentra asociado a una función de tendencia media  $t(z)$ , la cual determina la dependencia de la propiedad con la profundidad  $z$  del terreno, en el caso de que existiese; y el segundo a una componente que fluctúa con la profundidad  $w(z)$ , la cual se denomina variabilidad inherente.

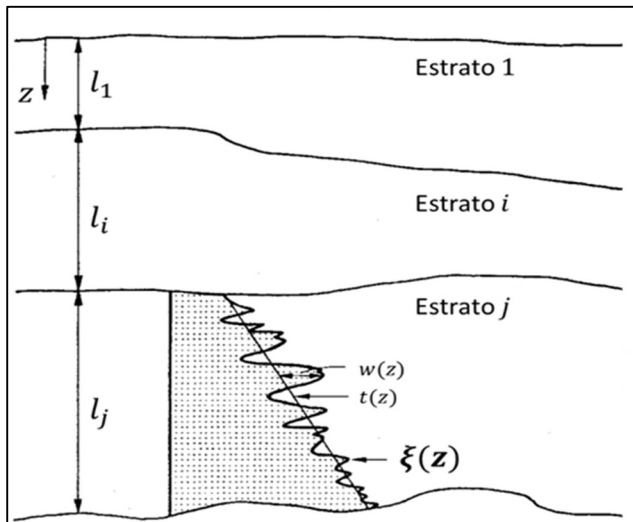


Figura 2: Esquema de la variabilidad inherente del suelo (Phoon & Kulhawy 1999a).

Un método racional para cuantificar la variabilidad inherente es considerar a la función  $w(z)$  como una función estadísticamente homogénea, es decir que sus propiedades, tales como la media  $\mu$  y el desvío estándar  $\sigma$ , no varían espacialmente. Además, la correlación entre los desvíos a dos profundidades diferentes sólo es función de su separación vertical, y no de sus posiciones absolutas (Vanmarcke 1983).

En estas condiciones, la desviación estándar de la variabilidad inherente del terreno puede ser definida como:

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

donde  $n$  es la cantidad de datos y  $w(z_i)$  es la variación respecto de la media  $t(z_i)$  a la profundidad  $z_i$ .

Se denomina coeficiente de variación al cociente entre la desviación estándar y el valor medio ( $t$ ). Es decir,

$$COV_w = SD_w/t \quad (3)$$

A partir de estos dos parámetros estadísticos, puede definirse la variabilidad inherente de una determinada propiedad del suelo. El conocimiento de esta dispersión es fundamental para definir parámetros característicos ( $x_k$ ) del material (valor con una determinada probabilidad de excedencia) y así poder efectuar un diseño geotécnico basado en la teoría de confiabilidad, abandonando el concepto de factor de seguridad ( $FoS$ ) por el de probabilidad de falla ( $P_f$ ) (Fernández 2021).

## 3 FORMACIÓN PAMPEANO

El perfil típico de los suelos del centro de la Ciudad de Buenos Aires ha sido ampliamente estudiado por numerosos autores (Fidalgo et al 1975, Bolognesi & Moretto 1961, Bolognesi 1975, Nuñez 1986, Bolognesi & Vardé 1981, Leoni et al 2008, Codevilla & Sfriso 2011). En forma sintética, las unidades geotécnicas más relevantes son:

- Rellenos superficiales (superficie a 1 m / 3 m): arcillas medianamente compactas y suelos aportados por el hombre;
- Pampeano superior (1 m / 3 m a 8 m / 12 m): limos y arcillas de mediana plasticidad, compactos con nódulos calcáreos en matriz pobremente cementada.
- Pampeano medio (8 m / 12 m a 25 m / 30 m): limos y arcillas de mediana plasticidad duros y fisurados, con matriz mediana a fuertemente cementada.
- Pampeano inferior (25 m / 30 m a 36 m / 40 m): arcillas de mediana y alta plasticidad compactas, pobremente cementadas, fisuradas y probablemente cizalladas.
- Puelchense: Arenas silíceas limpias, densas a muy densas.

En lo que respecta a la Formación Pampeano su espesor varía entre 40 m a 50 m y sus condiciones geotécnicas lo hacen apto para desarrollar fundaciones de gran envergadura, como así también la ejecución de obras de tunelería (Sfriso 1999, 2006, 2008). La experiencia acumulada a lo largo de varias décadas ha permitido subdividir al estrato en las 3 subunidades geotécnicas mencionadas con anterioridad.

#### 4 BASE DE DATOS

El trabajo fue realizado en base a la información obtenida en 376 campañas geotécnicas registradas durante el periodo 2008 – 2023, con un total de 1010 perforaciones SPT agrupadas. La Figura 3 muestra la distribución geográfica de las campañas geotécnicas en la Ciudad de Buenos Aires y alrededores. La Tabla 1 describe la cantidad de ensayos que componen la base de datos. Con el objetivo de poder procesar toda la información de una manera sencilla, eficiente y sin riesgo de alterar la información de base, se desarrolló un código en Python a tal efecto.

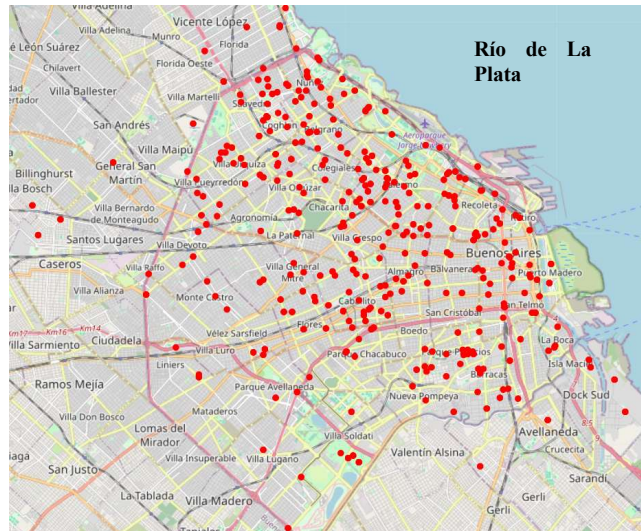


Figura 3: Campañas geotécnicas que componen la base de datos.

Tabla 1: Composición de la base de datos analizada.

Ensayo	Norma	Cantidad
Humedad natural	ASTM 2216	12521
Peso unitario	ASTM 7263	2999
Límites de Atterberg	ASTM 4318	5272
Número de golpes SPT	ASTM 1586	17405
Triaxial CIUC	ASTM 4767	67
Triaxial CIDC	ASTM 7181	25

#### 5 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN Y DESCARTE

Los ensayos que componen la base de datos fueron clasificados en las 3 subunidades de la Formación Pampeano, con el objetivo de analizar la variabilidad de cada una de ellas. Los criterios de clasificación fueron basados en el juicio profesional y en la descripción de las subunidades previamente conocidas por la experiencia acumulada.

La categorización en “Pampeano Superior” fue realizada considerando que esta subunidad presenta cementación errática en forma de nódulos calcáreos, los cuales son comúnmente descritos

en las muestras analizadas en laboratorio procedentes de perforaciones SPT. Por otro lado, no hay evidencia de que su extensión sea mayor que 15 metros de profundidad. A su vez, el número de golpes debe ser mayor que 5, para así separarlo de rellenos superficiales y de la Formación Postpampeano, y debe ser menor que 15, ya que correspondería al Pampeano Medio. Estas consideraciones fueron resumidas en dos grupos de condiciones, que permiten clasificar al ensayo como “Pampeano Superior” si alguna de ellas se cumple:

- La profundidad es menor a 15 metros, en la descripción de la perforación SPT asociada menciona las palabras ‘nódulos’ o ‘calcáreos’ y el  $N_{SPT}$  se encuentra comprendido entre 5 y 15.
- La profundidad es menor a 15 metros, la clasificación del suelo es MH, CL, CH, ML o CL-ML, con un número de golpes entre 5 y 15.

Por otro lado, la categorización en “Pampeano Medio” fue realizada considerando que esta subunidad presenta ya una matriz cementada y fuerte, que brinda valores de resistencia a la penetración mayores que 25, alcanzando en varios sectores la condición de rechazo. Esta subunidad fue detectada en profundidades de hasta 40 metros. Con estas consideraciones se realizaron dos grupos de condiciones:

- Si la profundidad es menor que 40 metros, el  $N_{SPT}$  es mayor o igual que 25 y la descripción en la perforación SPT asociada incluye términos como “cementado” o “cementación”.
- Si la profundidad es menor que 40 metros, el suelo clasifica como CL, ML o CL-ML y el  $N_{SPT}$  es mayor que 25.

Finalmente, la categorización en “Pampeano Inferior” fue realizada considerando que presenta una cementación menos resistente que la del Pampeano Medio, logrando así valores de resistencia a la penetración entre 15 y 30. Esta subunidad suele encontrarse a partir de los 15 metros de profundidad y es característico el color verdoso en su descripción visual. Así, los dos grupos de condiciones planteados son:

- La profundidad es mayor o igual que 15 metros, el  $N_{SPT}$  es igual o mayor que 15 y en la descripción de la perforación SPT asociada menciona las palabras ‘verdoso’ o ‘verde’.
- La profundidad es mayor o igual que 15 metros y la clasificación del suelo es MH, CL, CH, ML o CL-ML, con un número de golpes entre 15 y 30.

Se aplicó adicionalmente un criterio de descarte de valores extremos sobre los resultados de los ensayos, con el fin de evitar resultados incoherentes. Este criterio consiste en definir un rango de valores aceptables para cada parámetro y descartar aquellos que queden por fuera. Los rangos de aceptabilidad adoptados fueron:  $20 \leq w_{nat} \leq 60$ ,  $30 \leq LL \leq 70$ ,  $10 \leq LP \leq 50$ , y  $17 \leq \gamma \leq 22$ .

#### 6 PARÁMETROS FÍSICOS

##### 6.1 Histogramas

La Figura 4 presenta los histogramas obtenidos para cada una de las variables físicas en estudio en cada una de las subunidades del Pampeano.

Para cada histograma, se ajustó una determinada función de distribución. Se analizaron funciones de distribución normal,

lognormal, exponencial, gamma y beta. Para cada una de estas distribuciones, se obtuvo con el criterio de máxima verosimilitud (CMV) aquella función que presentó el mejor ajuste. El CMV es un método estadístico utilizado para estimar los parámetros de una función de distribución que mejor ajusta a los datos observados. Se basa en la búsqueda de los parámetros que maximizan la probabilidad de obtener los datos observados, asumiendo que la distribución utilizada es la correcta. Para cada una de las cinco funciones obtenidas, se calculó el error cuadrático medio entre la distribución de probabilidad ajustada y el histograma de datos utilizando un número específico de intervalos (bins). Es decir, dado un conjunto de valores  $y_i$  y un conjunto de valores predichos  $\hat{y}_i$ , el error cuadrático medio se calcula como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

En cada una de las gráficas se presenta la totalidad de valores utilizados para efectuar el histograma ( $n$ ), la distribución ajustada junto con la media y desvío de los datos obtenidos y el error cuadrático resultante para un número de intervalos igual a 20. De la misma forma, la Figura 5 presenta las distribuciones acumuladas para cada uno de los casos analizados.

Teniendo en cuenta que la tendencia media  $t(z)$  de estas propiedades físicas en la Formación Pampeano puede considerarse uniforme con la profundidad (Fernández 2023), y que la metodología para la determinación de estos parámetros no presenta una elevada dispersión de resultados asociados a la propia metodología, estas distribuciones aquí pueden considerarse como representativas de la variabilidad inherente del terreno  $w(z)$ .

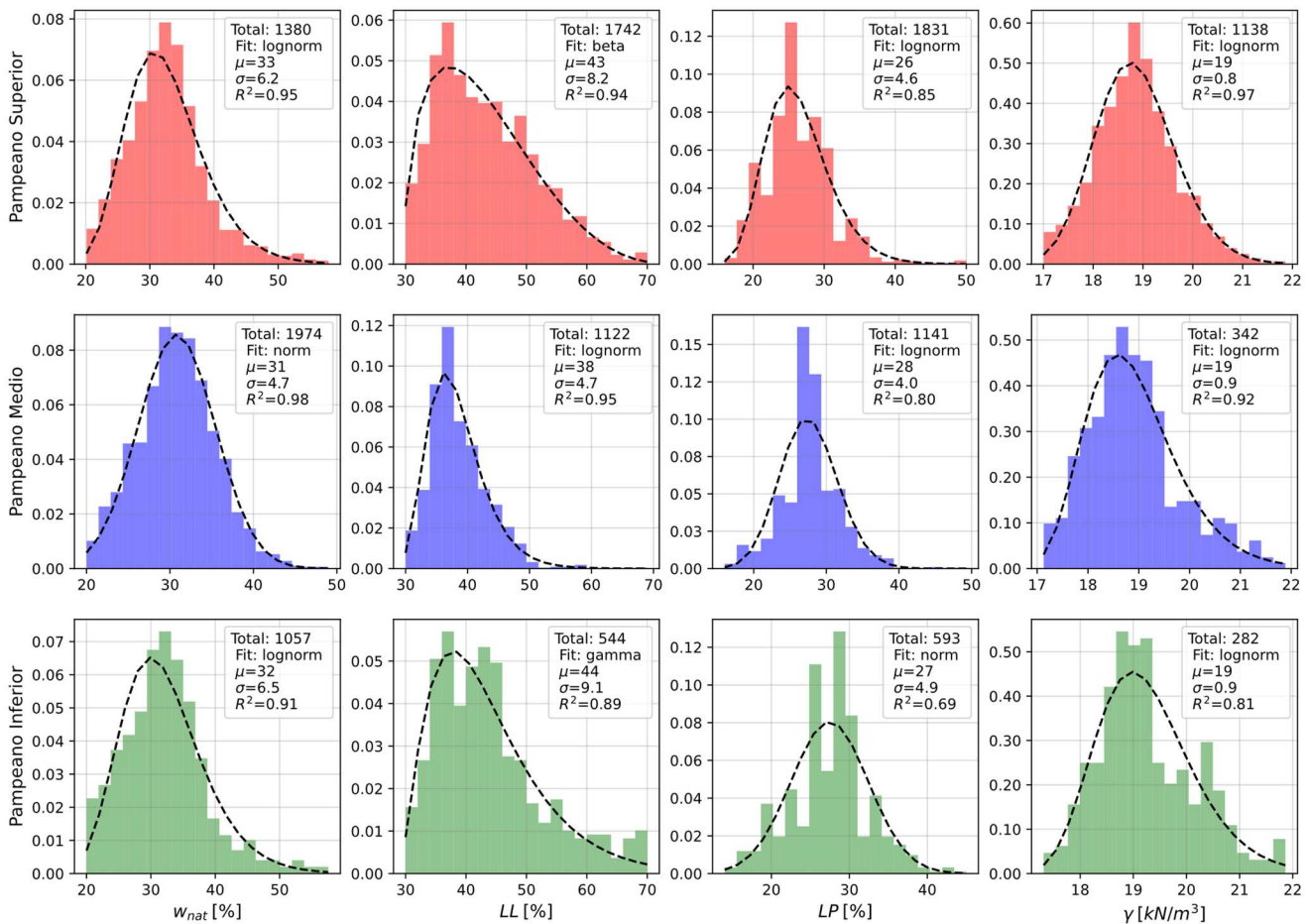


Figura 4: Histogramas de densidad de los parámetros físicos, separados según las subunidades de la Formación Pampeano.

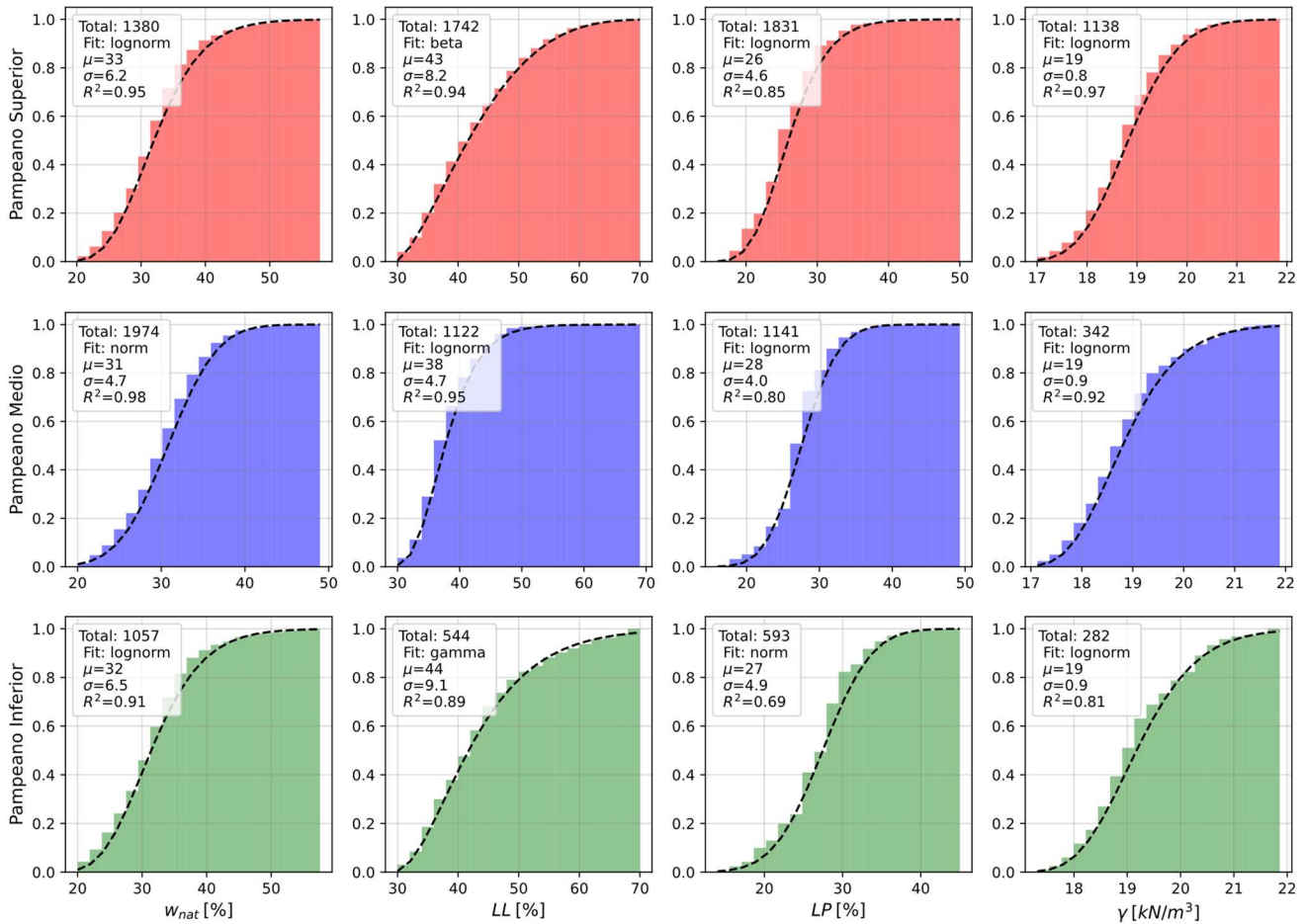


Figura 5: Histogramas acumulados de los parámetros físicos, separados según las subunidades de la Formación Pampeano.

## 6.2 Límites de Atterberg

La Figura 6 presenta el límite líquido de la totalidad de las muestras ensayadas en función del índice de plasticidad ( $IP = LL - LP$ ) y de la profundidad. En líneas generales, los estratos superficiales (primeros 10 m aprox.) tienden a ser más arcillosos y los resultados tienden a alinearse de forma paralela a la Línea A definida como (Casagrande 1932):

$$IP = 0.73 (LL - 20) \quad (5)$$

Es importante destacar que esto ha sido mencionado por (Terzaghi 1996) donde se menciona que la experiencia ha demostrado que los puntos que representan diferentes muestras del mismo estrato de suelo definen una línea recta que es aproximadamente paralela a la línea A. A medida que el límite líquido de los suelos representados por dicha línea aumenta, la plasticidad de los suelos también aumentan.

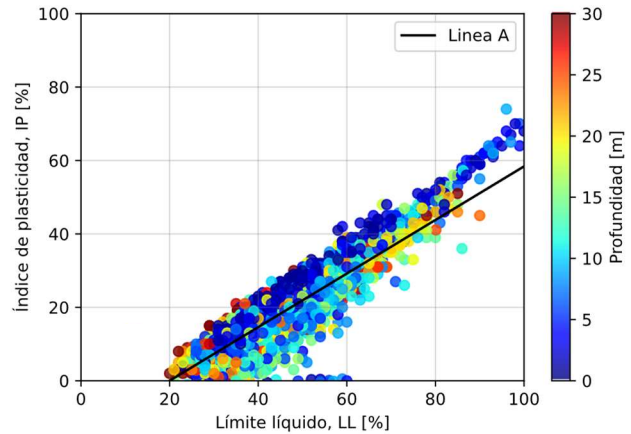


Figura 6: Límites de Atterberg de los suelos del Pampeano sobre la carta de plasticidad.

### 6.3 Valores medios y coeficientes de variación

En las Tabla 2 a Tabla 5 se presenta un resumen de los parámetros estadísticos principales que describen la variabilidad inherente de los parámetros geotécnicos analizados para cada una de las subunidades anteriormente definidas.

Por otra parte, la Figura 7 presenta, para cada una de las campañas geotécnicas efectuadas, el valor medio de cada uno de los parámetros físicos en estudio en función del correspondiente coeficiente de variación. En estos mismos gráficos, y con puntos negros, se presentan los valores informados en el reporte internacional 304 del Comité Técnico de la Sociedad Internacional de Geotecnia (ISSMGE-TC304 2021). Observando dichos gráficos, se observa que los resultados obtenidos presentan una buena correlación con los valores informados en ese reporte y con los establecidos en (AASHTO 2017), los cuales se presentan a continuación:

- Peso unitario:  $COV < 10 \%$
- Humedad natural:  $COV = 8|30 \%$
- Límites de Atterberg:  $COV = 6|30 \%$

Tabla 2: Variabilidad de los parámetros físicos – Humedad natural ( $w$ )

Subunidad	Media	Desvío	COV
Pampeano superior	32.7	6.17	18.9 %
Pampeano medio	30.8	4.66	15.1 %
Pampeano inferior	32.1	6.55	20.4 %

Tabla 3: Variabilidad de los parámetros físicos – Límite líquido ( $LL$ )

Subunidad	Media	Desvío	COV
Pampeano superior	42.9	8.19	19.1 %
Pampeano medio	38.3	4.68	12.2 %
Pampeano inferior	43.6	9.07	20.8 %

Tabla 4: Variabilidad de los parámetros físicos – Límite plástico ( $LP$ )

Subunidad	Media	Desvío	COV
Pampeano superior	26.4	4.59	17.4 %
Pampeano medio	27.6	3.98	14.4 %
Pampeano inferior	27.5	4.95	18.0 %

Tabla 5: Variabilidad de los parámetros físicos – Peso unitario ( $\gamma$ )

Subunidad	Media	Desvío	COV
Pampeano superior	18.9	0.81	4.3 %
Pampeano medio	18.9	0.92	4.9 %
Pampeano inferior	19.3	0.92	4.8 %

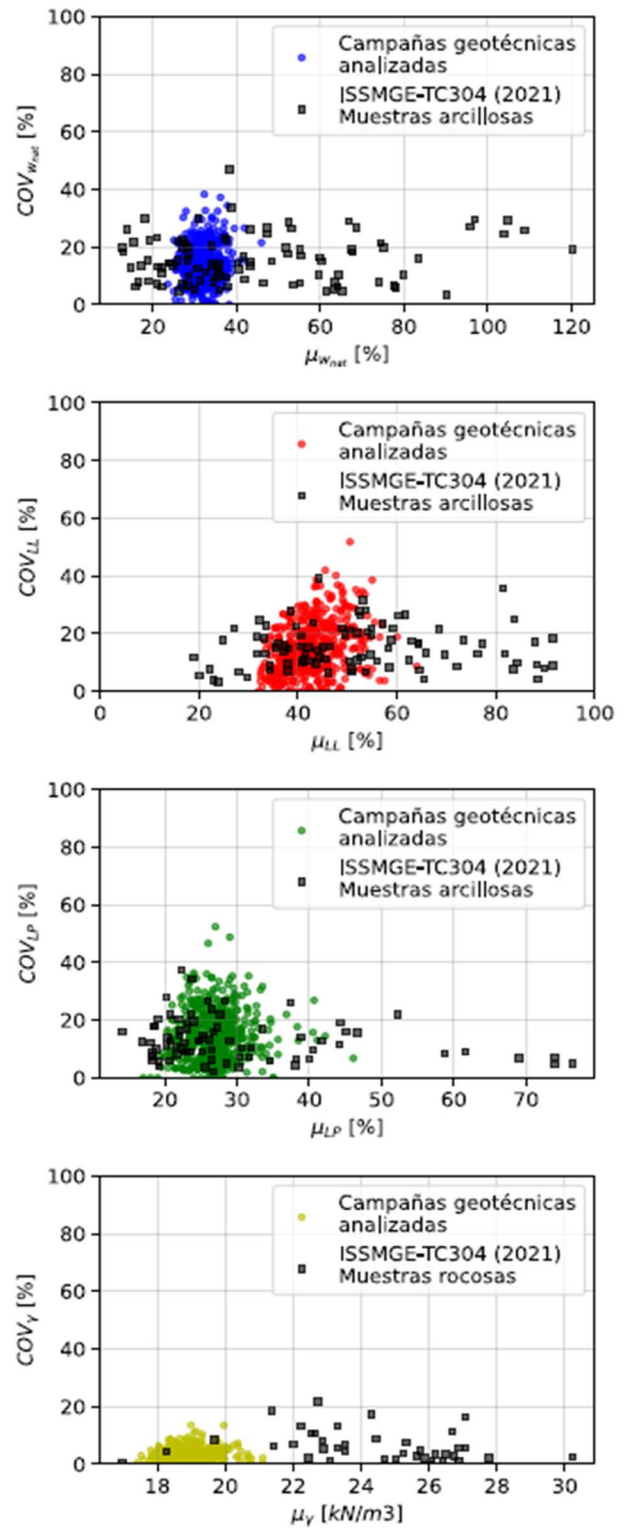


Figura 7: Media y coeficiente de variación (COV) para los parámetros físicos, separados por cada campaña geotécnica realizada.

## 7 PARÁMETROS MECÁNICOS

### 7.1 Número de golpes SPT

La Figura 8 muestra los histogramas de densidad y acumulados del número de golpes SPT, corregido por nivel de energía y nivel de tensiones, y separados para cada subunidad del Pampeano. Este valor fue calculado adoptando la expresión de corrección por presiones de Liao & Whitman (1986) y considerando mediciones de energía entregada al ensayo realizadas en la Ciudad de Buenos Aires (Leoni et al 2008):

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot \frac{90\% \cdot 475 J}{60\% \cdot 475 J} \cdot \sqrt{\frac{p_{atm}}{\sigma'_0}} \quad (6)$$

La Tabla 6 resume los parámetros estadísticos principales que describen la variabilidad el número de golpes  $(N_1)_{60}$  en las subunidades de la Formación Pampeano. La Figura 9 compara los puntos de coeficiente de variación ( $COV$ ) y valor medio ( $\mu$ ) medidos en cada una de las campañas geotécnicas realizadas, con aquellos publicados en el reporte internacional del Comité técnico de la Sociedad Internacional de Geotecnia (ISSMGE-TC304 2021). Se puede observar que para cada subunidad del Pampeano el coeficiente de variación es similar al indicado.

Tabla 6: Variabilidad del número de golpes  $(N_1)_{60}$  para cada subunidad del Pampeano.

Subunidad	Media	Desvío	COV
Pampeano superior	20	6.3	31.5 %
Pampeano medio	42	13.4	31.9 %
Pampeano inferior	23	7.2	31.3 %

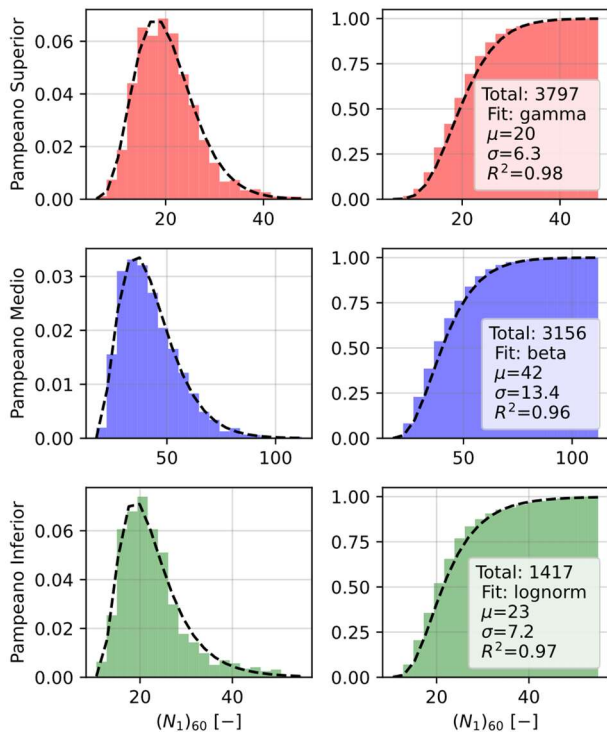


Figura 8: Histogramas de densidad y acumulados del número de golpes  $(N_1)_{60}$  para cada subunidad de la Formación Pampeano.

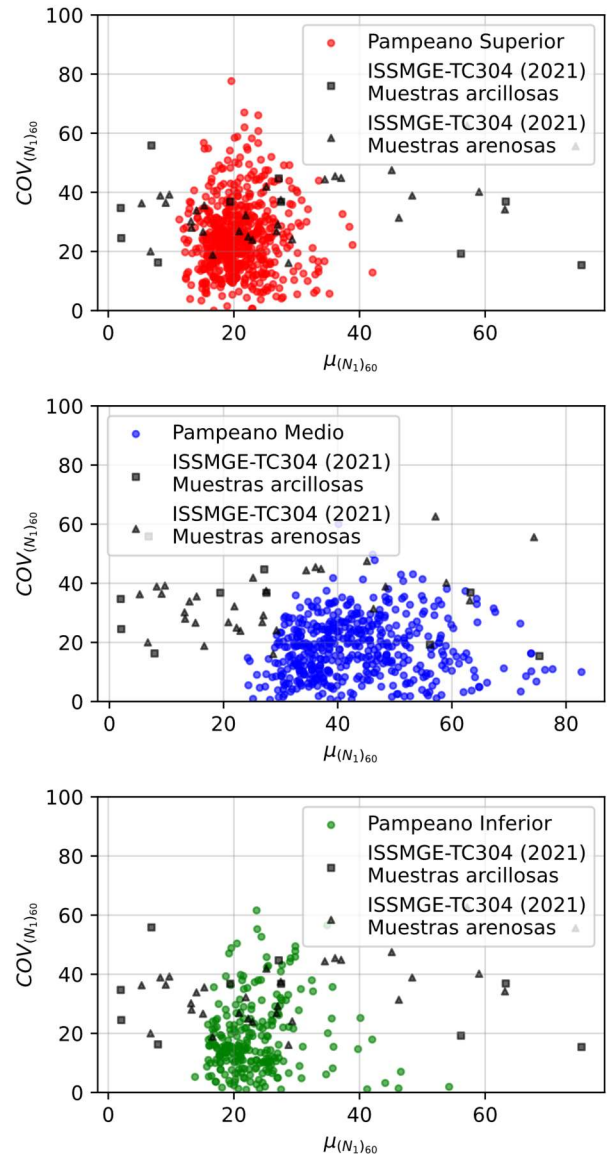


Figura 9: Media y coeficiente de variación (COV) para el número de golpes  $(N_1)_{60}$ , separados por cada campaña geotécnica realizada

## 7.2 Ensayos triaxiales CIUC - CIDC

Los ensayos triaxiales en condición consolidado-drenado (CIDC) y consolidado-no drenado (CIUC) se efectuaron sobre testigos de reducida alteración (muestra clase 1, CIRSOC 401) procedentes de tallado manual de damas superficiales y muestreadores Denison tipo Pitcher. Todos los ensayos fueron efectuados por un mismo laboratorio y equipo de medición. Adicionalmente, se informan resultados de ensayos triaxiales sobre muestras reconstituidas en laboratorio a valores humedad – peso unitario seco prefijados. A continuación, se menciona la metodología de trabajo empleada:

- Tamaño de testigos del orden 45-50 mm y 90-100 mm (diámetro – altura).
- Saturación mediante back-pressure y chequeo de parámetro B-Skempton no menor al 95 – 98 %.
- Consolidación isotrópica para alcanzar el rango de presiones efectivas deseado.
- Ruptura a deformación controlada de aprox. 0.1 mm/min, con registro en tiempo real de variación de carga axial y cambio en la presión de poros para ensayo no drenado (CIUC) y cambio de volumen para ensayo drenado (CIDC).

La Figura 10 y la Figura 11 muestran los resultados obtenidos en falla, agrupados en pares de valores de presión media efectiva ( $p' = 1/3 \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$ ) – carga desviante en falla ( $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ ), separados según el método de extracción-preparación y la profundidad de extracción, respectivamente. A los efectos de presentar de manera simple la información de base, no se graficaron las trayectorias de tensiones camino a la falla. El material presenta una importante variabilidad, probablemente producido por su cementación errática o variabilidad natural de la Formación. No existe una clara tendencia en el cambio de resistencia con respecto al método de extracción o preparación. Sí presenta un incremento de resistencia y un incremento en la variabilidad de resultados con la profundidad, lo cual puede estar asociado al incremento del grado de cementación con la profundidad y/o a la sobreconsolidación de las muestras producto de las tensiones aplicadas en el terreno.

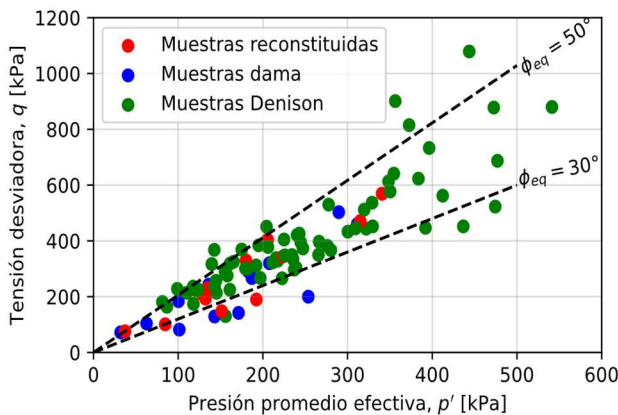


Figura 10: Puntos de falla en el gráfico p'-q, separados según el método de extracción – preparación.

La Figura 12 muestra el histograma del cociente entre la tensión desviadora y la presión media efectiva en la falla ( $\eta_{falla} = q_f/p'_f$ ) y la Figura 13 muestra los histogramas del ángulo de fricción

interna pico ( $\phi_{pico}$ ) y la cohesión efectiva ( $c'$ ) adoptados en cada set de 3 muestras ensayadas por campaña geotécnica.

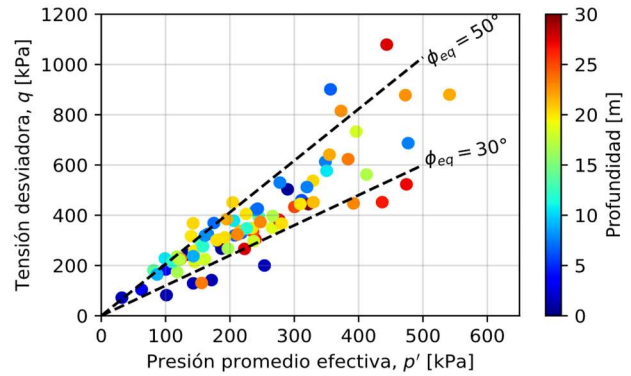


Figura 11: puntos de falla en el gráfico p'-q, separados según la profundidad.

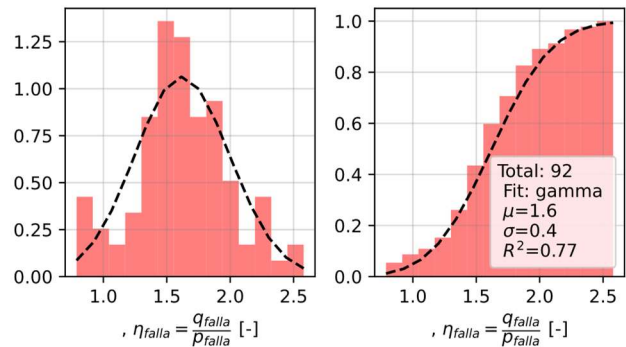


Figura 12: Histograma del cociente  $\eta_{falla}$ .

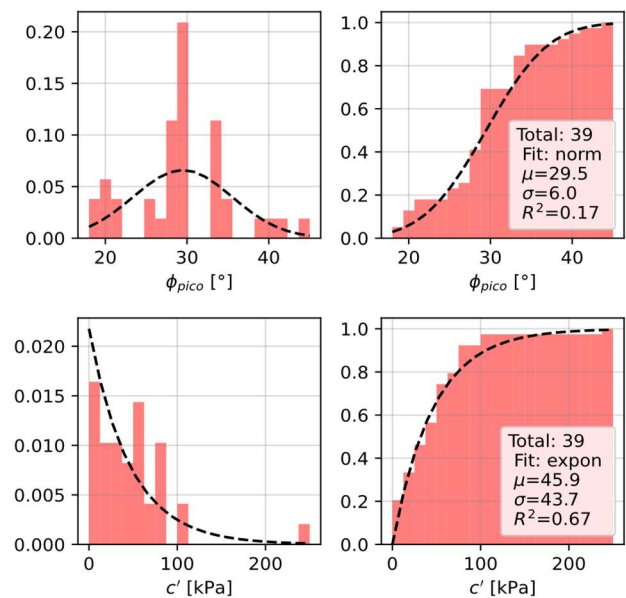


Figura 13: Histogramas de ángulo de fricción interna pico  $\phi_{pico}$  y cohesión  $c'$ , ambos definidos sobre tensiones efectivas.

Si bien evaluar los resultados mediante  $\eta_{falla}$  permiten eliminar la incertidumbre asociada al modelo Mohr – Coulomb, donde debe ajustarse el criterio de falla únicamente a través de una recta definida a partir de los parámetros  $\phi_{pico}$  y  $c'$ , no es posible asegurar que esta variabilidad corresponda únicamente a la asociada a la inherente del material. Esto se debe a que, por un lado, y a diferencia de la metodología para la determinación de las propiedades físicas, los errores de medición pueden tener una influencia considerable y por otro, se desconoce si el valor medio de los parámetros resistentes ( $t_{(z)}$ ) varía con la profundidad.

La Figura 14 muestra el valor medio y el coeficiente de variación del ángulo de fricción interna pico junto con los valores registrados en el reporte internacional 304 del Comité Técnico de la Sociedad Internacional de Geotecnia (ISSMGE-TC304 2021). Se puede observar que el desvío estándar se encuentra en aproximadamente  $\sigma = 5^\circ$ .

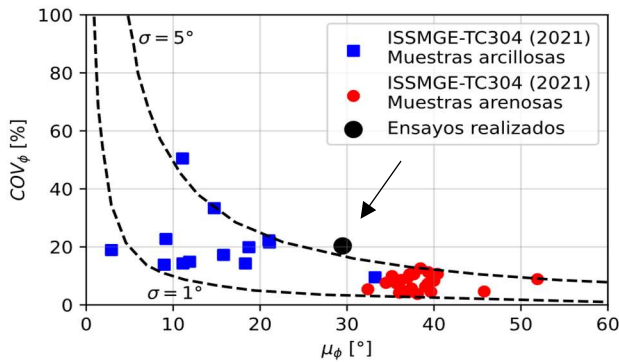


Figura 14: Media y coeficiente de variación (COV) para el ángulo de fricción interna pico.

## 8 CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron, por primera vez; los resultados del análisis de la variabilidad estadística de algunos parámetros físicos y mecánicos de las distintas subunidades de la Formación Pampeano. Este análisis comprende la información de 1010 campañas geotécnicas realizadas por la misma empresa en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires durante el período 2008 – 2023.

Las funciones de distribución presentadas en este trabajo, que ajustan la variabilidad inherente de los parámetros, junto con los valores medios y coeficientes de variación calculados, no sólo son consistentes con aquellos indicados en la bibliografía reciente (Phoon & Kulhawy 1999b, ISSMGE-TC304 2021), sino que también resaltan la importancia de considerar la incertidumbre inherente en los suelos para mejorar la predictibilidad y fiabilidad de los diseños geotécnicos, lo cual es de vital importancia para proyectos de infraestructura de mediana o gran envergadura posibles de ejecutarse en una metrópoli como Buenos Aires. Los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de integrar análisis de confiabilidad en las normas de diseño, como las CIRSOC 402 (actualmente en estudio), para optimizar la seguridad y la eficiencia en los proyectos de ingeniería civil.

Sin embargo, es importante considerar que, aunque los análisis estadísticos proporcionan una valiosa comprensión de la variabilidad de los parámetros del suelo, también presentan ciertas

limitaciones. La precisión de estos análisis depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles. Además, algunos de los parámetros analizados, como la humedad natural y el peso unitario, son parámetros de estado que pueden verse afectados en función de la temporada del año. Los datos recolectados en distintas estaciones pueden mostrar variaciones significativas que deben ser consideradas al interpretar los resultados.

En este sentido, los autores consideran que estos resultados efectivamente permitirán optimizar la ejecución de campañas geotécnicas en la Formación Pampeano, pero que aún no presentan la robustez adecuada para la determinación de los parámetros característicos que permitan efectuar diseños geotécnicos basados exclusivamente en la teoría de la confiabilidad.

Este trabajo no sólo busca determinar los valores medios y los coeficientes de variación de algunos de los parámetros geotécnicos más trascendentes, sino que también persigue dos objetivos claros: i) optimizar la ejecución de campañas geotécnicas, poniendo un mayor énfasis en la realización de ensayos de campo y/o laboratorio no convencionales sobre los cuales no se cuenta con abundante información, y ii) realizar los cálculos tradicionales en geotecnia basados no solo en un enfoque determinista, sino también mediante un análisis de confiabilidad, definiendo valores característicos de las variables y asignando probabilidades de falla a los problemas geotécnicos tradicionales.

Los autores buscan despertar un interés adicional en la comunidad geotécnica de la República Argentina para que, en su conjunto, se colabore con el enriquecimiento de bases de datos de libre acceso, compartiendo sus conocimientos y recursos. Este esfuerzo colectivo no solo mejorará la calidad técnica de nuestro trabajo, sino que también fortalecerá la capacidad de la comunidad geotécnica para enfrentar desafíos futuros con mayor eficiencia y seguridad.

Este trabajo proporciona una base sólida de partida para mejorar la práctica geotécnica en Buenos Aires, destacando la importancia de considerar de manera cuantitativa la incertidumbre en los parámetros del suelo y ofreciendo un camino claro hacia la optimización y mayor confiabilidad de los diseños geotécnicos. Los próximos pasos deberían incluir una mayor colaboración y el continuo enriquecimiento de la base de datos geotécnica que permitan efectuar análisis de variabilidad espacial (Cami, B. et al. 2020), así como la integración de estos análisis en las normativas locales.

## 9 AGRADECIMIENTOS

Los autores, en su función de docentes de la Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ingeniería, expresan su sincero agradecimiento a las empresas AOSA y SRK Consulting Argentina por haber permitido el acceso y uso de información valiosa.

## 10 REFERENCIAS

- AASHTO 2017. Bridge Design Specifications, Washington DC, US.
- Bolognesi A. y Moretto O. 1961. Propiedades del subsuelo del Gran Buenos Aires. I PCSMGE, 1, 303-310.
- Bolognesi A. 1975. Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano. V PCSMGE, Buenos Aires, 255-302.
- Bolognesi A. y Vardé O. 1991. Subterráneos en Buenos Aires. IX PCSMGE, Viña del mar, Chile, 3, 1329-1350.
- Cami, B., Javankhoshdel, S., Phoon, K. K., & Ching, J. (2020). Sca

- le of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6(4), 03120002.
- Casagrande A. 1932. Research on the Atterberg Limits of soils. *Journal of Highway Research*, 13, 121-130.
- CIRSOC401 2018. Reglamento Argentino de Estudios Geotécnicos. Ciudad de Buenos Aires, INTI.
- Codevilla M. y Sfriso A. 2011. Actualización de la información geotécnica de los suelos de la Ciudad de Buenos Aires. XIV PCSMGE, Toronto, Canadá.
- Fernandez P. y Codevilla M. 2023. Incertidumbre en los parámetros físicos de los suelos de la Formación Pampeano. XXVI CAMSIG G, Comodoro Rivadavia, Argentina, 117-121.
- Fernández P. 2021. Calibración de factores de minoración LRFD para fundaciones superficiales. XXV CAMSIG, Misiones, Argentina, 605-614.
- Fidalgo F., De Francesco D. y Pascual R. 1975. Geología superficial de la llanura Bonaerense. VI Cong. Geo. Arg., Bahía Blanca, Argentina.
- ISSMGE-TC304 2021. State-of-the-art review of inherent variability and uncertainty in geotechnical properties and models. ISSMGE – TC304 ‘Engineering Practice of Risk Assessment and Management’
- Leoni A., Guaraglia D., Bielecki A. y Cánchero J. 2008. Medición de la energía entregada por el impacto del pisón, en la ejecución de los ensayos SPT que se ejecutan en la República Argentina, XIX CAMSIG, La Plata, Argentina.
- Liao SSC. y Whitman RV. 1986. Overburden correction factors for SPT in sand. *J. Geotech. Eng. ASCE* 112(3):373-377.
- Núñez E. 1986. Panel report: geotechnical conditions in Buenos Aires City. V ICIAEG, Buenos Aires.
- Phoon K. y Kulhawy F. 1999a. Characterization of geotechnical variability. *Can. Geotech. J.*, 36, 612-624.
- Phoon K. y Kulhawy F. 1999b. Evaluation of geotechnical variability. *Can. Geotech. J.*, 36, 625-639.
- Sfriso A. 1999. Tunnels in Buenos Aires soils: application of numerical methods to the structural design of linings. XI PCSMGE, Foz de Iguazú, Brasil.
- Sfriso A. 2006. Algunos procedimientos constructivos para la ejecución de túneles urbanos. XIII CAMSIG, San Juan, Argentina. 1-17.
- Sfriso A. 2008. Metro tunnels in Buenos Aires: Design and construction procedures 1998-2007. 6<sup>th</sup> Intl. Symp. Geot. Aspect. Underg. Const. Soft Ground, Shanghai, China, 335-341.
- Terzaghi K., Peck R. y Mesri G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- Vanmarcke, E. 1983. *Random fields: analysis and synthesis*. MIT Press, Cambridge.