

# Incertidumbre en los parámetros físicos de los suelos de la Formación Pampeano

## Uncertainty on physical parameters in the Pampeano soils

**Pedro Fernández**

SRK CONSULTING ARGENTINA SA, Chile 300, CABA, [pfernandez@srk.com.ar](mailto:pfernandez@srk.com.ar)

Mauro Codevilla

AOSA SA, Humberto Primo 722, CABA, [mcodevilla@aosa.com.ar](mailto:mcodevilla@aosa.com.ar)

**RESUMEN:** La determinación de los parámetros geotécnicos que predicen el comportamiento del terreno, depende de la calidad de la medición experimental efectuada, de la dispersión intrínseca de los geo-materiales y de la incertidumbre de los modelos para la determinación de un parámetro a partir de un determinado ensayo (Phoon 1999). En este artículo se presenta, a partir de una determinada área de muestreo, un análisis de la variabilidad estadística de algunos de los parámetros físicos pertenecientes a la Formación Pampeano (contenido de humedad natural, peso unitario húmedo y límite líquido), de forma tal de facilitar la implementación de procedimientos de cálculo basado en análisis de confiabilidad (nuevo paradigma de diseño a incorporar en el reglamento CIRSOC 402, actualmente en versión borrador) y mejorar la interpretación de tales parámetros.

**ABSTRACT:** The determination of geotechnical parameters that predict the behavior of the soil depends on the quality of the experimental measurement performed, the intrinsic dispersion of the geomaterials, and the uncertainty of the models used to determine a parameter from a specific test (Phoon 1999). This article presents an analysis of the statistical variability of certain physical parameters belonging to the Pampeano Formation (natural moisture content, wet unit weight, and liquid limit) based on a specific sampling area. The aim is to facilitate the implementation of calculation procedures based on reliability analysis (a new design paradigm to be incorporated into the CIRSOC 402 code, currently in draft version) and improve the interpretation of these parameters.

**PALABRAS CLAVE:** Variabilidad inherente del suelo, coeficiente de variación, variabilidad geotécnica, Formación Pampeano.

**KEYWORDS:** inherent soil variability, coefficient of variation, geotechnical variability, Pampeano Formation.

## 1 INTRODUCCIÓN

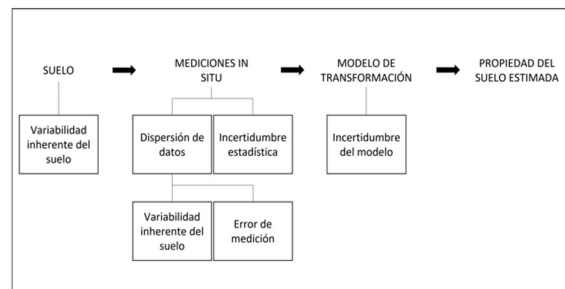
### 1.1 Dispersión e incertidumbre de los materiales terrestres

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

Los resultados que se obtienen de dicho análisis dependen fuertemente de los parámetros o datos de entrada los cuales se determinan en forma experimental mediante la ejecución de ensayos. Una mayor o menor dispersión o incertidumbre en la determinación de estos se verá reflejado en el resultado final que se quiera informar.

En lo que respecta a la determinación de parámetros de entrada sobre materiales terrestres (suelos y rocas, en general), se puede asociar su dispersión o incertidumbre a tres fuentes básicas (Phoon & Kulhawy 1999): i) variabilidad inherente, ii) error de la medición, iii) incerteza en la transformación.

Con respecto a la variabilidad inherente, los geomateriales fueron depositados por la naturaleza y posteriormente han sufrido procesos de intemperismo como así también la acción antrópica. En lo referente al error de la medición, comprende la habilidad-experiencia del operador que realiza la medición y de su equipamiento asociado. Por último, la incerteza en la transformación hace referencia a la bondad de la ecuación de ajuste utilizada para la determinación del parámetro en estudio. Lo dicho anteriormente se resume en el diagrama de flujo que se indica en la Figura 1.



**Figura 1.** Cuadro resumen de las incertezas asociadas en la determinación de una propiedad del terreno (Kulhawy 1992).

El propósito del presente artículo es efectuar un primer análisis de la variabilidad inherente de algunos parámetros físicos de los suelos pertenecientes a la Formación Pampeano a partir de los resultados obtenidos en un área de la Ciudad de Buenos Aires (CABA) en la cual se cuenta con abundante información de resultados de ensayos de laboratorio rutinarios.

### 1.2 Variabilidad inherente del terreno

Debido a los procesos naturales anteriormente mencionados, las propiedades in situ del terreno tienen una variabilidad espacial que puede definirse a partir de la sumatoria de dos términos (Phoon & Kulhawy 1999). El primero se encuentra asociado a una función de tendencia media  $t(z)$  y el segundo, a una componente que fluctúa con la profundidad  $w(z)$  que se la denomina variabilidad inherente. De esta manera,

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

donde  $\xi$  es la propiedad in situ del material a una profundidad  $z$  (ver Figura 2).

Un método racional de cuantificar la variabilidad inherente es considerar a la función  $w(z)$  como una función estadísticamente homogénea. Es decir, las propiedades estadísticas (media y desvío) no varían con la ubicación espacial y la correlación entre los desvíos a dos profundidades diferentes, es una función sólo de su separación y no de sus posiciones absolutas (Vanmarcke 1983).

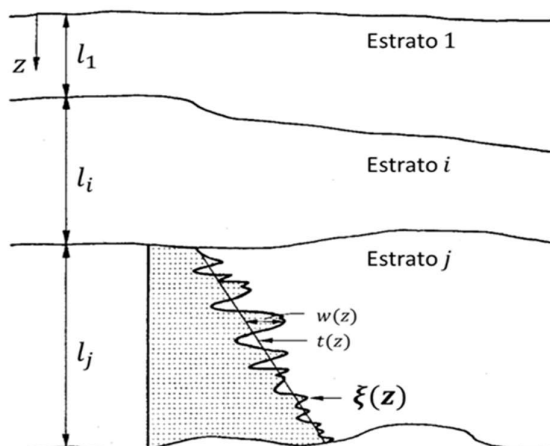


Figura 2. Variabilidad inherente del terreno.

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 ( $P_f$ ) (Fernandez 2020).

## 2 ESTUDIO REALIZADO

### 2.1 Sitio y extensión del área trabajo

El perfil típico del centro de la Ciudad de Buenos Aires está compuesto por (Fidalgo et al 1975, Bolognesi 1975, Nuñez, 1986, Codevilla 2011):

- Rellenos superficiales (superficie a 1m/3m): arcillas medianamente compactas y suelos aportados por el hombre;
- Pampeano (1m/3m a 30m/40m): loess modificado, preconsolidado por desecación y cementado con carbonatos de calcio y óxidos de manganeso (Fidalgo et al 1975, Bolognesi 1975, Nuñez, 1986). Se trata de limos y arcillas de mediana plasticidad, fisurados y compactos con nódulos calcáreos en matriz cementada.
- Puelchense: Arenas silíceas limpias, densas a muy densas.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la información procedente de 3 campañas geotécnicas efectuadas en CABA y sobre muestras extraídas únicamente de la Formación Pampeano.

La Figura 3 presenta la ubicación de cada uno de los sitios de estudio. El sitio A se circunscribe a un rectángulo de aproximadamente 120 m x 90 m y se ubica en la zona norte de la Capital Federal. El sitio B se corresponde con un trazado de aproximadamente 1900 m de extensión en sentido este – oeste en la zona centro-este de la Ciudad. Por último, el sitio C se corresponde con un trazado de 4500 m de extensión en sentido este-oeste en la zona centro de la Ciudad.



Figura 3. Imagen satelital de la CABA. Sitios de trabajo seleccionados (sitio A: zona norte, barrio Núñez; sitio B: zona centro-este, barrio Balvanera; sitio C: zona centro, barrio Villa Crespo).

### 2.2 Tipo, cantidad y procedencia de los datos utilizados

Para cada sitio de trabajo, se utilizaron los valores de peso unitario, humedad natural y límite líquido determinados en condiciones de laboratorio sobre muestras extraídas en campo mediante sacatestigos Moretto correspondiente al ensayo SPT. En la Tabla 1 se presenta un resumen del tamaño de la muestra para cada parámetro y para cada sitio de trabajo. Adicionalmente, se decidió incorporar en el análisis los valores de resistencia a la penetración  $N_{SPT}$  medidos en campo teniendo en cuenta la trascendencia arraigada en este dato frecuente del terreno.

Tabla 1. Cantidad de datos por cada parámetro y por cada sitio de trabajo.

Parámetro / Sitio		A	B	C
Peso unitario	$\gamma$	93	104	55
Humedad natural	$w$	261	662	415
Límite líquido	$LL$	96	211	57
Nro. golpes SPT	$(N_1)_{60}$	277	779	467

Las ecuaciones utilizadas para determinar cada uno de los parámetros anteriormente mencionados son:

$$\gamma = W_t/V_t \quad (4)$$

$$\omega = W_w/W_s \quad (5)$$

$$LL = \omega^n \cdot (N/25)^{0.121} \quad (6)$$

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot (ER = 90\%/ER = 60\%) \cdot C_N \quad (7)$$

donde  $W_t$  es el peso total de la muestra,  $V_t$  es el volumen total,  $W_w$  es el peso de la fase agua,  $W_s$  es el peso de la fase sólida,

$\omega^n$  es el contenido de humedad asociado al número de caídas  $N$  del cascador Casagrande (método de 1 punto),  $ER$  es la energía entregada durante la hinca del sacatestigo en la práctica argentina (Leoni 2008) y  $C_N$  es la corrección por nivel de tensiones.

En relación con la metodología de trabajo empleada en cada una de las mediciones, se enumeran las más relevantes:

- $N_{SPT}$  medido en forma manual por 2 a 3 operadores;
- $\gamma$ ,  $\omega$  y  $LL$  medido en laboratorio por 3 operadores;
- Maza 70kg y altura de caída 70 +/- 5cm libre mediante disparador "tipo sortija" durante ejecución ensayo SPT.

### 2.3 Manejo óptimo de la base de datos utilizada

Con el objetivo de poder procesar toda la información de una manera sencilla, eficiente y sin riesgo de alterar los datos de cada sitio, se desarrolló un código en Python disponible en: [https://drive.google.com/drive/folders/15MnhLGIIMTpJJpBTaB6\\_suSQLP8rU6vB?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/15MnhLGIIMTpJJpBTaB6_suSQLP8rU6vB?usp=sharing).

Las Figura 4 presenta, en función de la profundidad, todos los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros analizados. Se indica en línea de trazos el valor medio y en área sombreada, los valores medios más/menos un desvío y más/menos dos desvíos.

Con el objetivo de descartar aquellos valores que estén fuera de rango para un determinado parámetro, estos valores se encuentran filtrados en función de la experiencia acumulada en los suelos de CABA con el siguiente criterio:

- Peso unitario ( $kN/m^3$ )  $17 < \gamma < 22$
- Humedad natural (%)  $20 < \omega < 60$
- Límite líquido (%)  $30 < LL < 70$

En la Figura 5 se presentan los histogramas asociados a cada uno de los parámetros medidos en los 3 sitios de trabajo.

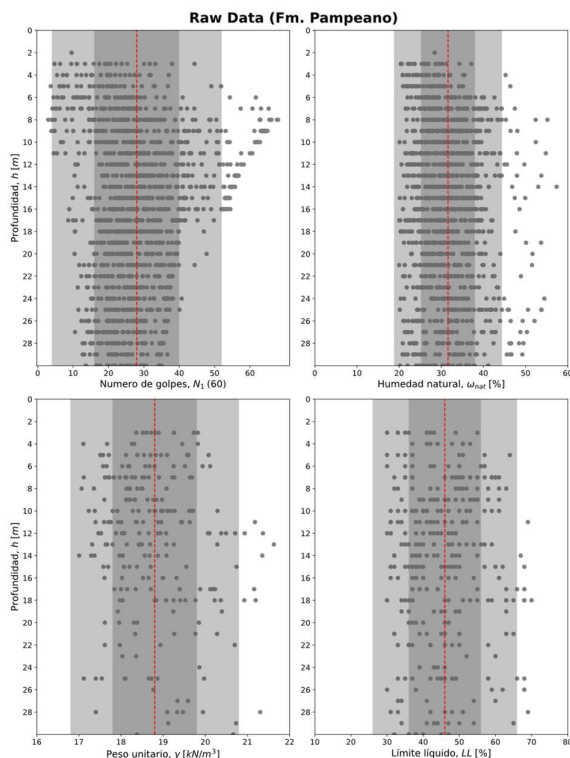


Figura 4. Resultados obtenidos de cada uno de los parámetros en estudio en función de la profundidad.

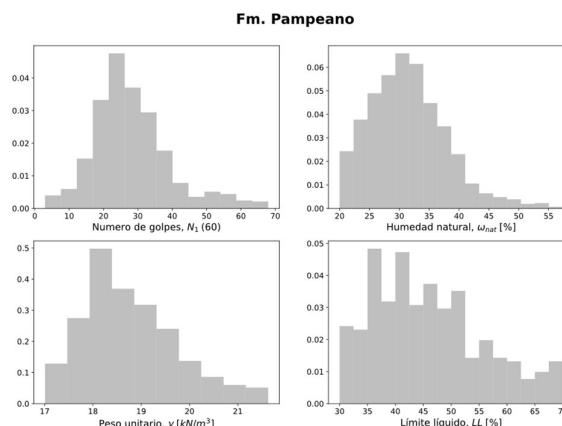


Figura 5. Histogramas obtenidos para cada uno de los parámetros en estudio de los 3 sitios de trabajo.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Selección óptima de función de densidad de probabilidad

Para cada uno de los histogramas presentados 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 las cinco funciones obtenidas, se calculó el error cuadrático y se adoptó aquella que presentó el menor.

Para los casos analizados, la función que mejor ajustó fue la distribución lognormal cuya expresión general es:

$$f(x) = \frac{1}{x s \sqrt{2\pi}} e^{-((\ln(x))^2)/(2s^2)} \quad (8)$$

Esta función de densidad de probabilidad puede escribirse en forma normalizada a partir de los parámetros de ubicación ("loc"), escala ("scale") y forma ("s"). El parámetro de ubicación determina el desplazamiento horizontal de la distribución ajustada. Es el valor alrededor del cual se centra la distribución. "scale" es el parámetro de escala y determina la escala o amplitud de la distribución ajustada. Controla la dispersión de los valores alrededor del parámetro de ubicación. Un valor mayor de escala hace que la distribución sea más ancha y con valores más dispersos. Por último, el parámetro de forma define la forma de la distribución ajustada. Es un parámetro adimensional que influye en la asimetría de la distribución. Un valor positivo de forma produce una distribución sesgada hacia la derecha, mientras que un valor negativo produce una distribución sesgada hacia la izquierda.

Luego, si  $g$  es la función lognormal normalizada,

$$g(x, s, loc, scale) = f(y, s)/scale \quad (9)$$

$$y = (x - loc)/scale \quad (10)$$

Donde  $f$  es la función de distribución lognormal definida en la ecuación (8).

La calidad del ajuste efectuado se evaluó a partir de dos parámetros. El primero, suma de errores cuadráticos ( $SSE$ ). Este parámetro representa la suma de los errores al cuadrado entre los

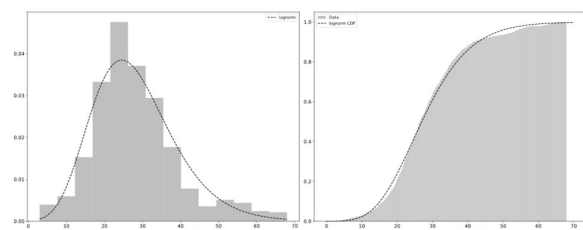
valores predichos por el modelo y los valores reales de los datos. Cuanto menor sea el valor  $SSE$ , mejor será el ajuste del modelo a los datos. El segundo, el coeficiente de determinación  $R^2$ . Este parámetro se interpreta como el porcentaje de la variabilidad explicada por el modelo en relación con la variabilidad total de los datos. Un valor  $R^2$  cercano a 1 indica un buen ajuste del modelo y un valor cercano a 0 indica que el modelo no es capaz de explicar la variabilidad de la variable dependiente.

A continuación, se presenta para cada uno de los parámetros de análisis, los parámetros de la función de distribución ajustada y el error cuadrático obtenido en cada caso. Si bien la suma de errores cuadráticos obtenidos es elevada en la mayoría de los casos, la correspondencia obtenida entre la distribución de probabilidad acumulada obtenida a partir de los datos medidos y la obtenida a partir del ajuste efectuado, se considera aceptable para la determinación de un parámetro físico asociado a un geomaterial.

### 3.2 Función de distribución para $(N_1)_{60}$

**Tabla 2.** SPT corregido. Parámetros característicos del ajuste.

Parámetro	Valor
Distribución	Lognormal
Parámetro de ubicación ( $loc$ )	-18.77
Parámetro de escala ( $scale$ )	45.73
Parámetro de forma ( $s$ )	0.23
Suma de errores cuadráticos ( $SSE$ )	0.49
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.391

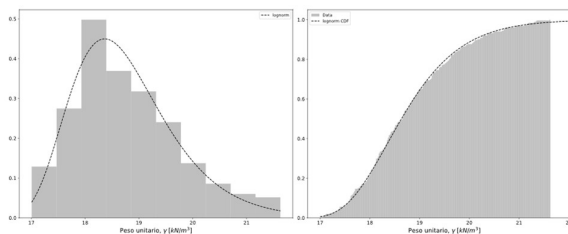


**Figura 6.** Número de golpes SPT corregido. Función de ajuste lognormal.

### 3.3 Función de distribución para $\gamma$

**Tabla 3.** Peso unitario. Parámetros característicos del ajuste.

Parámetro	Valor
Distribución	Lognormal
Parámetro de ubicación ( $loc$ )	15.61
Parámetro de escala ( $scale$ )	3.03
Parámetro de forma ( $s$ )	0.31
Suma de errores cuadráticos ( $SSE$ )	11.67
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.288

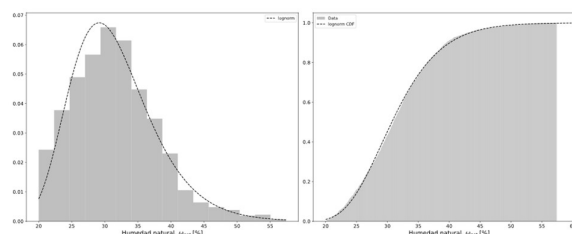


**Figura 7.** Peso unitario. Función de ajuste lognormal.

### 3.4 Función de distribución para $\omega$

**Tabla 4.** Humedad natural. Parámetros característicos del ajuste.

Parámetro	Valor
Distribución	Lognormal
Parámetro de ubicación ( $loc$ )	7.81
Parámetro de escala ( $scale$ )	22.91
Parámetro de forma ( $s$ )	0.27
Suma de errores cuadráticos ( $SSE$ )	0.981
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.409

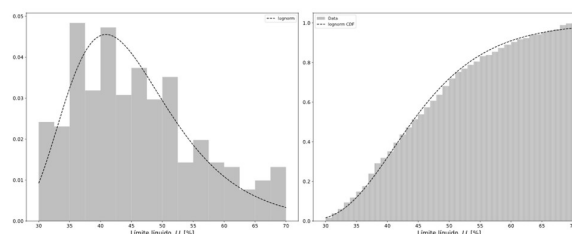


**Figura 8.** Humedad natural. Función de ajuste lognormal.

### 3.5 Función de distribución para $LL$

**Tabla 5.** Límite líquido. Parámetros característicos del ajuste.

Parámetro	Valor
Distribución	Lognormal
Parámetro de ubicación ( $loc$ )	17.75
Parámetro de escala ( $scale$ )	26.24
Parámetro de forma ( $s$ )	0.36
Suma de errores cuadráticos ( $SSE$ )	2.40
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.016

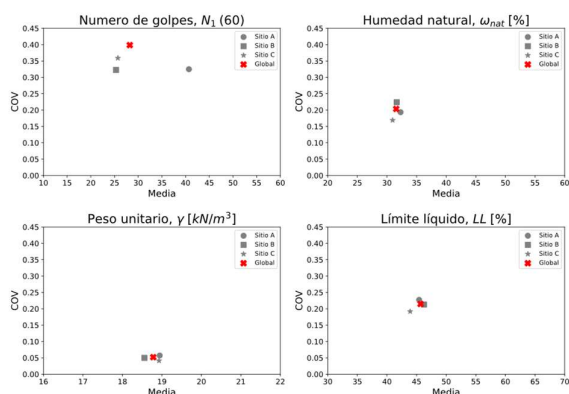


**Figura 9.** Límite líquido. Función de ajuste lognormal.

La Tabla 6 presenta un resumen de los parámetros estadísticos principales que describen la variabilidad inherente de los parámetros geotécnicos analizados. La Figura 10, presenta los coeficientes de variación obtenidos en forma individual para cada uno de los sitios en función de los valores medios.

**Tabla 6.** Variabilidad inherente de los parámetros físicos de la Fm. Pampeano, zona CABA (sitios A, B y C).

Parámetro	Media	Desvío	COV
Número de golpes, $(N_1)_{60}$	28	11	0.40
Peso unitario, $\gamma$ ( $kN/m^3$ )	18.8	1.0	0.05
Humedad natural, $\omega_n$ (%)	31.6	6.4	0.20
Límite líquido, $LL$ (%)	46	10	0.21



**Figura 10.** Coeficiente de variación en función de los valores medios.

#### 4 CONCLUSIONES

Para el desarrollo y la aplicación del diseño geotécnico basado en la confiabilidad resulta necesario contar con estimaciones realistas de la variabilidad de los parámetros del terreno. Tal como se mencionó anteriormente, la variabilidad de los parámetros de diseño del suelo debe evaluarse en función de la variabilidad inherente, del error de medición y de la propia incertidumbre de la transformación. En este trabajo se analizó por primera vez la variabilidad inherente de los parámetros físicos asociados a la Formación Pampeano a partir de los resultados obtenidos de tres campañas geotécnicas efectuadas en la Ciudad de Buenos Aires.

En la Tabla 6 se presenta un resumen de los resultados obtenidos. Particularmente, el peso unitario presentó el menor coeficiente de variación, aproximadamente igual al 5 % y con excepción del número de golpes SPT, todos los parámetros analizados han presentado una buena correlación entre los valores asociados a cada sitio y los valores globales obtenidos.

Además, los resultados obtenidos resultaron comparables con los especificados en AASHTO (2017). A saber,

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

Por último, se analizó la incertidumbre natural y experimental asociada al parámetro  $(N_1)_{60}$ . El coeficiente de variación obtenido es del orden del 40% y permite establecer de forma cuantitativa la fuerte incertidumbre asociada a este parámetro para la determinación de parámetros de resistencia o rigidez en reemplazo de ensayos que permitan su medición directa.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo agradecen a las empresas AOSA SA y SRK Consulting por permitir el uso de la información y herramientas de trabajo presentadas.

#### 6 REFERENCIAS

Bolognesi, A. (1975). *Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano*. V PCSMFE, Buenos Aires, V:255-302.

Codevilla M., Sfriso A. (2011). *Actualización de la información geotécnica de los suelos de la Ciudad de Buenos Aires*. XIV PCSMGE (Toronto, Canadá), paper 988.

Fernández P. (2020). *Calibración de factores de minoración LRFD para fundaciones superficiales*. CAMSIG XXV, Misiones, República Argentina.

Fidalgo, F., De Francesco, D., Pascual, R. (1975). *Geología superficial de la llanura Bonaerense*. VI Cong Geo Arg, Bahía Blanca.

Leoni A., Guaraglia D., Bielecki A., 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*. CAMSIG XIX, La Plata, República Argentina.

Nowak, A. S., Iatsko, O. (2017). *Revised load and resistance factors for the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. PCI Journal, 62(3), 46-58.

Núñez, E. (1986). *Panel report: geotechnical conditions in Buenos Aires City*. Proceedings, V ICIAEG, Buenos Aires.

Phoon, K. K., Kulhawy, F. H. (1999). *Characterization of geotechnical variability*. Can. Geotech. J., 36, 612-624.

Phoon, K. K., Kulhawy, F. H. (1999). *Evaluation of geotechnical variability*. Canadian Geotechnical Journal 36(4): 625-639.

Vanmarcke, E.H. (1983). *Random fields: analysis and synthesis*. MIT Press, Cambridge.