

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”

14 al 18 de Noviembre de 2022



ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO PARA LA OBTENCIÓN DE UN MODELO DEL ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO A PARTIR DEL ENSAYO CPTU. CASO DE ESTUDIO ZONA PILOTO OCCIDENTE SABANA DE BOGOTÁ

JULIAN RODRIGUEZ BEJARANO, YOLANDA CALDERON LARRAÑAGA

Ingeniero laboratorio de geotecnia

Dirección de Laboratorios – Laboratorio de Geotecnia

Grupo de investigación de materiales de interés geológico y geotécnico-

GIIGG

Servicio Geológico Colombiano



CONTENIDO

1. Introducción
2. Metodología
3. Zona de estudio
4. Insumos
5. Resultados
6. Conclusiones
7. Referencias



1.INTRODUCCION

La **Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano**, tiene dentro de sus objetivos estratégicos fomentar la investigación para el conocimiento del territorio; en este contexto, el laboratorio de Geotecnia viene desarrollando investigación desde el año 2020 para profundizar en el conocimiento geotécnico de materiales finos (arcillo-limosos) en el territorio nacional.



El proyecto tiene como zona piloto 1: el occidente de la sabana de Bogotá, lo datos analizados corresponden a una primera aproximación mediante 8 sondeos CPTu con profundidades variables entre 10m y 25m, realizados en el municipio del Rosal.

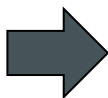


1.INTRODUCCION

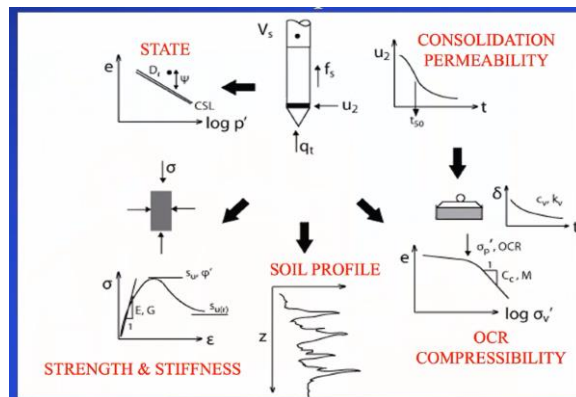
Perforación Recuperación muestra



Muestra



Laboratorio



Tomado Robertson 2016

CPTu Toma de datos in-situ

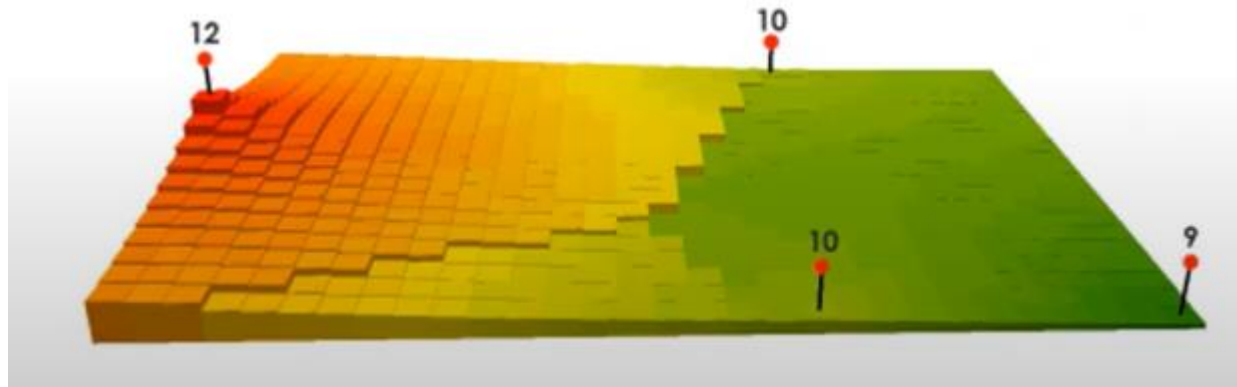




Que es Geoestadística?

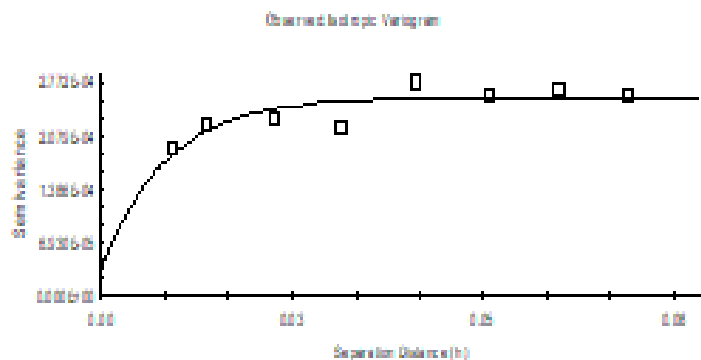
La Geoestadística es una metodología de estadística espacial usada para la estimación, predicción y simulación de datos correlacionados espacialmente, que en su análisis utiliza métodos exploratorios y de interpolación

La Geoestadística busca exhibir una estructura de correlación espacial.

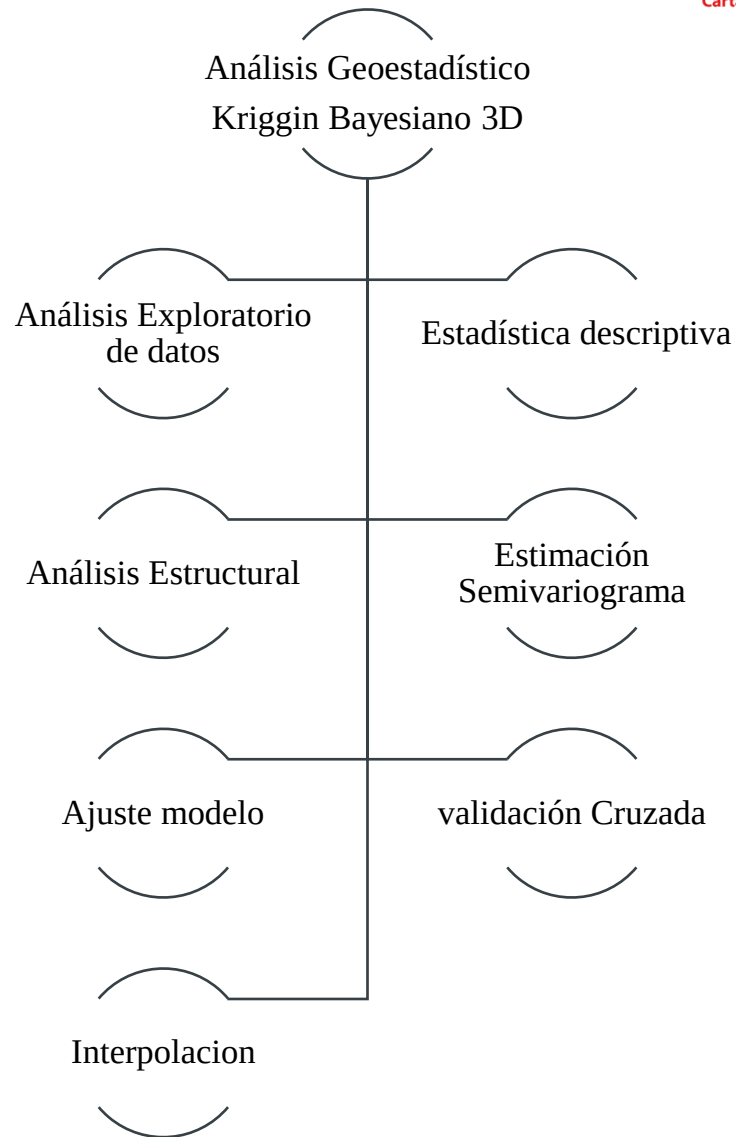




2.METODOLOGIA



Exponential model ($C_0 = 0.00003$; $C_0 + C = 0.00026$; $A_0 = 0.01$; $r^2 = 0.680$; $RSS = 2.075E-09$)





2.METODOLOGIA

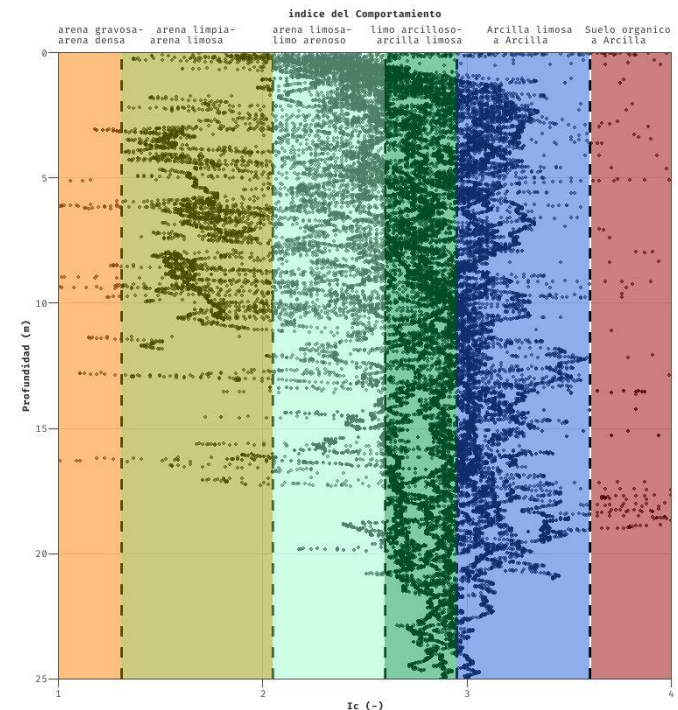
Indice del comportamiento

Resistencia en punta normalizada : $Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$

Fricción lateral normalizada : $Fr = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100 \%$

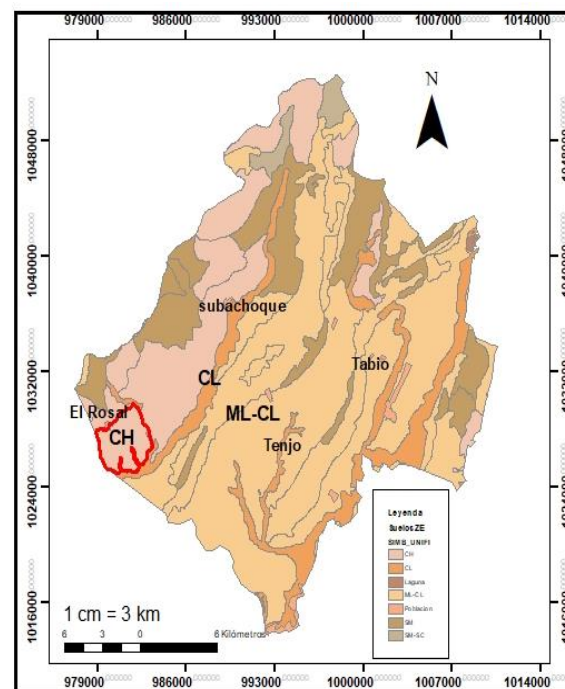
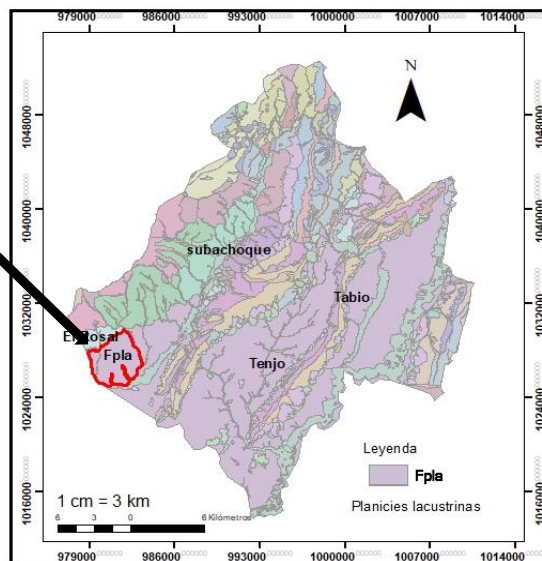
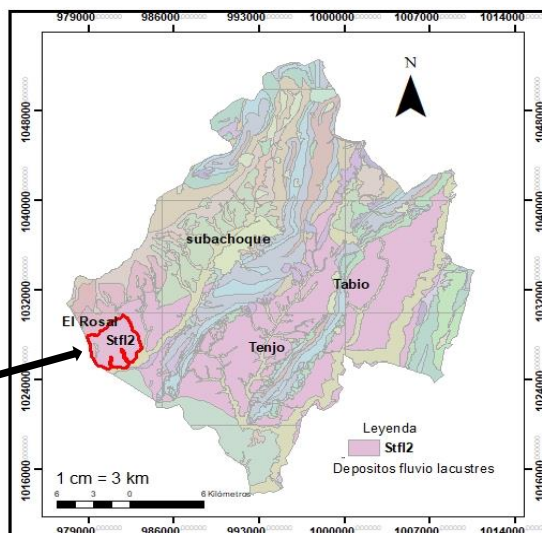
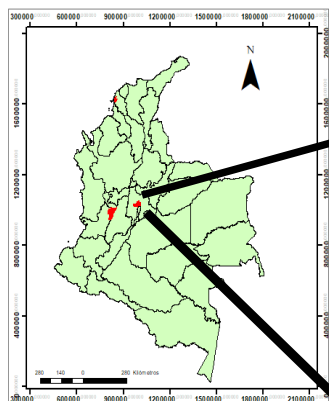
Índice de comportamiento (Robertson, 2009) : $I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log Fr + 1.22)^2)^{0.5}$

Zona SBTn	Tabla de Comportamiento	IC
1	Sensitivo, Grano Fino	N/A
2	Suelo organico a Arcilla	>3.6
3	Arcilla- Arcilla limosa a arcilla	2.95-3.6
4	limo arcilloso a arcilla limosa	2.60-2.95
5	arena limosa a limo arenoso	2.05-2.6
6	arena- arena limpia a arena limosa	1.31-2.05
7	arena gravosa a a arena densa	<1.31
8	arena muy rigida a arena arcillosa	N/A
9	grano- fino muy rigido	N/A

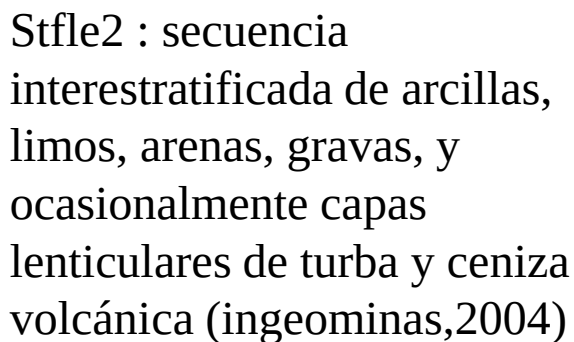




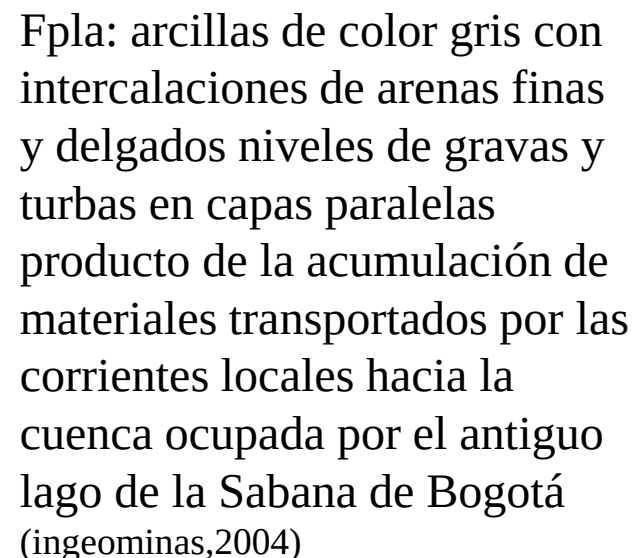
3. Zona de estudio



Geología (UGS)



Geomorfología

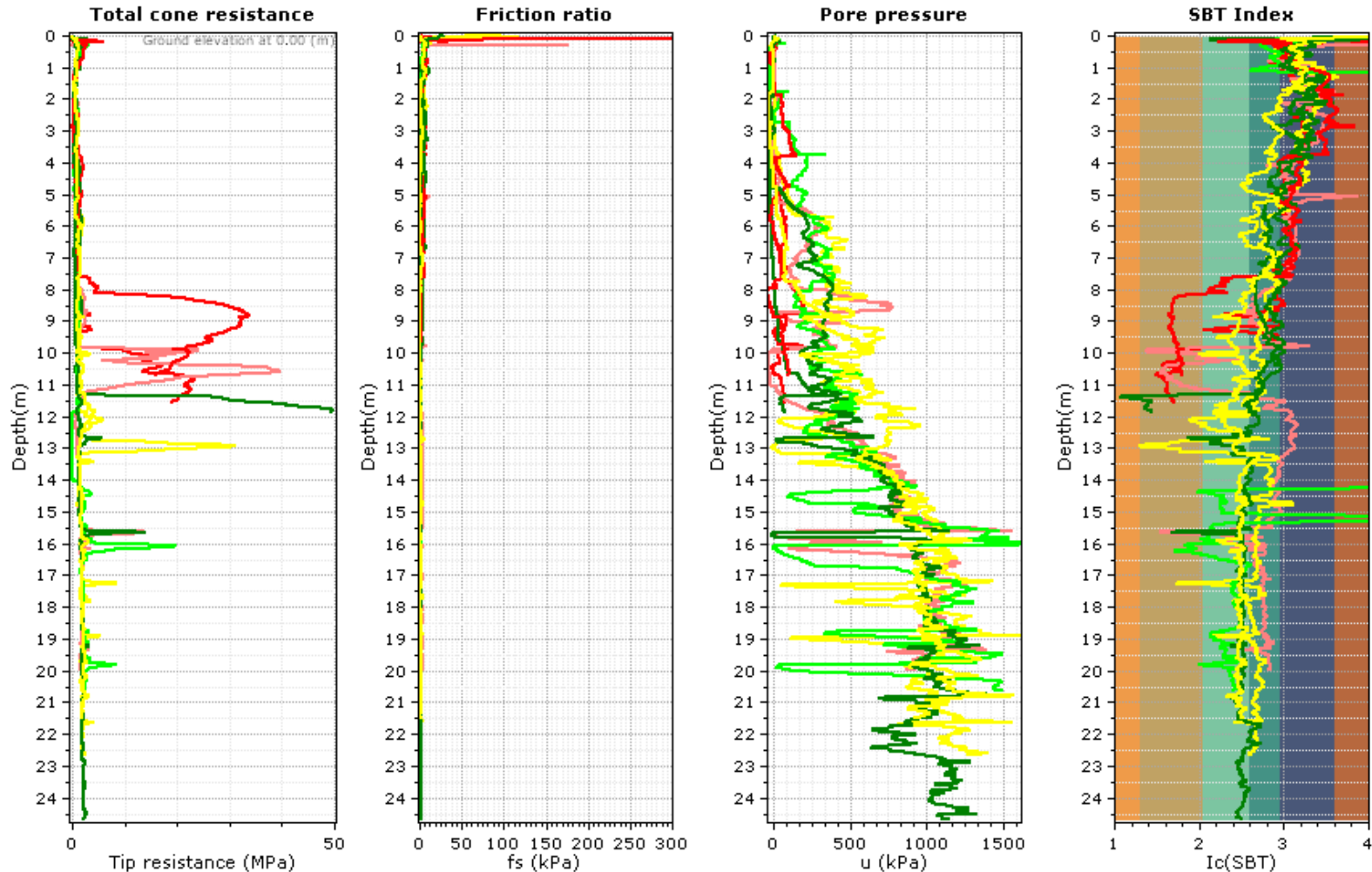




Datos insumos

Datos Ensayo CPTu

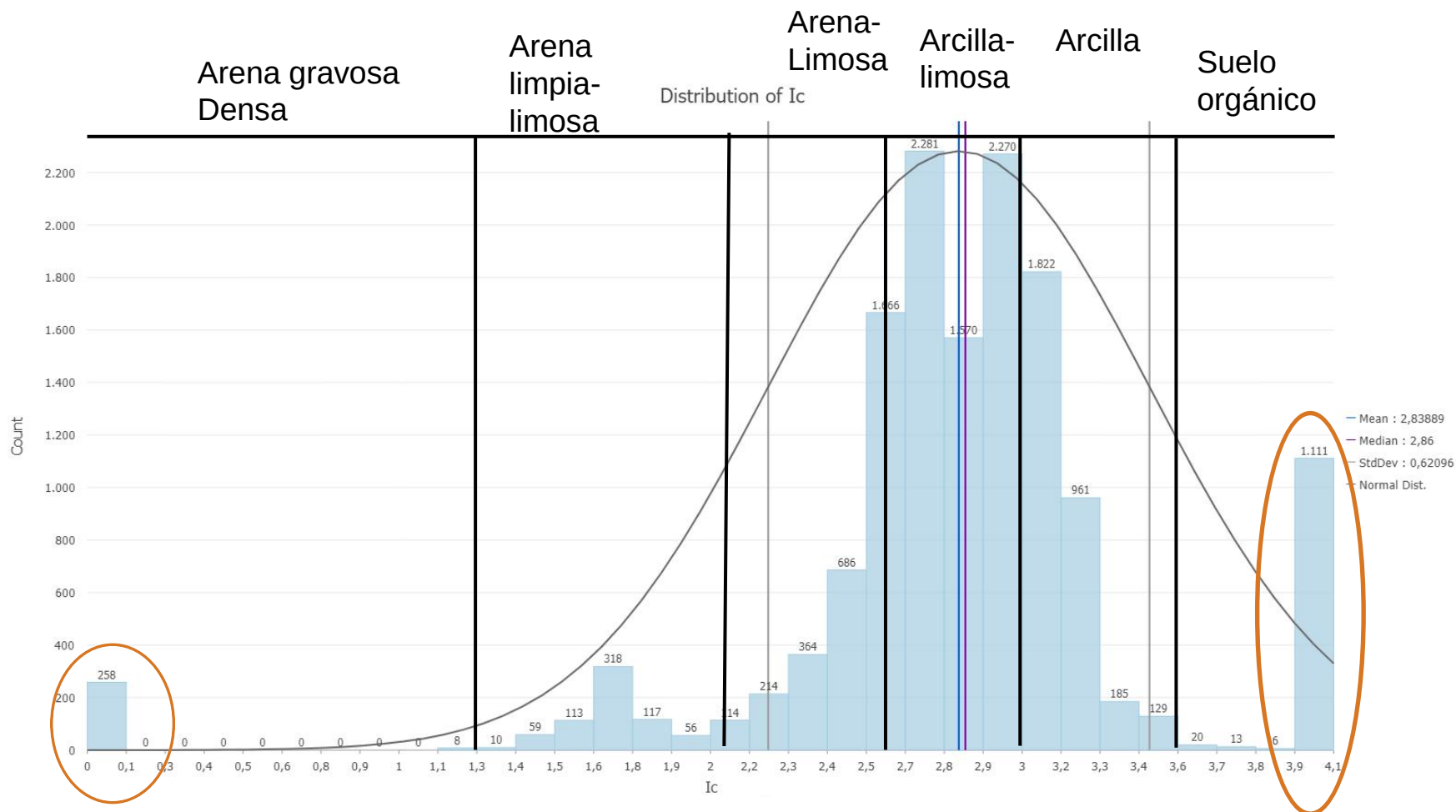
- CPTu1R0521
- CPTu4R0521
- CPTu3R0521
- CPTu2R0521
- CPTu20R0522
- CPTu8R0522
- CPTu1R0522
- CPTu2R0522





Resultados

Análisis Exploratorio de datos

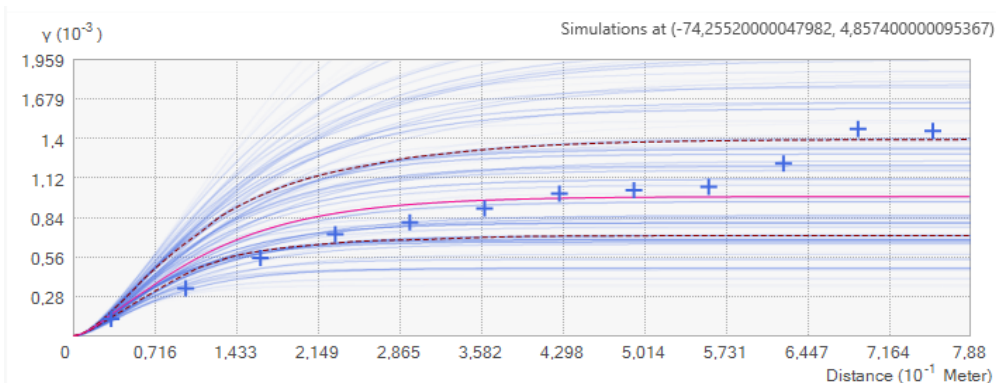




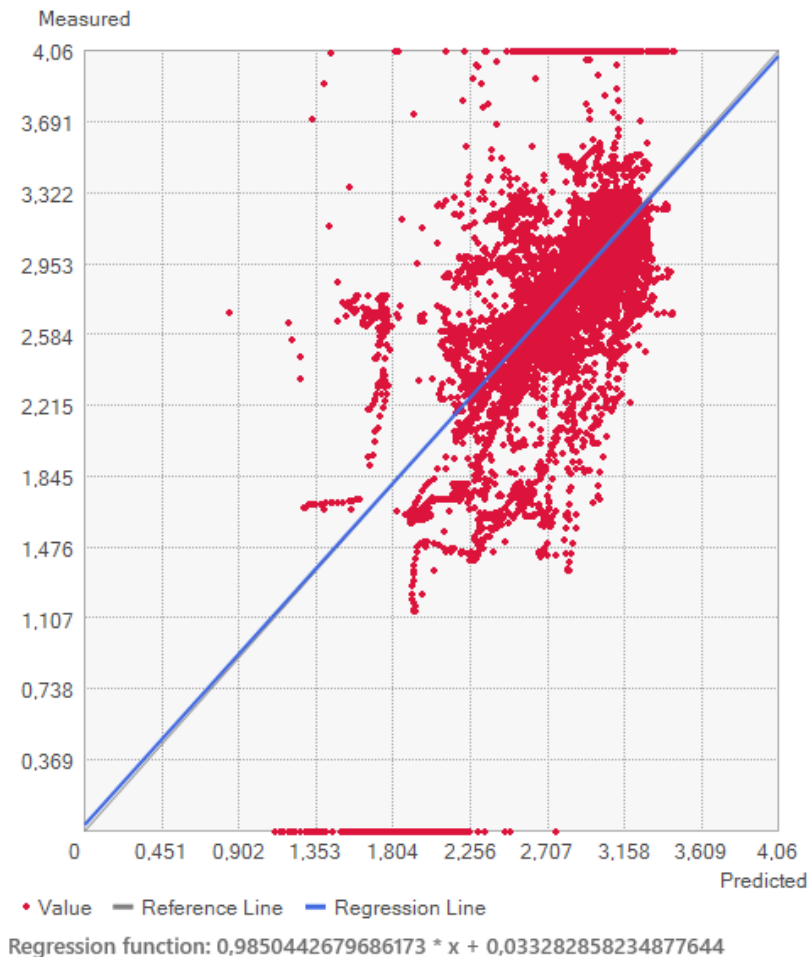
Resultados

Modelos evaluados

Modelos Evaluados Para Indice de comportamiento					
Tipo de kriggin	Prediccion	MODELO	RMS	ASE	RMSS
Krigging Bayesiano 3D	1	spline	0,956	1,6	1.01
	2	k-Bessel	0,558	1,863	0.7
	3	Estable	0,752	0,753	0.86
	4	Esferico	0,899	0,97	0.56
	5	Gausiano	0,635	0,69	2,23
	6	White	0,4722	0.451	1,17
	7	Estable	1,15	1,25	0.56
	8	Hole efect	0,877	5.09	3,8
	9	J-Bessel	0,936	1,2	0.588

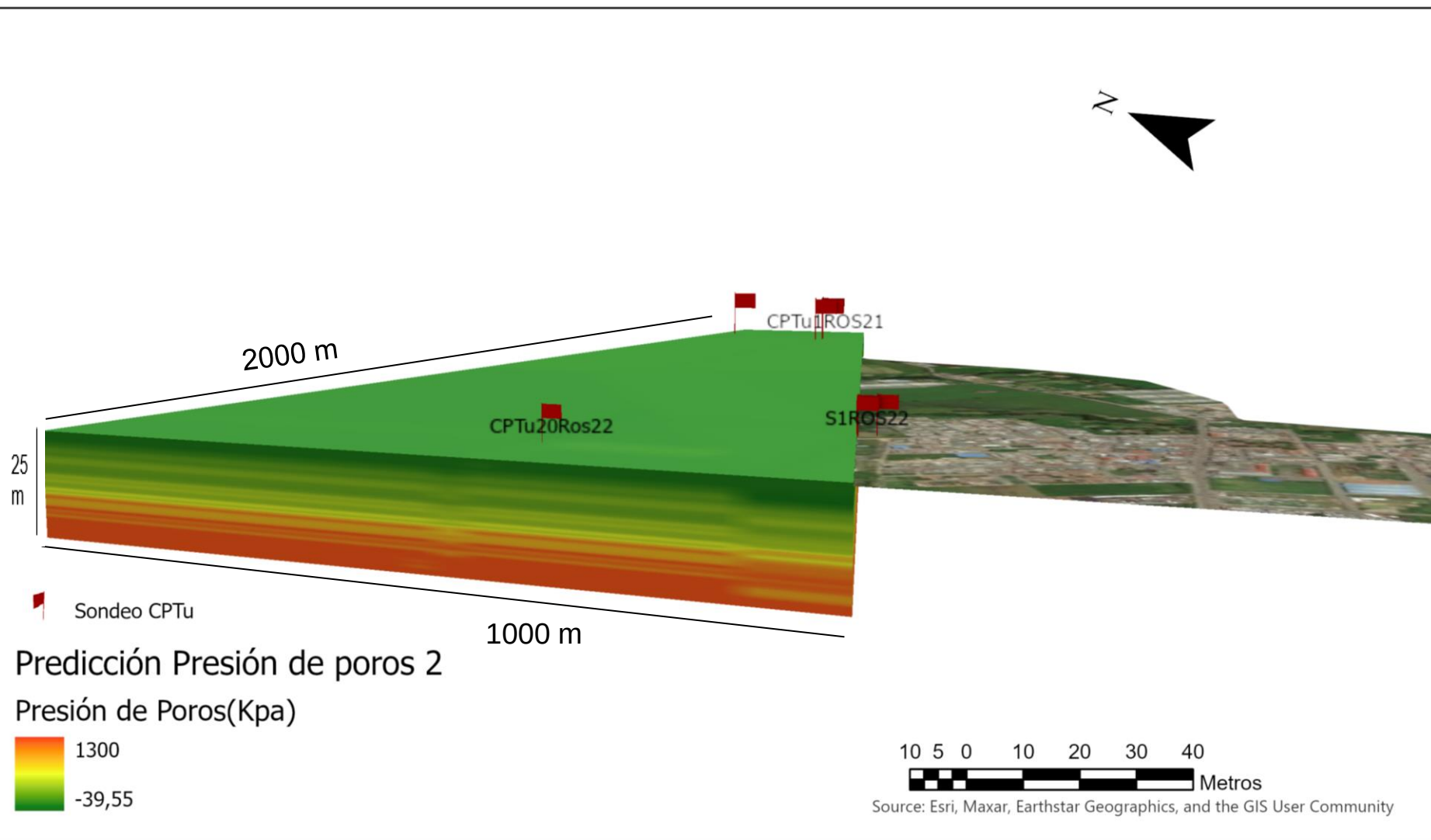


Modelo predicción white





Resultados





CONCLUSIONES

- 1- La metodología evaluada permite obtener modelos geomecánicos con buenas aproximaciones en tiempos óptimos, es adecuado para proyectos en etapa de prefactibilidad así como estudios a escala regional y media ya que permite determinar la distancia adecuada entre los sondeos minimizando la variabilidad de los datos recolectados.
- 2- Es importante destacar que los modelos evaluados deben ser calibrados mediante la inclusión de resultados de laboratorio.



CONCLUSIONES

Ventajas

- Permite simular los variogramas y sus errores adyacentes en el perfil (variabilidad espacial)
- Primer acercamiento del comportamiento Geomecánico en tiempos reducidos (etapas de prefactibilidad proyectos)
- Permite cuantificar los errores de predicción

Desventajas

- Tiempo de procesamiento en función de los datos analizados
(Capacidad computacional)



Referencias

Calderón, Y. et al. 2004. “Zonificación geomecánica de la sabana de Bogotá”.
INGEOMINAS

Diggle P.J., Ribeiro P.J. 2007 Model-based Geostatistics isbn 978-0-387-32907-9

Narvaez M., Torres C. 2020. Análisis geoestadístico para la obtención de un modelo geológico-geotécnico. caso de estudio metro de bogotá-Colombia

Parra L. 2020. Spatial geotechnical modeling of a lacustrine deposit using functional geostatistical analysis of CPTu tests.

Robertson, P.K. 2009. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Canadian Geotechnical Journal, 46(11): 1337–1355. doi:10.1139/T09-065



XVII CCG
SSAG 2022

Cartagena



SCG

50
años

1971-2021

¡GRACIAS!

¿Preguntas?

jfrodriguez@sgc.gov.co

SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO



MINISTERIO DE MINAS Y
ENERGÍA

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”

14 al 18 de Noviembre de 2022



HERRAMIENTA PARA ELABORACIÓN DE PERFILES GEOTÉCNICOS DE SUELOS USANDO MACHINE LEARNING



MARTHA ELIZABETH AVELLA C.
Maestría en Gestión de Información
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Director: Mg Francisco Sarmiento Devia
Codirector: Phd. Carlos Sainea Vargas





Contexto

Perfil del Terreno

Exploración del terreno y descripción.
Experiencias previas de campo



Comportamiento Observado



Observación y medición
Ensayos de Laboratorio y Campo.

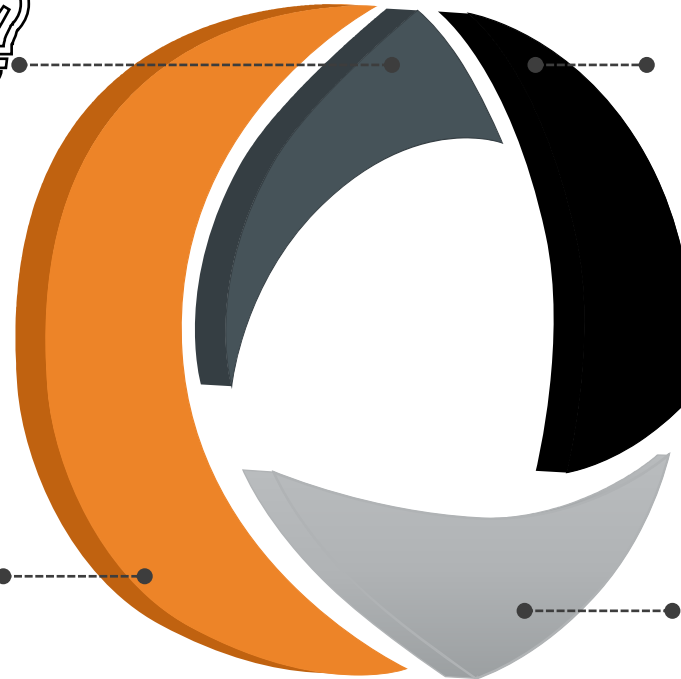
Genesis

Investigación del sitio
Procesos Geológicos o artificiales



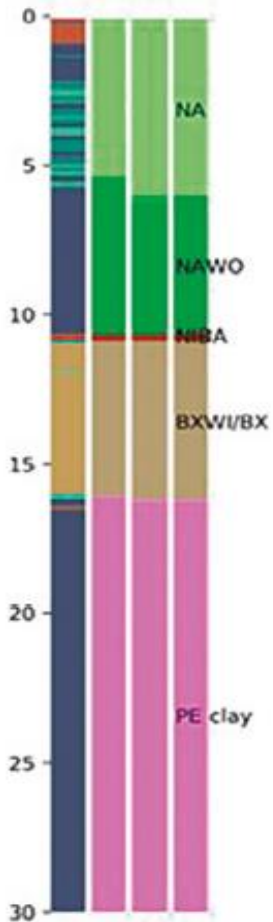
Modelo Aproximado

Modelización conceptual,
física o analítica

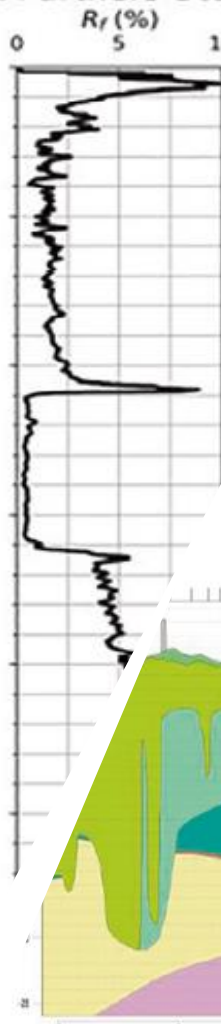
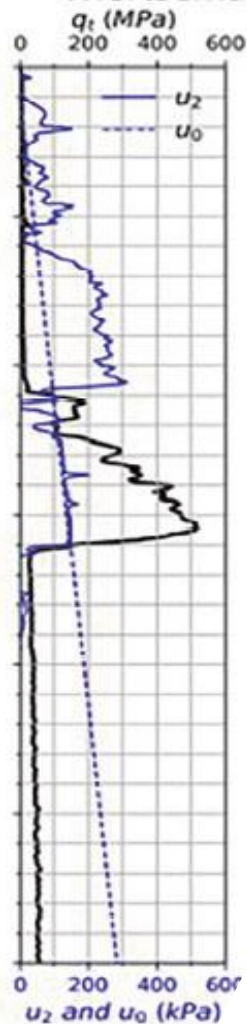


Accuracy: 0.973

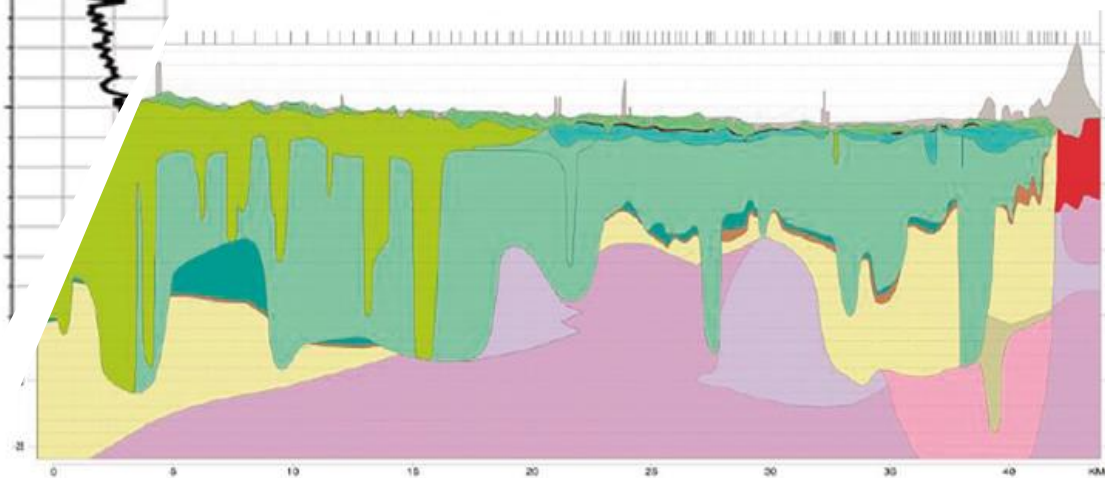
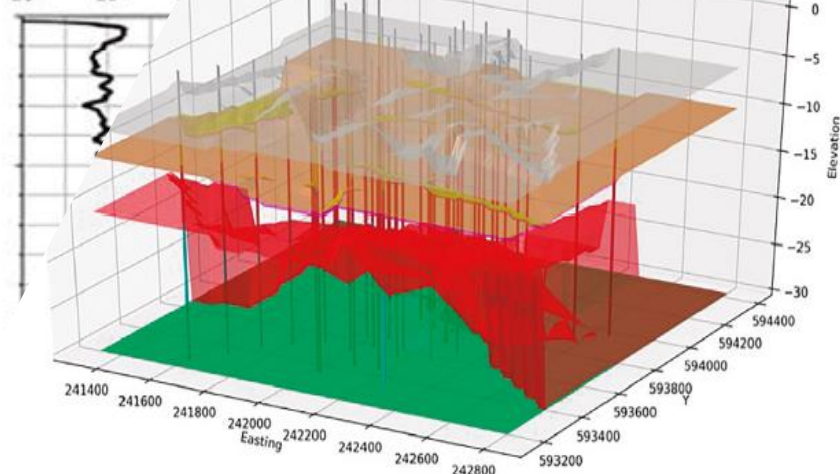
Detailed Prediction



Wiertsema & Partners-Stedum-68048-Df



γ (kN/m³)





Contexto

Perfil del Terreno

Exploración del terreno y descripción.
Experiencias previas de campo



Comportamiento Observado



Observación y medición
Ensayos de Laboratorio y Campo.

Genesis

Investigación del sitio
Procesos Geológicos o artificiales



**Empirismo o
Precedente
Experiencia
Reconocida**



Modelo Aproximado

Modelización conceptual,
física o analítica



Estado del Arte

IA

Auge generalizado a partir de tres factores :

- Disponibilidad de gran cantidad de datos (big data).
- El procesamiento gráfico (GPU).
- El procesamiento tensorial.

Machine Learning (ML)

Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) Comité TC304 - TC309 Aprendizaje automático

- Hacer accesibles los conjuntos de datos de referencia y la adquisición de macrodatos.
- Aplicar estos modelos a la ingeniería y habilitar el diseño geotécnico digital/automatizado.
- Estandarizar ML y construir un marco sólido para adquirir confianza en sus resultados y en la automatización.

Ingeniería Geotécnica

2018 - Chandan, Ritula Thakur – India -Tendencias de ML en la clasificación de suelos.

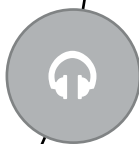
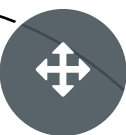
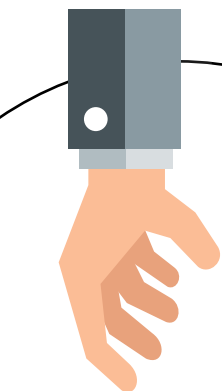
2021 - Ahmed M. Ebid – Egipto -Revisión de 626 artículo y Tesis aplicación de técnicas (IA) en ingeniería geotécnica.

2021 - Stefan Rauter and Franz Tschuchnigg - Austria Interpretación de datos CPT empleando ML

Latino America y Colombia

Uso de métodos analíticos y numéricos convencionales

2018 - Lucas O. Carvalho and Dimas B. Ribeiro1– Brazil -Un enfoque de aprendizaje automático de modelos múltiples para la clasificación del suelo a partir de datos de CPT





Planteamiento del Problema

Dificultad para realizar una adecuada clasificación geotécnica de suelos



Los intervalos de datos medidos son escasos

- Costo de los ensayos muy alto
- Información restringida y privada



Subjetividad en los resultados

- Dada la variedad de criterios y procesos, los equipos de expertos pueden no coincidir en los resultados de sus análisis
- Datos de respaldo insuficientes
- Estudio de la temática insuficiente
- Los ensayos y/o muestreos para cada análisis son insuficientes



Multiplicidad de variables para el análisis

- Espaciamiento muy grande entre sondeos y entre muestras
- Variabilidad en la distribución de los suelos
- Correlación de variables en pares para generar conclusiones a partir de métodos numéricos



Planteamiento del Problema





Objetivos del Proyecto

Objetivo General

Diseñar una herramienta que por medio del entrenamiento de algoritmos de Machine Learning apoye la clasificación geotécnica de suelos.





Objetivos del Proyecto

Objetivos Específicos:

- ❑ Analizar el core de negocio y algoritmos para la clasificación de suelos.
- ❑ Extraer y normalizar los datos de ensayos para varios tipos de suelo.
- ❑ Configurar el entrenamiento de los algoritmos de clasificación.
- ❑ *Validar los resultados a través de un ejercicio comparativo para suelos similares al caso de estudio.*



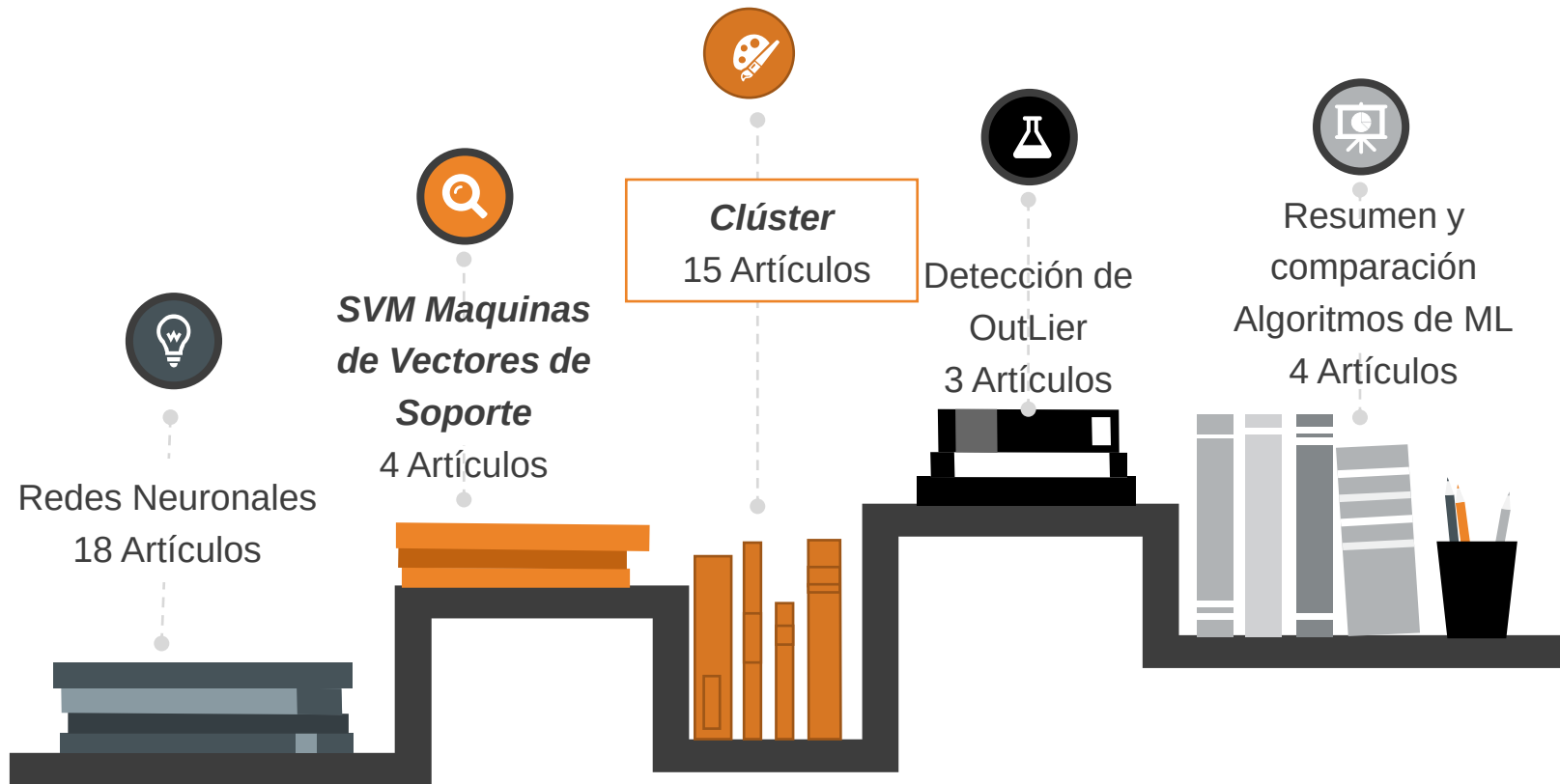


Metodología Propuesta





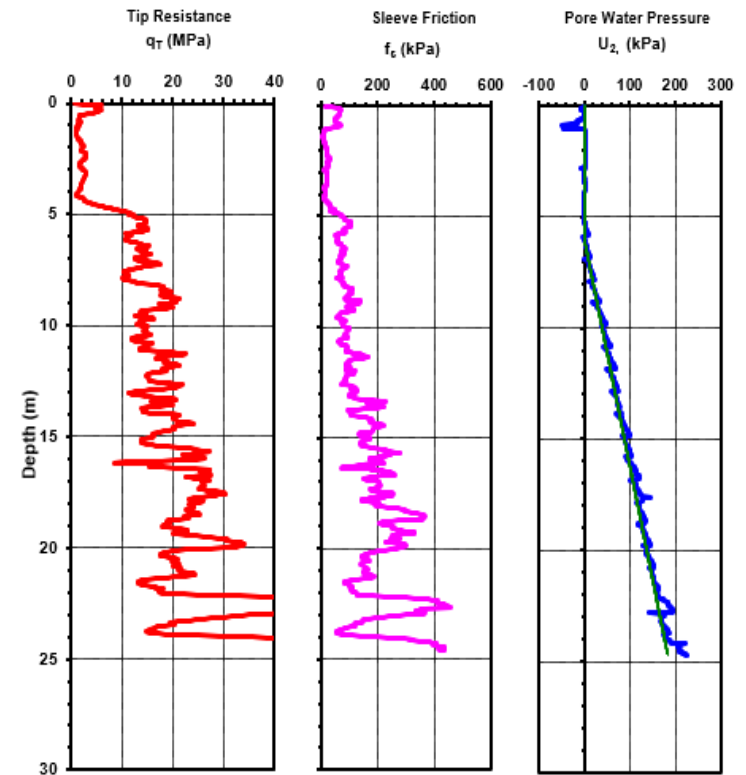
Resultados Parciales – Revisión Literaria





Resultados Parciales

- ❑ Establecer la utilidad de datos de suelos similares y de proyectos previos.
- ❑ Obtención de bancos de datos de ensayos CPT y CPTu.
- ❑ Selección de herramienta para la extracción de datos de gráficas.
- ❑ Exploración de algoritmos de ML k-vecino más cercano (KNN) y vecino más cercano ponderado por distancia (DWNN) gaussiano para clasificar los suelos usando los gráficos de Robertson en 2009 y 2016.



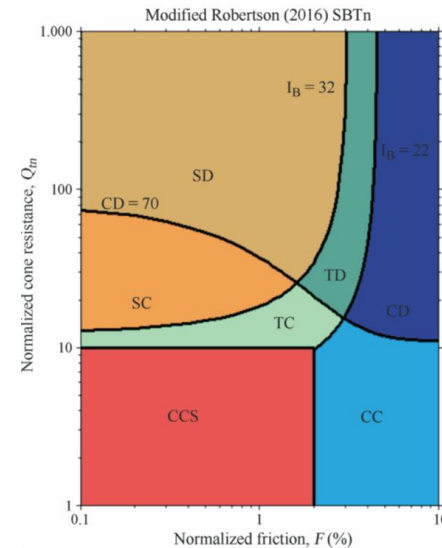
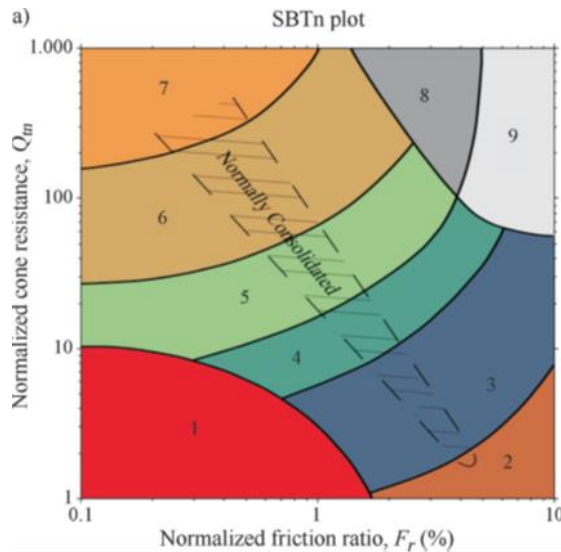
Georgia Institute of Technology, PaulMayne- Seismic Piezocone Penetration Test on Mooring , TN (2002)



Resultados Parciales

Las clases de suelo se definen utilizando el método de Robertson de acuerdo con su comportamiento (SBT y SBTn)

- ❑ **Resultados Previos**
- ❑ Evaluación de expertos del semillero SIGMA' - Grupo de investigación GIISAG
- ❑ Software CPeT-IT (Dr. Peter Robertson)



Canadian Geotechnical Journal , Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system - an update(2016).



Resultados Parciales

Bancos de datos de ensayos CPTu corresponden a 73 sondeos dispuestos por el profesor Mayne y 38 sondeos facilitados por el profesor Robertson de estudios previos, todos los datos de CPT se tomaron en intervalos de 2 a 5 cm, para un total de 11.083 muestras.

Ubicación	Cantidad de Sondeos
Gosnell, Arkansas, USA	1
Lenox, Tennessee, USA	1
Memphis, Tennessee, USA	16
Dexter, Missouri, USA	6
Mooring, Tennessee, USA	6
Marked Tree, Arkansas, USA	19
Collierville, Tennessee, USA	1
Meramec, Missouri, USA	4
Opelika, Alabama, USA	4
Wilson, Arkansas, USA	4
Wolf, Wyoming, USA	7
Wyatt, Missouri, USA	4

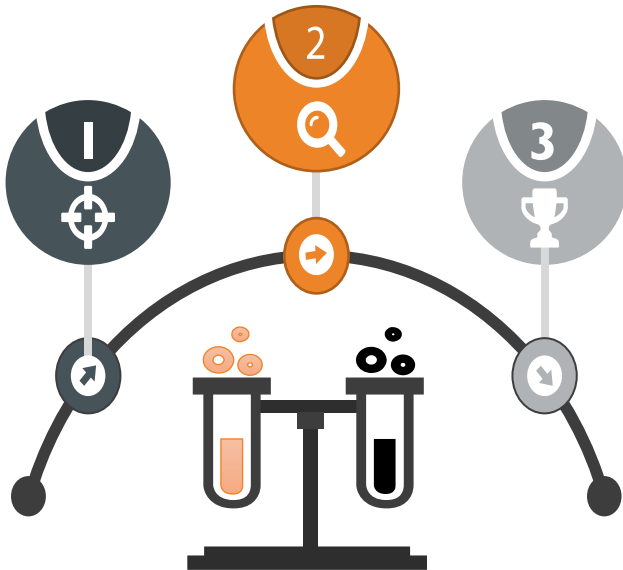
Ubicación	Tipo de Suelo
UBC, Canada	Mixed Soils
Venice Lagoon, Italy	Mixed Soils
Ford Center, USA	Mixed Soils
San Francisco, USA	Mixed Soils
Tailings, USA	Mixed Soils
UBC KIDD, Canada	Mixed Soils
UBC KIDD, Canada	Mixed Soils
Bothkennar, RU	Soft Clay
Burswood, Perth, Australia	Soft Clay
Onsoy, Norway	Soft Clay
Amherst, USA	Soft Clay
San Francisco Bay, USA	Soft Clay
San Francisco Bay, USA	Soft Clay
Newport Beach, USA	Soft Rock
LA Downtown, USA	Soft Rock
Newport Beach, USA	Soft Rock
Madingley, UK	Stiff Clay
Houston, USA	Stiff Clay

- a) <http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/Research/index.html>.
b) <https://github.com/Orbolato/KNN.git>.



Resultados Parciales

- Los algoritmos ML se desarrollan usando el lenguaje de programación Python.
- Se utilizan varias combinaciones de características de entrada:



Primer conjunto:

Profundidad z (m)
Resistencia del cono corregida q_t (MPa)
Fricción lateral f_s (kPa)
Presión intersticial u_2 (kPa)



Segundo conjunto:

Profundidad z (m)
Resistencia del cono normalizada Q_m
Fricción lateral normalizada Fr (%)
Presión intersticial normalizada B_q



Tercer conjunto:

Profundidad z (m)
Resistencia del cono normalizada Q_m
Fricción lateral normalizada Fr (%)
Presión intersticial normalizada U_2



Técnica KNN - DNN

Se utilizan las técnicas basadas en la distancia para replicar los sistemas de clasificación de suelos

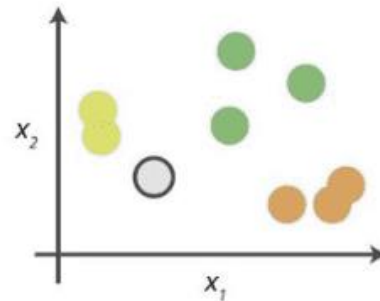
- k-vecino más cercano (KNN)

$$dist(x_i, x_j) = \sqrt[p]{\sum_{l=1}^d |x_i^l - x_j^l|^2}$$

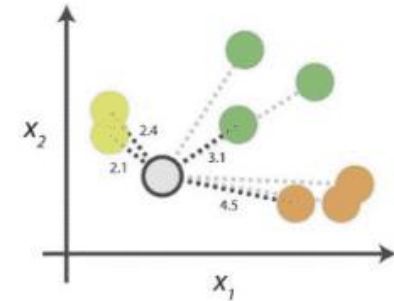
- Vecino más cercano ponderado por distancia (DWNN)

$$w(dist) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}dist^2}$$

0. Look at the data



1. Calculate distances



2. Find neighbours

Point Distance			
	...		2.1 → 1st NN
	...		2.4 → 2nd NN
	...		3.1 → 3rd NN
	...		4.5 → 4th NN

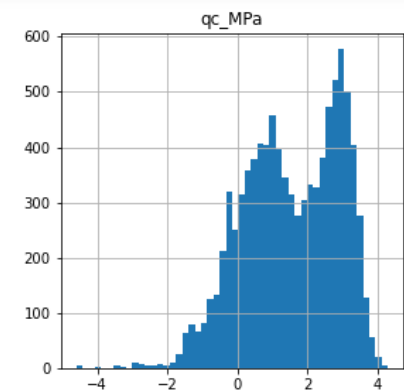
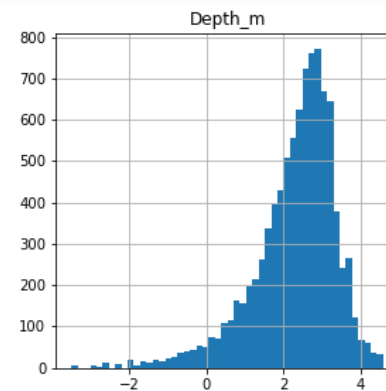
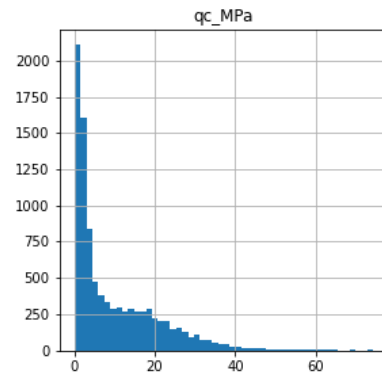
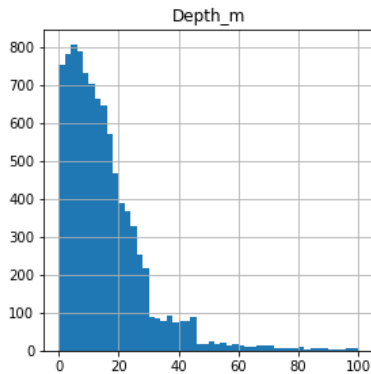
3. Vote on labels

Class	# of votes	
	2	 Class  wins the vote! Point  is therefore predicted to be of class  .
	1	
	1	



Pre-procesamiento de Datos

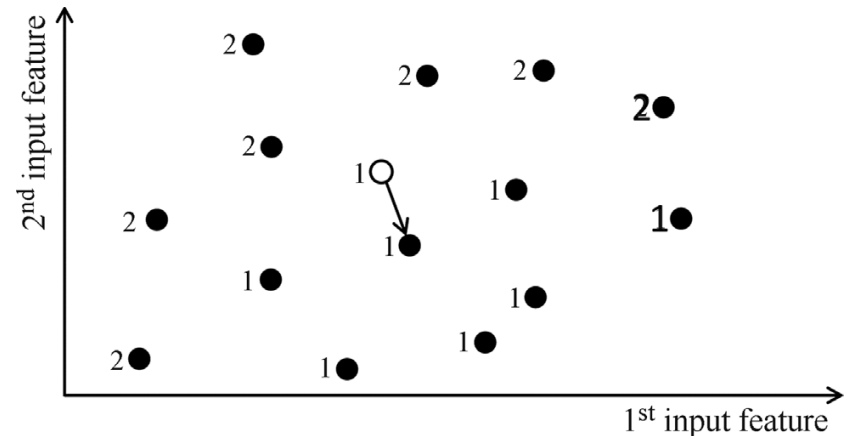
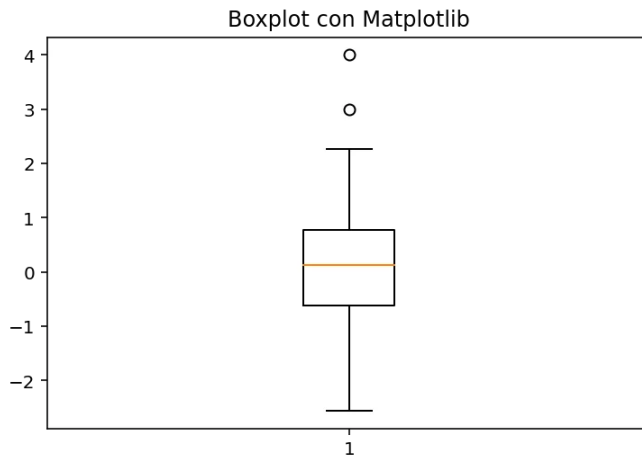
- Las técnicas de ML basadas en la distancia son sensibles a la escala de datos por lo que se normalizan todas las características de entrada al intervalo $[0, 1]$.





Pre-procesamiento de Datos

- ❑ Los datos tomados dentro de los sondeos CPT pueden contener ruido (datos faltantes y valores atípicos).
 - ❑ Eliminando los datos ruidosos que podían identificarse fácilmente por ausencia de datos.
- ❑ Primer criterio, procedimiento de limpieza automática usando diagramas de caja
- ❑ Como segundo criterio para decidir si, se eliminará cada valor atípico potencial identificado se usa Edit Nearest Neighbor;
- ❑ Eliminación de menos del 5%

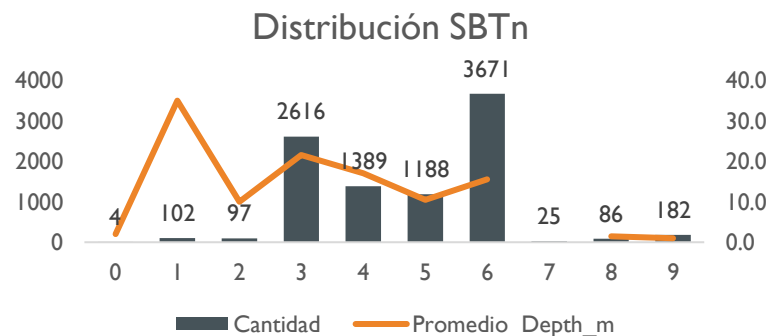
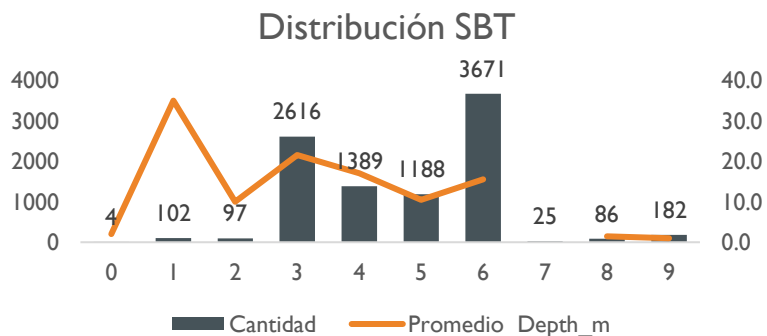
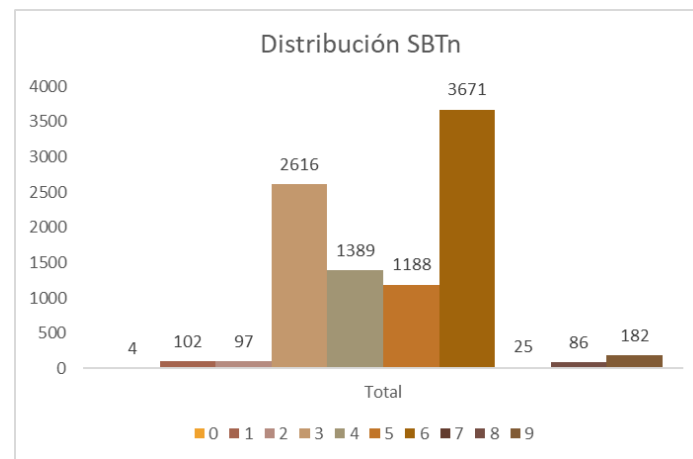
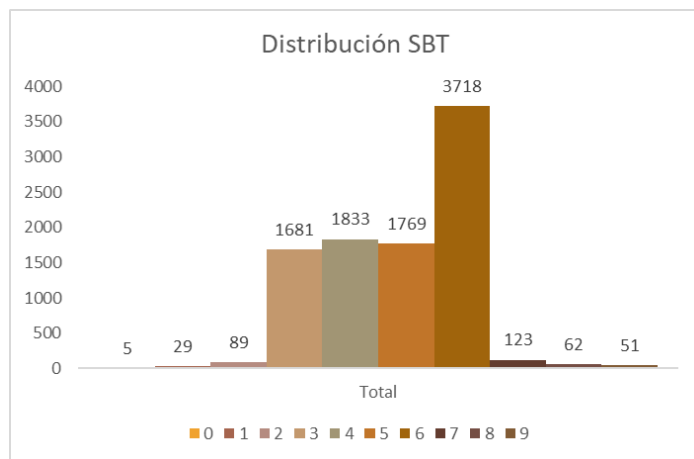


<https://www.analyticslane.com/2022/08/11/graficos-boxplot-con-matplotlib-en-python/>



Pre-procesamiento de Datos

- Se puede observar que las clases están, desequilibradas, lo que se espera de los sondeos CPT reales

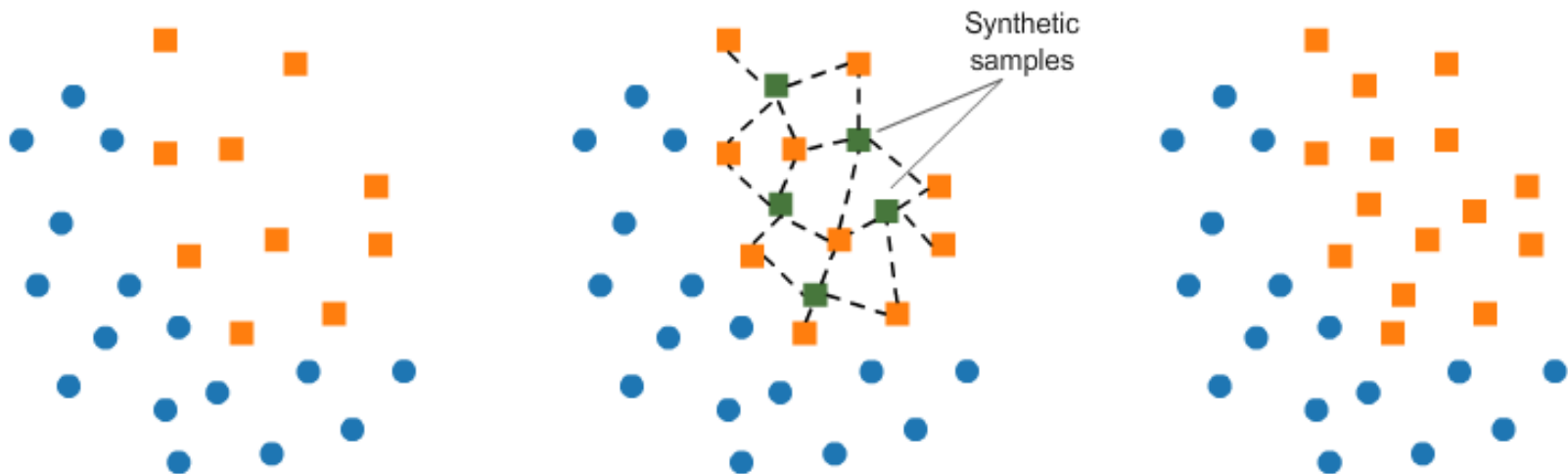


Histograma d distribución de datos según la clasificación de Robertson



Pre-procesamiento de Datos

Para crear nuevos ejemplos artificiales para las clases minoritarias se utilizó la técnica SMOTE.



<https://medium.com/@asheshdas.ds/oversampling-to-remove-class-imbalance-using-smote-94d5648e7d35>

Para una mejor distribución dentro del espacio de características de entrada, se estima cada nuevo objeto artificial d-dimensional a partir de $d + 1$ ejemplos originales



Procesamiento de Datos

Para generar comparaciones estadísticamente relevantes, se aplicó un procedimiento de validación cruzada de 10 veces (k-fold)

Características	K	k Mean	SD
$Q_{tn} Fr$	1	91,69	0,56
$Q_{tn} Fr U_2$	3	91,86	0,95
$Q_{tn} z Fr$	1	89,75	0,66
$Q_{tn} z Fr U_2$	1	87,91	1,12

Características	K	k Mean	SD
$Q_{tn} Fr$	1	91,69	0,56
$Q_{tn} Fr U_2$	1	91,79	0,97
$Q_{tn} z Fr$	1	89,75	0,66
$Q_{tn} z Fr U_2$	1	88,00	1,00

Tabla 3 Resultados KNN para Robertson

Tabla 4 Resultados KNN para Robertson ajustado

Características	K	k Mean	SD
$Q_{tn} Fr$	7	84,35	0,39
$Q_{tn} Fr U_2$	1	89,10	0,28
$Q_{tn} z Fr$	3	89,25	0,46
$Q_{tn} z Fr U_2$	1	89,14	0,54

Características	K	k Mean	SD
$Q_{tn} Fr$	7	88,90	0,40
$Q_{tn} Fr U_2$	1	91,86	0,28
$Q_{tn} z Fr$	1	93,02	0,38
$Q_{tn} z Fr U_2$	1	93,83	0,55

Tabla 5 Resultados KNN para Robertson

Tabla 6 Resultados KNN para Robertson ajustado



Comentarios Finales

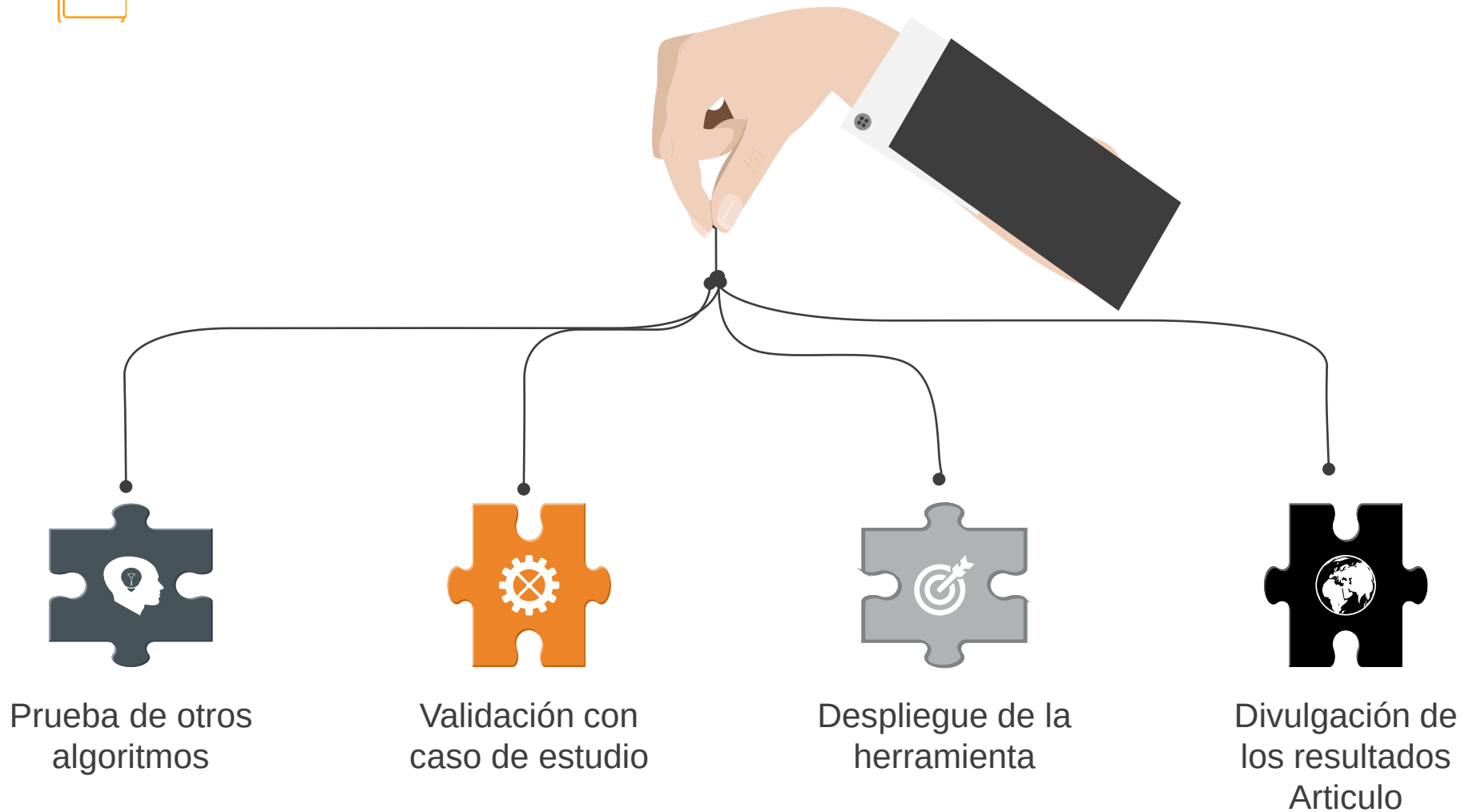
- ❑ Las soluciones deben validarse utilizando la validación cruzada k-fold ó LOO (leave-one-out).
- ❑ Un modelo es más útil si se puede implementar en una gama más amplia de condiciones reales (datos).
- ❑ En al exploración preliminar se puede obtener una precisión razonable sin las normalizaciones propuestas en la literatura para los datos de CPT
- ❑ La clasificación geotécnica de basada en datos todavía esta en una etapa temprana de desarrollo que requiere un fuerte acoplamiento de la investigación con la práctica, considerando que gran parte de los datos son producidos por la industria

"Todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles"





Próximos Pasos





XVII CCG
I SSAG 2022

Cartagena



SCG

50
años

1971-2021

¡GRACIAS!

¿Preguntas?

martha.avella@mail.escuelaing.edu.co

martha.avella@uptc.edu.co

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”

14 al 18 de Noviembre de 2022



GEO CARACTERIZACIÓN A PARTIR DEL SPT

Jorge A. Rodriguez, PhD
Gerente
Jeoprobe SAS
Jorge.rodriguez@jeoprobe.com

RESISTENCIA MATERIALES GRANULARES

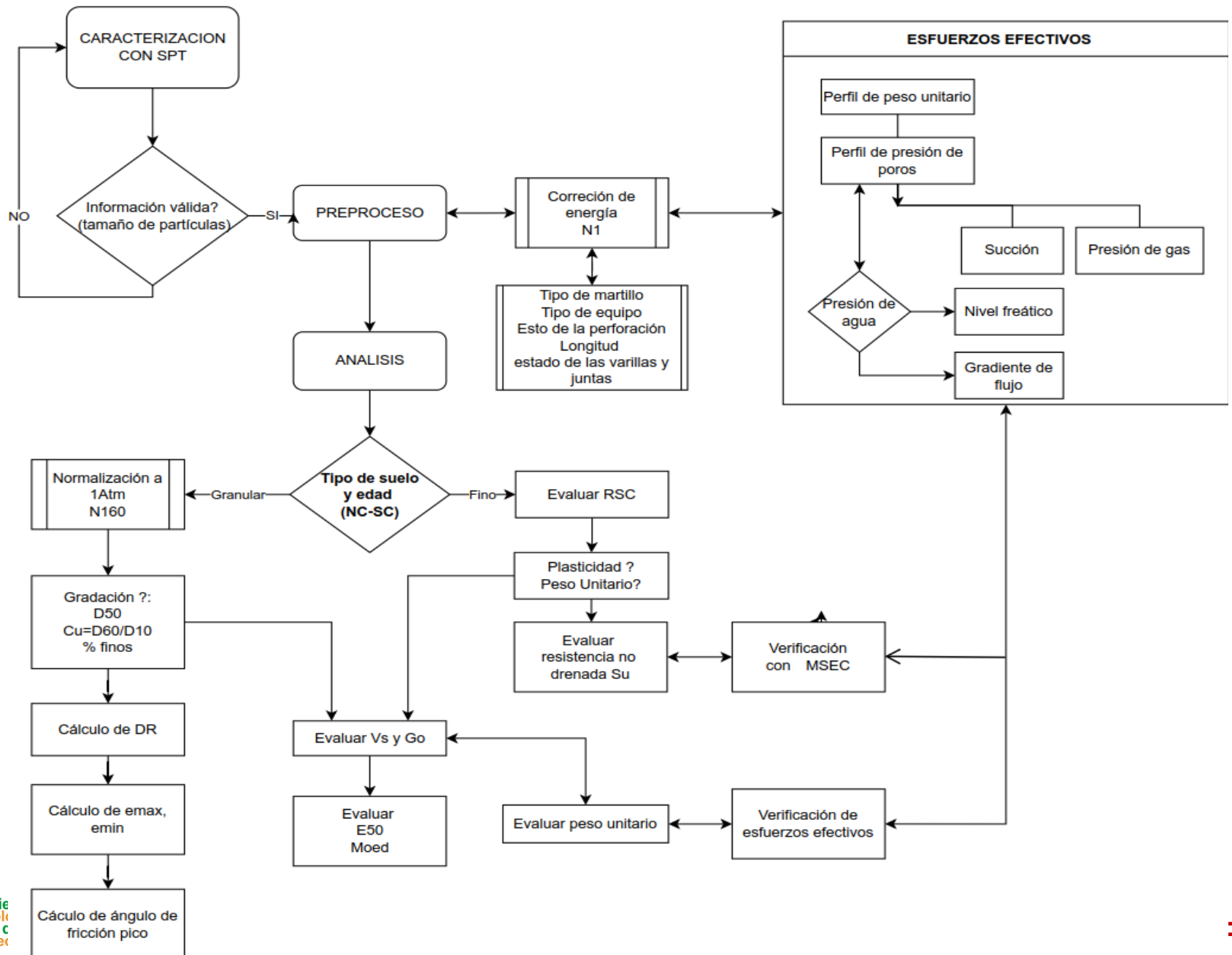
1. Aplicabilidad ensayo en función del tamaño de las partículas que se encuentran en el terreno
2. Proceso de la información para tener en cuenta correcciones por energía y por confinamiento
3. Evaluación del estado de esfuerzos efectivos considerando presión del agua, incluyendo la consideración de la succión en suelos parcialmente saturados o con gas, y peso de los materiales en el perfil de suelos
4. Obtención de parámetros por correlaciones teniendo en cuenta el tipo de material: suelos granulares o materiales finos

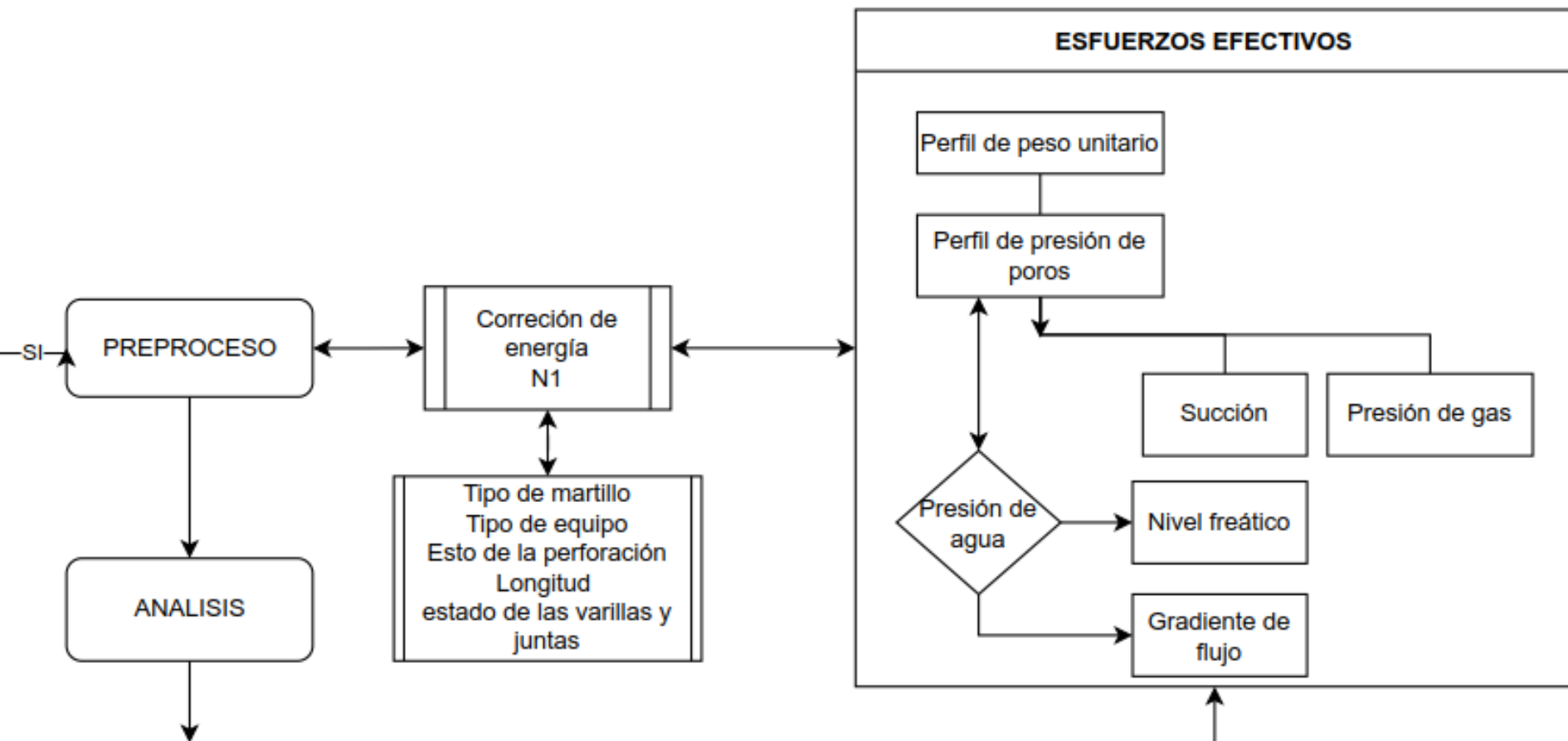
En el caso de suelos granulares:

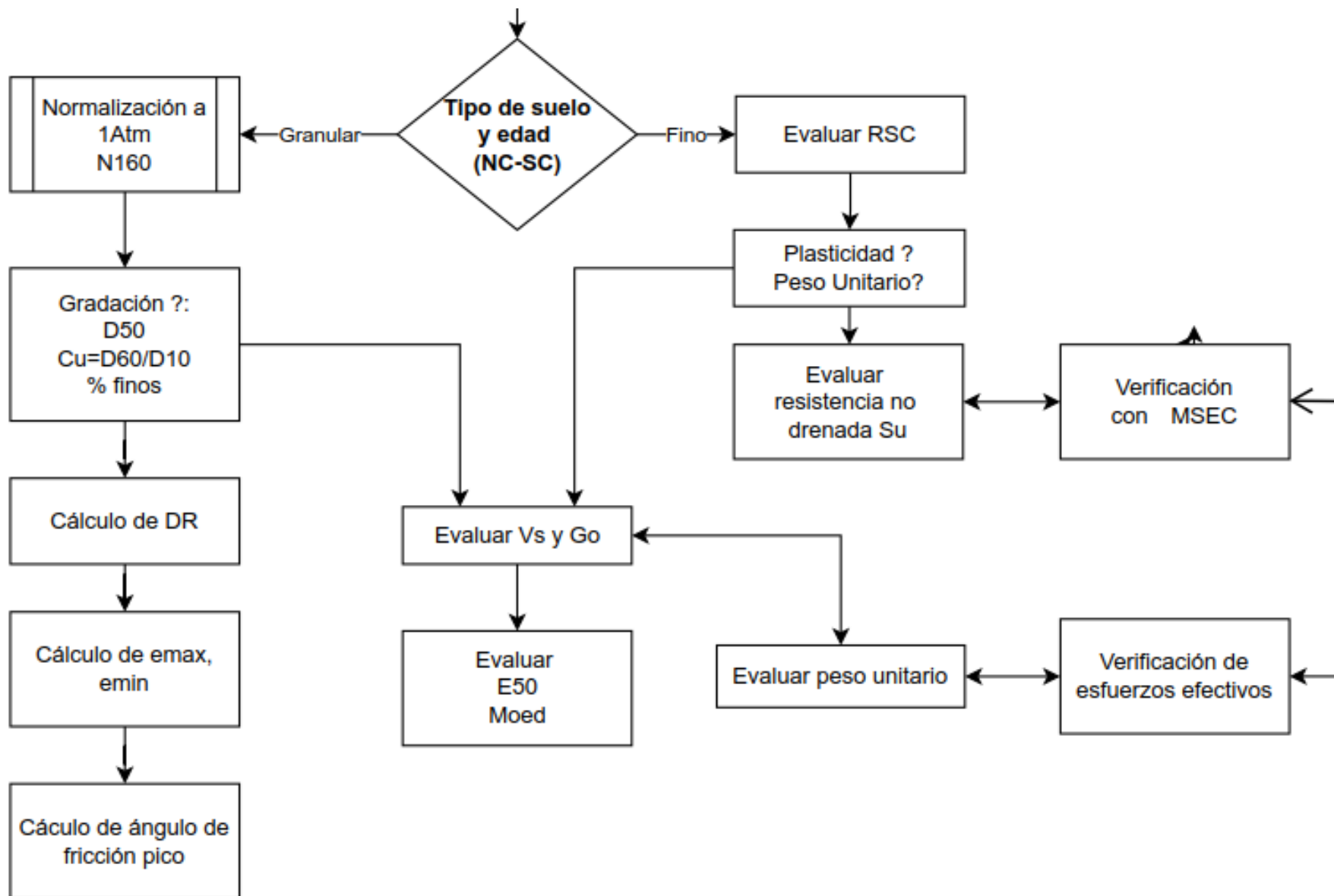
1. Dar consideración a la normalización por esfuerzo efectivo y por gradación, en particular tamaño medio de partículas distribución granulométrica y contenido de finos
2. Estimar las relaciones de vacíos máximos y mínimas y la densidad relativa
3. Con base en lo anterior estimar el ángulo de fricción pico movilizado en la prueba

En el caso de suelos finos:

1. Evaluar la relación de sobre consolidación
2. Tener en cuenta la plasticidad y peso unitario y estimar la resistencia al corte en condición no drenada que es la que se mide en el ensayo dado que es un ensayo dinámico de muy corta duración.
3. La resistencia al corte evaluada se puede verificar aplicando principios de mecánica de suelos de estado crítico para verificar la consistencia y validez de la interpretación







Developments in Geotechnical Engineering

Jay Ameratunga
Nagaratnam Sivakugan
Braja M. Das

Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering

Ameratunga, J. Sivakugan, N., Das, B. Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. Springer (2016).

RESISTENCIA MATERIALES GRANULARES

Kulhawy and Mayne (1990) analyzed several unaged normally consolidated sand and provided the following correlation for relative density, D_r , of sand:

$$\frac{(N_1)_{60}}{D_r^2} = 60 + 25 \log D_{50} \quad (4.21)$$

Or

$$D_r(\%) = \left[\frac{(N_1)_{60}}{60 + 25 \log D_{50}} \right]^{0.5} \times 100 \quad (4.22)$$

where

D_{50} = median grain size (mm)

Kulhawy and Mayne (1990) provided a modification of Eq. (4.22) to account for the effect of aging and overconsolidation in the form,

$$D_r(\%) = \left[\frac{(N_1)_{60}}{(60 + 25 \log D_{50}) C_A C_{OCR}} \right]^{0.5} \quad (4.23)$$

where

C_A = correction factor for aging

C_{OCR} = correction for overconsolidation

The correlations for C_A and C_{OCR} can be expressed as,

$$C_A = 1.2 + 0.05 \log \left(\frac{t}{100} \right) \quad (4.24)$$

t = time, in years, since deposition

$$C_{OCR} = (OCR)^{0.18} \quad (4.25)$$

OCR = overconsolidation ratio

Meyehof (1957) provided a correlation between D_r and N in the form

$$N = \left(17 + 24 \frac{\sigma'_o}{p_a} \right) D_r^2 \quad (4.19)$$

Or

$$D_r(\%) = 20.4 \left(\frac{N}{0.7 + \frac{\sigma'_o}{p_a}} \right)^{0.5} \quad (4.20)$$

The standard penetration number given in Eqs. (4.19) and (4.20) are approximately equal to N_{60} . It gives fairly good estimates for clean, medium fine sands.

Correlación Resistencia en condición no drenada [“cohesion”] (S_u) Con N para suelos finos

Table 4.7 provides the approximate consistency, corresponding N value, and undrained cohesion (c_u) of clay soils (Terzaghi and Peck 1967). These values need to be used with care.

Table 4.7 Approximate variation of consistency, N , and undrained cohesion of clay

Consistency	N	c_u (kN/m ²)
Very soft	0–2	<12
Soft	2–4	12–25
Medium	4–8	25–50
Stiff	8–15	50–100
Very stiff	15–30	100–200
Hard	>30	>200

From the table it is evident that

$$c_u \text{ (kN/m}^2\text{)} \approx KN \quad (4.53)$$

where $K=6$ and N N_{60}

Stroud (1975) provided a correlation between N , c_u , and plasticity index (PI) of clay soils, which is of the form

$$\frac{c_u}{p_a} = \alpha N \quad (4.55)$$

The hammer used for obtaining the data had an energy ratio of approximately 73 %. For an energy ratio of 60 %, the α value provided by Stroud (1975) have been modified by Salgado (2008) as,

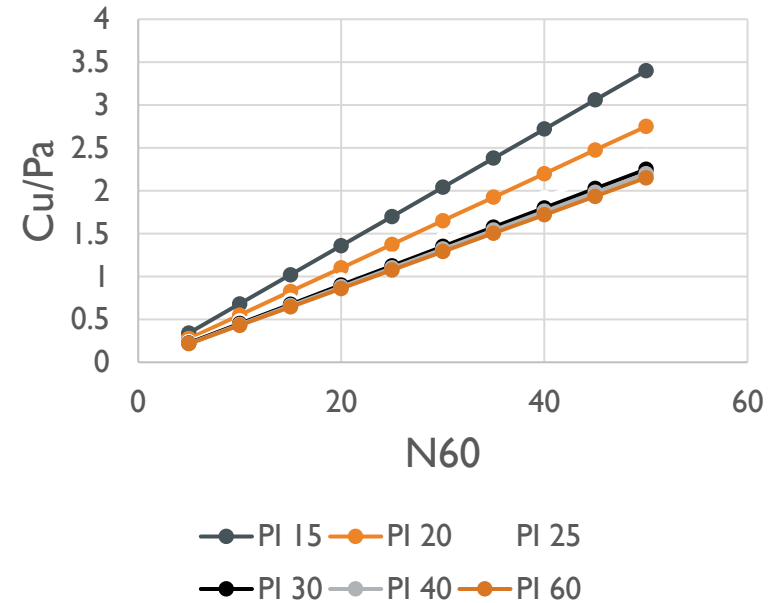
$$\alpha' = \frac{73}{60} \alpha \approx 1.22\alpha$$

Table 4.9 Variation of α' with plasticity index (PI)

Hence, Eq. (4.54) can be rewritten as

$$\frac{c_u}{p_a} = \alpha' N_{60} \quad (4.56)$$

The interpolated values of α' with plasticity index are given in Table 4.9.



PI	α'
15	0.068
20	0.055
25	0.048
30	0.045
40	0.044
60	0.043

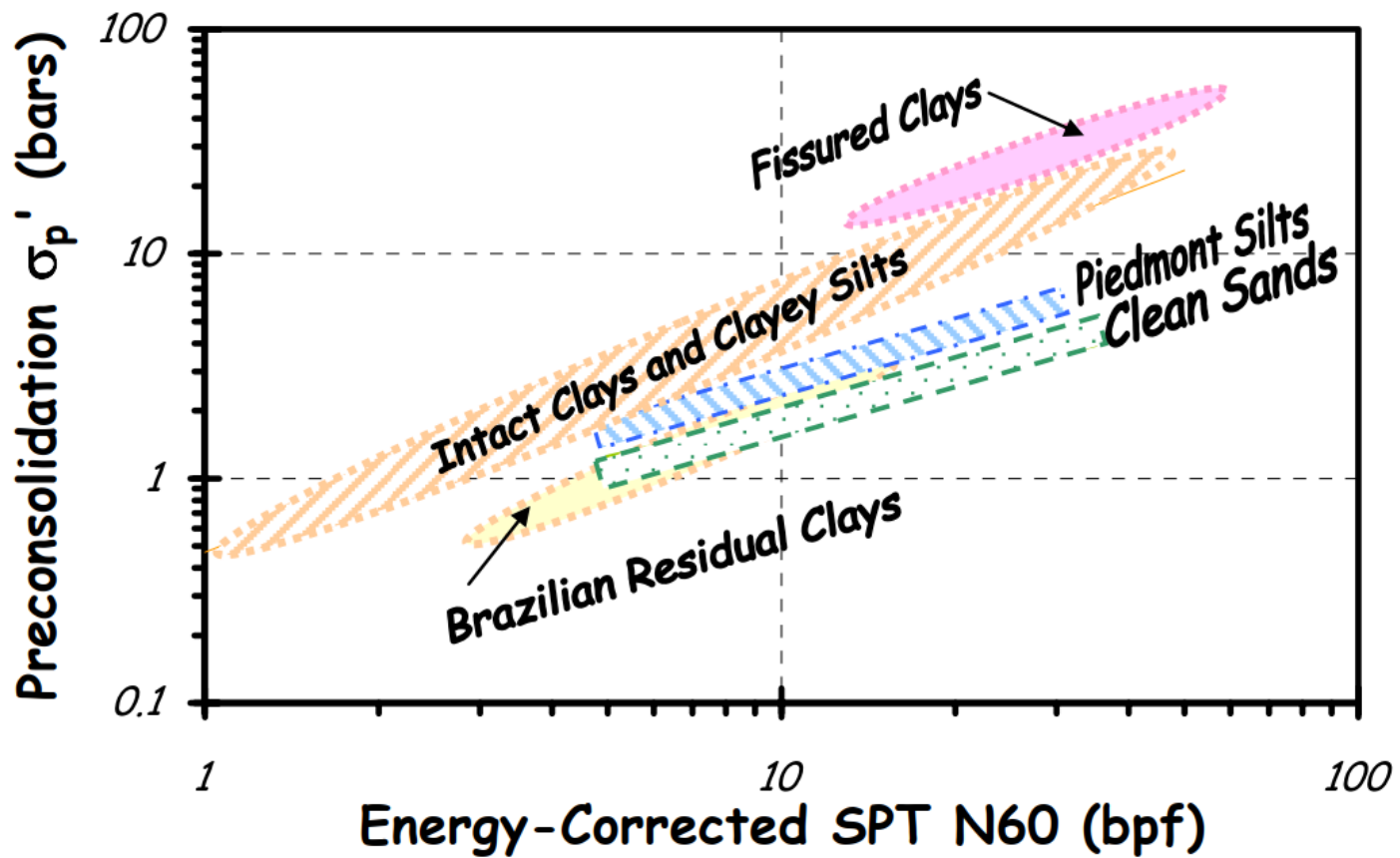
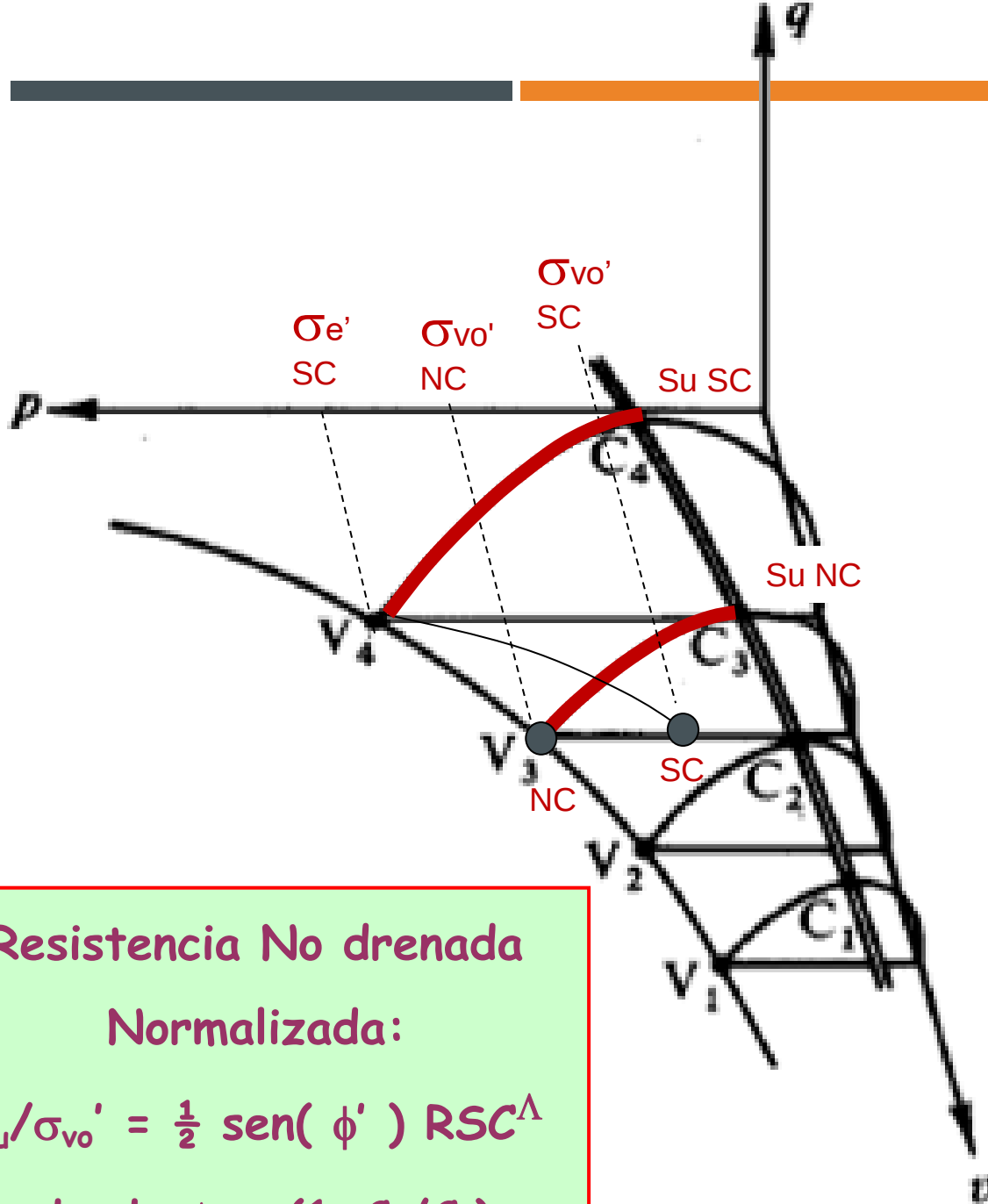


Figure 37. Apparent preconsolidation stress vs. N_{60} for soils (after Mayne 1992).



Inicialmente :

$s_u / \sigma_{v0}' = \text{constante}$ para
suelos NC (aprox.0.2)

En compresión primaria :

$$\sigma_{v0}' = \sigma_e'$$

Entonces:

$s_u / \sigma_e' = \text{constante}$ para
todo suelo (NC & SC)

Para corte simple :

$$s_u / \sigma_e' = \frac{1}{2} \sin \phi'$$

Esfuerzo equivalente:

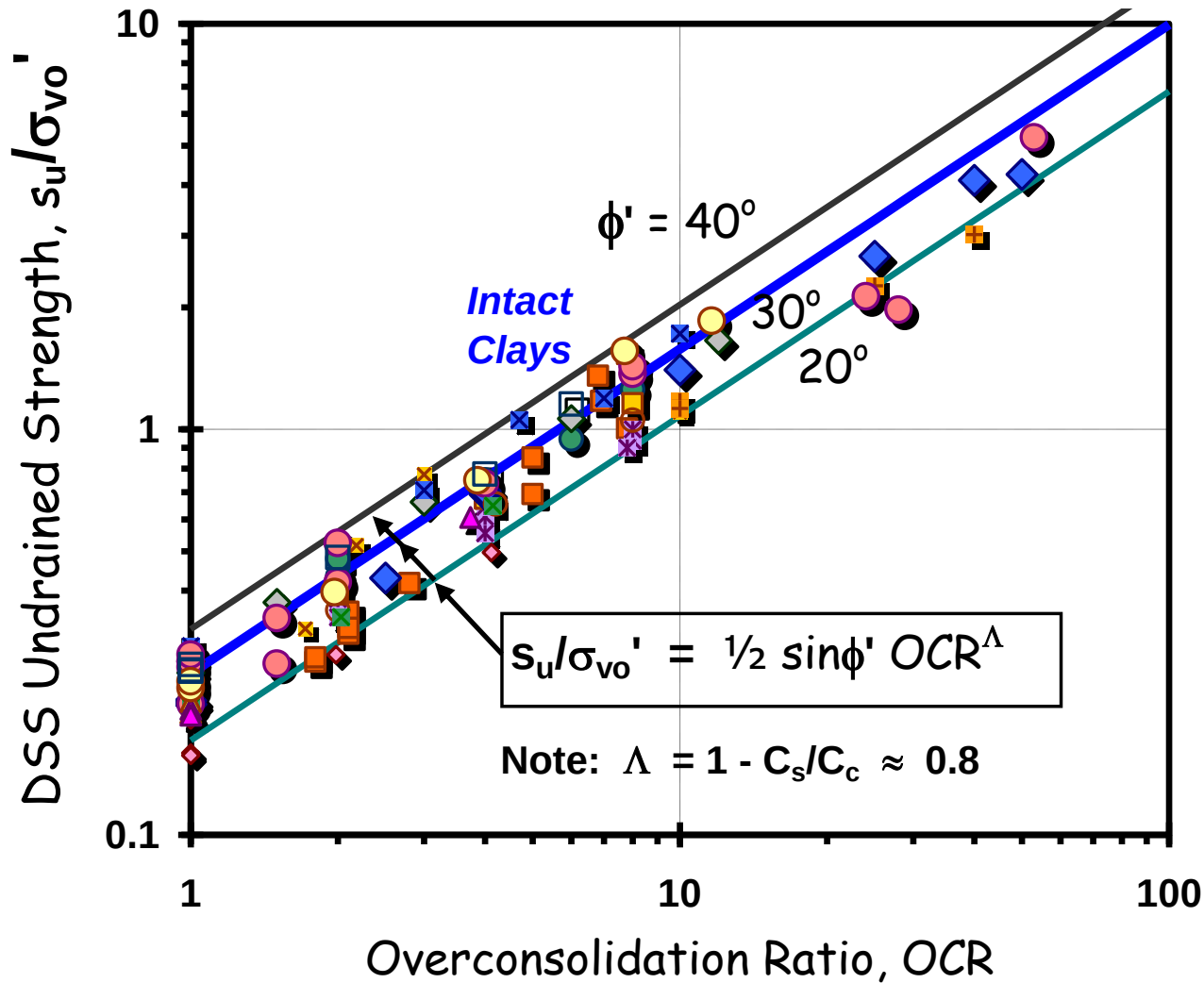
$$\sigma_e' = \sigma_{v0}' RSC^{[1-C_s/C_c]}$$

Resistencia No drenada

Normalizada:

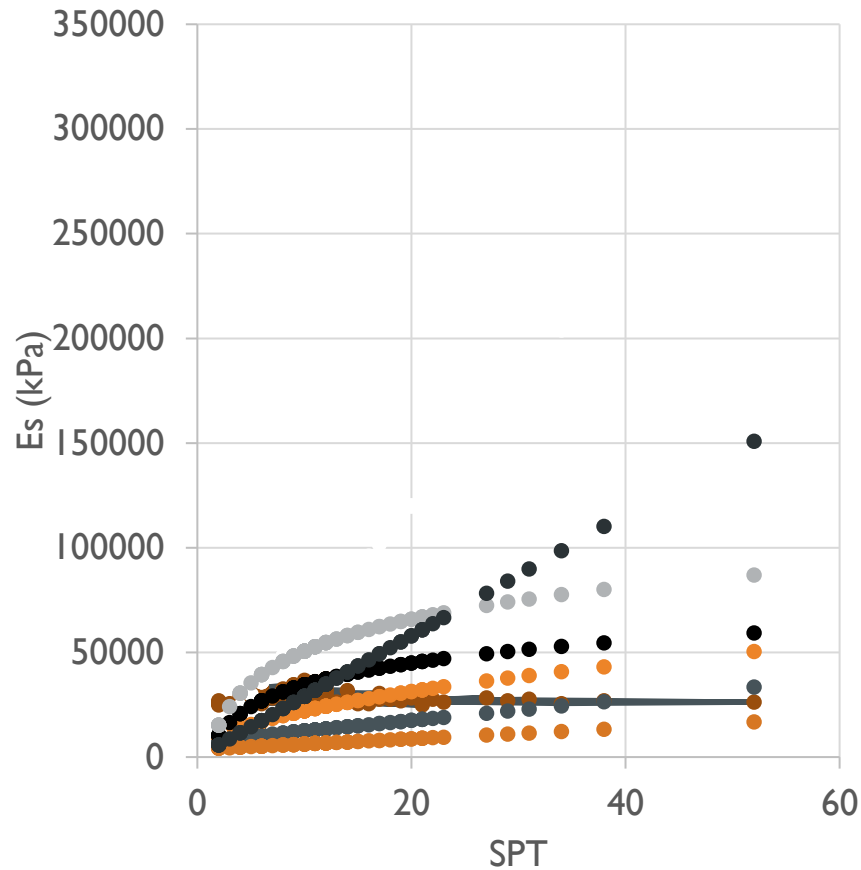
$$s_u / \sigma_{v0}' = \frac{1}{2} \sin(\phi') RSC^\Lambda$$

$$\text{donde } \Lambda = (1 - C_s/C_c)$$

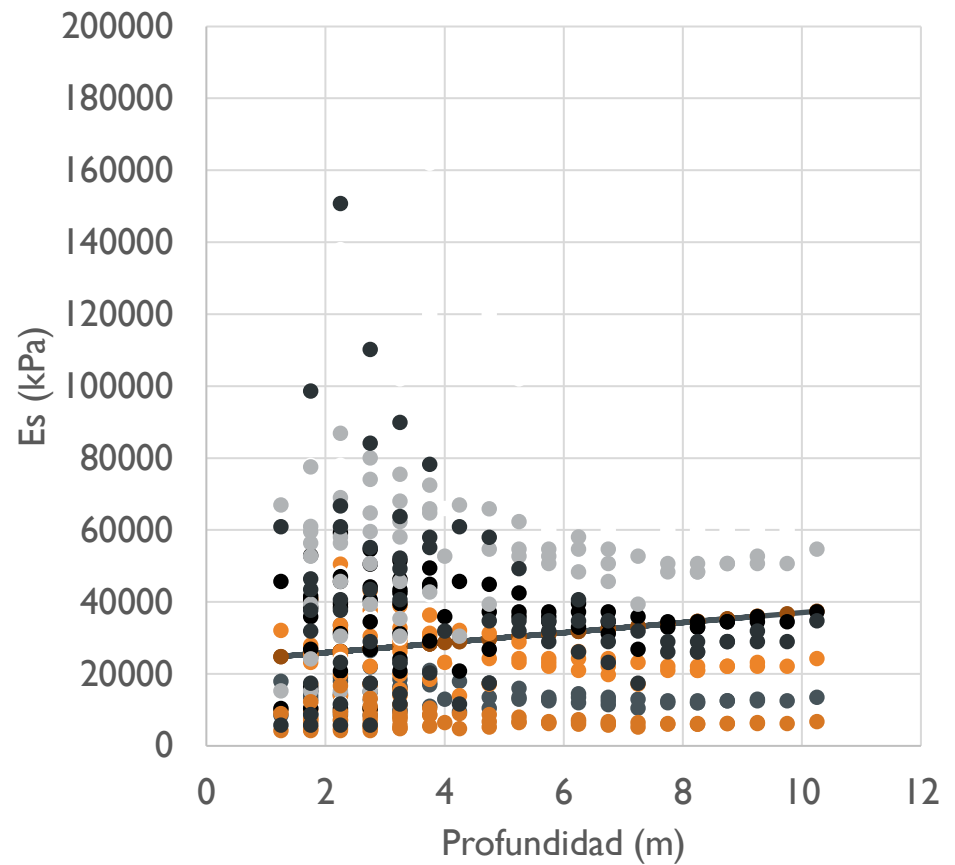


- Amherst CVVC
- Atchafalaya
- Bangkok
- Bootlegger Cove
- Boston Blue
- Cowden
- Drammen
- Hackensack
- Haga
- Lower Chek Lok
- Maine
- McManus
- Paria
- Portland
- Portsmouth
- Silty Holocene
- Upper Chek Lok
- 20
- 30
- 40

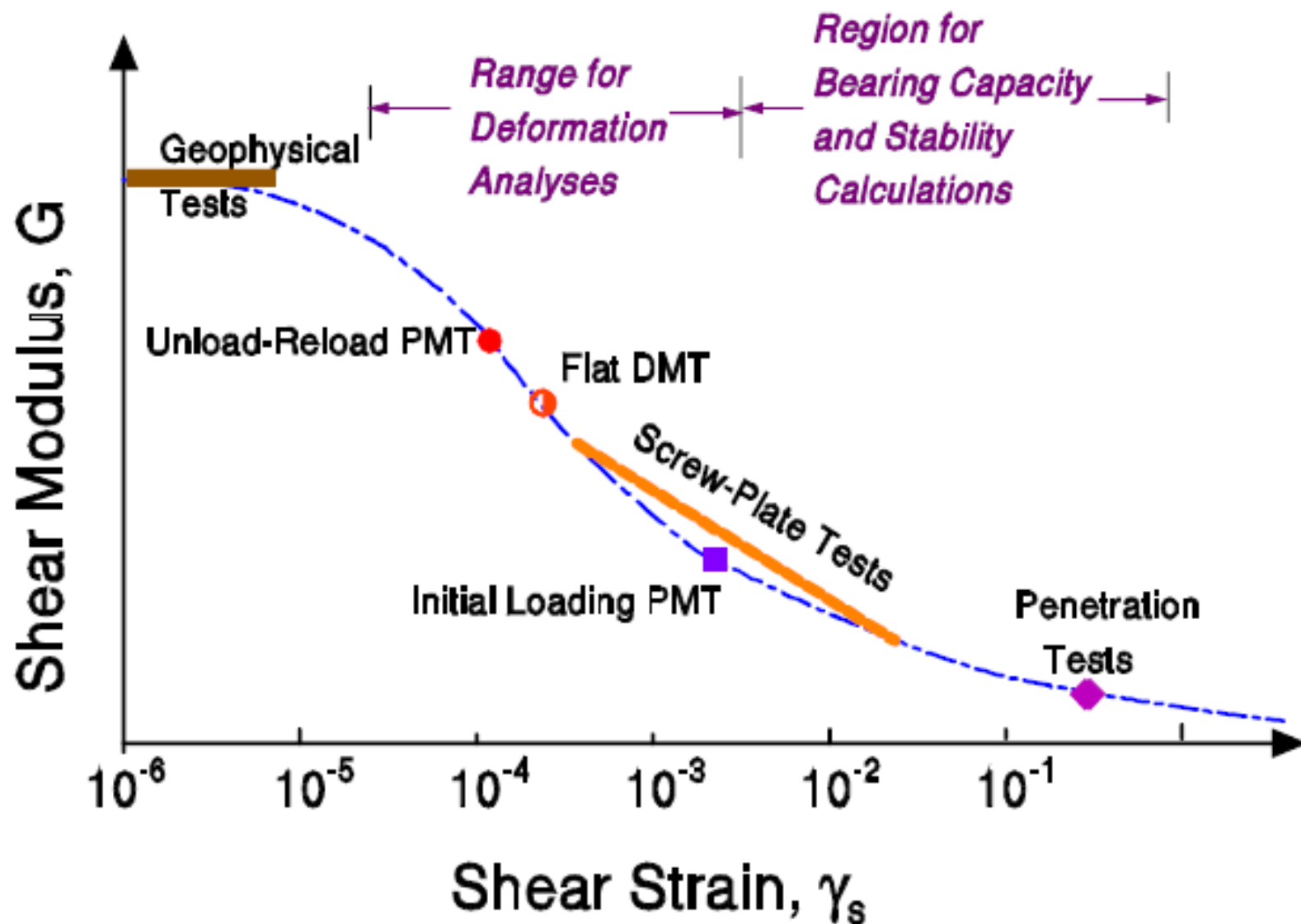
RIGIDEZ



- $500(N+15)$
- $7000N^{0.5}$
- $6000N$
- $15000 \ln N$
- $22000 \ln N$
- $250(N+15)$
- $2900 N$
- de Vs



- $500(N+15)$
- $7000N^{0.5}$
- $6000N$
- $15000 \ln N$
- $22000 \ln N$
- $250(N+15)$
- $2900 N$
- de Vs



Guidelines for estimation of Shear Wave Velocity Profiles

Bernard Wair, Jason DeJong, Thimas Shantz

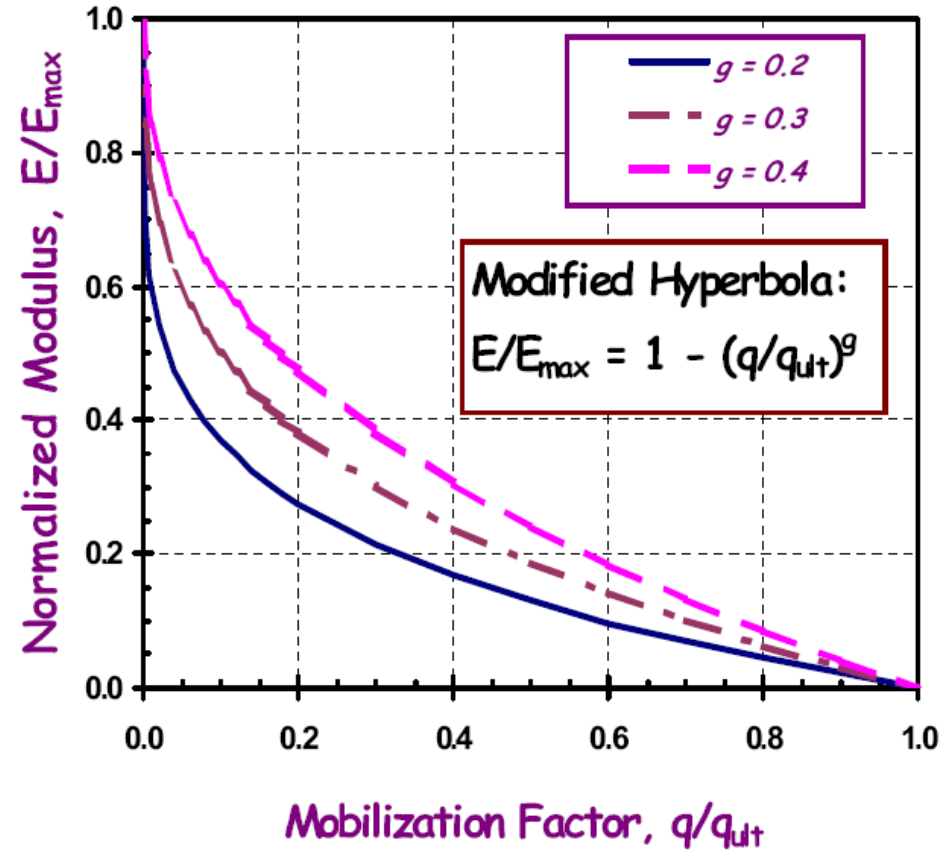
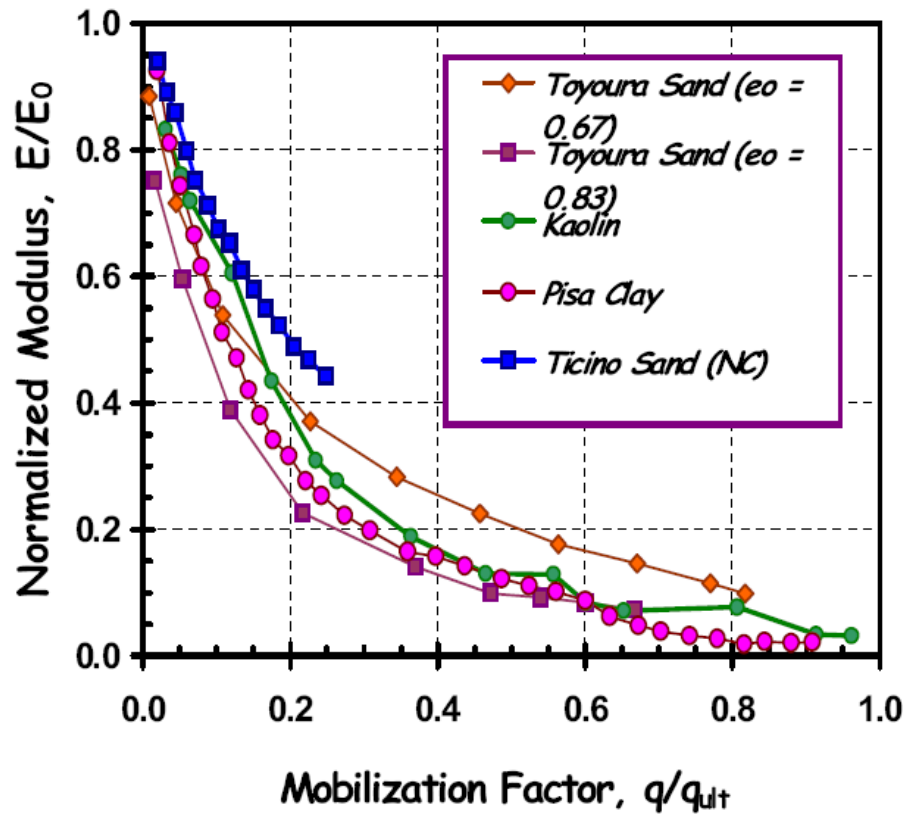
PEER 2012/08

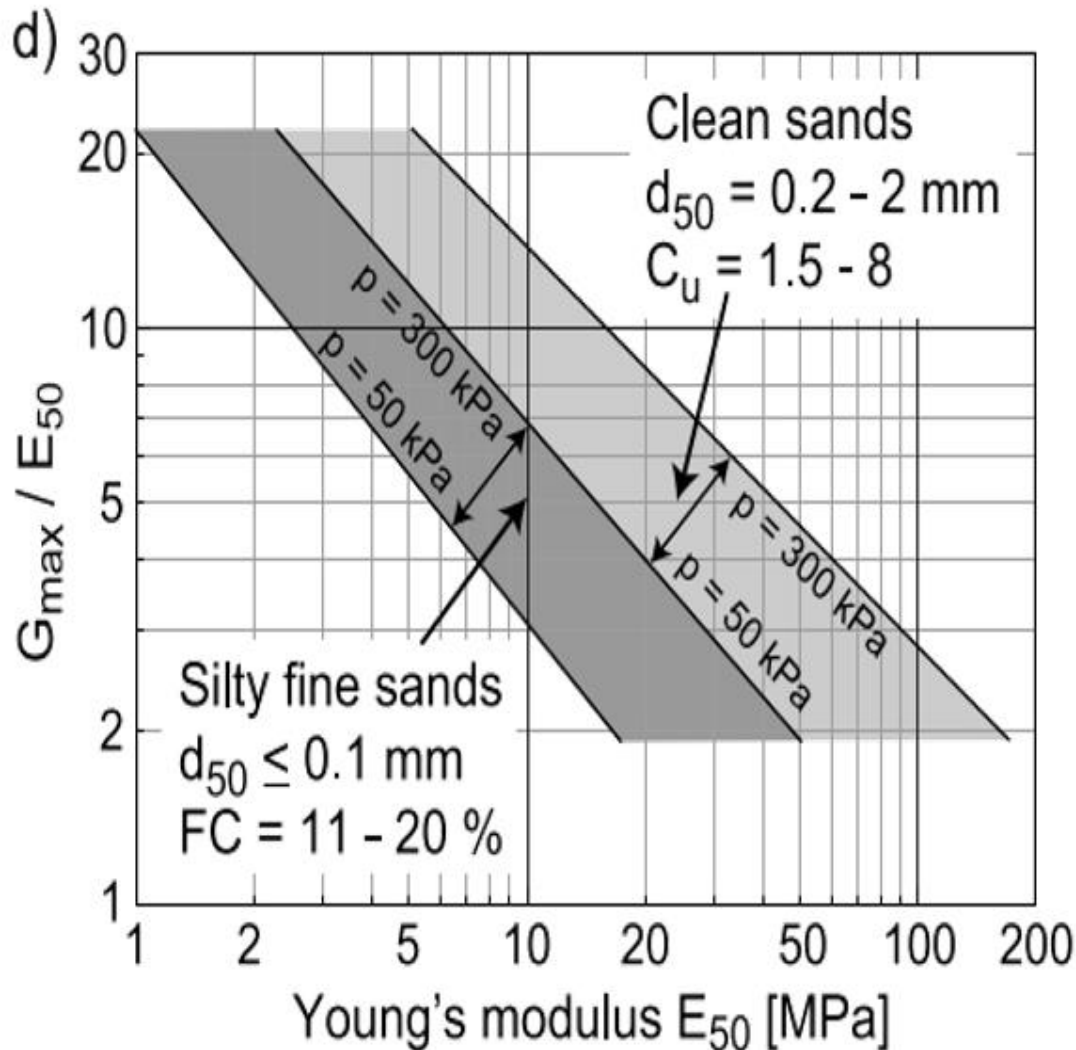
Table 4.11 Recommended SPT–stress– V_s correlation equations.

Soil Type	Shear Wave Velocity for Quaternary Soils (m/s)				Age Scaling Factors	
				(Eq #)	Holocene	Pleistocene
All Soils	30	$N_{60}^{0.215}$	$\sigma'_v^{0.275}$	(4.17)	0.87	1.13
Clays & Silts	26	$N_{60}^{0.17}$	$\sigma'_v^{0.32}$	(4.40)	0.88	1.12
Sands	30	$N_{60}^{0.23}$	$\sigma'_v^{0.23}$	(4.77)	0.90	1.17
Gravels - Holocene	53	$N_{60}^{0.19}$	$\sigma'_v^{0.18}$	(4.98)	----	----
Gravels - Pleistocene	115	$N_{60}^{0.17}$	$\sigma'_v^{0.12}$	(4.102)	----	----

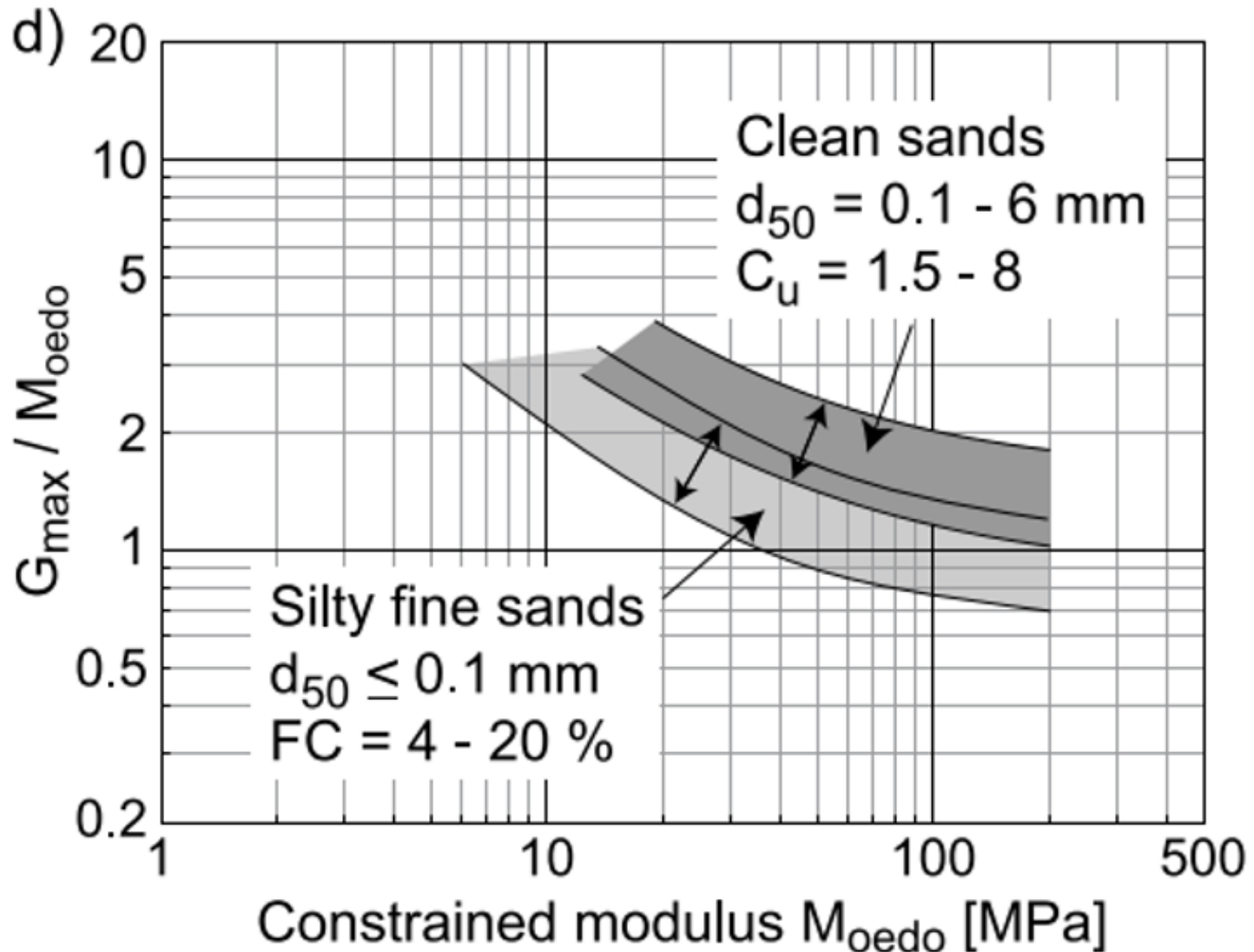
σ'_v measured in kPa

Laboratory Modulus Degradation Data





Witchman T., Kimming I., Triantafylidis T., (2017) On correlations between "dynamic" (small strain) and "static" (large strain) stiffness moduli - An experimental investigation on 19 sands and gravels (2017) Soil dynamics and Earthquake Engineering 98(2017)72-83



Witchman T., Kimming I., Triantafylidis T., (2017) On correlations between "dynamic" (small strain) and "static" (large strain) stiffness moduli - An experimental investigation on 19 sands and gravels (2017) Soil dynamics and Earthquake Engineering 98(2017)72-83



¡GRACIAS!

¿Preguntas?

■ Jorge.rodriguez@jeoprobe.com

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”

14 al 18 de Noviembre de 2022



COMPARACIÓN DE MEDICIONES H/V CON REGISTROS DE MOVIMIENTO FUERTE EN ESTACIONES ACELOROGRÁFICAS EN BOGOTÁ Y ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DEL PERFIL DE SUELOS

JUAN DANIEL MOYA, IC, MSCE
Gerente Técnico
SAICON SAS.

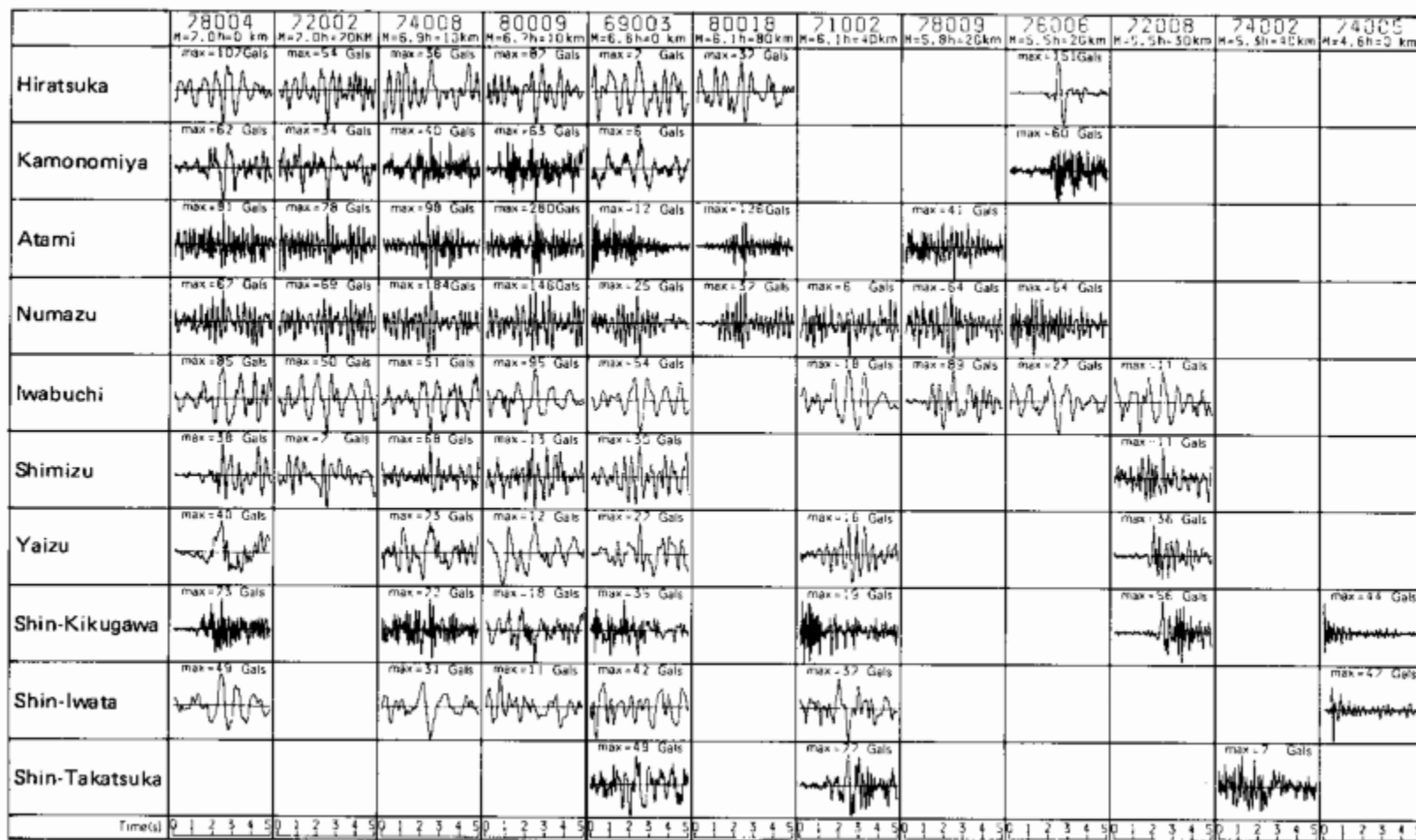


CONTENIDO

1. Instrumentación y Mediciones H/V.
2. Sitios de medición
3. Relaciones espectrales H/V.
4. Comparación de relaciones HV y funciones de transferencia.
5. Inversión de perfiles H/V
6. Conclusiones y recomendaciones



1. Instrumentación y mediciones H/V



Nakamura, 1989



1. Instrumentación y mediciones H/V



SOURCE * PATH * RECEIVER



COMPARACIÓN DE MEDICIONES H/V CON REGISTROS
DE MOVIMIENTO FUERTE



1. Instrumentación y mediciones H/V

Se realizaron mediciones de vibraciones ambientales usando una estación de banda ancha, la cual esta instrumentada con tres velocímetros electrodinámicos orientados en dirección NS, EW y vertical. Los sensores del equipo permiten ajustar la ganancia en diferentes rangos dinámicos y pueden medir señales en un rango de frecuencias comprendidas entre 0.1 y 1024 Hz.

El equipo cuenta es una estación independiente que cuenta con memoria interna, conversor análogo digital de 24 bit y antena de GPS.

El equipo se acopla al terreno mediante una serie de estacas que se instalan en la base del instrumento y se nivela horizontalmente.





1. Instrumentación y mediciones H/V



GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION

SESAME European research project
WP12 – Deliverable D23.12

COMPARACIÓN DE MEDICIONES H/V CON REGISTROS
DE MOVIMIENTO FUERTE

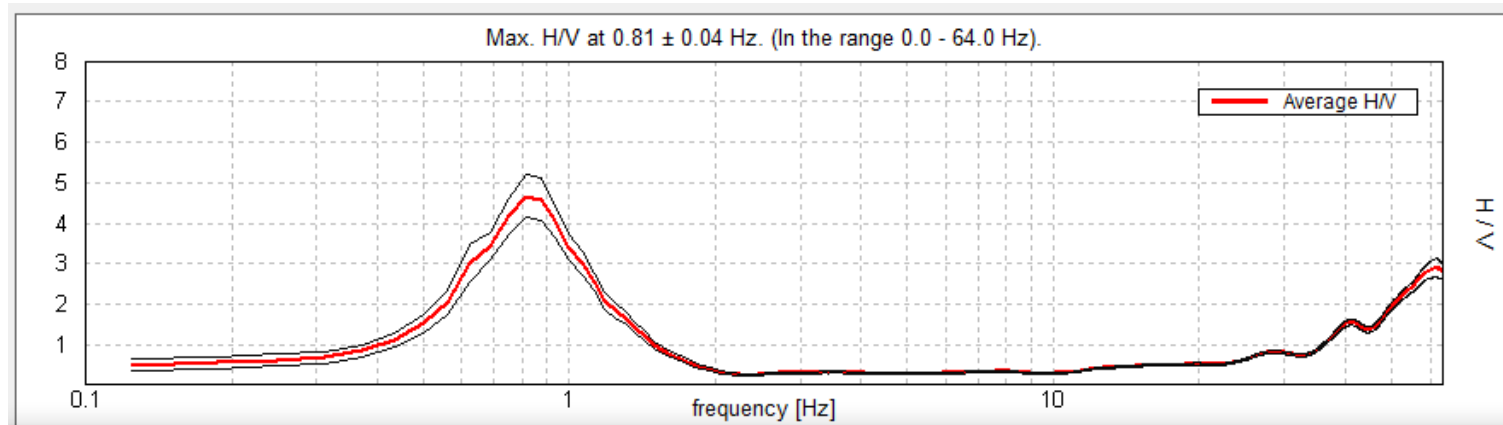


1. Instrumentación y mediciones H/V

- Nivelar adecuadamente el sensor, y acoplarlo de forma adecuada al terreno.
- El tamaño de la ventana de análisis debe ser como mínimo 4 - 5 veces el periodo objetivo de la medición.
- Se debe garantizar como mínimo 20 ventanas de análisis para poder realizar análisis estadísticos de las relaciones H/V.
- Se recomienda aplicar filtros de alta frecuencia para suavizar las relaciones espectrales.
- Es importante evaluar los rangos de confiabilidad de las mediciones HVSR y presentar las desviaciones estándar junto con la media de la medición.
- Se debe identificar los picos HVSR correspondientes a las amplificaciones estratigráficas y no confundir con vibraciones ambientales. Verificar la los espectros de Fourier de las tres componentes (“eyed shape”, 2fo).
- Verificar condiciones de aplicabilidad para la medición y la interpretación del periodo de vibración (caso 1D – 2D).

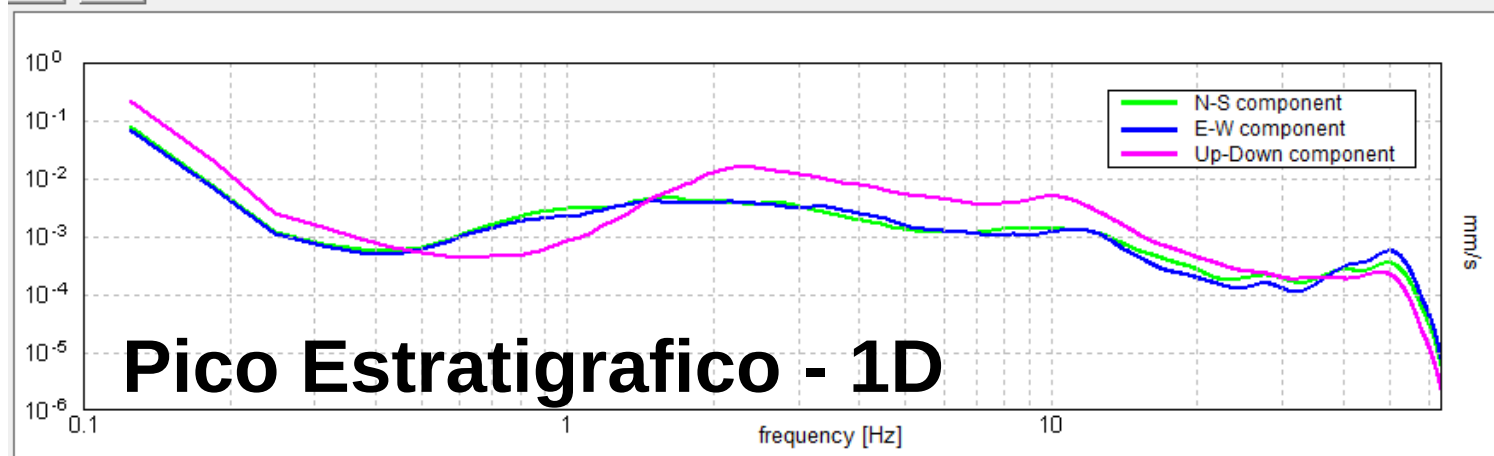


1. Instrumentación y mediciones H/V



Amplitude spectra. Bogota, Calle69 HVSR-1

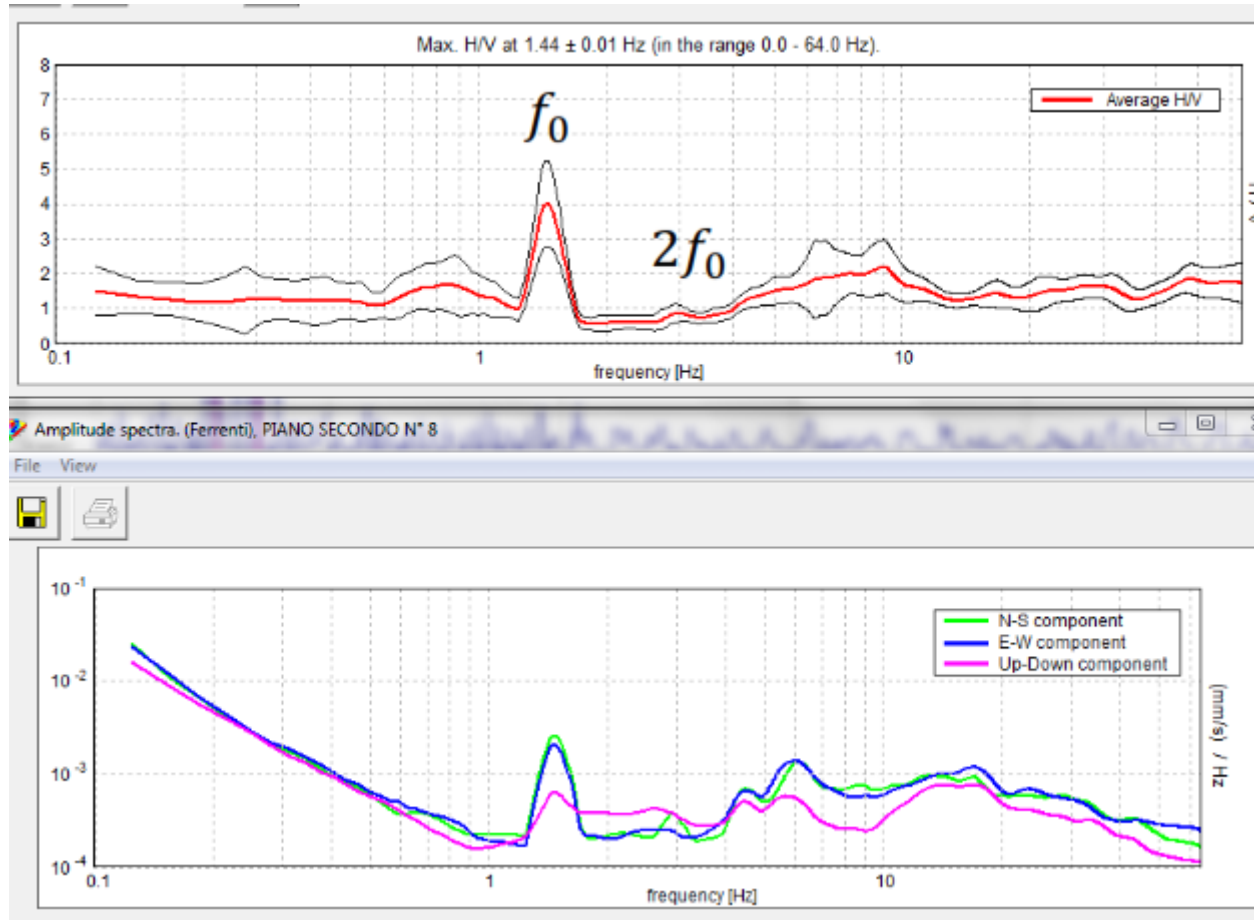
File View



COMPARACIÓN DE MEDICIONES H/V CON REGISTROS
DE MOVIMIENTO FUERTE



1. Instrumentación y mediciones H/V

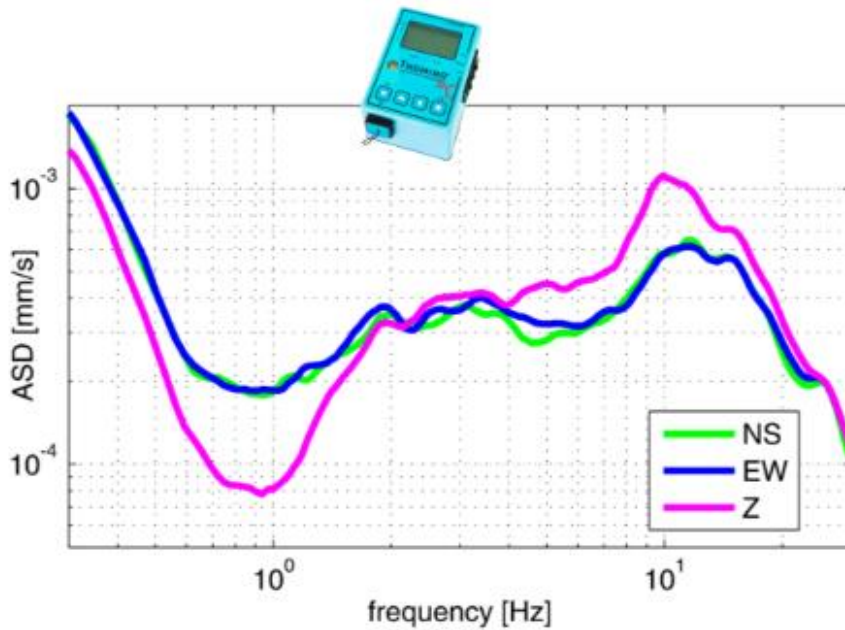


No es pico estratigráfico !!!!!

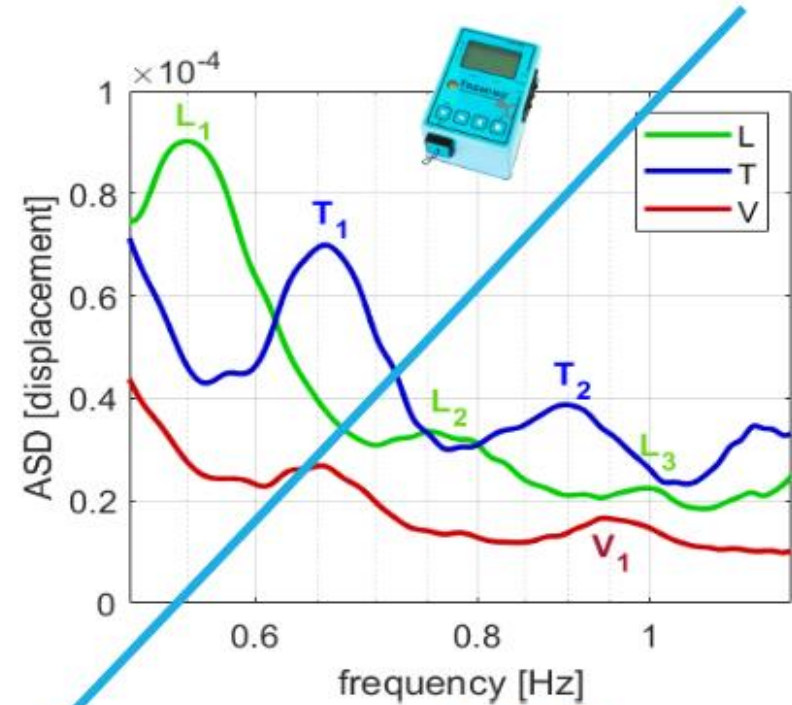
COMPARACIÓN DE MEDICIONES H/V CON REGISTROS DE MOVIMIENTO FUERTE



1. Instrumentación y mediciones H/V



1D



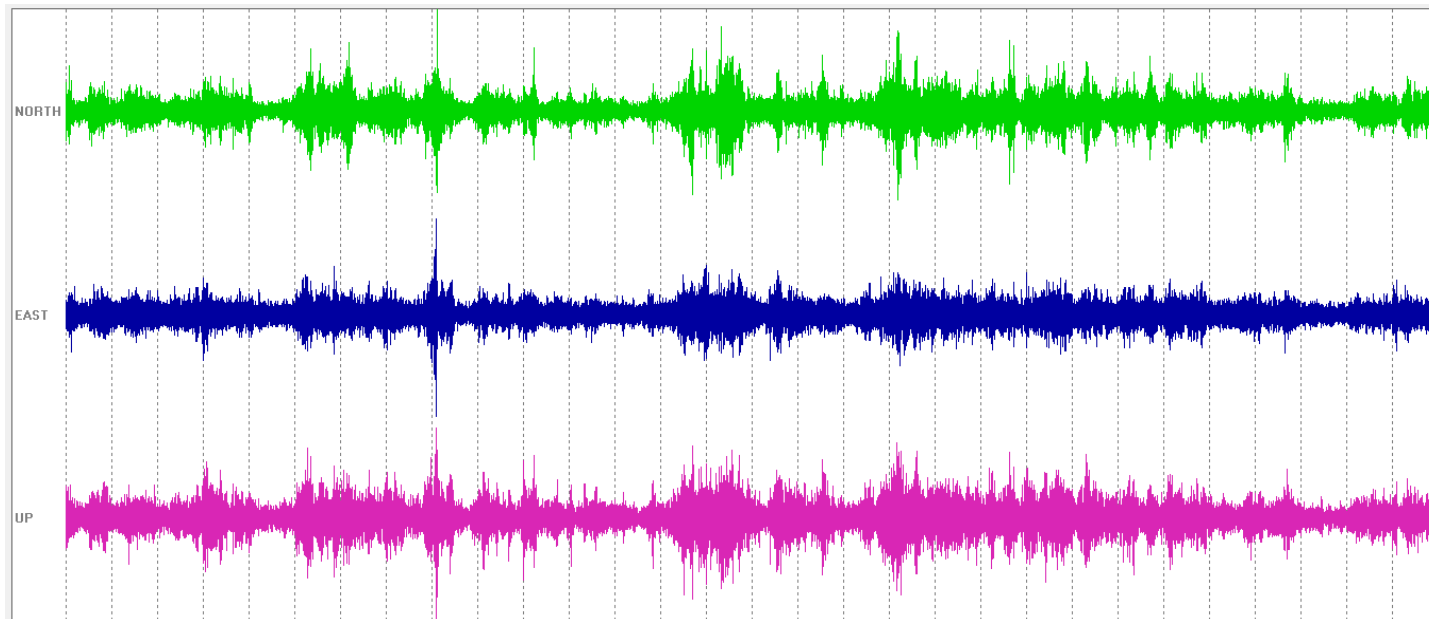
~~not 1D~~

Castellaro, S., (2021)



1. Instrumentación y mediciones H/V

- Se realizan mediciones de 30 minutos en cada sitio de medición.
- Se analizan ventanas de 20 seg (min 10 veces el periodo muestreado)
- Se calculan espectros independientes en cada ventana para calculo de relaciones H/V. 90 relaciones H/V para análisis estadístico





2. Sitios de medición

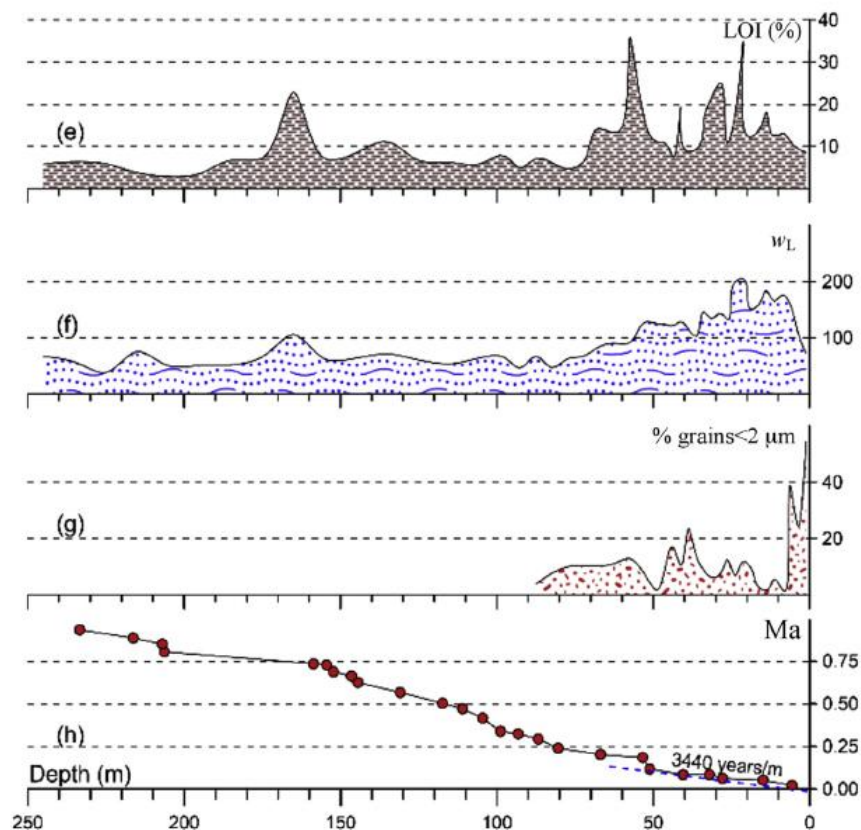
- Se realizaron mediciones en la Ciudad de Bogotá, en dos sitios puntuales donde hay acelerómetros de la red nacional de acelerógrafos tanto en superficie como en profundidad. Adicionalmente se conoce el espesor de los depósitos cuaternarios (Ingeominas - UNIANDES, 1997).

SITIO	ID	LATITUD	LONGITUD	PROFUNDIDAD ROCA (m)
1	SGC	4°38'34"	74°04'52"	180
2	CAGR	4°45'13"	74°03'15"	119

- El sector 1 esta localizado en zona geotécnica Lacustre B y el sector 2 se localiza en zona Lacustre A de acuerdo con el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Decreto 523 de 2010), caracterizados por depósitos de arcillas blandas y muy blandas, respectivamente, de alta humedad y plasticidad. En términos de la respuesta sísmica ambos sectores se encuentran en zona de lacustre 200.



2. Sitios de medición

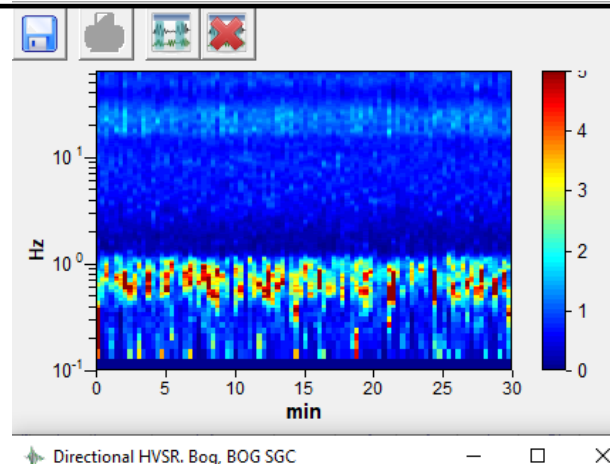
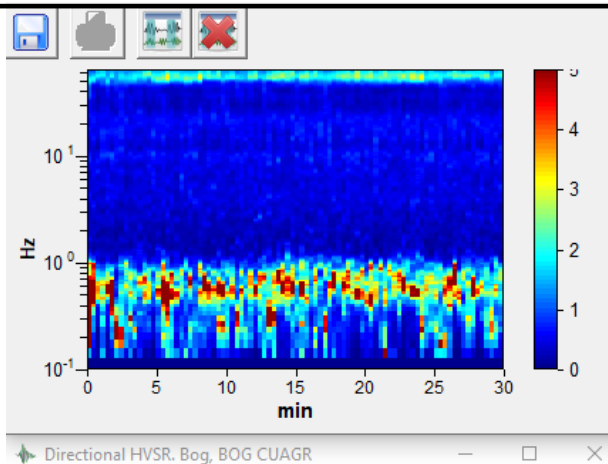


Propiedades geotécnicas de los primeros 250m del depósito lacustre de la Sabana de Bogotá y cronología de deposición (Caicedo et al., 2018).

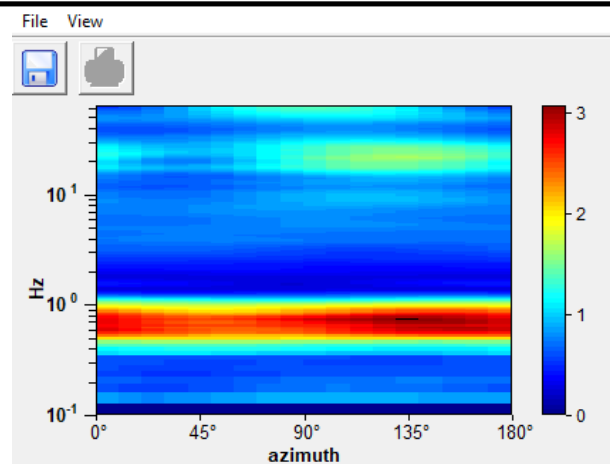
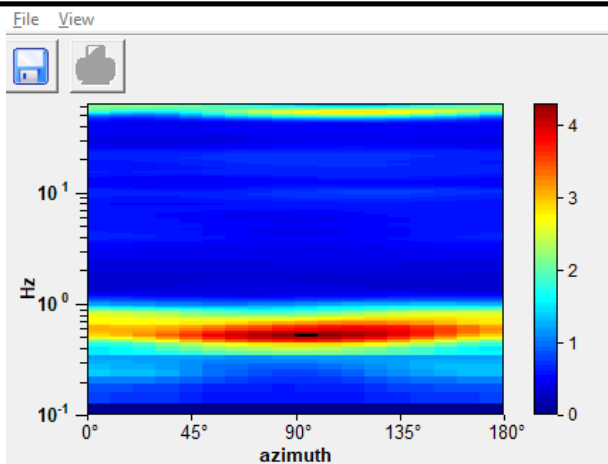


3. Relaciones espectrales HVSR

Consistencia de HVSR
en el tiempo



Análisis de
direccionalidad

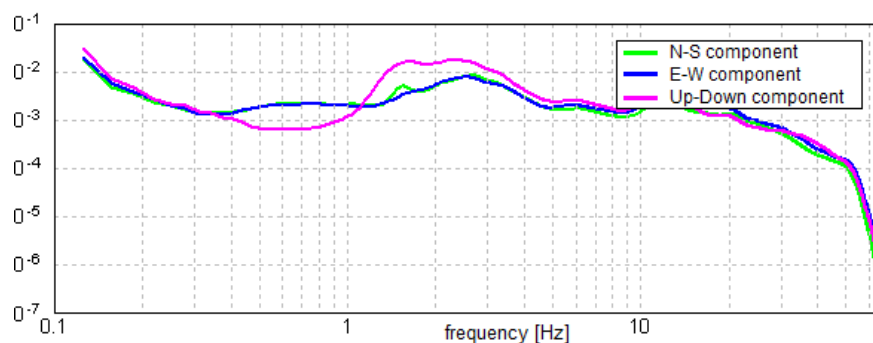
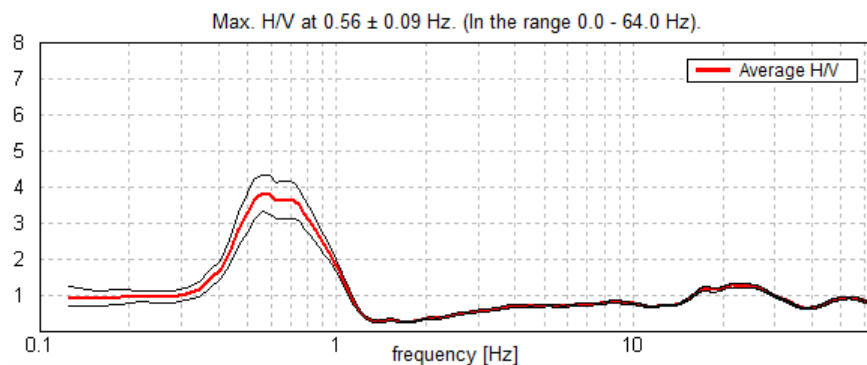


COMPARACIÓN DE MEDICIONES H/V CON REGISTROS
DE MOVIMIENTO FUERTE

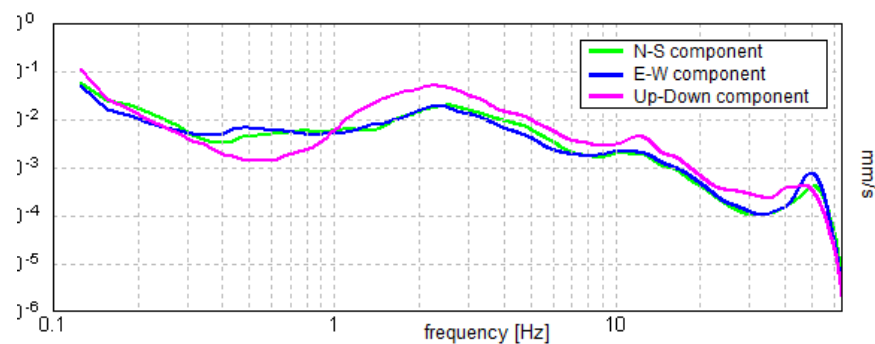
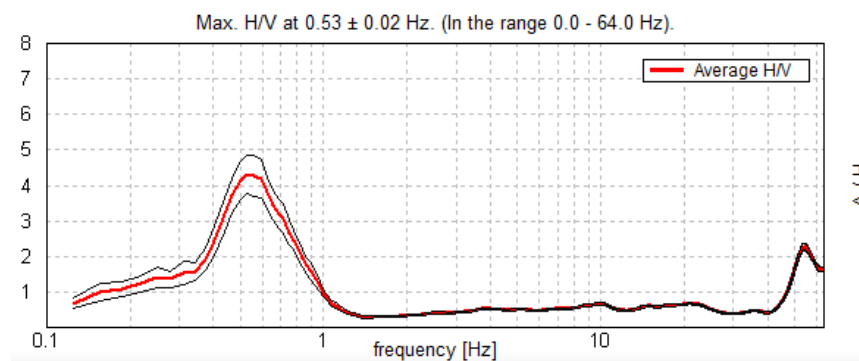


3. Relaciones espectrales HVSR

Sitio 1



Sitio 2





4. Comparación HVSR – Función Transferencia

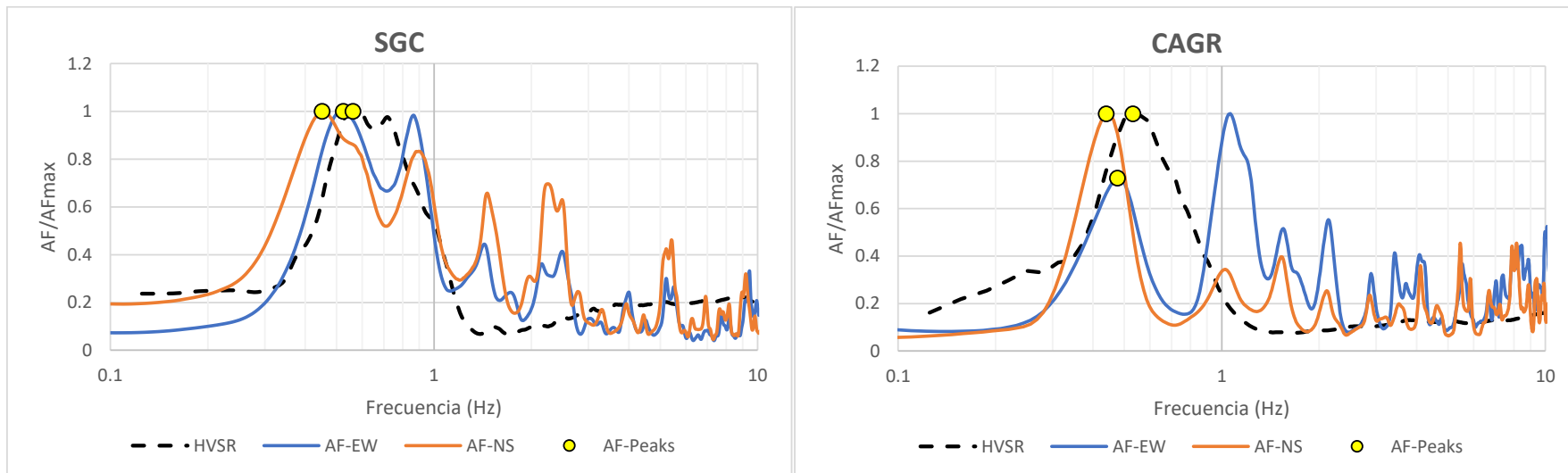
- Para estimar las funciones de transferencia en cada sitio de medición se emplearon los registros de dos sismos registrados en cada estación. Con base en esta información se calculo la FT como la relación espectral entre el movimiento horizontal en superficie y el movimiento horizontal en roca.

SITIO	SISMO	FECHA	Mw (-)	Distancia (km)	Amax (gal)
CAGR	Quetame	24/05/2008	5.7	48	24.8
SGC	Mesetas	24/12/2019	6.0	102	11.3

- Se estimaron las funciones de transferencia para cada componente de movimiento (E-W y N-S), con el fin de realizar la comparación con las relaciones H/V medidas en campo.



4. Comparación HVSR – Función Transferencia



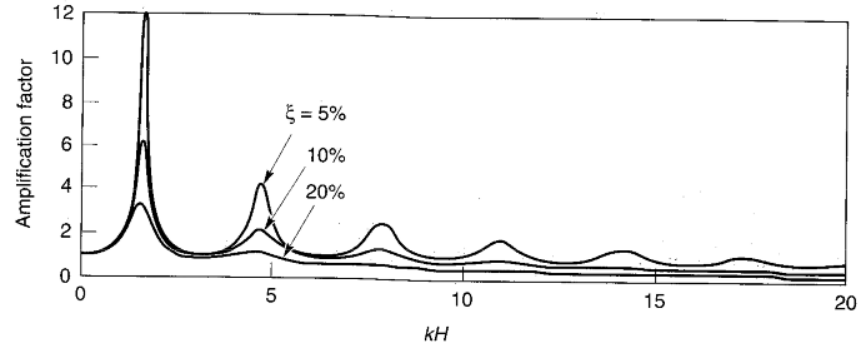
- Picos de H/V se presentan un ligero corrimiento en frecuencia, atribuidos al comportamiento elástico del movimiento.
- Picos de relación H/V coinciden con el primer modo de vibración natural del depósito.
- Grandes valores de la relación H/V ponen en evidencias grandes contrastes de rigidez de los depósitos.



4. Comparación HVSR – Función Transferencia

- Los corrimientos en frecuencia de la respuesta para movimiento fuerte se atribuye a los efectos no lineales del suelo. Es posible tener un estimativo de los efectos no lineales promedio del perfil, asumiendo soluciones elásticas (Kramer, 1996):

$$FT \approx \frac{1}{\sqrt{\left(\cos \left(\frac{\omega H}{V_s} \right)^2 + \left(\xi \left[\frac{\omega H}{V_s} \right] \right)^2 \right)}}$$



- En esta ecuación el efecto del amortiguamiento tiene una gran incidencia sobre las amplitudes de la función de transferencia en las frecuencias de cada modo de vibración, pero tiene una mínima incidencia en el corrimiento de los picos de respuesta en frecuencia. El parámetro que mas incide para desplazar en frecuencia la función de transferencia, es el argumento $\omega H/V_s$.



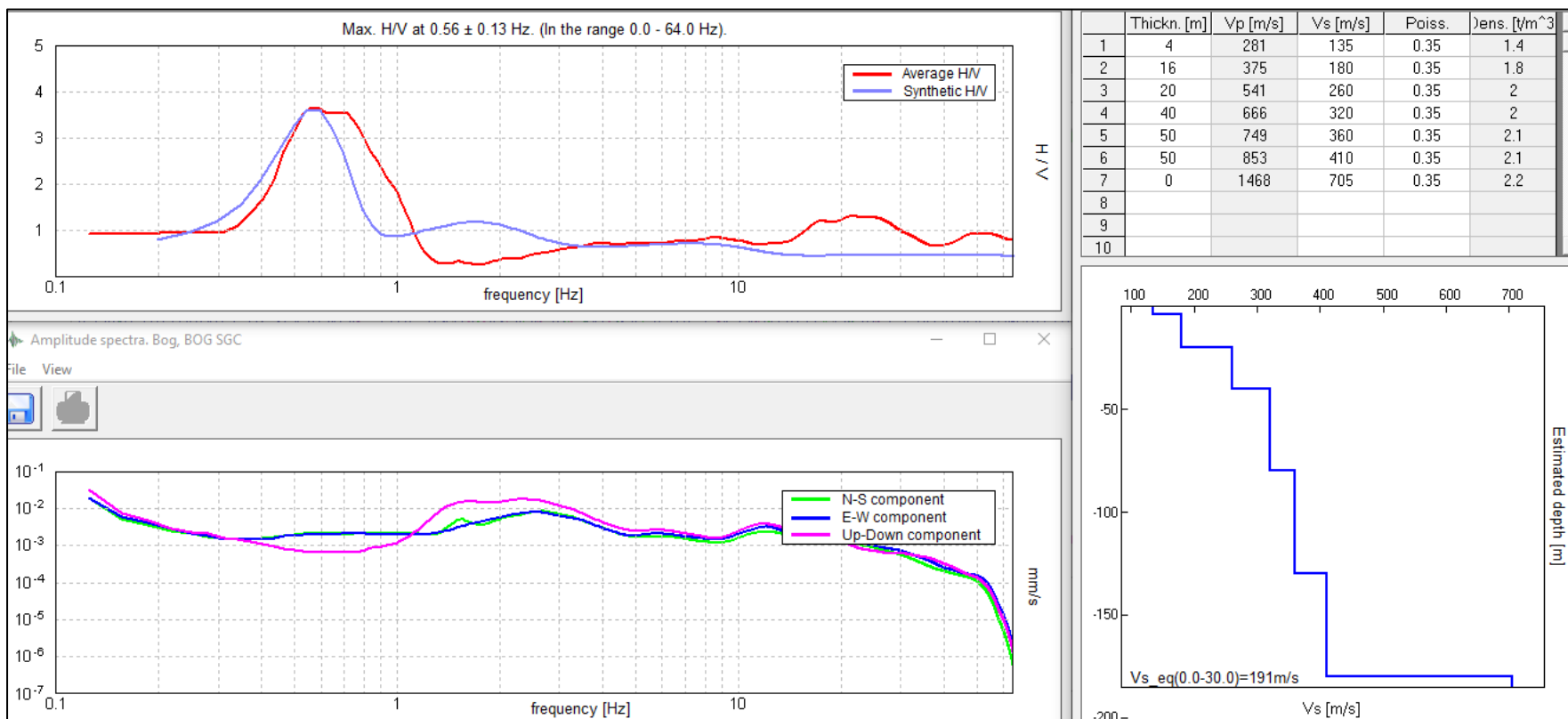
- Con base en los datos que se tienen medidos se calculan los valores promedios de V_s , para condición elástica (HVSR) y los V_s reducidos para movimiento fuerte (sismo).

SITIO	f_o (HVSR) (Hz)	f_o (Sismo) (Hz)	H (m)	$V_{s_{max}}$ (m/s)	$V_{s_{red}}$ (m/s)	G_{max} (kPa)	G_{red} (kPa)	G_{red}/G_{max} (-)
CAGR	0.53	0.455	119	252	217	114561	84760	0.74
SGC	0.56	0.495	180	403	357	292626	229408	0.78

- Se observa que el sismo de Quetame registrado en el sitio 2 degrado mas la rigidez por corte que el sismo de Mesetas en el sitio 1. Lo cual es coherente con los niveles de aceleraciones registrados en cada estación. El sismo de Quetame en la estación CUAGR registró una aceleración máxima de 24.8 gales mientras el sismo de mesetas registró una aceleración máxima de 11.3 gales.

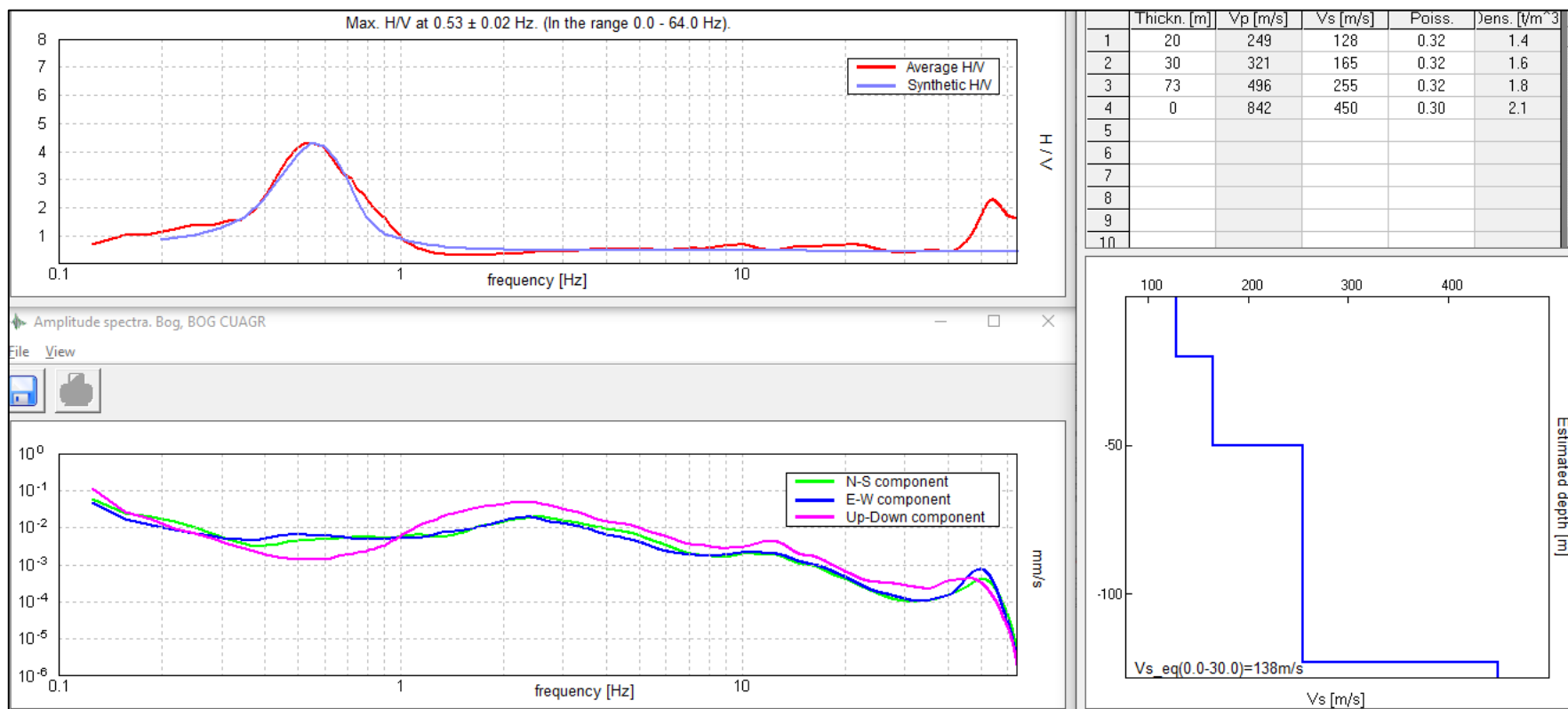


5. Inversión Perfiles HVSR (Sitio 1- SGC)





5. Inversión Perfiles HVSR (Sitio 2 –CUAGR)





6. Conclusiones

- La técnica HVSR permite medir de forma rápida, sencilla y confiable la respuesta dinámica del perfil de suelos en términos del periodo fundamental de vibración de ondas SH.
- Las frecuencias estimadas por las mediciones HVSR se basan en vibraciones ambientales de muy baja amplitud, razón por la cual la respuesta evaluada del sistema es prácticamente elástica y por tanto para movimiento fuerte el periodo muestra claramente un corrimiento en frecuencia que se explica por la degradación que sufre el modulo de corte por los niveles de deformación movilizados durante el sismo.
- Si es conocido alguno de los parámetros principales para la estimación de la frecuencia del depósito (perfiles someros de Vs o espesor de basamento) es posible realizar con una precisión aceptable el perfil de velocidad de onda de corte hasta profundidades importantes.
- Se considera que el uso de estas mediciones es fundamental para la realización de estudios de respuesta de sitio ya que permite calibrar los modelos analíticos y obtener datos importantes del comportamiento dinámico.



XVII CCG
I SSAG 2022

Cartagena



SCG

50
años

1971-2021

¡GRACIAS!

¿Preguntas?

juanmoya@saicon.com.co

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”

14 al 18 de Noviembre de 2022



Evaluación del perfil de velocidad de ondas en dos depósitos de suelo de la ciudad de Santiago de Cali, a partir de registros de vibración ambiental en superficie

Gonzalez, H.^{1,2}, Cruz, A.², Sandoval, E.²

¹. Candidato a grado, ingeniero civil. Universidad del Valle

². grupo de Investigación G7, Universidad de Valle.



Contenido



INTRODUCCIÓN



METODOLOGÍA



RESULTADOS



CONCLUSIONES



Caracterización dinámica

Periodo de Vibración



Amplitud del
desplazamiento sísmico

Magnitud esfuerzo
cortante inducido

Aceleración máxima
esperada

Espectro de diseño
sísmico



Edificio de la carrera 15 en Armenia después del terremoto de 1999.

Técnicas de exploración convencionales

Métodos invasivos

Up-Hole

Down-Hole

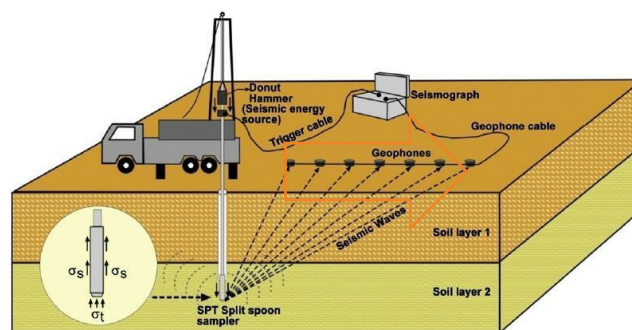
Cross-Hole

- Gran despliegue en superficie (montaje)
- Altos costos de exploración en profundidad
- Fuentes artificiales emisoras de ondas

Técnicas de prospección

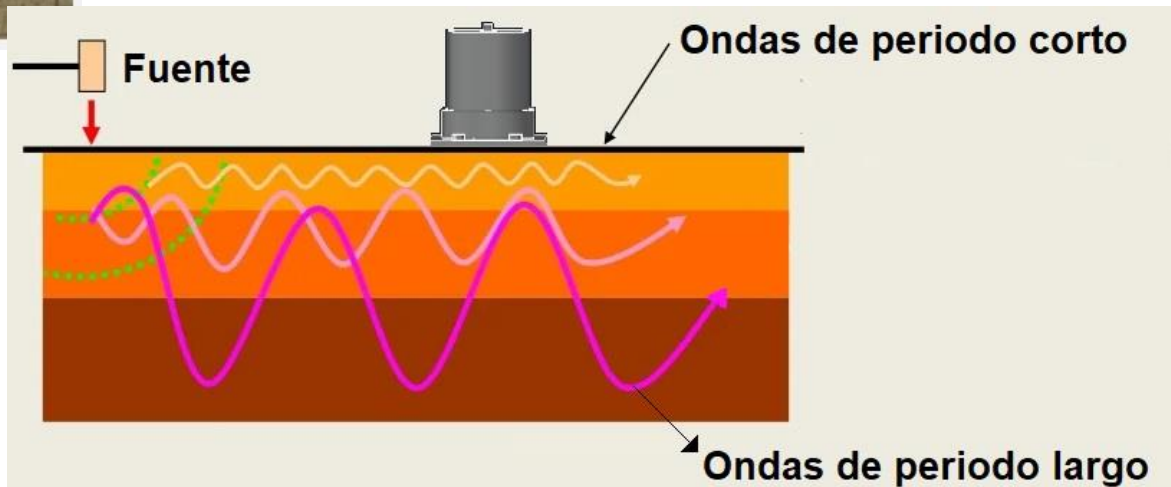
Reflexión de ondas

Refracción de ondas



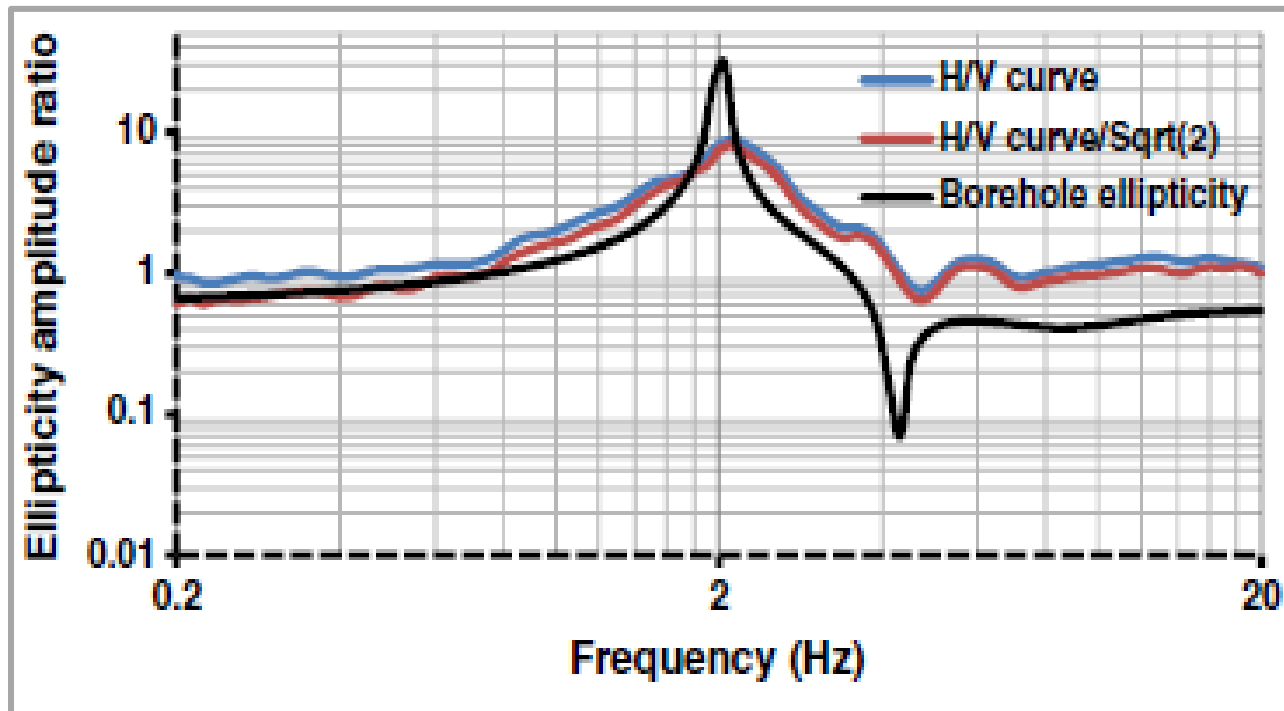


Estación única de registro



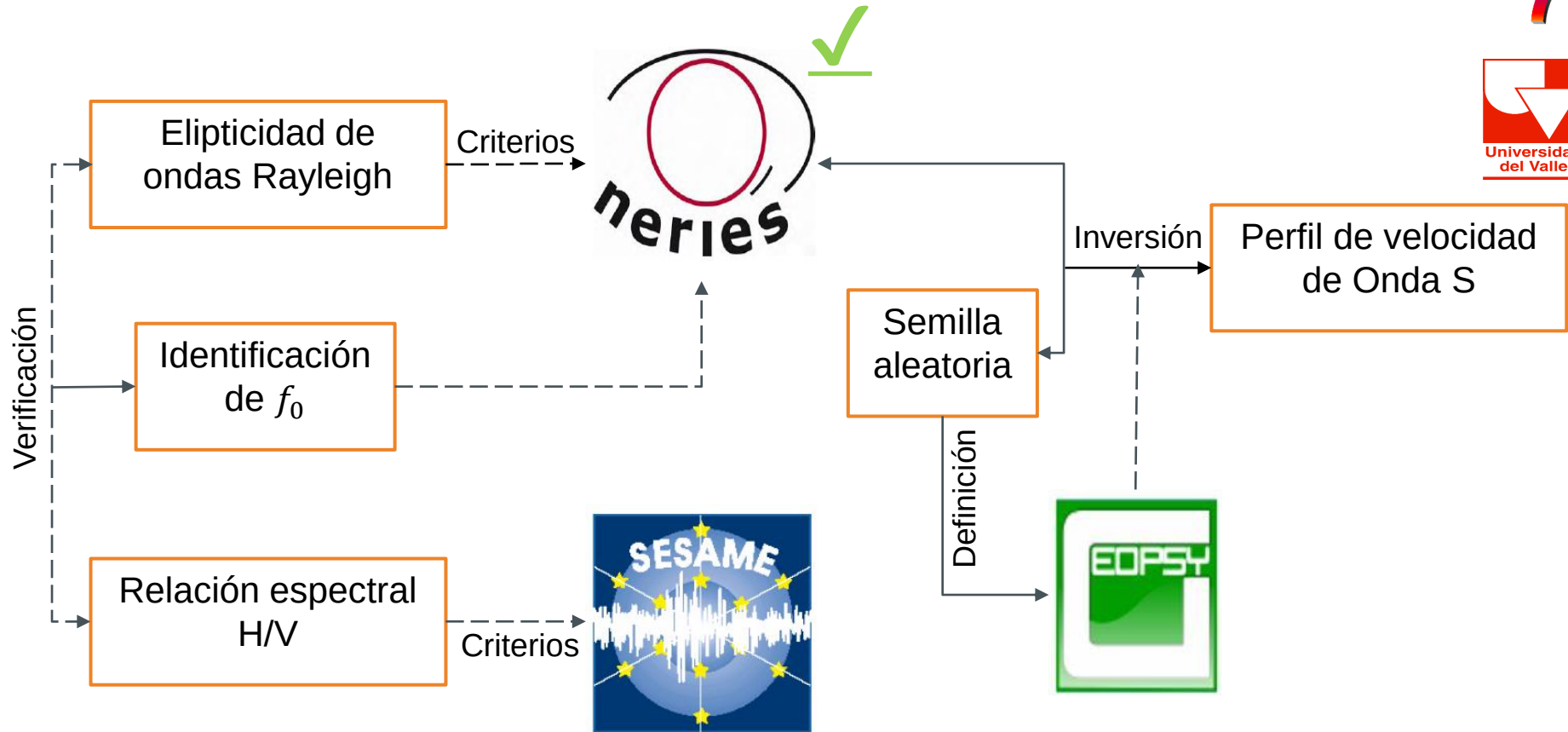


H/V “~” Elipticidad de Ondas Rayleigh en modo fundamental



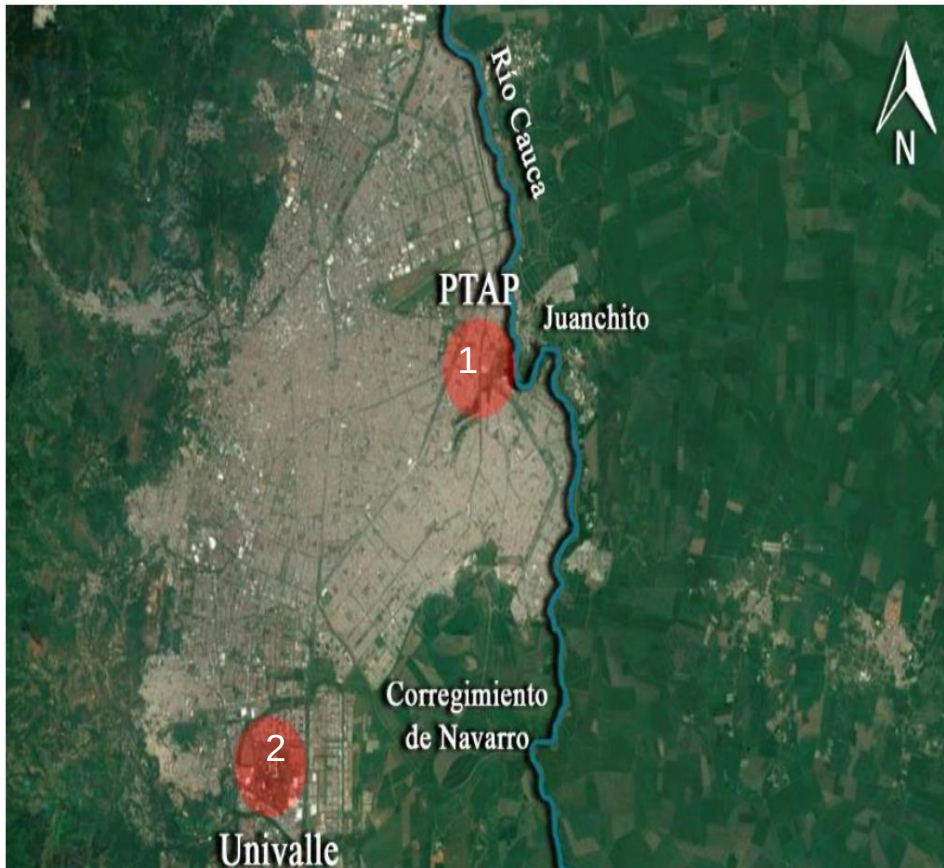


Metodología





Zonas de estudio

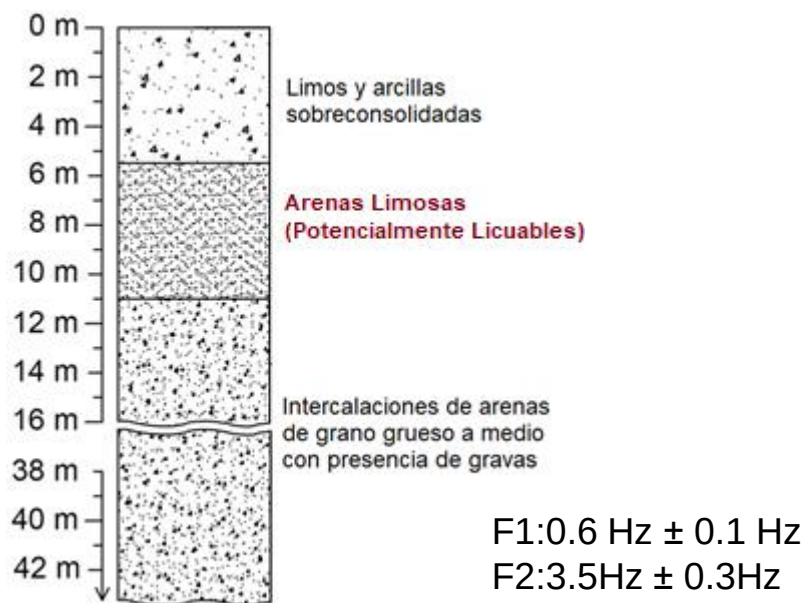




Caracterización de la zona de estudio

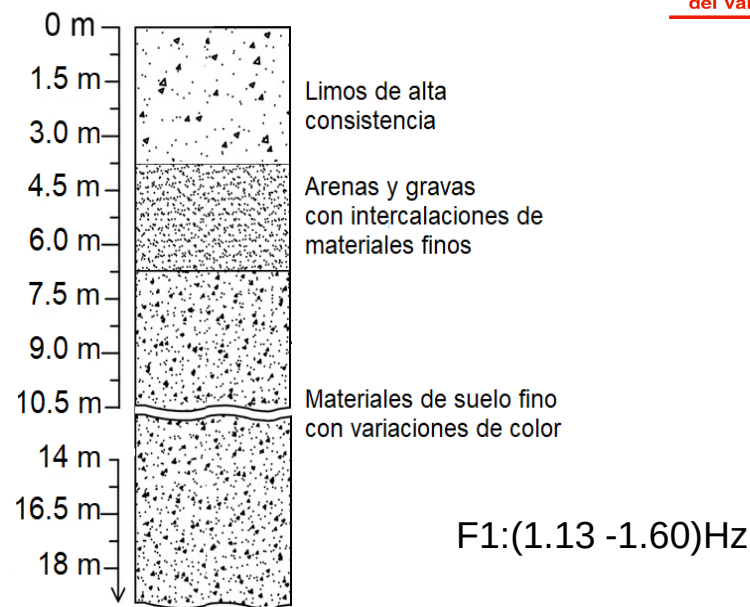


- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)



Gallo (2020)

- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)

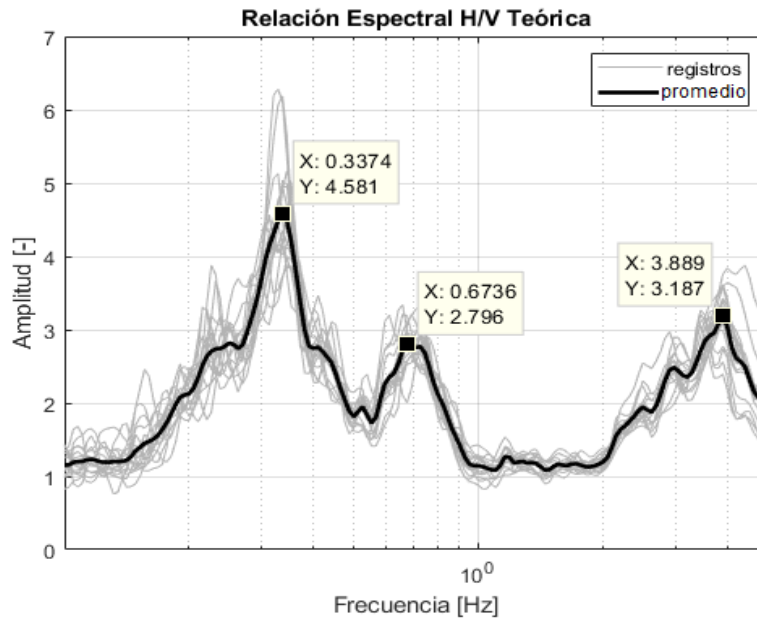


Gallo (2017); Peralta (2015)

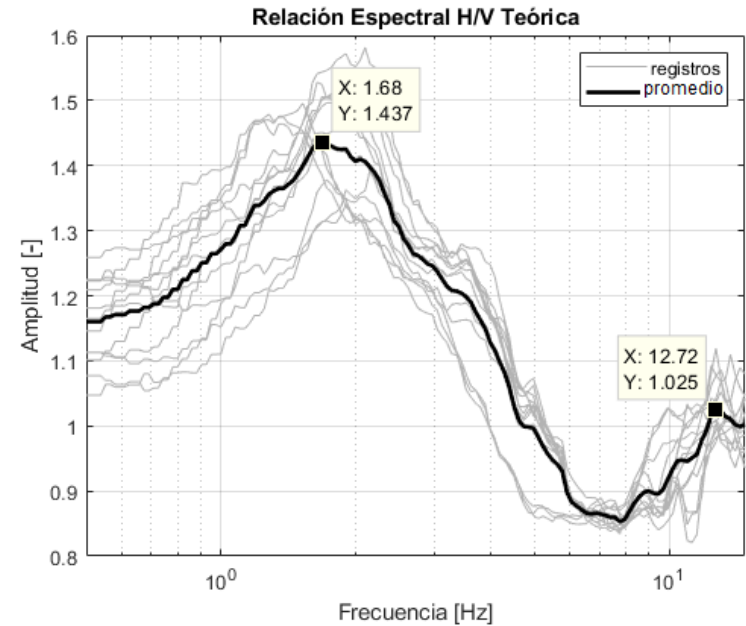


Relación espectral H/V

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)*



- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)*





Fiabilidad Relación espectral H/V



Pico Significativo: $0.66 > 0.08$ y $1.68 > 0.4$

$$f_0 > 10/L_w; L_w = \text{longitud de ventana en segundos}$$



Número de ciclos significativos: 1425 y 1487

$$N_c = L_w * N_w * f_0 > 200; N_w = \text{Número de ventanas}$$



Dispersión entre ventanas: $\sigma_a(f) < 2$ ambas zonas

$$\sigma_a(f) < 2 \text{ si } f_0 > 0.5\text{Hz}$$

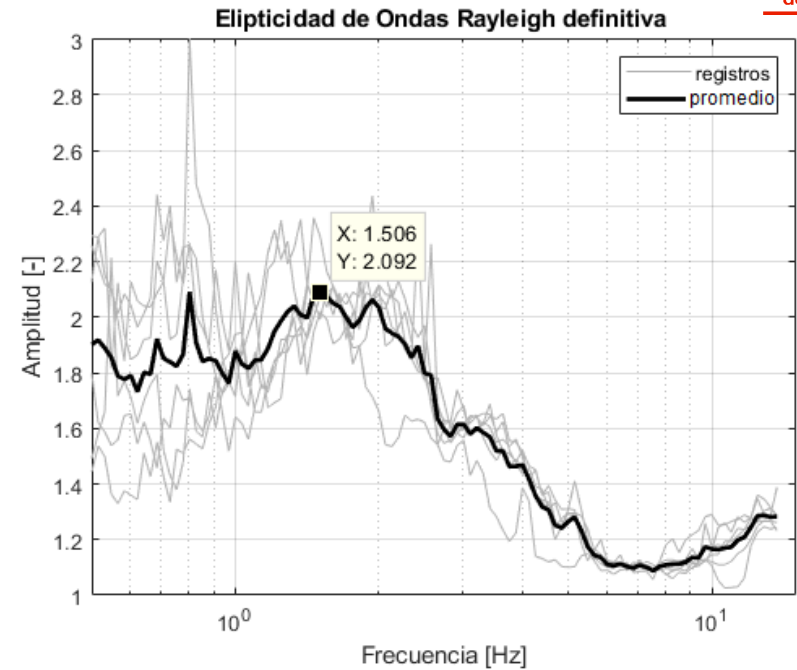
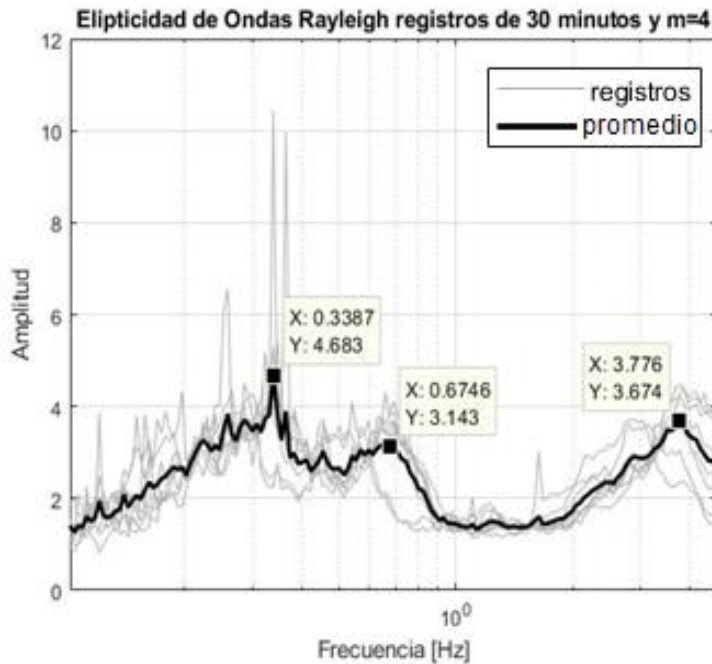




Elipticidad de ondas Rayleigh

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)*

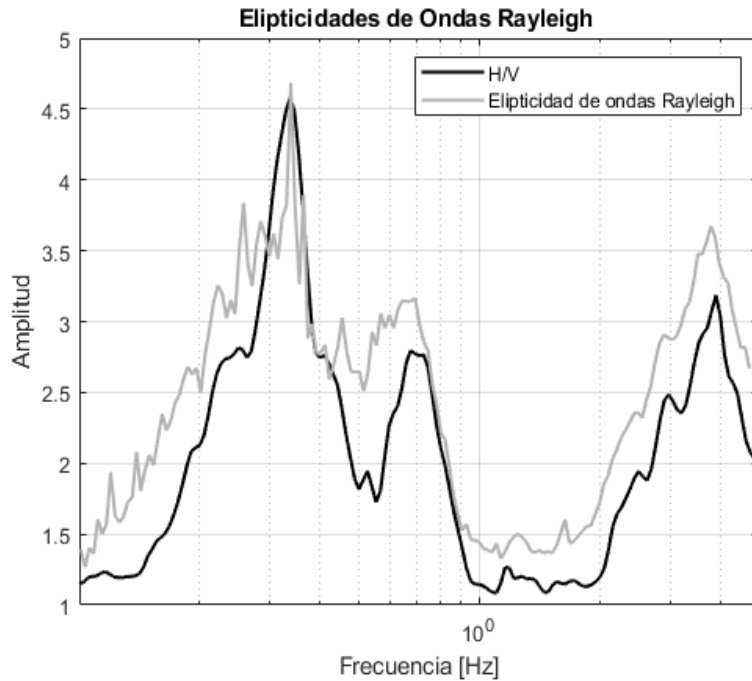
- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)*



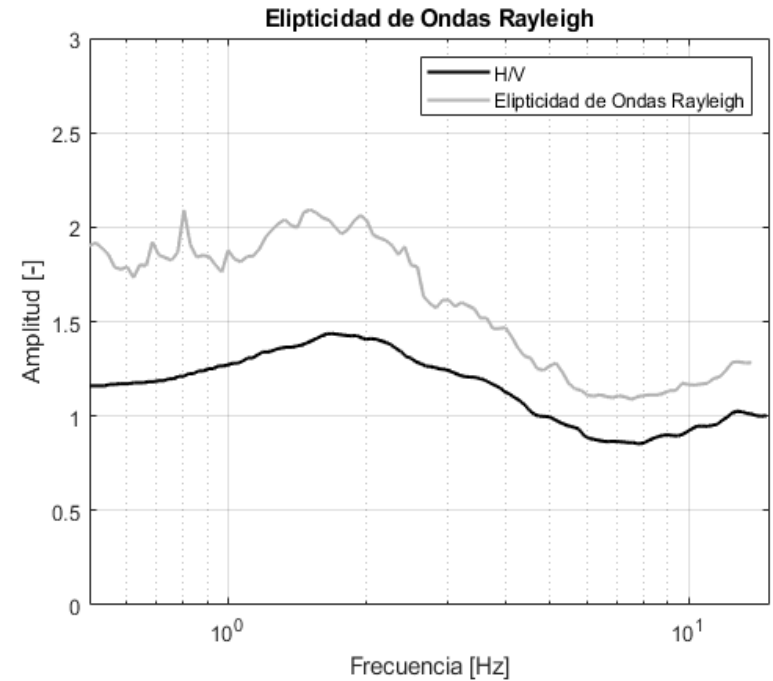


Análisis comparativo

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)*



- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)*





Semilla aleatoria

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)*

Zona de estudio 1.

Capa	Espesor h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Poisson
1	8	210-350	150-250	1850	0.2-0.5
2	22	350-500	250-350	1750	
Semiespacio	>>	350-640	250-450	1750	

- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)*



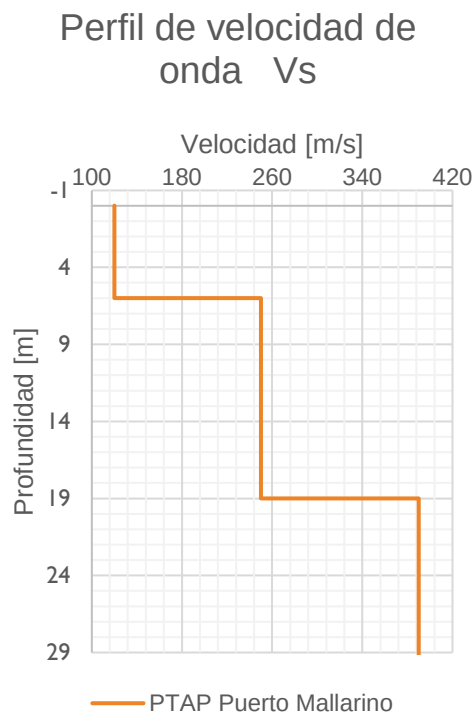
Zona de estudio 2.

Capa	Espesor h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Poisson
1	9	280-370	200-260	1850	0.2-0.5
2	30	370-470	260-330	1550-1880	
Semiespacio	>>	280-640	200-450	1700-1850	



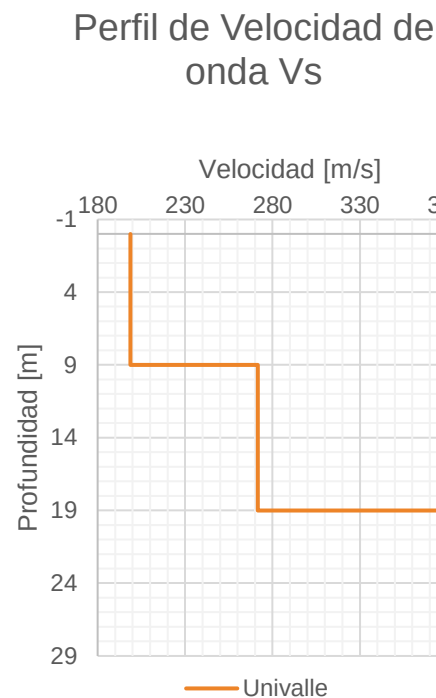
Perfil de velocidad de onda S

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)



$$V_{s30} = 253.33 \text{ m/s}$$

- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)



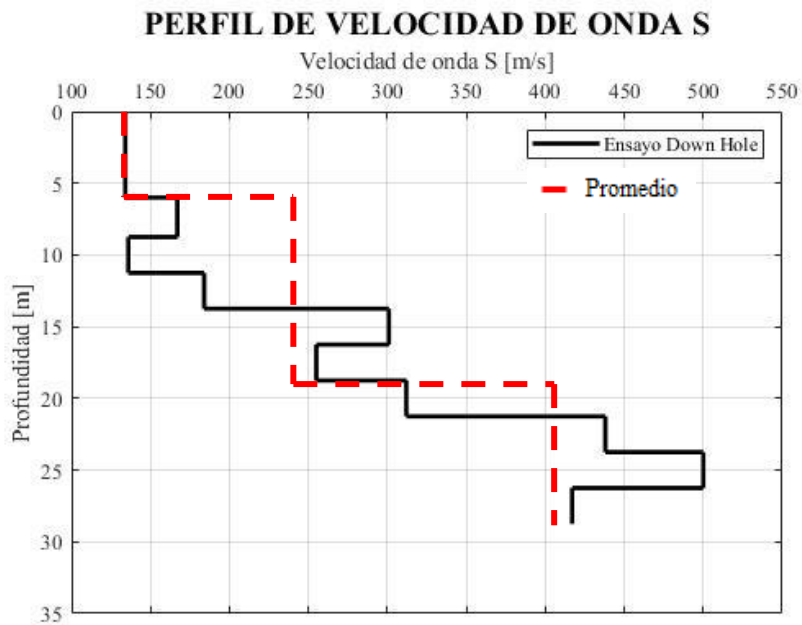
$$V_{s30} = 203.17 \text{ m/s}$$



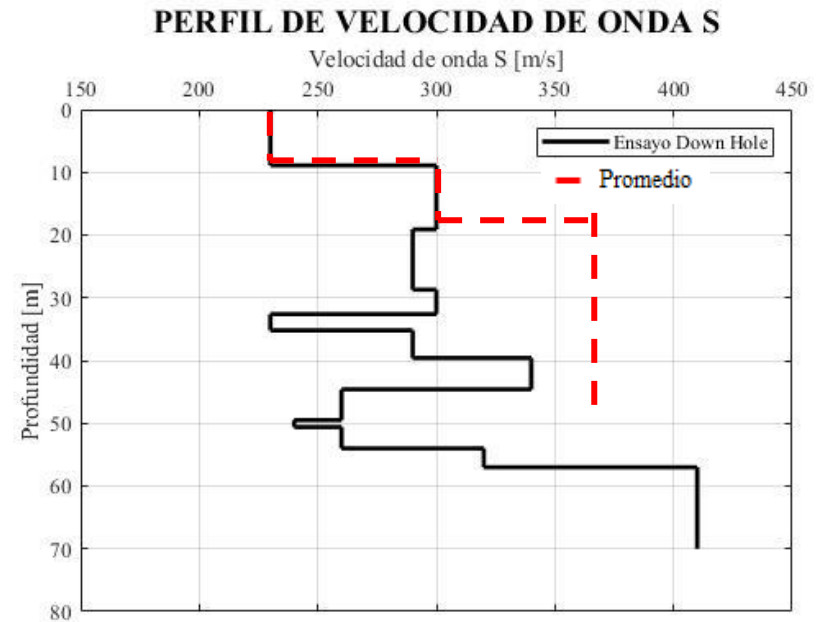


Estudios previos

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)*



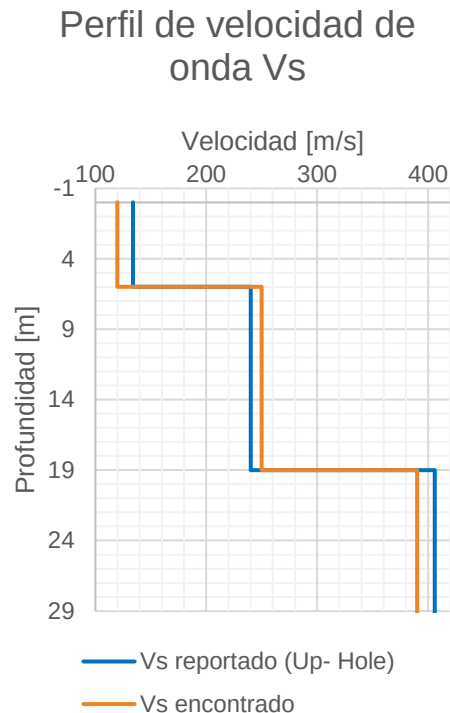
- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)*



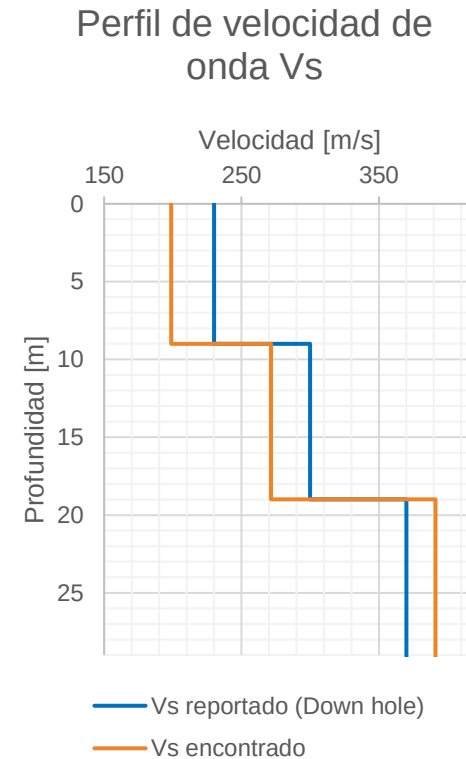


Análisis comparativo

- Zona de estudio 1. (PTAP PUERTO MALLARINO)*

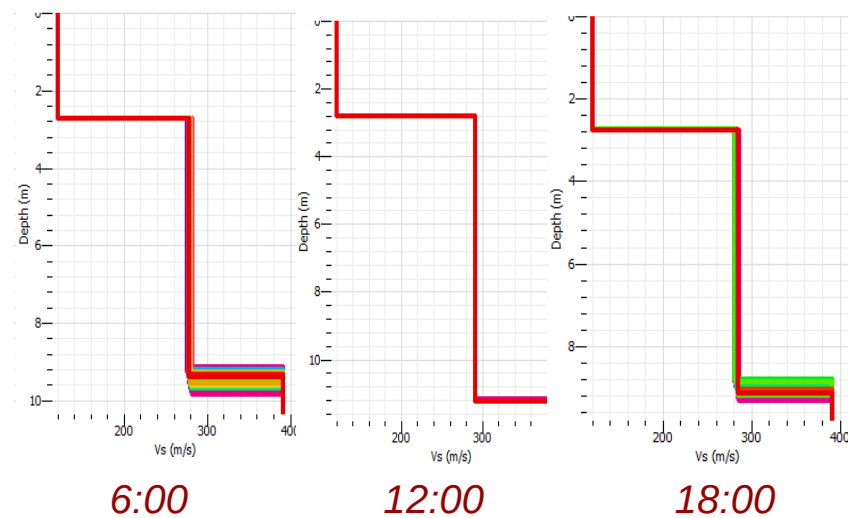
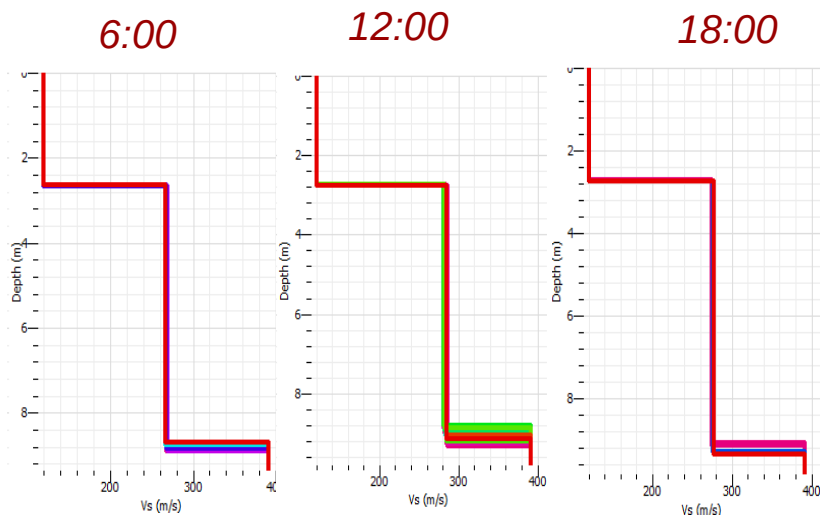


- Zona de estudio 2. (UNIVERSIDAD DEL VALLE)*





Análisis Multi-temporal





Conclusiones

Fiabilidad



- $$\alpha = \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{\sum_i V_i}{V_t} \right) \approx 0.99$$

Alpha de Crombach

Coherencia de resultados

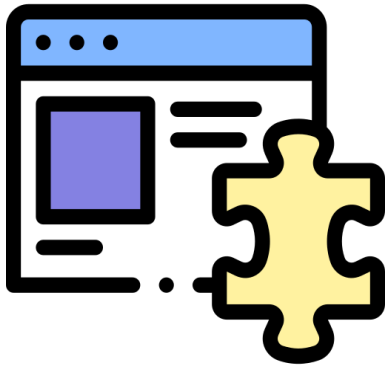


Inversión Elipticidad de ondas
Rayleigh



Conclusiones

Complemento



Sensor superficial y registros
de vibración ambiental



Resultados Representativos



Perfil de velocidad de onda
cortante





Agradecimientos

Esta investigación fue realizada con apoyo del Grupo de Investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle; en el marco de los proyectos de investigación:

- i) “Evaluación de Métodos Convencionales para la Determinación y Mitigación del Potencial de Licuación en Suelos”, con código 11067-710-51485, financiado por COLCIENCIAS de acuerdo con el contrato FP44842-022-2016;
- ii) “Investigación y Desarrollo a Escala de Prototipo de la Tecnología de Filtración en Lecho de Río desde el Río Cauca para la Ciudad de Cali”, financiado por EMCALI EICE ESP según contrato interadministrativo No. 300-GAA-CIA-1162-2017;
- iii) “Implementación de un Centro de Monitoreo Sísmico en los Depósitos de Suelo Potencialmente Licuables de Santiago de Cali”, con centro de información (C.I) 21088, financiado por la Universidad del Valle mediante la Convocatoria Interna 2019-119



XVII CCG
I SSAG 2022

Cartagena



SCG

50
años

1971-2021

¡GRACIAS!

¿Preguntas?

gonzalez.henry@correounivalle.edu.co

eimar.sandoval@correounivalle.edu.co

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”

14 al 18 de Noviembre de 2022



ESTIMACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA A CORTE NO DRENADA DEL DEPÓSITO LACUSTRE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ CON BASE EN CPTU

**Nicolás Quintana Páez
Lina Ximena Garzón Ávila
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**



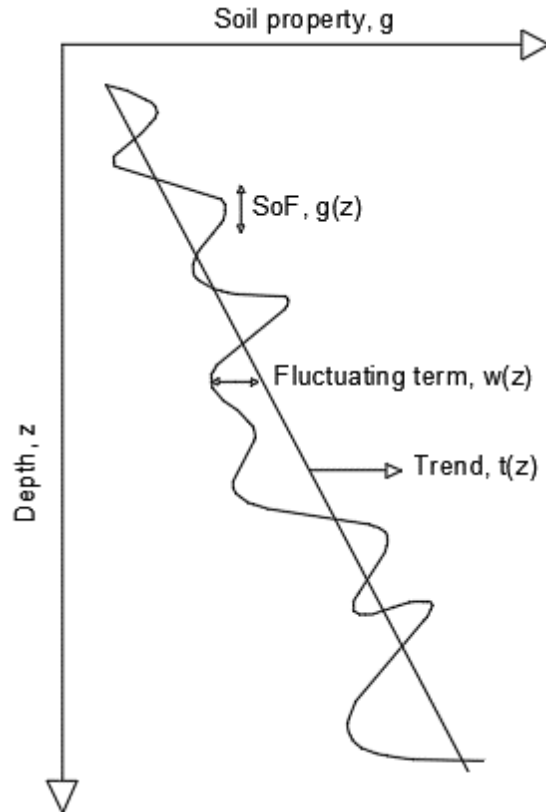
CONTENIDO

1. Introducción
2. Localización
3. Metodología
4. Análisis de resultados
5. Conclusiones
6. Referencias



INTRODUCCIÓN

Variabilidad espacial de las propiedades del suelo



$$g(z) = t(z) + w(z)$$

La distancia de correlación, δ (horizontal y vertical) es la longitud en la cual las propiedades de los suelos muestran una relación entre ellos. (Fenton & Griffiths, 2008).

Fuente: Nie et al. 2015

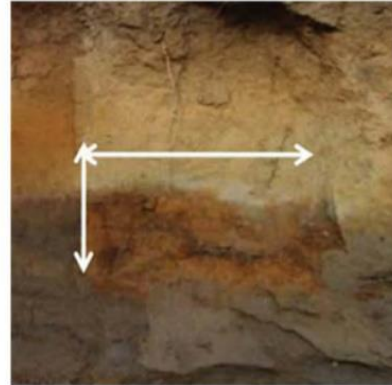


INTRODUCCIÓN

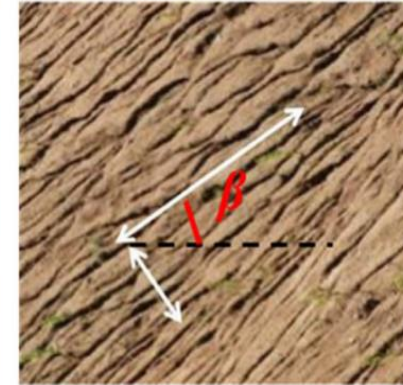
Distancia de autocorrelación



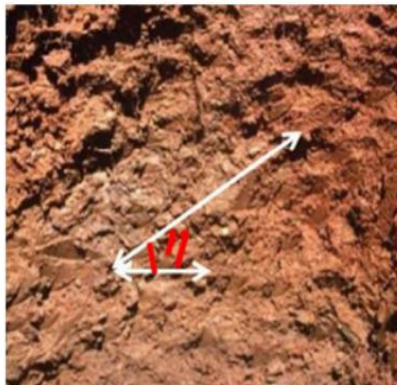
(a) Isotropy



(b) Transverse anisotropy



(c) Rotated anisotropy



(d) General anisotropy



(e) General rotated anisotropy



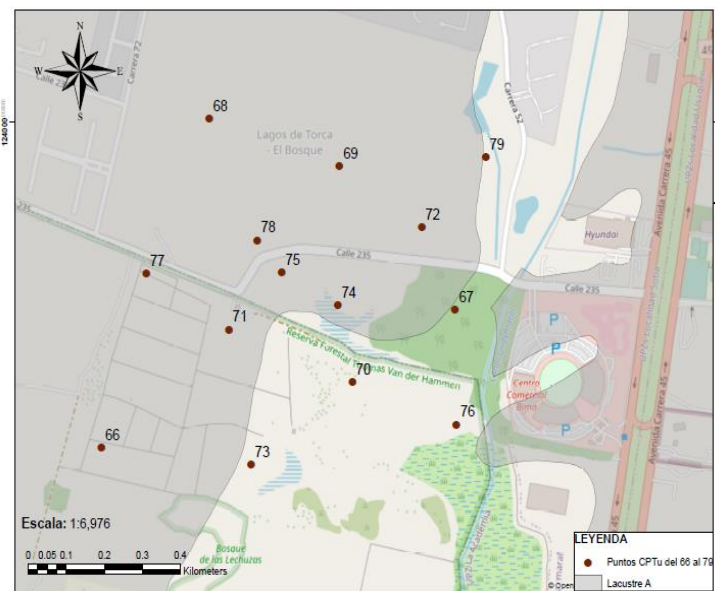
(f) Combination

Fuente: Cheng et al. 2018

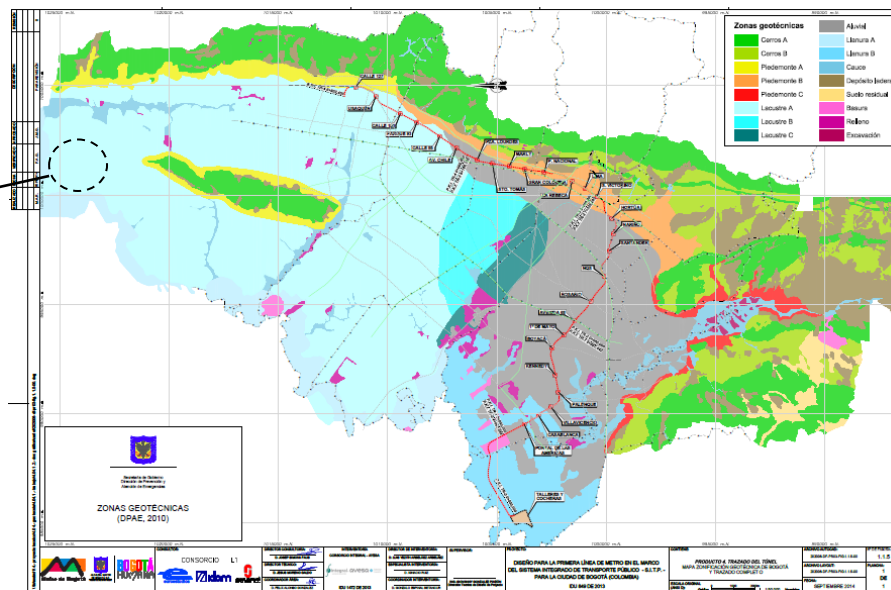


LOCALIZACIÓN

Depósito lacustre de la ciudad de Bogotá
entre las calles 192 a 240 y carreras 7 a 55.



Zona de estudio
Fuente: Autor

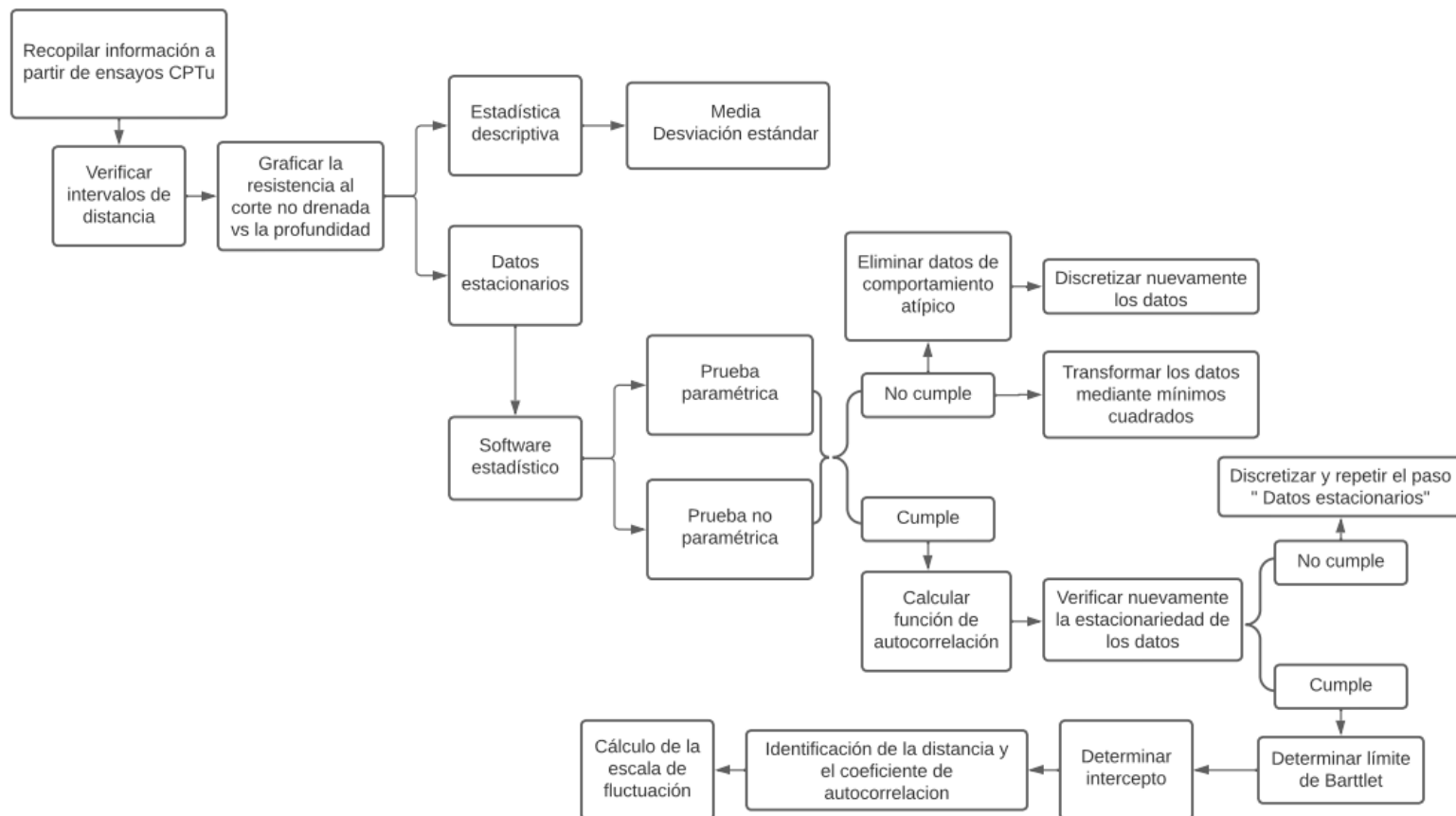


Mapa de microzonificación
sísmica de Bogotá
Fuente: DRAE,2010



METODOLOGÍA

Método de ajuste de una función de autocorrelación (ACFM)

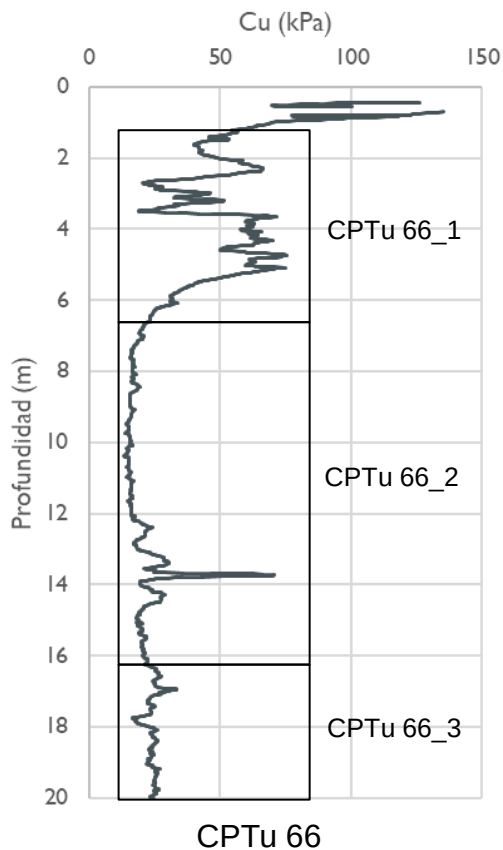


Fuente: Autor



METODOLOGÍA

Cu (kPa) vs Profundidad (m)



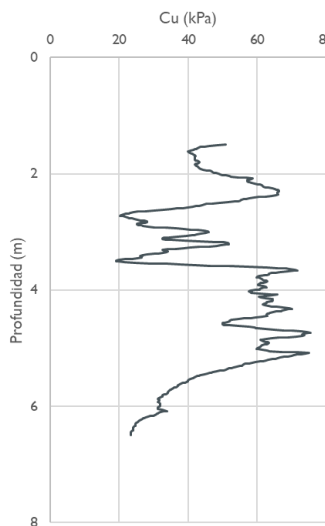
Fuente: Autor

Punto	66-79		
Estratos	Inicio (m)	Fin (m)	Diferencia (m)
Placa de concreto	0	0.1	0.1
Relleno	0.1	1.5	1.4
Limo orgánico	1.5	6.5	5
Arcilla limo arenosa	6.5	16.3	9.8
Limo arcilloso	16.3	34.2	17.9
Limo arenoso	34.2	44.1	9.9
Limo con presencia de turbas	44.1	48.5	4.4
Limo arenoso de color gris	48.5	59	10.5
Limo arenoso	59	65	6

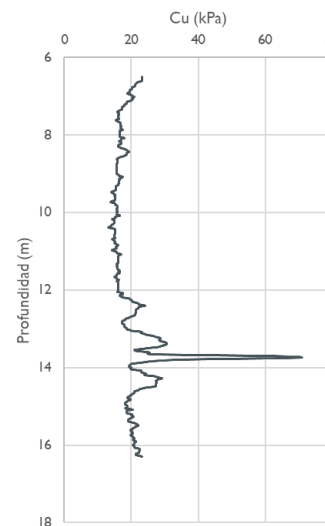
Tabla resumen perfil estratigráfico

Fuente: Autor

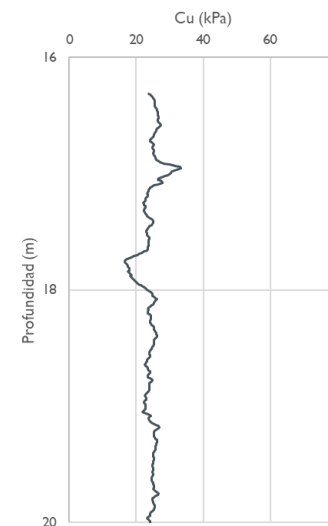
Cu (kPa) vs Profundidad (m)



Cu (kPa) vs Profundidad (m)



Cu (kPa) vs Profundidad (m)

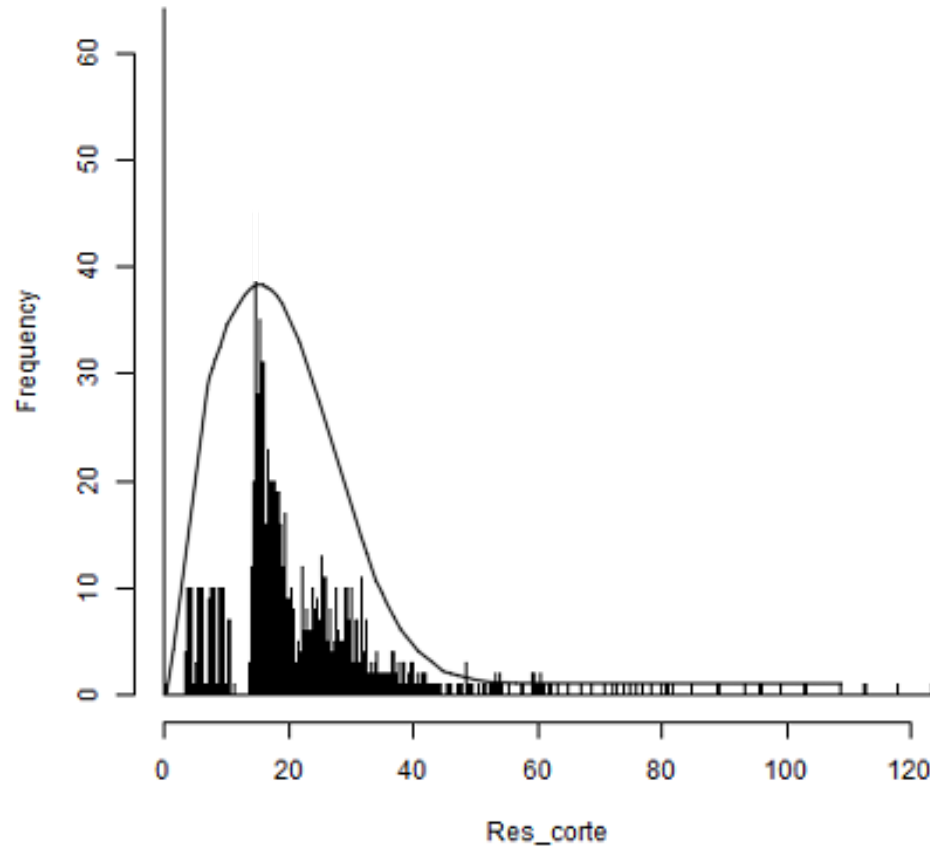


CPTu 66_1, 66_2 y 66_3

Fuente: Autor



METODOLOGÍA

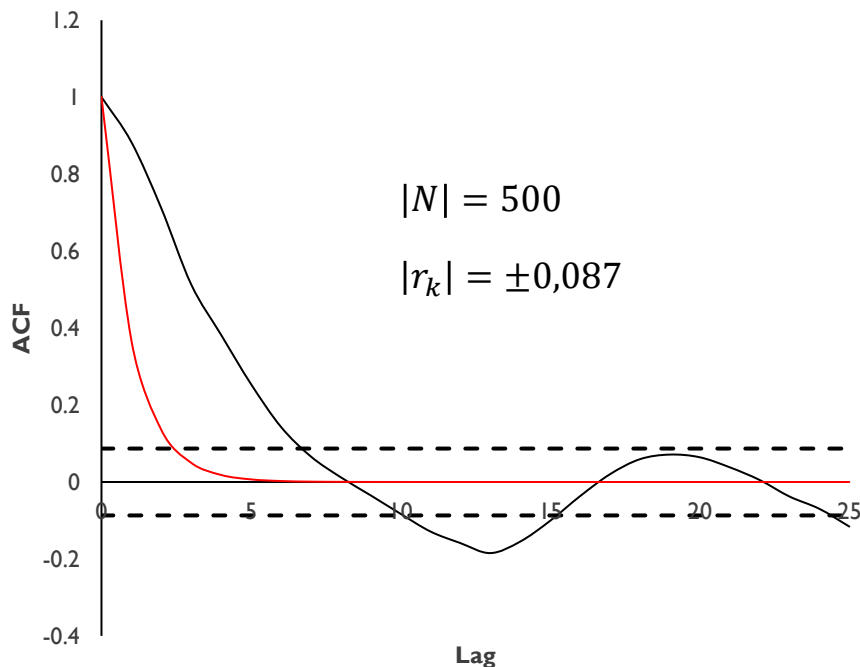


Curva de distribución e histograma CPTu 66

Fuente: Autor



METODOLOGÍA



ACF CPTu 66_1

Fuente: Autor

Model	Autocorrelation function
Triangular	$\rho(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{ \tau }{\delta}, & \tau \leq \delta \\ 0, & \tau > \delta \end{cases}$
Exponential	$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2 \tau }{\delta}\right)$
Squared exponential	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2\right)$
Cosine exponential	$\rho(\tau) = \cos\left(\frac{\tau}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{ \tau }{\delta}\right)$
Second-order Markov	$\rho(\tau) = \left(1 + \frac{4 \tau }{\delta}\right) \exp\left(-\frac{4 \tau }{\delta}\right)$

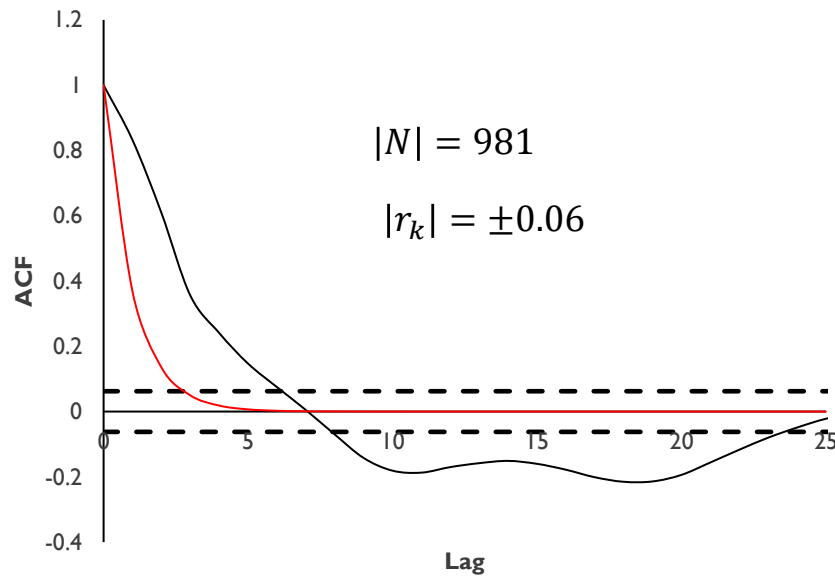
Note: τ is separation distance and δ is scale of fluctuation

Funciones de autocorrelación

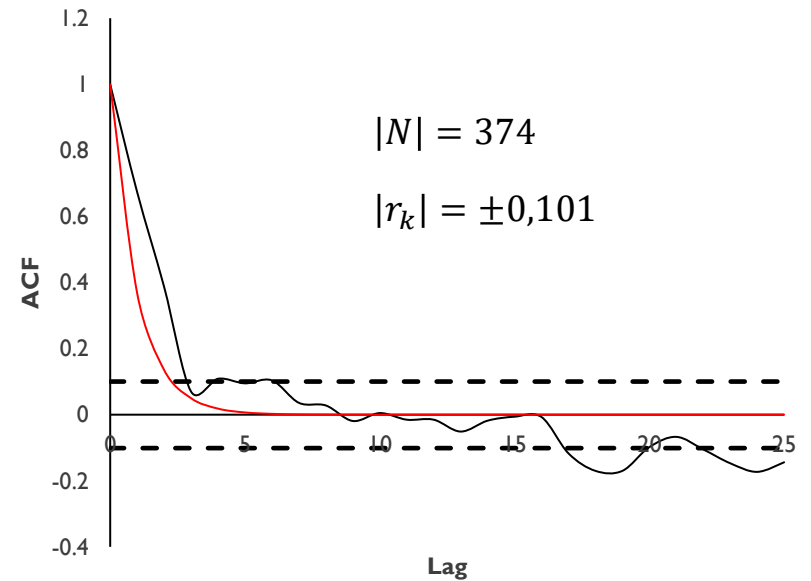
Fuente: (Nie et al. 2015)



METODOLOGÍA



ACF CPTu 66_2
Fuente: Autor



ACF CPTu 66_3
Fuente: Autor



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CPTu	No. de datos	Distribución datos	Valor mínimo/Valor máximo (kPa)	Media (kPa)	Desviación estándar (kPa)	COV	Distribución ACF	$\delta(m)$
66	1855	Lognormal	13,19 - 75,41	30,31	7,79	24,01	Exponencial	0,99
67	1851	Lognormal	17,49 - 63,66	28,05	6,21	20,02	Exponencial	1,00
68	1851	Lognormal	11,17 - 55,77	21,68	5,55	22,96	Exponencial	0,68
69	1851	Lognormal	14,03 - 47,89	22,87	5,44	22,93	Exponencial	0,99
70	1856	Lognormal	15,94 - 60,12	27,89	5,94	19,97	Exponencial	2,09
71	1851	Lognormal	13,88 - 67,53	27,14	5,97	19,68	Exponencial	0,67
72	2054	Lognormal	10,16 - 58,3	23,77	4,97	19,33	Exponencial	0,87
73	1852	Lognormal	6,65 - 51,78	19,52	4,74	21,36	Exponencial	0,88
74	1851	Lognormal	17,75 - 71,37	32,16	6,03	16,47	Exponencial	1,16
75	1852	Lognormal	15,22 - 80,9	32,69	7,03	18,60	Exponencial	1,80
76	2047	Lognormal	12,32 - 62,66	26,63	6,86	23,75	Exponencial	1,00
77	1851	Lognormal	13,88 - 68,53	27,14	5,97	19,69	Exponencial	1,21
78	1849	Normal	7,78 - 49,51	17,80	9,52	54,16	Exponencial	0,66
79	2842	Lognormal	9,75 - 157,68	25,98	8,16	30,25	Exponencial	1,23

Tabla de resultados

Fuente: Autor



CONCLUSIONES

Se determinaron los parámetros de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenada C_U , del lacustre de la ciudad de Bogotá comprendida entre las calles 192 a 240 y carreras 7 a 55.

El coeficiente de variación, COV de la resistencia al corte no drenada, C_U en la zona de estudio varia entre 18 % y 54%. Este rango corresponde a los reportados en la literatura.

La función de autocorrelación que mejor se ajusta al comportamiento de los datos es de tipo exponencial, sin embargo esto no indica que esta tendencia se mantenga en el deposito lacustre en general.

La distancia de correlación vertical, δ_v determinada varía entre 0,66 m y 2,09 m siendo similares a los encontrados en la literatura para este tipo de suelos.



Referencias

- Alonso Pollán, J. A. (2014). *Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava* (Tesis de Doctorado) . Universidad Politécnica de Madrid: Madrid.
- Auvinet, G. (2002). Incertidumbre en geotecnia. *Decimosexta Conferencia Nabor Carrillo, Querétaro, México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 34-36,59-76.
- Badii, M. H., Guillen, A., Lugo Serrato, O. P., & Aguilar Garnica, J. J. (2014). Correlación No-Paramétrica y su Aplicación en la Investigaciones Científica. *Daena: International Journal of Good Conscience*. 9(2), 31-40.
- Becker, D. (1996). Limit states design for foundations. Part II. *Development for National Building Code of Canada. Can. Geotech*, 984-1007.
- Castañeda Jaimes, Á. (2018). Criterios generales de diseño y construcción para el metro subterráneo en la ciudad de Bogotá. *XVI CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA & IV SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERA SISMO-GEOTÉCNICA*, 1-10.
- Cheng, H., Chen, J., Chen, R., Chen, G., & Zhong, Y. (2018). Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties. *Computers and Geotechnics*, 61-72.
- Chiasson, P., Lafleur, J., Soulié, M., & Haw, K. T. (1995). Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics. *Canadian Geotechnical Journal*, 32:1–10.
- Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2008). *Time Series Analysis With Applications in R . Second Edition*. Iowa: Springer.
- Del Barrio Castro, T., Del Sur Mora, A., & Suriñach Caralt, J. (2001). Comportamiento de los contrastes ADF, PP y KPSS al trabajar con series ajustadas de estacionalidad. *QÜESTIÓ*, vol. 25, 1, 19-46.
- Días Viera, M. A. (2002). *Geoestadística aplicada*. Instituto de Geofísica, UNAM , Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA: Ciudad de Mexico.
- Díaz , L., & Manrique, A. (2020). *Caracterización de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenado del depósito lacustre "A" ubicado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito* (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito , Bogotá.
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distriburion of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association* , Volume 74 , Issue 366, 427-431.
- Elkateb, T., Chalaturnyk, R., & Robertson, P. K. (2003). An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems. *Canadian Geotechnical Journal*, 1-15.



Referencias

- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2008). *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- FOPAE. (2010). *ZONIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO INFORME FINAL Vol.1*. Bogotá: FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIA SUBDIRECCIÓN DE TÉCNICA Y GESTIÓN COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO .
- Gallardo, A. (2006). Geostatística. *Ecosistemas*.
- Gens, A., & Alonso, E. (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*. 29(6), 1013-1032.
- Harvie, C., Pahlavani, M., & Saleh, A. (2006). *Identifying Structural Breaks in the Lebanese Economy 1970-2003: An Application of the Zivot and Andrews Test*, Department of Economics. University of Wollongong.
- Huber, M., Moellmann, A., Bárdossy, A., & Vermeer, P. A. (2009). Contributions to probabilistic soil modelling. *Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop*, 1-12.
- INGEOMINAS. (2007). *Geología de la Sabana de Bogotá , Volumen 28, pp 1-103*. Bogotá: Publicaciones Especiales del INGEOMINAS.
- Jaksa, M. B. (2013). Assessing Soil Correlation Distances and Fractal Behavior. *Geotechnical Special Publication*, 405-420.
- Jaksa, M. B., Brooker , P. I., & Kaggwa, W. S. (1997b). Modeling Spatial Variability of the Undrained Shear Strength of Clay Soils using Geostatistics. *In Geostatistics Wollongong '96, E. Y. Baafi and N. A. Schofield (eds.), Volume 2*, 1284-1295.
- Jaksa, M. B., Yeong, K. S., Wong, K. T., & Lee, S. L. (2004). Horizontal Spatial Variability of Elastic Modulus in Sand from the Dilatometer., (págs. 289-294).
- Jaksa, M., Kaggwa, W., & Brooker, P. (1999). Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay.
- Jaramillo J, D. (2012). VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO: BASES PARA SU ESTUDIO. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín V 1 N°1 julio 2012 • ISSN 0121-747X*, 73-87.
- Jaramillo, D. J., González, H. S., & Álvarez, F. M. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, vol. 3, núm. 2, 10-19.
- Jinhui , L., Wuzhang, L., Yinghui , T., Yuan, W., & Mark Jason, C. (2020). Modeling of large deformation problem considering spatially variable soils in offshore engineering. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-13.
- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. London: Academic Press.



Referencias

- Juárez Camarena, M., Auvinet Guichard, G., & Méndes Sánchez, E. (2016). Geotechnical Zoning of Mexico Valley Subsoil. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVII (número 3)*, 297-308.
- Juarez, M., Aluvinet, G., & López, J. (2014). Validación de los métodos geoestadísticos aplicados a la caracterización del subsuelo de la ciudad de México. *Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 1-8.
- Kim, H. (2005). *SPATIAL VARIABILITY IN SOILS: STIFFNESS AND STRENGTH (Doctoral thesis)*. Georgia Institute of Technology: Georgia.
- Koker, N., & Day, P. (2018). Assessment of reliability-based design for a spectrum of geotechnical design problems. *Geotechnical Engineering*, Volume 171 , Issue GE2.
- Kulhawy, F., & Phoon, K. (1996). Engineering judgment in the evolution from deterministic to reliability-based foundation design. *In Uncertainty in the Geologic Environment - From Theory to Practice (GSP 58)*, , 29-48 ,New York.
- Kulhawy, F., & Phoon, K. (2002). Engineering judgment in the evolution from deterministic to reliability-based foundation desing. *In Uncertainty in Geologic Enveironment-From Tehory to Practice (GSP 58)* , 29-48, New York.
- Li, K. S., & Lumb, P. (1987). Probabilistic design of slopes. *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, No.4*, pp.520-535.
- Lobo-Guerrero Uscátegui, A. (1992). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. *VII JORNADAS GEOTECNICAS DE LA INGENIERIA DE COLOMBIA* , 1-20.
- Londoño Ciro, L. A., Ramírez Bólvivar, J. R., Ramírez Bolivar, G., & Ordóñez Ante, C. A. (2010). MODELO DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO. *Dyna, vol. 77, núm. 164*, 109-118.
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, Vol. 58, pp. 1246.
- Mendoza Bolaño, C., & Lizcano A., A. (2009). Comportamiento mecánico de la Arcilla de Bogotá. *XV Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Bogotá, Colombia*, 1-7.
- Mulla, D. J. (1988). Estimating spatial patterns in water content, matric suction and hydraulic. *Soil Science Society*, 52:1547–1553.
- Murthy, S. (2005). *Probabilistic site characterization and reliability analysis of shallow foundations and slopes (Doctor Thesis)*. DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE: BANGALORE.



Referencias

- Onyejekwe, & Ge, L. (2013). Scale of Fluctuation of Geotechnical Parameters Estimated from CPTu and Laboratory Test Data. *Geotechnical Special Publication*, 1-10.
- Onyejekwe, S. (2012). *Charecterization of soil variability for realiability-based design (Doctor thesis)*. MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, USA.
- Palachy, S. (2019). Detecting stationarity in time series data. *Toward data science*.
- Phoon, K. (2004). Towards reliability-based design for geotechnical engineering. *Special lecture for Korean Geotechnical Society*, (pág. 23). Seul.
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Can.Geotech*, 612-624.
- Pineda Contreras, A. R., & Auvinet Guichard, G. (2012). Método del elemento finito estocástico en geotecnia. Enfoque espectral. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV*, 1-16.
- Pineda Contreras, A., & Auvinet Guichard, G. (2012). Evaluación de incertidumbre en análisis de esfuerzos y deformaciones con el método del elemento finito estocástico espectral en geotecnia. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 1-10.
- Popescu, R., Deodatis, G., & Nobahar, A. (2005). Effects of random heterogeneity of soil . *properties on bearing capacity*, 324 –341.
- Ramírez Bolívar, G. I. (2010). *Aplicación del método del intervalo de confianza como técnica geoestadística no lineal a la modelación espacial de variables geotécnicas (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia : Medellín.
- Rojas Dávila, M. A. (2003). *Técnicas Estadísticas Paramétricas y No Paramétricas Equivalentes: Resultados Comparativos Por Simulación (Tesis de pregado)*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- Soulié, M., Montes, P., & Silvestri, V. (1990). Modeling spatial variability of soil parameters. *Canadian Geotechnical Journal*, 27:617–630.
- Suarez Pinilla, J. G. (2017). *Análisis por Confiabilidad de Asentamientos de cimientos*.
- Uzielli, M. (2008). Statistical analysis of geotechnical data. 1-21.
- Uzielli, M., Lacase, S., Nadim, F., & Phoon, K. (2006). Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice. 104.
- Vanmarcke, E. H. (2010). *Random Fields: Analysis and Synthesis (Revised and Expanded New Editon*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Vanmarcker, E. (1997). Probabilistic Modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1227-1246.
- Vargas Tapia, R. R. (2013). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN EL DISEÑO GEOTÉCNICO DE MUROS DE CONTENCIÓN, UTILIZANDO EL MÉTODO MONTE*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ: Lima.



Referencias

- Vázquez Guillen , F., & Auvinet Guichard, G. (2013). Simulación de campos aleatorios con dependencia no multi-gaussiana empleando cópulas. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XV (número 4)*,, 539-548.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myes, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- Yu, W., & Zijun, C. (2013). Expanded reliability-based design of piles in spatially variable soil using efficient MonteCarlo simulations. *Soils and Foundations*, 820-834.
- Zivot, E., & Andrews, D. (1992). Further evidence of great crash, the oil price shock and unit root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics Vol. 10, No. 3*, 251-270.



XVII CCG
I SSAG 2022

Cartagena



SCG

50
años

1971-2021

¡GRACIAS!

¿Preguntas?

lina.garzon@escuelaing.edu.co

nicolas.quintana@mail.escuelaing.edu.co