

Mediciones de campo, variabilidad espacial y susceptibilidad a la licuación

Por: Juliana Álvarez Zapata

Tesis presentada a la Universidad EAFIT para optar al título de Maestría en
Ingeniería modalidad Investigación

Octubre, 2021
Medellín, Colombia

Profesora: Silvana Montoya-Noguera

© 2021, Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que hicieron parte de este proceso de investigación. Gracias a mi familia, quienes desde siempre me han ayudado y apoyado en cada proyecto que he emprendido. Gracias a mi madre, que con su amor incondicional me ha enseñado de fortaleza y perseverancia. Gracias a la universidad EAFIT, por financiar este proceso de aprendizaje y ser un espacio de generación de conocimiento.

A mi tutora, Silvana Montoya Noguera, le agradezco su orientación y paciencia. A mis compañeros del grupo de mecánica aplicada, gracias por su ayuda y complicidad, y finalmente, agradezco a todos los profesores del departamento de ingeniería civil, por inspirarme siempre a través de su conocimiento.

Resumen

Los cálculos y diseños geotécnicos pueden desarrollarse con mejores aproximaciones al comprender la variabilidad espacial del suelo. Sin embargo, tener una caracterización geotécnica completa, que además de cuenta de la variabilidad del suelo, podría incurrir en grandes costos para los proyectos.

El presente estudio integra la teoría de campo aleatorio en geotecnia, la detección compresiva bayesiana y la simulación de Monte Carlo, para la generación de simulaciones en 2D que permitan obtener una representación de la variabilidad de las propiedades del suelo. Lo anterior tomando como datos de entrada mediciones limitadas del ensayo de penetración con cono CPTu. Durante el estudio se consiguió hacer una caracterización completa de sitio que incluyó, además de la variabilidad espacial del suelo, el conocimiento de parámetros geotécnicos de diseño y comportamiento.

Finalmente, la variabilidad espacial estimada se pudo incorporar en la evaluación de la susceptibilidad a licuación. Se pudo validar que la variabilidad representada y caracterizada por medio de campos aleatorios depende completamente de la variabilidad registrada en campo y que el efecto de la variabilidad espacial es más importante en la evaluación de la susceptibilidad a la licuación cuando se tienen aceleraciones de sismo menores.

Este trabajo señala la necesidad de continuar estudiando y desarrollando metodologías que permitan comprender cada vez con mejores aproximaciones el papel de la variabilidad espacial en el comportamiento de suelos susceptibles de licuación, migrando a métodos numéricos que integren sus efectos espaciales, además concluye sobre la necesidad de incluir la incertidumbre asociada a las correlaciones empíricas en la generación de los campos aleatorios.

Palabras clave – Licuación, Variabilidad espacial, Campo aleatorio, Ensayo de penetración con cono, CPTu.

Lista de símbolos

- CC Arcilla-Contractante
- CCS Arcilla-Contractante-Sensitiva
- CD Arcilla-Dilatante
- CPTu Ensayo de penetración con cono
- CRR Resistencia cíclica del suelo
- CS Detección de compresión
- CSR Demanda cíclica del suelo
- MCMC Markov Chain Monte Carlo
- NF Nivel freático
- PDF Función de densidad de probabilidad
- RFM Modelo de campo aleatorio
- SBT Clasificación del tipo de comportamiento del suelo
- SC Arena arcillosas de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- SM Arena limosa de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- SP Arena limpia pobremente gradada de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- SPT Ensayo de penetración estándar
- TC Material de transición -Contractante
- TD Material de transición-Dilatante
- $2D$ Dos dimensiones
- B_q Presión de poros normalizada
- B_t^{2D} Representación de un conjunto de funciones básicas

- CD Parámetro de delimitación de comportamiento dilatante y contractante
- COV Coeficiente de variación de un conjunto de datos
- CRR Coeficiente de resistencia cíclica
- $CRR_{M=7.5, \sigma'=1}$ Coeficiente de resistencia cíclica de referencia
- CSR Coeficiente de esfuerzo cíclico inducido por el sismo
- F Resistencia normalizada de fricción
- FS Factor de seguridad
- I_B Índice de comportamiento SBT-Actualizado
- I_c Índice de comportamiento de material
- K_σ Factor de escala del esfuerzo efectivo
- M Magnitud del sismo
- MSF Factor de escala para sismo
- N Dimensiones de P
- N_1 Dimensión de P para las filas-Número de datos en la vertical
- N_2 Dimensión de P para las columnas-Número de datos en la horizontal
- $N_{mcmc} = 100$ Número final de simulaciones de MCMC
- P Matriz de representación de datos que varían espacialmente y son correlacionables
- Q Resistencia normalizada de la punta
- Q_n Resistencia normalizada de la punta con un exponente de
- R^2 Porcentaje de variación del parámetro estimado
- SOF Escala de fluctuación-Longitud de auto-correlación
- V_s Velocidad de propagación de onda de corte
- X Parte determinista de una variable geotécnica

-
- $X + \Delta h$ Parte aleatoria de una variable geotécnica
 - Y Matriz conformada por los datos provenientes de las medidas de campo
 - a_{max}/g Aceleración horizontal máxima como fracción de la gravedad
 - c Cohesión del suelo
 - $e(z)$ Error asociado a $w(z)$
 - f_s Resistencia de fricción medida en el ensayo de CPTu
 - k_0 Coeficiente de esfuerzos laterales
 - n Exponente de esfuerzo variable para normalización la resistencia de la punta
 - n_b Número de sondeos de campo
 - n_{x2} Resolución horizontal, separación en la horizontal de los datos simulados
 - n_{x1} Resolución vertical, separación en la vertical de los datos simulados
 - q_c Resistencia de punta medida en el ensayo de CPTu
 - q_t Resistencia de punta normalizada
 - r_d Factor de reducción del esfuerzo cortante
 - u_0 Presión de poros hidrostática
 - u_2 Presión de poros instantánea medida en el ensayo de CPTu
 - $t(z)$ Función de tendencia determinista
 - w Longitud de ventana media móvil
 - $w(z)$ Componente de fluctuación de $t(z)$
 - z Profundidad,
 - γ_t Peso específico total
 - γ_w Peso específico del agua
 - σ Esfuerzo vertical total

- σ' Esfuerzo vertical efectivo
- σ'_h Esfuerzo horizontal efectivo
- p_{atm} Presión atmosférica
- ϕ Ángulo de fricción
- $\xi(z)$ Representación de cualquier propiedad del suelo *in-situ*
- Ψ^T Matriz transpuesta con la posición de los sondeos de CPTu.
- μ Media de un conjunto de datos
- δ Escala de fluctuación (SOF)-Longitud de auto-correlación
- Δh Distancia de separación entre dos valores de una misma variable
- σ_r Varianza de referencia
- σ_w Varianza para los datos suavizados
- ω_t^{2D} Factor de peso o ponderación para B_t^{2D}

Índice general

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMIENTOS | I |
| Resumen | II |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Objetivos de la investigación | 3 |
| 3. Contexto de la investigación | 4 |
| 3.1. Contexto: Variabilidad y CPTu | 4 |
| 3.2. Contexto: Variabilidad y campos aleatorios | 7 |
| 3.3. Contexto: Fenómeno de licuación | 9 |
| 3.4. Contexto: Variabilidad y licuación | 10 |
| 3.5. Contexto: Observaciones generales | 11 |
| 4. Metodología | 14 |
| 4.1. Metodología: Recopilación y Análisis del CPTu | 15 |
| 4.1.1. Metodología: Geología y estratigrafía | 16 |
| 4.1.2. Metodología: Análisis de datos de CPTu | 16 |
| 4.2. Metodología: Correlaciones y CPTu | 19 |
| 4.2.1. Metodología: Correlaciones y CPTu | 22 |
| 4.2.2. Metodología: Correlaciones y CPTu | 24 |
| 4.3. Metodología: Variabilidad del suelo | 27 |
| 4.3.1. Metodología: Variabilidad y validación de procedimiento para simulaciones | 29 |
| 4.3.2. Metodología: Variabilidad de datos de CPTu | 32 |
| 4.3.3. Metodología: Variabilidad de datos correlacionados | 33 |
| 4.3.4. Metodología: Variabilidad y parámetros para su caracterización | 33 |
| 4.3.4.1. Metodología: Escala de fluctuación | 36 |
| 4.4. Metodología: Análisis de licuación | 36 |
| 5. Resultados y Análisis | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1. Análisis y resultados: Variabilidad de parámetros de CPTu | 39 |
| 5.2. Análisis y resultados: Variabilidad de parámetros correlacionados | 46 |
| 5.3. Análisis y resultados: Variabilidad y Licuación | 61 |
| 6. Conclusiones y Perspectivas | 65 |
| Referencias | 67 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| 4.1.1. Información general de los CPTu | 15 |
| 4.2.1. Zonas y tipos de comportamiento de suelo según Robertson (2016) | 26 |
| 4.3.1. Localización horizontal de los sondeos CPTu, con respecto a la longitud total del depósito | 32 |
| 5.1.1. Valores de $SOF_{vertical}$ para cada sondeo | 40 |
| 5.1.2. Coeficientes de variación, medias y valores extremos para q_t | 41 |
| 5.1.3. Coeficientes de variación, medias y valores extremos para f_s | 41 |
| 5.1.4. Posiciones de los sondeos con respecto al número de los datos en la horizontal | 42 |
| 5.1.5. Valores de SOF obtenidos en la vertical para algunas posiciones longitudinales | 45 |
| 5.1.6. Valores de SOF obtenidos en la horizontal para algunas profundidades | 45 |
| 5.2.1. Variaciones de γ_t en función de variables estadísticas al ser estimado con diferentes correlaciones | 47 |
| 5.2.2. Variaciones de V_s en función de variables estadísticas al ser estimado con diferentes correlaciones | 48 |
| 5.2.3. Cantidad y porcentaje de datos por zona de tipo de comportamiento para los datos de las simulaciones y los sondeos | 51 |
| 5.2.4. Datos de caracterización para γ_t para los datos de los sondeos y los datos simulados | 56 |
| 5.2.5. Datos de caracterización para V_s para los datos de los sondeos y los datos simulados | 57 |
| 5.2.6. Datos de caracterización para ϕ para los datos de los sondeos y los datos simulados | 58 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 3.5.1.Contexto general de la investigación | 13 |
| 4.1.1.Eschema simplificado para la localización de los sondeos con respecto a la longitud de la zona de interés | 16 |
| 4.1.2.Variación con la profundidad de las medidas de CPTu | 17 |
| 4.1.3.Variación de las medidas de CPTu y aproximación de la estratigrafía de acuerdo con Bong and Stuedlein (2017) | 18 |
| 4.2.1.Procedimiento general para la definición de los parámetros de resistencia y comportamiento a partir de los datos de CPTu | 21 |
| 4.2.2.Comparación en el plano Q - F de las zonas SBT (Tomado de Robertson (2016)) | 27 |
| 4.3.1.Comparación de visualizaciones para zona muestreada con CPTu en Nueva Zelanda: (a) Simulación obtenida (b) Simulación original (Zhao et al. (2020)) | 31 |
| 4.3.2.Representación de la variabilidad del suelo (Tomado de Phoon and Kulhawy (1999)) | 35 |
| 5.1.1.Campos aleatorios promedios con una resolución vertical de 0.02 m y una resolución horizontal de 0.50 m: (a) q_t (b) f_s (c) u_2 | 43 |
| 5.2.1.Variación en profundidad de los valores de γ_t definidos por diferentes correlaciones: (a) P1-1 (b) P2-1 (c) P3-1 (d) P4-1 (e) P5-1 | 49 |
| 5.2.2.Variación en profundidad de los valores de V_t definidos por diferentes correlaciones: (a) P1-1 (b) P2-1 (c) P3-1 (d) P4-1 (e) P5-1 | 50 |
| 5.2.3.(a) Esquema de referencia propuesto por Robertson (2016) con respecto a zonificación de SBT (b) Esquema con distribución de datos en zonas de STB, a partir de los campos simulados para las variables del CTPu | 52 |
| 5.2.4.Visualización de la zonificación del suelo según la estimación del SBT-RF=50 | 53 |
| 5.2.5.Representación de campos aleatorios promedios con una resolución vertical de 0.02 m y una resolución horizontal de 0.05m: (a) γ_t (b) V_s (c) ϕ' | 54 |
| 5.2.6.Representación de campos aleatorios para V_s con una resolución vertical de 0.02 m y una resolución horizontal de 0.05m: (a) Datos promedios (b) Simulación 1 (c) Simulación 50 (d) Simulación 100 | 55 |

| | |
|--|----|
| 5.2.7. Rangos de distribución por tipo de zonas de comportamiento para (a) γ_t (b) V_s (c) ϕ | 60 |
| 5.3.1. Visualización de resultados típicos de FS en $2D$ para $RF=13$, $M = 7.5$: (a) $a_{max} = 0.12g$ (b) $a_{max} = 0.15g$ (c) $a_{max} = 0.20g$ (d) $a_{max} = 0.30g$ | 62 |
| 5.3.2. Visualización de la zonificación del suelo según la estimación del SBT- $RF=50$ | 63 |
| 5.3.3. Variación de los asentamientos diferenciales en la dirección horizontal para $M = 7.5$ a) $0.12 g$ (b) $0.30g$ | 63 |

Capítulo 1

Introducción

[Kavazanjian et al. \(2016\)](#), menciona que el fenómeno de licuación es uno de los problemas más complejos que enfrenta la ingeniería geotécnica en la actualidad, siendo catalogado como una de las principales causas de daños por sismos en todo el mundo. Sismos como los ocurridos en Kocaeli-Turquía en 1999; la secuencia de sismos 2010-2011 en Cantenbury, Nueva Zelanda; y el sismo de Muisne 2016 en Ecuador, demuestran la importancia y la complejidad del fenómeno; sin embargo, aún existen limitaciones para su estudio, ya que aunque hay avances significativos en las metodologías para evaluar el potencial de activación de la licuación, siguen siendo reducidos aquellos métodos para predecir sus consecuencias.

Estudios como los desarrollados por [Fenton and Vanmarcke \(1998\)](#), [Popescu et al. \(1997\)](#) y [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), indican que los diseños relacionados con licuación pueden tener mejores aproximaciones al tener una comprensión de la magnitud de la variabilidad espacial del suelo. Sin embargo, estimar las variaciones en dos dimensiones de las propiedades del suelo, puede incurrir en grandes costos por los proyectos convencionales de ingeniería geotécnica. Existen diferentes metodologías basadas en la teoría de campo aleatorio, que permiten recrear las variaciones espaciales de los depósitos. Particularmente [Zhao et al. \(2020\)](#) plantean una alternativa que permiten simular las variaciones presentes en el suelo a partir de datos limitados, estadística bayesiana y campos aleatorios.

El presente proyecto propone recrear la variabilidad registrada en campo, para un número

limitado de ensayos de penetración con cono (CPTu), en toda la longitud de un depósito de suelo, a través de la anterior metodología. Luego propone incorporar la variabilidad simulada en análisis que permitan conocer la respuesta del suelo frente a cargas sísmicas (i.e. Licuación). [Mayne et al. \(2007\)](#), plantea que el CPTu se ha posicionado como un ensayo eficiente y rentable para la caracterización geotécnica, ofreciendo ventajas sobre otros métodos de prueba en campo.

El ensayo, permite tener una medida directa de la variabilidad del suelo en profundidad y además favorece la detección de campos delgadas, que puedan activar el potencial de licuación, constituyendo una herramienta altamente estudiada, por lo que cada vez, con mejores aproximaciones, es posible correlacionar las medidas de campo, con algunos parámetros de diseño (e.g. [Mayne \(2006\)](#); [Mayne \(2007\)](#); [Mayne \(2014\)](#)), y comportamiento [Robertson \(2016\)](#). Razón, por la que también se lleva a cabo una caracterización completa de algunos parámetros de diseño y comportamiento determinados en función de las mediciones de CPTu, obteniéndose una aproximación a la estratigrafía de la zona y a la variabilidad de cada parámetro.

La organización del documento cuenta con un capítulo donde se presenta el contexto general de la investigación, allí se citan diferentes investigaciones y conceptos teóricos que enmarcan su soporte (3, posteriormente se describen las metodologías, procedimientos, validaciones y ecuaciones utilizadas durante la investigación (4), seguido de un capítulo que muestra en detalle los análisis y resultados obtenidos (5. Finalmente en el capítulo 6, se presenta la conclusión global de la investigación.

Capítulo 2

Objetivos de la investigación

1. Desarrollar una metodología que permita incluir la variabilidad espacial medida en campo en la caracterización geotécnica.
2. Evaluar el efecto de la variabilidad espacial medida en campo, en los análisis de susceptibilidad de licuación sísmica.

Capítulo 3

Contexto de la investigación

En este capítulo se expone el contexto general de la investigación, resaltando la necesidad de contemplar la variabilidad espacial dentro de los diseños geotécnicos con el fin de obtener mejores aproximaciones, menor incertidumbre y minimizar costos de los proyectos en la etapa de exploración. Para esto se enfatiza en el uso de mediciones de campo, y se plantea un caso de estudio particular relacionado con la evaluación de la susceptibilidad a la licuación.

3.1. Variabilidad geotécnica y ensayo de penetración de cono (CPTu)

De acuerdo con [Zhao et al. \(2020\)](#), la caracterización geotécnica consiste en la determinación de la estratigrafía del suelo y la estimación de las propiedades de resistencia y comportamiento de los materiales en el sitio de interés. Comúnmente, dicha caracterización se hace de manera determinista. Además, dada la cantidad limitada de datos de campo y laboratorio que se obtienen dentro de una campaña de exploración, pocas veces se toman en cuenta las variaciones espaciales de los materiales y de sus propiedades.

[Popescu \(2008\)](#), menciona que el desconocimiento de la variabilidad en los suelos, puede tener un efecto sustancial en los resultados de diseños bajo cargas. Es por esto, que resalta la necesidad de incorporar la variabilidad de los materiales y de sus propiedades en los diseños

de ingeniería; y la implementación de metodologías que favorezcan su representación y cuantificación. Lo anterior sugiere la realización de diseños con mejores aproximaciones, y menores grados de incertidumbre.

La incertidumbre para la ingeniería geotécnica ha sido estudiada por varios autores. Entre ellos, [Phoon and Kulhawy \(1999\)](#) y [Popescu \(2008\)](#) proponen la existencia de tres fuentes principales de incertidumbre.

1. La variabilidad inherente del suelo debida a los procesos geológicos naturales que formaron y modificaron la masa del suelo.
2. Los errores de medición relacionados con los operarios y los equipos.
3. La incertidumbre de la transformación, que se encuentra relacionada con la obtención de parámetros para el diseño o la caracterización, por medio de ecuaciones obtenidas empíricamente (i.e. correlaciones).

[Popescu \(2008\)](#) aclara que las tres fuentes de incertidumbre contribuyen a una variabilidad global dentro de los cálculos y diseños geotécnicos que debería tenerse en cuenta.

Al relacionar los planteamientos anteriores, se hace evidente que es necesario considerar métodos para la caracterización geotécnica que aproximen además, la variabilidad global. Esto se puede lograr mediante una cantidad considerable de ensayos de campo y laboratorio, pero incrementaría notablemente los costos de los proyectos de ingeniería ([Kavazanjian et al., 2016](#)). Sin embargo, [Zhao et al. \(2020\)](#) plantean alternativas adicionales que permiten simular las variaciones presentes en el suelo a partir de datos limitados, estadística bayesiana y campos aleatorios como herramientas para representar dichas variaciones.

Específicamente, [Phoon and Kulhawy \(1999\)](#) plantearon las bases de la caracterización de la variabilidad espacial en geotecnia por medio de modelos de campo aleatorio (e.g. [Cao et al. \(2018\)](#)). [Baecher \(1999\)](#) propone que aunque los procesos geológicos no son aleatorios, la variabilidad inherente del suelo si puede modelarse mediante la teoría de estos campos.

Lo anterior impulsó el estudio de la variabilidad de los suelos, principalmente en profundidad, tomando en cuenta los resultados de ensayos in-situ, como los obtenidos en el ensayo de penetración estándar (SPT) y el ensayo de penetración con cono (CPT o CPTu)

(e.g. [Cao and Wang \(2013\)](#); [Bong and Stuedlein \(2017\)](#); [Zhao et al. \(2020\)](#); [Viviescas et al. \(2021\)](#)). Estos ensayos proporcionan una buena cantidad de datos en profundidad que puede relacionarse con la variación de la resistencia de los suelos. Sin embargo, como se menciona en [Bong and Stuedlein \(2017\)](#), aún existe la necesidad de cuantificar y validar los parámetros de variabilidad en la dirección horizontal, ya que para la generación de los campos, como lo plantean en [Phoon and Kulhawy \(1999\)](#), y se realiza en [Cao et al. \(2018\)](#), es necesario tener un amplio conjunto de datos que permita calibrar la longitud de auto-correlación de las variables ([Baecher, 1999](#)).

Los ensayos de sitio mencionados anteriormente, son utilizados en la ingeniería práctica con gran frecuencia, por lo que cada vez, con mejores aproximaciones, es posible correlacionar las medidas de campo, con algunos parámetros de diseño (e.g. [Mayne \(2006\)](#); [Mayne \(2007\)](#); [Mayne \(2014\)](#)), y hacer estimaciones de fenómenos como la licuación, a partir de la resistencia medida en campo (e.g. [Boulanger and Idriss \(2014\)](#)). Esto sumado a los planteamientos de [Phoon and Kulhawy \(1999\)](#) y [Baecher \(1999\)](#), permite obtener una medida indirecta de la variación de algunos parámetros de resistencia y de comportamiento del material, e incorporarla en diseños geotécnicos.

Particularmente, [Mayne et al. \(2007\)](#), plantea que el CPTu se ha posicionado como un ensayo eficiente y rentable para la caracterización geotécnica, especialmente para proyectos de carreteras. En su estudio [Mayne et al. \(2007\)](#) estimó que el 27 % de los 104 ingenieros geotécnicos de los departamentos de transporte de los Estados Unidos y de 12 provincias canadienses utilizan frecuentemente los resultados de CPTu en sus diseños.

Por otro lado, el uso de CPTu ofrece ventajas sobre otros métodos de campo para estimar la variabilidad del suelo, considerando que las mediciones de CPTu se realizan de forma casi continua en profundidad (lecturas cada 0.02 m o 0.05 m), mientras que otros ensayos como el SPT, proporcionan datos sólo cada 0.45 m. Esto permite que el CPTu identifique como ya se mencionó, los cambios en la resistencia del material y permita la detección de capas delgadas que favorezcan, por ejemplo, la activación del potencial de licuación ([Kavazanjian et al., 2016](#)).

Otra ventaja que ofrece el CPTu con relación a otros ensayos de campo, es que permite la medición de la presión de poros instantánea que se genera durante el ensayo, especialmente en suelos saturados de grano fino ([Mayne et al., 2007](#)). No tener en cuenta esta condición

instantánea de presión de poros, podría contribuir a lecturas erróneas de la resistencia del suelo; sin embargo, con las variables que proporciona el ensayo, estas medidas pueden ser corregidas durante el procesamiento de los datos.

Los resultados del CPTu además, dependen en menor proporción del operador y de la configuración del equipo, si se compara con otras pruebas de campo. El ensayo permite una toma de datos digitalizada, y no requiere el uso de procedimientos manuales como es el caso del SPT (Kavazanjian et al., 2016). Adicionalmente, proporciona datos para la aplicación de metodologías que caracterizan el tipo de comportamiento del suelo, no sólo en función de propiedades físicas, como el tamaño de las partículas, si no que toman en cuenta, por ejemplo, la respuesta del suelo antes de la falla (e.g. Mayne et al. (2007); Robertson (2016)).

A pesar de las ventajas anteriormente mencionadas, el CPTu como herramienta para aproximar la variabilidad del suelo tiene una gran limitación, dado que sólo ofrece datos suficientes para evaluar la variabilidad de las propiedades del suelo con la profundidad. Este ensayo no constituye una herramienta apropiada para estimar la variación espacial en la horizontal, a menos que se cuente con un gran número de sondeos en el sitio. Lo anterior podría incurrir en limitaciones de tiempo y recursos para los proyectos (Zhao et al., 2020). Por esto es necesario implementar de manera complementaria, metodologías para obtener una estimación más robusta de la variabilidad geotécnica en todas las direcciones. Una estrategia es tomar en cuenta los datos específicos del sitio, además de información previa mediante técnicas bayesianas (e.g. Cao and Wang (2013)). También se puede combinar esto con la teoría de campo aleatorio (e.g. Phoon and Kulhawy (1999); Cao et al. (2018)) y utilizar ambos enfoques para incluir, por ejemplo, la variabilidad del CPTu en la generación de simulaciones (e.g. Zhao et al. (2020)).

3.2. De la variabilidad de CPTu a la generación de campos aleatorios

Bong and Stuedlein (2017) cuantificaron y representaron por medio de la teoría de campo aleatorio, la variabilidad en la horizontal y en la vertical, de un depósito en Hollywood, Carolina del Sur. El estudio se realizó con una base de datos amplia, que comprende 25

sondeos entre SPT y CPTu. En este estudio, calcularon la escala de fluctuación vertical y horizontal, el coeficiente de variabilidad inherente del material y las funciones de tendencia para cada medición. Sin embargo, obtuvieron coeficientes de variación muy amplios, lo que es atribuido a incertidumbres estadísticas o errores en el modelo, además de que la variabilidad encontrada para los parámetros en la dirección horizontal podría no ser representativa de toda la variabilidad observada en los sondeos.

Es por esto, que el presente proyecto propone tomar las mediciones de campo del CPTu, que fueron analizadas por [Bong and Stuedlein \(2017\)](#), y caracterizar además de la variabilidad de los parámetros medidos en el ensayo, la variabilidad de algunos parámetros de resistencia y comportamiento, que puedan obtenerse por medio de correlaciones, para luego incorporarlos en cálculos geotécnicos. Para este caso, se propone utilizar la metodología descrita en [Zhao et al. \(2020\)](#) para la generación de las simulaciones de variabilidad del depósito, la cual no requiere como factores iniciales la determinación de los parámetros necesarios en la teoría del campo aleatorio, ni un gran número de sondeos de CPTu en la dirección horizontal.

La metodología de [Zhao et al. \(2020\)](#) propone integrar el concepto de muestreo compresivo (CS) a partir del procesamiento de señales, el marco bayesiano y los métodos de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC). Esto permite generar campos aleatorios en dos dimensiones (2D) de las medidas de CPTu o de los parámetros correlacionados. A partir de estos campos, se realiza la caracterización geotécnica completa que incluye la estratificación, la zonificación del suelo, y la definición de las variaciones espaciales de las propiedades geotécnicas, tomando en cuenta las correlaciones con las medidas de CPTu (ver sección 4.2).

Los conceptos que integra la metodología de [Zhao et al. \(2020\)](#), se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Muestreo compresivo (CS): Los datos provenientes del CPTu pueden ser tratados como señales espacialmente variables, y reconstruirse a partir de datos escasos. Esto se debe a que las señales variables y que se autocorrelacionan son compresibles, y se pueden representar con una suma ponderada de funciones básicas limitadas.
2. Marco bayesiano: En geotecnia es posible utilizar el teorema de bayes para actualizar

los parámetros estadísticos de una propiedad, la cual debe ser tratada como una variable aleatoria. El marco bayesiano permite manejar eficazmente incertidumbres, asociadas a la interpolación de información limitada, y la incertidumbre del modelo. Donde para este caso la información que se requiere actualizar, estará representada por su función de densidad de probabilidad (PDF). Debido a que puede ser complicado de expresar la PDF explícitamente se utiliza el método MCMC.

3. Métodos de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC): Consiste en un encadenamiento de la simulación de Monte Carlo, que se utiliza para representar la PDF de la variable que se quiere simular numéricamente.

3.3. La licuación como fenómeno geotécnico de interés

De acuerdo con [Kavazanjian et al. \(2016\)](#), el fenómeno de licuación, es uno de los problemas más complejos que enfrenta la ingeniería geotécnica en la actualidad, siendo catalogado como una de las principales causas de daños por sismos en todo el mundo. Sismos como los ocurridos en Kocaeli-Turquía en 1999; la secuencia de sismos 2010-2011 en Cantenbury, Nueva Zelanda; y el sismo de Muisne 2016 en Ecuador, demuestran la importancia y la complejidad del fenómeno; sin embargo, aún existen limitaciones para su estudio, ya que aunque hay avances significativos en las metodologías para evaluar el potencial de activación de la licuación, siguen siendo reducidos aquellos métodos para predecir sus consecuencias.

La licuación se produce cuando un suelo no cohesivo saturado, se somete a esfuerzos cortantes cíclicos (normalmente generados por acción sísmica), lo que ocasiona un incremento en la presión de poros y consecuentemente, una disminución en la resistencia del suelo ([Marcuson, 1978](#)).

Para su estudio, existen dos tipos de metodologías ([Kavazanjian et al., 2016](#)). La primera metodología y la más utilizada, se basa en establecer la susceptibilidad a la licuación del suelo por medio de métodos empíricos o semi-empíricos, donde las variables de interés corresponden a los esfuerzos cíclicos inducidos por los sismos, o demanda cíclica del suelo (CSR), y la capacidad del suelo para resistir dicha demanda (CRR) ([Seed and Idriss, 1971, 1982](#)). La segunda, se basa en la aplicación de métodos numéricos para establecer la

generación, distribución y disipación de la presión de poros, que es la variable de mayor interés en el análisis (e.g. [Montoya-Noguera et al. \(2014\)](#)).

Sin embargo, al tratarse de un fenómeno no lineal, y de alta complejidad, no es suficiente con conocer las variables propias para su estudio de manera determinista. Autores como [Fenton and Vanmarcke \(1998\)](#), [Popescu et al. \(1997\)](#) y [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), indican que la predicción de la activación del potencial de licuación, y los daños provocados por el fenómeno, requieren tener un conocimiento geotécnico completo de la zona de interés, y considerar las incertidumbres involucradas en los diseños. En sus estudios, se indica que los diseños relacionados con licuación pueden tener mejores aproximaciones al tener una comprensión de la magnitud de la variabilidad espacial del suelo.

Con relación a lo anterior, [Kavazanjian et al. \(2016\)](#) sugiere utilizar los datos del ensayo de penetración de cono (CPTu) para la estimación de la resistencia a la licuación por medio de ensayos de campo. Esto debido a que el método ofrece ventajas como la detección de capas delgadas que pueden favorecer la ocurrencia del fenómeno, y además, favorece la caracterización completa del sitio dando una medida de la variabilidad del suelo en profundidad (e.g. [Bong and Stuedlein \(2018\)](#)).

3.4. De la caracterización de la variabilidad al análisis de licuación

Luego de calibrar la variabilidad del depósito en [Bong and Stuedlein \(2017\)](#), [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), estimaron el potencial de activación de licuación con el fin de ilustrar el uso y el impacto de los parámetros de campo aleatorio sobre los asentamientos diferenciales inducidos por licuación.

De manera similar, el presente estudio propone tomar en cuenta la calibración de la variabilidad del depósito, realizada con la metodología de [Zhao et al. \(2020\)](#), para conocer el comportamiento del suelo ante cargas sísmicas y tener una medida de comparación frente a los resultados obtenidos por [Bong and Stuedlein \(2018\)](#). En este caso, los análisis también se llevarán a cabo mediante el método simplificado de [Boulanger and Idriss \(2014\)](#), el cuál toma como datos de entrada las variables medidas en el CPTu.

En su estudio [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), hicieron aportes importantes en cuanto al impacto de la corrección de la arena limpia y del esfuerzo de sobrecarga, utilizadas en la metodología de [Boulanger and Idriss \(2014\)](#), para describir la variabilidad espacial de los campos aleatorios, encontrando que la magnitud de la variabilidad inherente se vio considerablemente afectada por la corrección de la arena limpia. En ese sentido menciona que la selección de los parámetros para los análisis de deformación basados en la resistencia de la punta no deben basarse en valores "típicos" no corregidos.

Es importante mencionar, que si bien el análisis de activación de la licuación debe avanzar hacia un enfoque totalmente probabilístico que incluya las incertidumbres relacionadas con la magnitud, duración, amplitud y frecuencia, de la carga sísmica ([Kavazanjian et al., 2016](#)), en este caso únicamente se tomarán en cuenta incertidumbres relacionadas con la variabilidad global del depósito.

Los detalles de los conceptos anteriores y su aplicación directa sobre los datos de entrada para el estudio se muestran en el capítulo 4.

3.5. Observaciones generales

En la figura 3.5.1, se presenta de manera gráfica un resumen de las relaciones entre los diferentes conceptos y metodologías que dan soporte al desarrollo del proyecto. Se especifica la necesidad de desarrollar diseños geotécnicos seguros y económicos como punto de partida, donde para este caso particular, los diseños se enfocan en evaluar y analizar el riesgo sísmico por licuación.

Como se muestra en la figura 3.5.1, la seguridad en los diseños guarda una relación directa con la disminución de la incertidumbre, por lo que es fundamental, tener una caracterización completa del sitio estudiado que además, incluya un conocimiento específico de la variabilidad de las propiedades del suelo. Dicha caracterización puede lograrse, a través de un número considerable de ensayos de campo, laboratorio, o la mezcla de ambos; sin embargo, esta condición convertiría los diseños geotécnicos, en diseños altamente costosos para los proyectos.

Al enlazar los anteriores planteamientos, con la utilización de las medidas del ensayo de penetración con cono (CPTu) para la caracterización geotécnica, se resaltan algunas de

las ventajas del ensayo, ya que permite obtener un número importante de medidas en la dirección vertical, lo que se traduce en una medida indirecta de la variabilidad del suelo, necesaria para aproximar mejores resultados, cuenta con una calibración estandarizada que depende en menor proporción del equipo y el operario, y permite correlacionar parámetros y metodologías de diseño, incluyendo metodologías para estimar el potencial de activación de la licuación. Además de que constituye una prueba de sitio relativamente económica y rápida para los proyectos, cumpliendo con los dos criterios de partida.

Sin embargo, es necesario involucrar metodologías más robustas para caracterizar y conocer la variabilidad completa de los depósitos, sin incurrir en costos adicionales por ensayos de campo o laboratorio, por lo que finalmente, se muestra cómo a través de los ensayos de CPTu y la aplicación combinada de modelos matemáticos, y la teoría de campos aleatorios, es posible extender la variabilidad medida en el sitio a todo el depósito. Esto considerando a demás, que la cuantificación o caracterización de dicha variabilidad se puede obtener a partir de los parámetros de la teoría de campos aleatorios.

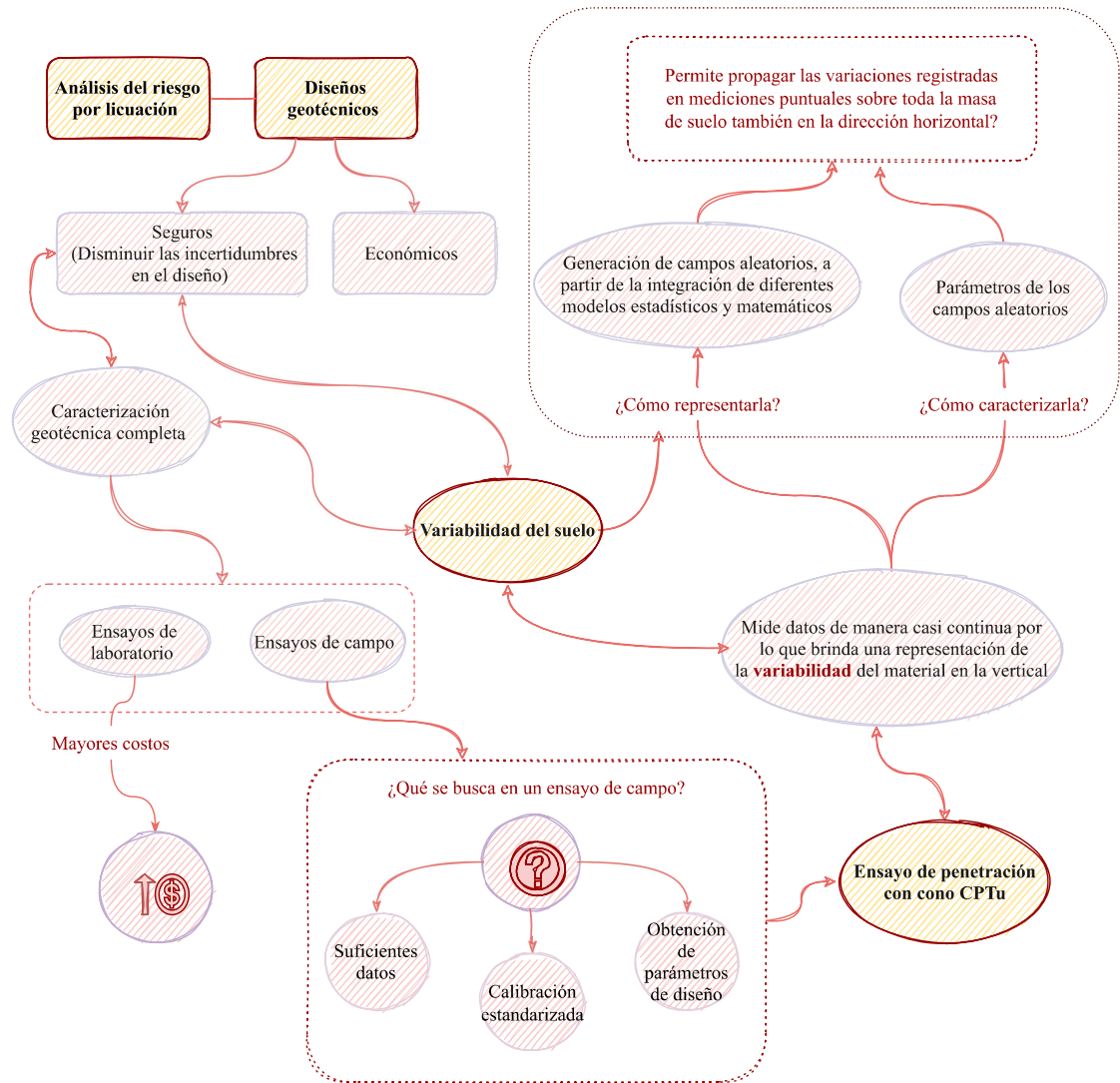


Figura 3.5.1: Contexto general de la investigación

Capítulo 4

Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del presente estudio y los análisis derivados del mismo, se pueden resumir de manera general en los siguientes ítems:

1. Recopilación y análisis de la información proveniente del CPTu
2. Análisis de diferentes correlaciones para la estimación de parámetros de comportamiento y resistencia, a partir de las medidas de campo
3. Estimación y representación de la variabilidad a partir de las medidas de campo y los parámetros obtenidos en el punto anterior.
 - a) Verificación de la metodología definida por [Zhao et al. \(2020\)](#) para la generación de campos aleatorios con resultados de CPTu en Nueva Zelanda
 - b) Generación de campos aleatorios con los datos del presente estudio
 - Para los parámetros directamente medidos en el CPTu
 - Para los parámetros geotécnicos obtenidos por medio de correlaciones
 - c) Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, por medio de la estimación de parámetros estadísticos y de variables de la teoría de campos aleatorios
4. Análisis del riesgo sísmico por licuación tomando en cuenta la variabilidad de las medidas de campo

El detalle de éstos se presenta a continuación.

4.1. Recopilación y análisis de la información proveniente del CPTu

Los datos de entrada para el estudio, fueron obtenidos durante una serie de ensayos de campo realizados en Hollywood, Carolina del Sur. Específicamente se tomarán los resultados de 5 CPTu, los cuales también fueron analizados en [Bong and Stuedlein \(2017\)](#).

La información general de cada uno de los sondeos se registra en el Cuadro 4.1.1, donde la nomenclatura propuesta para su identificación, corresponde a la utilizada por [Bong and Stuedlein \(2017\)](#).

| Sondeos | P1-1 | P2-1 | P3-1 | P4-1 | P5-1 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Profundidad máxima alcanzada [m] | 12.60 | 12.94 | 13.34 | 12.94 | 12.88 |
| Profundidad del nivel freático [m] | 2.44 | 2.59 | 2.59 | 2.74 | 2.44 |

Cuadro 4.1.1: Información general de los CPTu

Con el fin de unificar la profundidad de análisis, se decide tomar los registros de campo sólo hasta la profundidad de 12.0 m. La zona del depósito que se desea estudiar tiene una longitud total de 26.0 m. La separación aproximada entre sondeos que se muestra en [Bong and Stuedlein \(2017\)](#) es de 6.0 m, por lo que se asume está misma longitud de separación para todos los cálculos y análisis. Un esquema simplificado de la localización de los sondeos se muestra en la Figura 4.1.1.

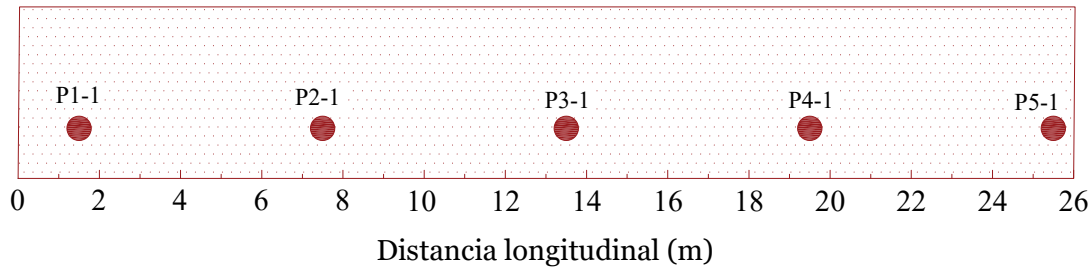


Figura 4.1.1: Esquema simplificado para la localización de los sondeos con respecto a la longitud de la zona de interés

4.1.1. Características geológicas y estratigráficas del sitio explorado

De acuerdo con [Bong and Stuedlein \(2017\)](#), la zona explorada se encuentra ubicada sobre una unidad estratigráfica de llanura costera, y el material corresponde a depósitos estuarinos. En dicho estudio, la estratigrafía general del sitio, pudo ser validada con la información de SPT y clasificación visual.

El perfil de suelo se encuentra conformado por una capa de 2.0 m de espesor de arenas limosas y arcillosas (SM y SC) con una consistencia de suelta a medianamente densa, que cubre una capa de arena fina limpia a limosa (SP y SM). Este último horizonte alcanza profundidades de 8.5 m a 9.0 m, presentando también, una consistencia de suelta a medianamente densa y un diámetro promedio de grano de 0.2 mm. De acuerdo con [Bong and Stuedlein \(2017\)](#) este material constituye una capa de suelo potencialmente licuable.

Debajo del estrato de arenas, se encuentran varios estratos caracterizados por [Bong and Stuedlein \(2017\)](#) como no licuables, los cuales incluyen una capa de arcilla arenosa de rigidez media de aproximadamente 1.0 m de espesor, subyacente a un depósito de arena densa de 1.5 m de espesor. El nivel freático (NF) registrado durante la campaña de exploración, varió con los eventos de precipitación, y estuvo aproximadamente entre los 2.5 m y 2.7 m por debajo de la superficie del suelo.

4.1.2. Variación de parámetros provenientes del ensayo

En la Figura 4.1.2, se presenta la variación en profundidad de los registros de campo, normalizados de q_t y las mediciones para f_s y u_2 .

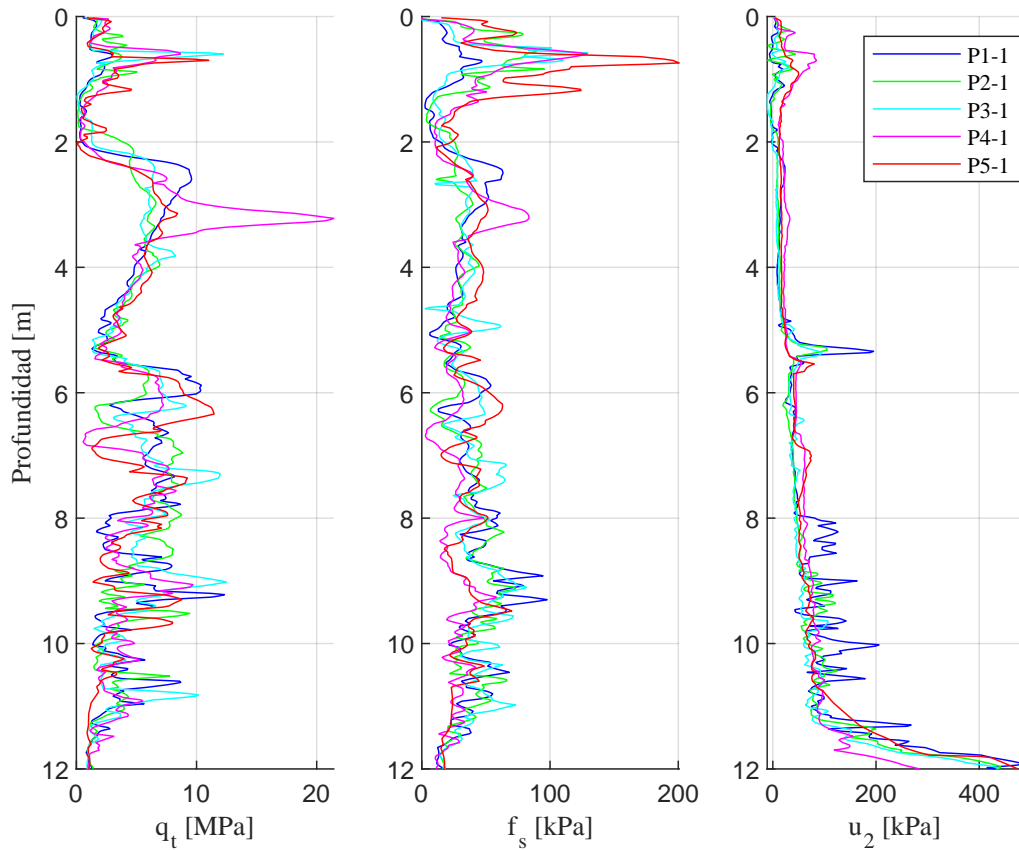


Figura 4.1.2: Variación con la profundidad de las medidas de CPTu

Bong and Stuedlein (2017) identificaron que la capa de material arenoso, y nombrado como potencialmente licuable, es relativamente uniforme en toda la zona explorada, con valores de resistencia normalizados en la punta (q_t) que varían de 0.1 MPa a 10.0 MPa como se ve en la Figura 4.1.2. También se registran valores superiores a ciertas profundidades cercanas a los 0.6 m, 6.0 m, 7.3 m y 9.0 m que no superan los 12.5 MPa. Específicamente, para el sondeo P4-1, a una profundidad de 3.2 m, se registra el mayor valor de q_t igual a 21.4 MPa. Los valores registrados para q_t , se encuentran dentro de los rangos de valores típicos mostrados para arcillas y arenas, los cuales se encuentran entre 0.7 MPa y 26.0 MPa (Ching and Schweckendiek, 2021).

Los rangos de valores registrados para f_s y u_2 varían de 0.49 kPa a 200.7 kPa, y de -6.5 kPa a 400.0 kPa respectivamente. El mayor valor de f_s se midió en la perforación P5-1 y corresponde a 200.7 kPa, a una profundidad de 0.7 m ; sin embargo las mediciones oscilan

predominantemente para este parámetro entre 11.8 kPa y 70.0 kPa.

Por otro lado se aprecia un incremento significativo para las medidas de u_2 después de los 11.0 m de profundidad para todos los sondeos, donde la variación de los mismos había permanecido constante hasta dicha profundidad, entre los 8.0 kPa y los 33.0 kPa aproximadamente. Cerca a una profundidad de 5.5 m, también se evidencia un incremento, pero de menor proporción, de la variable u_2 en los sondeos P1-1, P2-1 y P3-1. En este caso los incrementos coinciden con el cambio de estrato hacia suelos más densos, según la caracterización de [Bong and Stuedlein \(2017\)](#).

En la figura 4.1.3, se presenta de manera combinada una aproximación de la estratigrafía de la zona de interés propuesta por [Bong and Stuedlein \(2017\)](#) y la variación en profundidad de los parámetros medidos en el CPTu.

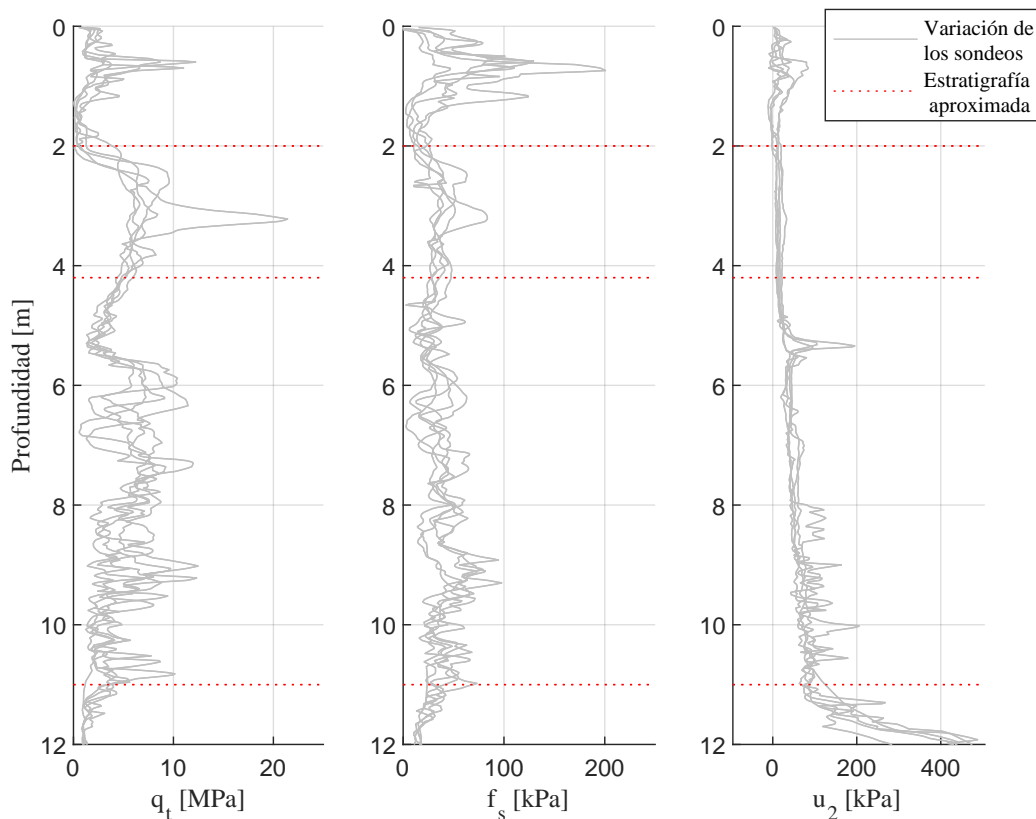


Figura 4.1.3: Variación de las medidas de CPTu y aproximación de la estratigrafía de acuerdo con [Bong and Stuedlein \(2017\)](#)

En general se puede apreciar que las variaciones más significativas de los parámetros provenientes de los diferentes CPTu, están influenciadas con los cambios de horizontes y consecuentemente con los tipos de comportamiento del suelo a lo largo de la dirección horizontal y vertical, constituyendo una medida de las variaciones del suelo.

En la sección 4.2, se presenta de manera detallada una recopilación de la información que se empleará para la caracterización del depósito en función de los parámetros del CPTu.

4.2. Definición de correlaciones para la estimación de parámetros de comportamiento y resistencia, a partir de las medidas de CPTu

Como se mencionó en el capítulo 3, el CPTu es un ensayo confiable para realizar investigaciones de campo, donde las variables medidas pueden utilizarse para la caracterización geotécnica y la estimación de algunos de los parámetros que describen su comportamiento. Esto se logra a través de diferentes metodologías, basadas en análisis estadísticos y correlaciones, e.g. [Mayne et al. \(2007\)](#); [Mayne \(2007, 2014\)](#).

Para el presente proyecto, y a partir de las mediciones de q_t , f_s y u_2 provenientes del ensayo de CPTu, se propone estimar la variación en profundidad y en la horizontal de algunos parámetros de resistencia, incluyendo el tipo de comportamiento del suelo. Los parámetros propuestos corresponden a los analizados por [Mayne \(2014\)](#), en su estudio sobre la interpretación de parámetros geotécnicos a partir de CPTu (“*Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone test*”) y se listan a continuación:

- Peso específico total (γ_t)
- Ángulo de fricción efectivo (ϕ')
- Velocidad de propagación de onda de corte (V_s)
- Tipo de comportamiento de material, estimado de manera complementaria con [Robertson \(2016\)](#)

Para este proyecto se tomaron en cuenta las correlaciones que se proponen y analizan en

Mayne (2006), Mayne (2007), Mayne (2014), y la metodología modificada por Robertson (2016) para la caracterización del tipo de comportamiento del suelo. Además de las variables obtenidas en el CPTu (i.e. q_t , f_s y u_2), es necesario estimar los esfuerzos verticales efectivos (σ'). Por último, es necesario definir las siguientes constantes para los valores de la presión atmosférica (p_{atm}) y del peso específico del agua (γ_w), los cuales se toman en todos los casos como 0.10 MPa y 9.81 kN/m³ respectivamente.

En la Figura 4.2.1 se muestra el procedimiento propuesto para la estimación de las variables, considerando las relaciones y dependencias que existen entre ellas. A manera de simplificación, todos los cálculos se realizan tomando en cuenta una profundidad constante del nivel freático (NF) igual a 2.40 m.

Además de considerar la metodología mostrada en la Figura 4.2.1, algunos de los parámetros fueron estimados empleando más de una correlación. Esto se realiza con el fin de hacer una primera validación de las variaciones que se pueden presentar en los parámetros a partir de los rangos de valores obtenidos.

Antes de implementar las correlaciones para la definición de los parámetros de resistencia y comportamiento, es necesario hacer la corrección de la resistencia de la punta (q_c), para obtener el valor de la resistencia total corregida de la punta (q_t). Dicha corrección permite considerar los excesos de resistencia debidos a las presiones de poros instantáneas, que actúan sobre áreas desiguales de la punta del cono, algo que cobra importancia en arcillas y limos inalterados (Mayne et al., 2007).

A continuación, se presentan de manera detallada las ecuaciones empleadas para los diferentes análisis.

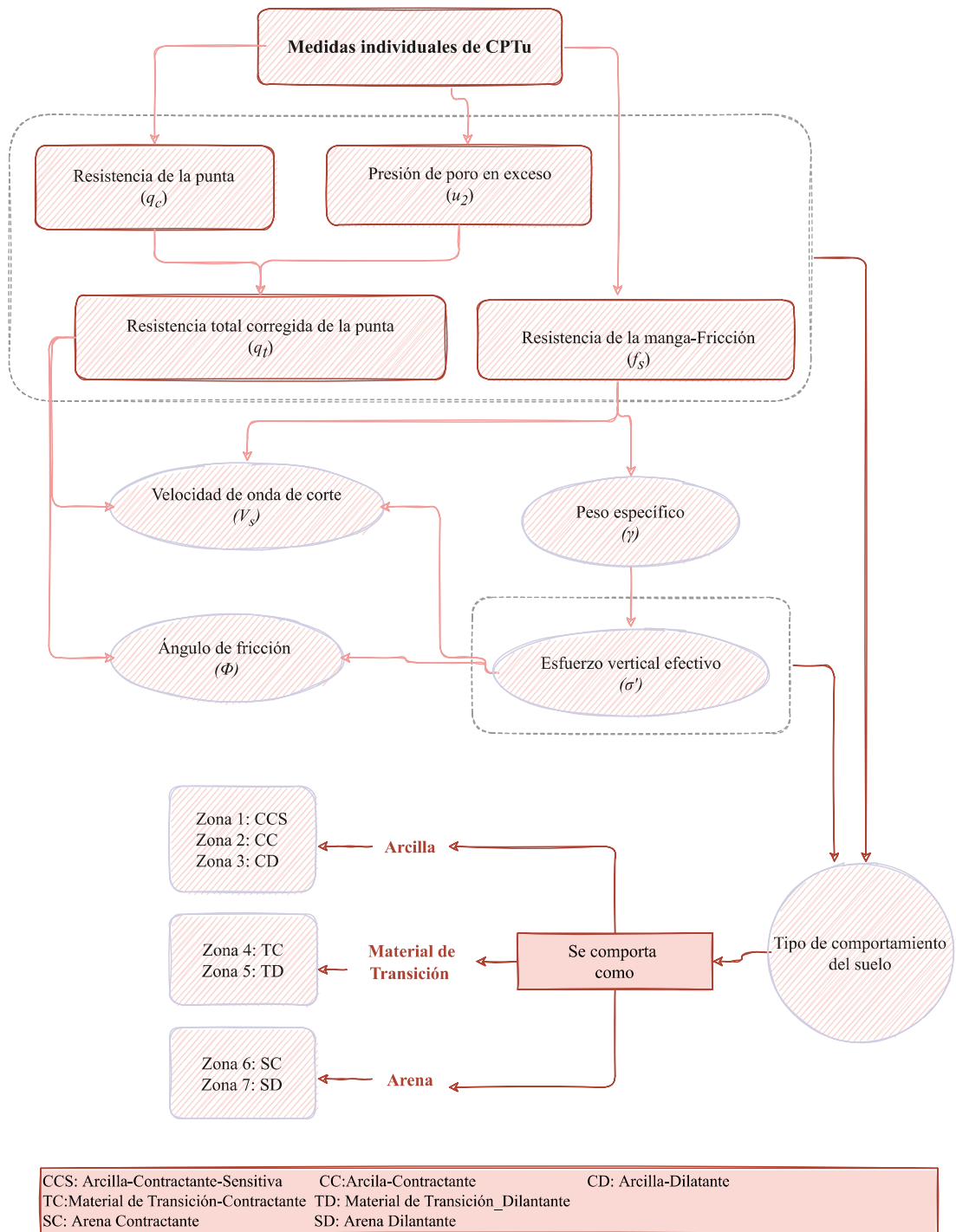


Figura 4.2.1: Procedimiento general para la definición de los parámetros de resistencia y comportamiento a partir de los datos de CPTu

4.2.1. Correlaciones empleadas para la estimación de parámetros de resistencia

Como primer paso se procede a determinar los valores del peso específico total (γ_t). Estos valores permiten de manera directa estimar la variación de los esfuerzos verticales totales y efectivos (σ y σ' , respectivamente) en profundidad.

Las siguientes dos correlaciones se utilizan para calcular los valores de (γ_t) en todo tipo de materiales. A ambas se les asocia una desviación estándar de 1.5 y un valor del coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.62.

$$\gamma_t = 26 - \frac{14}{1 + [0.5 \cdot \log(f_s + 1)]^2} \quad (4.2.1)$$

(Mayne, 2014)

$$\gamma_t = 12 + 1.5 \cdot \ln(f_s + 1) \quad (4.2.2)$$

(Mayne and Peuchen, 2012)

Posteriormente y luego de realizar el cálculo de σ y σ' , es posible obtener los valores de V_s . Las correlaciones utilizadas para esta variable son las siguientes:

$$V_s = 277(q_t)^{0.13}(\sigma')^{0.27} \quad (4.2.3)$$

(Baldi et al., 1990)

$$V_s = 118.8 \cdot \log(f_s) + 18.5 \quad (4.2.4)$$

(Mayne, 2006)

$$V_s = [10.1 \cdot \log(q_t) - 11.4]^{1.67} [f_s/q_t \cdot 100]^{0.3} \quad (4.2.5)$$

(Hegazy and Mayne, 1995)

La Ecuación 4.2.3, es una correlación derivada principalmente para suelos arenosos; predominantes en este proyecto de acuerdo con el perfil estratigráfico definido por Bong

and Stuedlein (2017), esta ecuación tiene una desviación estándar de 0.997. Por otro lado las ecuaciones 4.2.4 y 4.2.5, fueron aproximadas a partir de bases de datos que incluían arenas, limos, arcillas, así como tipos de suelos mixtos, por lo que no tienen una relación directa que dependa del tipo de suelo.

Particularmente, Hegazy and Mayne (1995), analizaron 323 datos para correlacionar las variables del ensayo CPTu con los valores de V_s , por medio de la ecuación 4.2.5, la cual corresponde a una regresión lineal con un valor de R^2 de 0.70, sin embargo en su estudio no se reporta el valor de la desviación estándar.

Finalmente, en cuanto a parámetros de resistencia, se procede a estimar los valores del ángulo de fricción efectivo (ϕ'). Este parámetro es muy importante dada su relación con el criterio de falla.

A diferencia de los demás parámetros estimados, para este caso sólo se emplea la ecuación 4.2.6 para el cálculo de ϕ' , la cuál depende únicamente de la variación de los esfuerzos efectivos verticales y la resistencia de la punta. Para la relación se asocia una desviación estándar de 1.27

$$\phi' = 17.6^\circ + 11^\circ \cdot \log(q_{t1}) \quad (4.2.6)$$

donde,

$$q_{t1} = \frac{q_t/p_{atm}}{(\sigma'/p_{atm})^{0.5}} \quad (4.2.7)$$

(Kulhawy and Mayne, 1990)

Mayne (2006) presenta correlaciones adicionales para el cálculo de ϕ' , las cuales sugieren una normalización de q_t en términos de los esfuerzos efectivos horizontales (σ'_h), sin embargo, se decidió no tomarlas en cuenta para el análisis, debido a que sería necesario calcular σ'_h , como una función de k_0 , el cual a su vez depende de ϕ' .

Una vez definidas las correlaciones para la estimación de los parámetros de resistencia, se procede a definir el tipo de comportamiento del suelo. El detalle de la metodología empleada se describe en la sección 4.2.2.

4.2.2. Correlaciones empleadas para la definición del tipo de comportamiento del suelo

Mayne et al. (2007) y Robertson (2016) indican dos conjuntos de correlaciones diferentes para definir el tipo de comportamiento del suelo (SBT), ambos basados en la metodología original propuesta por Robertson (1990), a partir de los datos obtenidos en el CPTu. A continuación se presenta el detalle de los dos conjuntos de correlaciones con el fin de presentar el contexto global del método utilizado.

La metodología del SBT, se basa en el cálculo del índice de comportamiento del material (I_c), en función de los parámetros normalizados Q , F y B_q , de las medidas de campo q_t , f_s y u_2 respectivamente. Los valores obtenidos de I_c permiten definir el tipo de comportamiento del suelo a partir de unos rangos preestablecidos. En este sentido, el tipo de comportamiento del suelo difiere para arcillas, arenas o materiales mixtos.

Las ecuaciones 4.2.8, 4.2.9, 4.2.10 y 4.2.11, son las que se utilizan para la aplicación de la metodología en Mayne et al. (2007).

$$I_c = \sqrt{3 - \log[Q \times (1 - B_q)]^2 + [1.5 + 1.3 \times (\log F)]^2} \quad (4.2.8)$$

donde,

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma'} \quad (4.2.9)$$

$$Q = \frac{q_t - \sigma}{\sigma'} \quad (4.2.10)$$

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma} \quad (4.2.11)$$

Sin embargo, de acuerdo con lo que plantea Robertson (2016), el comportamiento de las principales zonas que se definen a partir de las anteriores relaciones, puede estar representado en función de propiedades físicas, como por ejemplo, el tamaño de grano de la partícula, asociando únicamente a esta característica, factores importantes como la alta o baja resistencia del suelo. En la metodología, no se toman en cuenta factores

adicionales que pueden tener incluso mayor influencia en el comportamiento de los suelos, los cuales están relacionados con el historial de esfuerzos, la edad de los depósitos, procesos físicos y químicos, procesos geológicos, entre otros, haciendo que su aplicación tenga mejores aproximaciones para depósitos jóvenes, no consolidados y con un historial de carga limitado.

Por lo anterior, Robertson (2016) propone una actualización del procedimiento, que entre otras características, toma en cuenta el comportamiento de los suelos antes de la falla, lo que permite dividir los suelos en dos grupos, los que se dilatan y los que se contraen bajo deformaciones de corte, siendo este aspecto muy relevante para la evaluación de problemas geotécnicos complejos como la licuación. A continuación, se listan las características más importantes que se consideran en la actualización:

- El suelo puede cambiar de volumen debido a la reordenación de las partículas y a los cambios en la relación de vacíos.
- El suelo es esencialmente friccionante, y su resistencia y rigidez incrementan con los esfuerzos normales y la profundidad.
- El suelo es inelástico y su respuesta es no lineal luego de un umbral de deformación muy pequeño.

Ahora, teniendo en cuenta que el I_c puede representar las zonas SBT por medio del radio de los círculos concéntricos que definen los límites del tipo de suelo (Been and Jefferies, 1985), la primera modificación que se hace a la metodología, es cambiar la ecuación 4.2.8 a la ecuación 4.2.12.

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log(Q))^2 + (1.22 + \log(F))^2} \quad (4.2.12)$$

(Robertson, 1990)

En esta nueva ecuación, el cálculo del I_c deja de depender del parámetro B_q definido en la ecuación 4.2.9.

Además propone la actualización del valor de Q por el valor de Q_n , que incluye un exponente de esfuerzo variable n de la siguiente forma:

$$Q_n = \left(\frac{q_t - \sigma'}{p_{atm}} \right) \left(\frac{p_{atm}}{\sigma'} \right)^n \quad (4.2.13)$$

donde el valor de n se define como:

$$n = 0.38(I_c) + 0.05\left(\frac{\sigma'}{p_{atm}}\right) - 0.15 \quad (4.2.14)$$

Así que el I_c empleado para el cálculo de n , es el propuesto por [Robertson \(1990\)](#) y mostrado en la ecuación 4.2.12, por lo que se requiere de un proceso iterativo.

Finalmente, se calculan mediante las ecuaciones 4.2.16 y 4.2.15 los parámetros modificados del índice de tipo de comportamiento de suelo I_B y el parámetro CD , el cual permite delimitar los comportamientos contractante y dilatante.

$$I_B = 100 \left(\frac{Q_n + 10}{70 + Q_n F} \right) \quad (4.2.15)$$

$$CD = (Q_n - 11)(1 + 0.06F)^{17} \quad (4.2.16)$$

Las zonas que propone la metodología actualizada de [Robertson \(2016\)](#) para la definición del tipo de comportamiento, y que son tenidas en cuenta para el presente proyecto se muestran en el cuadro 4.2.1

| Zona | SBT Abreviatura | SBT Descripción |
|--------|--------------------|----------------------------------|
| Zona 1 | CCS | Arcilla-Contractante-Sensitiva |
| Zona 2 | CC | Arcilla-Contractante |
| Zona 3 | CD | Arcilla-Dilatante |
| Zona 4 | TC | Suelo de transición-Contractante |
| Zona 5 | TD | Suelo de transición-Dilatante |
| Zona 6 | SC | Arena-Contractante |
| Zona 7 | SD | Arena-Dilatante |

Cuadro 4.2.1: Zonas y tipos de comportamiento de suelo según [Robertson \(2016\)](#)

En la figura 4.2.2 se presenta de manera complementaria una comparación en el plano Q - F de las dos metodologías mencionadas, donde las líneas punteadas representan las zonas de

material que toma en cuenta la clasificación presentada en [Mayne et al. \(2007\)](#).

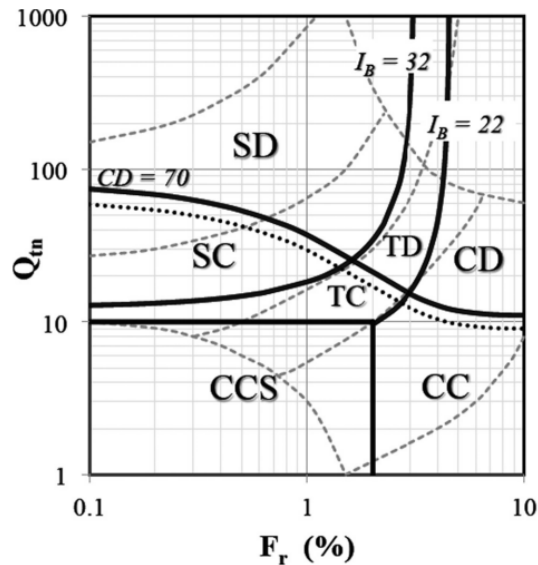


Figura 4.2.2: Comparación en el plano Q - F de las zonas SBT (Tomado de [Robertson \(2016\)](#))

Las correlaciones, procedimientos y metodologías mencionados a lo largo de la sección 4.2, corresponden a la información utilizada para la caracterización del suelo en cuanto al tipo de comportamiento y algunos parámetros de diseño a partir de datos puntuales de CPTu. Sin embargo, la propuesta de la investigación incluye tomar en cuenta las variaciones en profundidad evidenciadas directamente en las medidas de campo, para obtener variaciones también en la horizontal, por medio de simulaciones 2D. El detalle de los procedimientos y de la metodología utilizada para la generación de los campos aleatorios se muestra en la sección 4.3.

4.3. Representación y caracterización de la variabilidad del suelo

Como se mencionó en el capítulo 3, el procedimiento utilizado para la generación de campos aleatorios integra el concepto de muestreo compresivo (CS), el enfoque bayesiano y los métodos en cadena de Markov Monte Carlo (MCMC). Primero, se utiliza el muestreo

compresivo bayesiano considerando incertidumbres hiperparamétricas, y posteriormente se desarrolla las simulaciones con el MCMC utilizando la técnica de actualización secuencial.

En este caso se partirá del planteamiento del CS en un conjunto de datos en 2D, para dar un contexto general de las variables y parámetros requeridos para su aplicación.

Sea P , la representación de un conjunto de datos que varían espacialmente y son correlacionables con una dimensión $N_1 \times N_2$, como se indica en la ecuación 4.3.1 .

$$P = \sum_{t=1}^N B_t^{2D} \omega_t^{2D} \quad (4.3.1)$$

donde,

$N = N_1 \times N_2$ es la dimensión del conjunto de datos

B_t^{2D} representa un conjunto de funciones básicas con igual dimensión que P y

ω_t^{2D} es un factor de peso o ponderación para B_t^{2D} también con dimensión $N_1 \times N_2$, y corresponde a la variable de mayor relevancia para la construcción de la matriz P .

Considerando que para este caso, P puede ser la representación en dos dimensiones de las medidas de CPTu. La metodología propone que debe existir una relación matemática entre los datos específicos de sitio, y la matriz P .

Dicha relación viene dada por la ecuación 4.3.2, donde Y es una sub-matriz de P conformada por los datos específicos de sitio, con una dimensión de $N_2 \times n_b$.

$$Y = P\Psi^T \quad (4.3.2)$$

En este caso, n_b representa el número de sondeos de CPTu en la horizontal, y Ψ^T corresponde a una matriz transpuesta que contiene la posición de los sondeos, en esta misma dirección. Lo que indica que tanto P como Y serán funciones de ω_t^{2D} .

Ahora, al considerar la ecuación 4.3.2 y de manera adicional, considerar una descomposición de la matriz ω_t^{2D} en dos dimensiones, donde la descomposición quedará representada por matrices unidimensionales ortonormales, se logra el cálculo de ω_t^{2D} .

Para este caso, y como se indicó en el capítulo 3, el marco bayesiano para el cálculo de ω_t^{2D} permite manejar incertidumbres asociadas a la interpolación de información limitada, y la incertidumbre del modelo. Además, de que se enfoca en la actualización de la variable ω_t^{2D} , a través de su función de densidad de probabilidad (PDF), la cual es estimada a partir de la MCMC, utilizando la técnica de actualización secuencial con los valores del coeficiente de variación (COV) y la media (μ) de los datos.

Un resumen del procedimiento utilizado de manera computacional se muestra a continuación:

1. Obtener los datos de entrada para la formación de la matriz Y
2. Indicar la localización de los sondeos en la horizontal, por medio de la matriz Ψ^T
3. Indicar las longitudes totales exploradas en la vertical y la horizontal N_1 y N_2 , respectivamente, tomando en cuenta las resoluciones horizontal y vertical de los datos (n_{x2} y n_{x1}). Esto representa el numero de datos en ambas direcciones de las simulaciones.
4. Descomponer ω_t^{2D} , en dos sub-matrices unidimensionales
5. Definir el numero de funciones básicas a emplear para la definición de B_t^{2D}
6. Definir el número máximo de muestras MCMC y el número iteraciones
7. Generar los campos aleatorios de dimensiones N_1 y N_2 de las variables deseadas.

Los detalles matemáticos del procedimiento se presentan en el estudio desarrollado por [Zhao et al. \(2020\)](#).

4.3.1. Validación de la metodología para la generación de simulaciones en 2D, como una representación visual y numérica de la variabilidad del suelo

Inicialmente y como una medida de verificación del modelo empleado para la generación de los campos aleatorios, y descrito de manera resumida en la introducción de la presente sección, se decidió validar los resultados obtenidos por [Zhao et al. \(2020\)](#) en su estudio.

La validación se realiza para una zona muestreada con CPTu en Nueva Zelanda, donde los datos de los sondeos fueron tomados de la base de datos "New Zealand Geotechnical Database", a partir de la codificación mostrada en Zhao et al. (2020). Específicamente se quiere conocer el error medio relativo (MRE), de los datos simulados en una posición específica, con respecto a uno de los sondeos, el cuál no se incluye como dato de entrada para la generación del campo aleatorio. El sondeo de referencia fue el CPT44421.

Para las simulaciones se utilizaron exactamente los mismos datos que menciona Zhao et al. (2020) en su estudio, los cuales incluyen localización de los sondeos, resoluciones vertical y horizontal, número de funciones básicas, número máximo de muestras y número de iteraciones. En la figura 4.3.1, se muestra una comparación de las visualizaciones obtenidas durante la validación de los resultados y el estudio de Zhao et al. (2020).

Las simulaciones muestran una alta proximidad. Sin embargo, para algunas profundidades y longitudes, no es posible obtener el detalle que se muestra en la visualización de Zhao et al. (2020), lo que se debe al carácter aleatorio del campo.

Por otra parte, el valor de MRE registrado por Zhao et al. (2020) para el análisis, fue de 18.85 %, mientras que el valor encontrado durante la validación de la metodología fue de 15.94 % luego de 100 simulaciones, con respecto a los datos en la localización del sondeo CPT44421, lo que también se considera una buena aproximación.

Los resultados anteriores, permitieron validar que los procedimientos y la metodología aplicada para este estudio, es consistente con la de Zhao et al. (2020), y puede emplearse para representar la variabilidad del depósito de interés en la presente investigación.

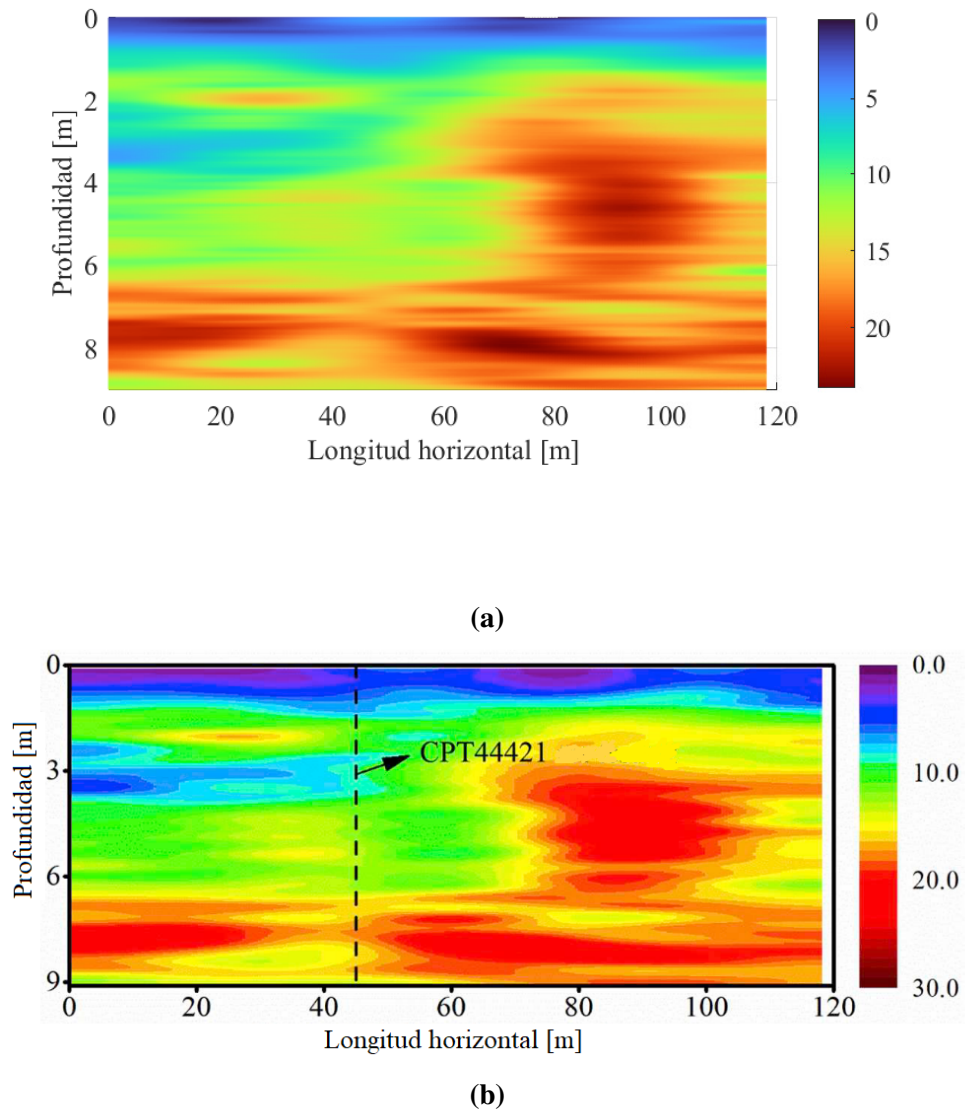


Figura 4.3.1: Comparación de visualizaciones para zona muestreada con CPTu en Nueva Zelanda: (a) Simulación obtenida (b) Simulación original (Zhao et al. (2020))

4.3.2. Generación de campos aleatorios con los datos del presente estudio

Tomando en cuenta el planteamiento y la verificación realizada en las secciones anteriores, para la metodología de generación de los campos aleatorios, se procede a generar las simulaciones para los registros de q_t , f_s y u_2 , del presente proyecto.

Los datos y variables que requiere el método se definen como sigue:

1. Definición de la matriz Y : Como se indicó en la sección 4.1, se tienen 5 sondeos de CPTu, con medidas que alcanzan una profundidad de 12.0 m, y registros en la vertical cada 0.02 m. En este caso las dimensiones de la matriz Y , son iguales a $N_2 \times n_b$, es decir a 600×5 .
2. Definición de la localización de los sondeos en la horizontal, por medio de la matriz Ψ^T : Tomando en cuenta lo propuesto en la sección 4.1, específicamente en la figura 4.1.1, se definió de manera aproximada la localización de los sondeos. Esto se muestra con mayor detalle en el cuadro 4.3.1, el cual se consideró que la longitud del depósito es de 26.0 m.

| Sondeo | P1-1 | P2-1 | P3-1 | P4-1 | P5-1 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|
| Localización en la horizontal [m] | 1.5 | 7.5 | 13.5 | 19.5 | 25.5 |

Cuadro 4.3.1: Localización horizontal de los sondeos CPTu, con respecto a la longitud total del depósito

3. Determinación de las dimensiones N_1 y N_2 : Tomando en cuenta los registros de campo y la localización de los sondeos, se propone que las resoluciones estén dadas por $n_{x1} = 0.02\text{m}$ y $n_{x2} = 0.5\text{m}$. Lo que indica que la dimensión final de la matriz F será de 600×53 .
4. Definición del número de funciones básicas en la horizontal para la construcción de B_t^{2D} : Se definieron para todos los casos en un factor de $1.4n_b$.
5. Definición del número máximo de muestras de MCMC y el número final de campos a obtener: Para este caso se definen 2100 muestras y 100 como el número final

de campos. Lo anterior se hace con el fin de asegurar que las muestras sean estadísticamente independientes y tengan una correlación estadística débil. En total se simulan 2100 muestras, se descartan las primeras 100 y luego se toma una muestra cada 20 simulaciones. Lo que da un número final de $N_{mcmc} = 100$, independientes entre sí.

6. Generación de los 100 campos aleatorios de dimensiones 600×53 para las 3 variables.

4.3.3. Generación de campos obtenidos por medio de correlaciones

Una vez se tienen los campos para las mediciones directas de CPTu (i.e q_t, f_s y u_2) en una estructura de tres dimensiones de $600 \times 53 \times 100$, se utiliza el procedimiento para la obtención de parámetros mostrado en la sección 4.2, específicamente en la Figura 4.2.1.

La aplicación del procedimiento, se realiza con los datos de CPTu simulados para cada variable, relacionándolos respecto a su posición dentro de la malla $2D$, y por supuesto considerando su ubicación dentro de las 100 simulaciones. Es decir, considerando su localización, dentro de la estructura de tres dimensiones obtenida directamente al aplicar la metodología propuesta por [Zhao et al. \(2020\)](#).

Finalmente, se obtiene para cada parámetro de diseño (γ_t, ϕ' y V_s) y para la definición del SBT, una representación de la variabilidad de cada uno en un espacio tridimensional de $600 \times 53 \times 100$.

El procedimiento anterior, permite entonces relacionar las correlaciones para la estimación de los parámetros de diseño y comportamiento, con la variabilidad de las mediciones del CPTu, representada a través de la simulación de campos aleatorios.

4.3.4. Parámetros relacionados con la caracterización de la variabilidad del material de acuerdo con la teoría de campos aleatorios

En las secciones anteriores se han definido los parámetros y el procedimiento para generar campos aleatorios que incluyan la variabilidad medida directamente en el depósito estudiado en el presente proyecto. Para comparar los resultados, en esta sección se definen los

parámetros estadísticos que permite cuantificar y caracterizar las variaciones tanto en la vertical como en la horizontal.

Los parámetros que se emplearán para el estudio, se proponen en Jones et al. (2003), y se puede evidenciar en los estudios de Cao and Wang (2013); Bong and Stuedlein (2017) y Zhao et al. (2020) constituyen las variables de mayor interés.

Antes de plantear las variables y procedimientos que se emplean para la cuantificación y caracterización de la variabilidad del material, se expone el detalle del planteamiento inicial de Phoon and Kulhawy (1999), con relación a la variabilidad del suelo.

El planteamiento se encuentra ligado a la teoría de campos aleatorios y propone que la variación de las propiedades del suelo puede separarse en una función de tendencia determinista $t(z)$ y un componente de fluctuación de dicha tendencia $w(z)$, representando así la variabilidad total del suelo.

$$\xi(z) = t(z) + w(z) + e(z) \quad (4.3.3)$$

donde $\xi(z)$ es una propiedad del suelo en el sitio y $e(z)$ es el error asociado a dicha fluctuación. En este caso y como ya se ha mencionado el error puede estar influenciado también por errores provenientes de los ensayos de campo o laboratorio, o por incertidumbres en la transformación de las propiedades del suelo (Popescu, 2008).

En la figura 4.3.2, se muestra un esquema generalizado del planteamiento que se propone en Phoon and Kulhawy (1999). Donde se puede ver además, una variable nombrada como escala de fluctuación δ_v , la cual será tomada en cuenta con detalle más adelante.

Con relación a lo anterior Jones et al. (2003), indica que las propiedades del suelo están correlacionadas espacialmente. Por lo que la caracterización de la distribución espacial de las propiedades del suelo requiere el uso de variables que tienen una estructura conformada por una variable aleatoria y otra determinista.

Esto significa que las propiedades de una variable pueden ser descritas por X y $X + \Delta h$, donde Δh es una distancia de separación, que constituye una correlación de la variable consigo misma, y denominada como auto-correlación.

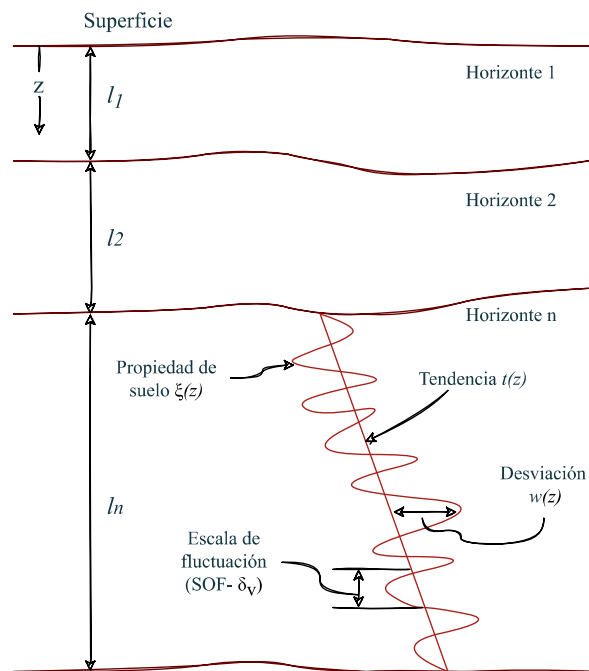


Figura 4.3.2: Representación de la variabilidad del suelo (Tomado de Phoon and Kulhawy (1999))

La auto-correlación depende de las posiciones relativas de X y $X + \Delta h$, tanto en distancia como en dirección, y de la propiedad particular que se esté considerando. Así, el concepto se puede ligar directamente y con el concepto de escala de fluctuación (SOF), uno de los principales factores que se deben determinar para caracterizar la variabilidad del material (Jones et al., 2003).

Además de la distancia de auto-correlación, la variabilidad de los parámetros del suelo se caracteriza también a partir de variables estadísticas como la media (μ) y el coeficiente de variación COV (Vanmarcke, 1977, 2010).

Particularmente, el COV da una medida de la dispersión de los datos, y como ya se mencionó, ha sido ampliamente utilizado para estimar la variación de las propiedades del suelo. Este parámetro toma en cuenta la media y la desviación estándar del conjunto de datos.

A continuación, se muestra el detalle del procedimiento utilizado para el cálculo de la escala de fluctuación o longitud de auto-correlación de los datos del proyecto.

4.3.4.1. Escala de fluctuación (*SOF*)

De acuerdo con Jones et al. (2003), la escala de fluctuación proporciona una medida de la distancia estimada en la que una propiedad del suelo muestra una fuerte correlación. Esto se puede lograr utilizando el comportamiento del coeficiente de variación normalizado bajo promedios locales sucesivos.

Un alto valor de *SOF*, indica baja variación de la propiedad sobre la tendencia (baja variabilidad espacial) o visto de otra manera un parámetro con una longitud de auto-correlación corta, cambia rápido con la posición, mientras que uno con una longitud de auto-correlación grande, sólo cambia a grandes distancias.

El procedimiento para el cálculo de dicha variable se muestra a continuación, el cuál fue tomado y adaptado de Jones et al. (2003).

1. Calcular la varianza para la serie de datos, ésta es la varianza de referencia, σ_r .
2. Suavizar la serie de datos aplicando una ventana media móvil de longitud w y sustituir el valor original de los datos con el nuevo valor suavizado.
3. Calcular la varianza para los datos suavizados σ_w , la cual debe ser inferior a σ_r debido a la cancelación de las fluctuaciones debidas al promedio espacial.
4. Normalizar la varianza de los datos normalizados, con la varianza de referencia y multiplicarla por la longitud de la ventana para obtener la escala de fluctuación ($SOF = (\sigma_w/\sigma_r) * w$)
5. Repetir los pasos 2 a 4 incrementando la longitud de la ventana hasta que el suavizado sea mayor que aproximadamente la mitad de la longitud de la serie de datos.

4.4. Evaluación de la susceptibilidad a la licuación considerando la variabilidad de campo

El enfoque simplificado basado en esfuerzos para evaluar el potencial de activación de la licuación (Seed and Idriss, 1971), compara los coeficiente de esfuerzo cíclico (*CSR*) inducidos por el sismo, con los coeficientes de resistencia cíclica (*CRR*) del suelo.

Específicamente, el CRR suele estar correlacionado directamente con parámetros de sitio, como por ejemplo, la resistencia medida en el CPTu, mientras que la CSR depende en mayor proporción de las condiciones del sismo. Sin embargo, este último coeficiente, también depende de los esfuerzos efectivos verticales, por lo que para este caso y considerando el procedimiento mostrado en la figura 4.2.1, también dependerá directamente de las variables provenientes de los sondeos de CPTu. Para los análisis se utilizarán los campos simulados de cada una de las variables del ensayo, con el fin de obtener una respuesta completa del depósito, utilizando la metodología propuesta por [Boulanger and Idriss \(2014\)](#), y utilizada por [Bong and Stuedlein \(2018\)](#).

A continuación, se presentan algunas generalidades del método. El detalle del mismo como ya se mencionó, se muestra en el reporte presentando por [Boulanger and Idriss \(2014\)](#).

De acuerdo con la metodología, las variables de mayor interés son el CRR y el CSR . El valor de CRR del suelo depende de la duración del sismo, expresándose mediante un factor de escala de la magnitud del sismo, conocido como MSF y del esfuerzo efectivo de la sobre carga expresado mediante un factor K , como se muestra en la ecuación 4.4.1. Para este caso la relación ajusta los valores de CSR , a partir de los datos de un caso histórico de referencia, el cual toma una magnitud del sismo (M) igual a 7.5 y un valor de referencia para el esfuerzo efectivo vertical (σ') igual a una atmósfera.

$$CRR = CRR_{M=7.5, \sigma'=1} MSF * K_{\sigma} \quad (4.4.1)$$

Por otro lado, el CSR , se expresa generalmente como un valor representativo igual al 65 % de la relación de esfuerzo cortante cíclico máximo, como se muestra en la ecuación 4.4.2

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma}{\sigma'} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (4.4.2)$$

Donde, la elección del nivel de referencia igual a 0.65, se ha implementado desde el planteamiento original de la metodología, σ/σ' es una relación entre el esfuerzo vertical total y efectivo en la profundidad z , a_{max}/g es la aceleración horizontal máxima (como fracción de gravedad) en la superficie del suelo, y r_d es el factor de reducción del esfuerzo cortante que tiene en cuenta la respuesta dinámica del perfil del suelo.

Es importante mencionar, que de acuerdo con [Boulanger and Idriss \(2014\)](#), la selección de un nivel de esfuerzo de referencia diferente alteraría los valores de ciertos parámetros y relaciones, pero no tendría un efecto neto significativo en el resultado final del procedimiento para la evaluación de la licuación, y que dentro de la metodología, el CRR se correlaciona con la resistencia medida en el CPTu, tras la aplicación de correcciones de procedimiento y correcciones de el esfuerzo de sobrecarga. Algo para tener en cuenta dentro de los análisis de licuación dada la corrección de la resistencia de punta (q_c) por efectos de área desigual.

En el método simplificado, finalmente es importante conocer el factor de seguridad (FS) definido por la ecuación 4.4.3, el cuál permite definir si el suelo es potencialmente licuable o no.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (4.4.3)$$

Para este caso, como valores de entrada se toman los valores de referencia propuestos por [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), donde la magnitud del sismo (M) es igual a 7.5 y se realizan análisis para una aceleración máxima de 0.12 g, y 0.30 g. Adicionalmente, se estiman los asentamientos diferenciales como respuesta del material frente a la activación de la licuación.

Capítulo 5

Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados y análisis obtenidos al estudiar, y caracterizar la variabilidad de un depósito de suelo, a partir de las medidas obtenidas de ensayos de penetración con cono (CPTu), y posteriormente al incorporar dicha variabilidad para estudiar el fenómeno de licuación.

5.1. Representación y cuantificación de la variabilidad en función de los parámetros medidos directamente en el ensayo de penetración con cono

El análisis de la información proveniente directamente de los sondeos CPTu, se muestra con detalle en la sección 4.1. A continuación se presentan los aspectos más relevantes.

- Las medidas de q_t varían predominantemente entre 1 MPa y 10 MPa, sin embargo, se presentan valores inferiores para la resistencia de la punta de hasta 48 kPa. Sólo para en el sondeo de P4-1, se registra un valor superior a los 12.5 MPa.
- Los rangos de valores registrados para f_s oscilan predominantemente entre 11.8 kPa y 75.0 kPa. Sin embargo, en la perforación P5-1 a una profundidad de 0.70 m, se registra un pico que alcanza un valor de casi 200.0 kPa. También se presentan, de manera aislada valores a lo largo de toda la profundidad que indican una resistencia

de fricción de hasta 0.49 kPa.

- Los valores para u_2 varían en general de -6.5 kPa a 33.0 kPa, hasta una profundidad cercana a los 11.0 m, presentando incrementos localizados en los sondeos P1-1, P2-1 y P3-1 cerca de los 5.5 m. Después de los 11.0 m, los valores registrados para u_2 se incrementan considerablemente alcanzando valores de hasta 400.0 kPa.

Tomando en cuenta lo anterior, y con el fin de tener una primera aproximación de la variabilidad del depósito, en función de los registros de campo, se estimaron algunos parámetros estadísticos y de la teoría de campos aleatorios, para cada uno de los sondeos.

Primero, se estimó el grado de correlación entre las mediciones individuales de CPTu, por medio del cálculo de la escala de fluctuación en la dirección vertical. En este caso el procedimiento se llevó a cabo para los registros de q_t y f_s .

En el cuadro 5.1.1 se presentan los resultados para cada uno de los sondeos, donde es posible observar que existe un comportamiento general para los datos en todas las perforaciones. La longitud de correlación para f_s y q_t , se encuentra en todos los casos por encima de los 0.5 m y por debajo de 1.0 m, excepto para q_t , en el sondeo P2-1.

| Variables | Sondeos | | | | |
|-----------|---------|------|------|------|------|
| | P1-1 | P2-1 | P3-1 | P4-1 | P5-1 |
| q_t | 0,73 | 1,06 | 0,85 | 0,54 | 0,86 |
| f_s | 0,85 | 0,62 | 0,51 | 0,51 | 0,64 |

Cuadro 5.1.1: Valores de $SO F_{vertical}$ para cada sondeo

Es importante mencionar, que [Bong and Stuedlein \(2017\)](#) calcularon la escala de fluctuación para q_t y f_s en la vertical utilizando 24 sondeos, encontrando que la escala de fluctuación vertical estaban alrededor de 0.49 m para q_t , un valor que se encuentra cercano a la longitud de correlación encontrada para los datos del sondeo P4-1, especialmente.

Además del cálculo de la escala de fluctuación, se estimaron los coeficientes de variación, la media y los valores extremos para los registros de q_t y f_s con los datos de cada uno de los sondeos. También se calcularon los parámetros estadísticos para cada variable unificando los registros de las cinco pruebas de campo. En los cuadros 5.1.2 y 5.1.3, se presentan los

resultados obtenidos.

| q_t | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|---------|
| Datos considerados | Valor mínimo [kPa] | Valor máximo [kPa] | Media [kPa] | COV [%] |
| P1-1 | 286.08 | 12324.00 | 4239.00 | 49.68 |
| P2-1 | 107.22 | 9433.00 | 4245.00 | 45.98 |
| P3-1 | 48.10 | 12474.00 | 4434.00 | 47.22 |
| P4-1 | 218.41 | 21423.00 | 4465.00 | 59.48 |
| P5-1 | 93.20 | 11458.00 | 4161.00 | 60.97 |
| Todos los sondeos | 48.10 | 21423.00 | 4309.00 | 63.97 |

Cuadro 5.1.2: Coeficientes de variación, medias y valores extremos para q_t

| f_s | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|---------|
| Datos considerados | Valor mínimo [kPa] | Valor máximo [kPa] | Media [kPa] | COV [%] |
| P1-1 | 0.49 | 97.73 | 34.43 | 49.68 |
| P2-1 | 0.49 | 95.68 | 35.40 | 45.98 |
| P3-1 | 0.49 | 129.31 | 37.78 | 47.22 |
| P4-1 | 0.49 | 128.95 | 30.55 | 59.48 |
| P5-1 | 11.68 | 200.70 | 40.25 | 60.97 |
| Todos los sondeos | 0.49 | 200.70 | 35.68 | 54.04 |

Cuadro 5.1.3: Coeficientes de variación, medias y valores extremos para f_s

Al analizar los resultados anteriores, se observa que los valores de COV obtenidos tanto para q_t , como para f_s , se encuentran por encima de 40 y por debajo de 72 %. Al comparar estos valores con los valores típicos reportados en [Ching and Schweckendiek \(2021\)](#), para arcillas y arenas, es posible encontrar mayor similitud con los rangos que se registran para suelos arenosos, los cuales van desde 17 hasta 82 %, mientras que los de las arcillas, alcanzan valores máximos del COV cercanos a 40 %. Lo anterior es consistente con la caracterización inicial planteada por [Bong and Stuedlein \(2017\)](#), donde se indica que la estratigrafía del sitio se encuentra conformada predominantemente por arenas.

Además, los cuadros 5.1.2 y 5.1.3 permiten observar la diferencia de los valores extremos medidos en cada sondeo, lo que coincide con la variación de los valores medios. Para el

caso de q_t el valor medio se encuentra entre 4116 kPa y 4465 kPa y para f_s entre 30.55 kPa y 40.25 kPa.

Luego de conocer de manera preliminar algunos de los parámetros que dan cuenta de la variabilidad del suelo en puntos específicos del depósito y sólo en dirección vertical. Se procedió a implementar la metodología para la generación de los campos aleatorios descrita en la sección 4.3.

Como ya se ha mencionado, estas simulaciones permiten obtener una representación de la variabilidad en dos direcciones, tomando en cuenta la longitud y la profundidad completas del depósito. En la figura 5.1.1, se observa por medio de gráficos de malla, las variaciones en 2D obtenidas de los campos aleatorios para cada uno de los parámetros medidos en el CPTu. Específicamente, las gráficas mostradas en la figura 5.1.1 son el valor promedio de las 100 simulaciones en cada punto de la malla .

Es importante mencionar que la posición de los sondeos en la malla con respecto a la horizontal, corresponde a la que se indican en el cuadro 5.1.4.

| Sondeos | P1-1 | P2-1 | P3-1 | P4-1 | P5-1 |
|--|------|------|------|------|------|
| Posición que ocupa el sondeo con respecto a las 53 posiciones horizontales | 4 | 16 | 28 | 40 | 52 |

Cuadro 5.1.4: Posiciones de los sondeos con respecto al número de los datos en la horizontal

Al comparar la variación de los parámetros q_t , f_s y u_2 en la figura 5.1.1, con las variaciones mostradas en profundidad para cada sondeo en la figura 4.1.3, se hace evidente la proximidad entre la posición de los sondeos y los incrementos o decrementos de los datos simulados. Por ejemplo, los mayores valores de q_t se muestran aproximadamente a los 3.0 m de profundidad y cerca de los 20.0 m longitudinales, lo que coincide con la localización del sondeo P4-1, el cuál registró el máximo valor de q_t igual a 21.47 MPa, a esa profundidad. También se evidencia, cómo por medio de la generación de campos aleatorios es posible extender la variación registrada en un punto localizado, donde nuevamente el incremento de q_t se propaga aproximadamente entre los 17.0 m y los 23.0 m, con respecto a la longitud del depósito.

Los resultados de las simulaciones, indicaron rangos de variación mayores a los

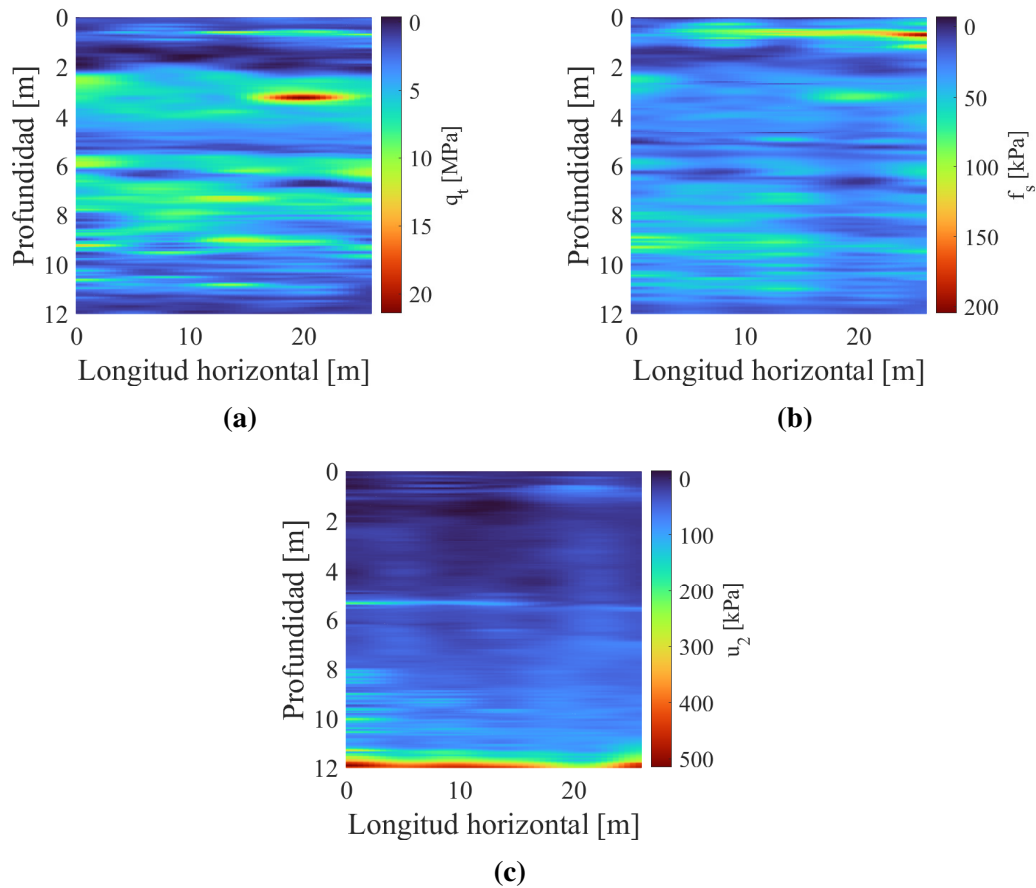


Figura 5.1.1: Campos aleatorios promedios con una resolución vertical de 0.02 m y una resolución horizontal de 0.50 m: (a) q_t (b) f_s (c) u_2

medidos en cada sondeo, en el caso de q_t se obtuvieron valores desde -3.2 MPa hasta aproximadamente 22.075 MPa, incluyendo valores negativos, los cuales no son coherentes como representación de una medida de resistencia del CPTu. Una situación similar ocurrió con los valores de f_s , donde el rango de variación de los datos está entre -30.00 kPa y 207 kPa. Por lo que se consideró necesario hacer una corrección de los valores simulados. En total el número de valores negativos simulados para q_t y f_s , fue de 50078 y 13319 respectivamente, lo que equivale a un porcentaje de 1.6% y 0.41% .

Para este caso y tomando en cuenta que los porcentajes de valores negativos obtenidos para las dos variables fue inferior al 2.0% , se decidió corregir además de los valores negativos obtenidos durante las simulaciones, los valores inferiores a los valores mínimos obtenidos en las mediciones de campo. En ese sentido el número de datos que cambiaron para q_t y

f_s , fueron de 55624 y 13367, lo que en porcentaje es aproximadamente igual a 1.75 % y a 0.42 %, manteniéndose por debajo del 2.0 %. Para q_t , el valor mínimo asignado fue de 48.10 kPa y para f_s de 0.49 kPa.

La corrección realizada fue necesaria primero para lograr que los valores de las simulaciones fueran representativos de la variable que se estaba simulando, y segundo con el fin de poder utilizar los datos de los campos como variables de entrada para el cálculo de los parámetros de diseño y comportamiento como se indicó en la sección 4.2 y se muestra con detalle en la sección 5.2.

Luego de hacer la corrección anterior, se encontró que el valor medio para la totalidad de los datos simulados de q_t es de 4.34 MPa, estando dentro del rango de los valores medios obtenidos para cada uno de los sondeos y que se muestran en el cuadro 5.1.2. De igual manera, el valor de COV obtenido para q_t es igual a 62.37 %, y también se encuentra dentro del rango de valores obtenidos para los sondeos, además de que se mantiene dentro de los rangos registrados por [Ching and Schweckendiek \(2021\)](#) para materiales arenosos.

Con respecto a f_s , el valor de COV fue igual a 52.01 %, lo que nuevamente es coherente con los valores registrados en la literatura. Específicamente para f_s , no se aprecia un incremento significativo del valor medio obtenido con todos los datos de las simulaciones, respecto a los datos de campo. En este caso el valor medio es de 35.28 MPa, lo que, como ya se mencionó, guarda proximidad con los datos del cuadro 5.1.3.

Con la información obtenida de las simulaciones, queda claro que hay un incremento en los rangos de variación de los parámetros q_t y f_s , sin embargo, debido a la corrección realizada sobre los valores inferiores al mínimo medido en los ensayos de sitio, sólo se ve reflejada en el límite superior. En este caso los datos simulados son mayores a los medidos en campo por 652 kPa para q_t y 6.03 kPa para f_s , lo que permite reafirmar, que la variabilidad que se representa por medio de los campos aleatorios, tiene una estrecha relación con la variabilidad que se refleja en el conjunto de datos provenientes del CPTu.

Finalmente, como una medida adicional de la variabilidad obtenida para el depósito durante las simulaciones, se calcularon las longitudes de auto-correlación de q_t y f_s en la dirección horizontal y vertical para algunas posiciones específicas. En los cuadros 5.1.5 y 5.1.6 se muestran los resultados obtenidos.

| Longitud [m] | Posición horizontal de la malla | $SO F_{vertical} q_t$ [m] | | $SO F_{vertical} f_s$ [m] | |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| | | Mínimo | Máximo | Mínimo | Máximo |
| 1.5** | 4 | 0.72 | 0.73 | 0.83 | 0.86 |
| 3.5 | 8 | 0.72 | 1.03 | 0.63 | 1.66 |
| 7.5** | 16 | 1.06 | 1.06 | 0.61 | 0.63 |
| 9.5 | 20 | 0.93 | 1.18 | 0.45 | 0.61 |
| 13.5** | 28 | 0.85 | 0.85 | 0.49 | 0.53 |
| 15.5 | 32 | 0.6 | 0.86 | 0.25 | 0.31 |
| 19.5** | 40 | 0.54 | 0.54 | 0.5 | 0.51 |
| 21.5 | 44 | 0.47 | 0.61 | 0.38 | 0.56 |
| 25.5** | 52 | 0.87 | 0.87 | 0.63 | 0.65 |

Notas:

(a) Los datos corresponden a máximos y mínimos para la misma localización tomando en cuenta las 100 simulaciones.

(b) Las localizaciones marcadas con ** corresponden a las localizaciones de los sondeos.

Cuadro 5.1.5: Valores de $SO F$ obtenidos en la vertical para algunas posiciones longitudinales

| Profundidad (m) | $SO F_{horizontal} q_t$ (m) | | $SO F_{horizontal} f_s$ (m) | |
|--------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| | Mínimo | Máximo | Mínimo | Máximo |
| 3.0 | 4.4 | 5.8 | 4.0 | 6.2 |
| 6.0 | 2.9 | 4.5 | 2.7 | 3.8 |
| 9.0 | 2.6 | 4.8 | 4.8 | 6.5 |
| 12.0 | 2.7 | 5.2 | 2.8 | 5.3 |

Cuadro 5.1.6: Valores de $SO F$ obtenidos en la horizontal para algunas profundidades

Particularmente, en el cuadro 5.1.5 se presentan los valores de $SO F_{vertical}$ obtenidos para 9 de las 53 posiciones en la horizontal, donde 5 de ellas corresponden a las posiciones originales donde se ubican los sondeos en el depósito. Los valores de $SO F_{vertical}$, fueron estimados con los datos de cada posición para las 100 simulaciones, donde los valores registrados en el cuadro 5.1.5, representan el valor máximo y mínimo obtenido en cada punto. En general los valores de $SO F_{vertical}$ para q_t y f_s en cada posición longitudinal, se mantuvieron en su mayoría en el rango inicial encontrado para cada sondeo (Ver cuadro 5.1.1) y están del orden de 0.50 m a 1.0 m. Se registraron valores de $SO F_{vertical}$ para f_s y q_t menores y mayores, especialmente en las posiciones intermedias a las posiciones originales de los sondeos, sin embargo, dichos incrementos o decrementos únicamente superan los 0.20 m, en 4 de los 36 casos analizados.

En el cuadro 5.1.6 se muestran los valores de $SOF_{horizontal}$, los cuales se calcularon de manera similar a la descrita para los $SOF_{vertical}$, pero tomando en cuenta los datos de las 100 simulaciones en cada profundidad. En este caso se pudo encontrar que el rango de valores para el $SOF_{horizontal}$ de q_t y f_s se mantiene dentro del rango definido por Bong and Stuedlein (2017), el cuál fue definido entre 1.6 m y 6.5 m. Específicamente el rango de variación encontrado para las simulaciones del presente proyecto se encuentra entre 2.6 m y 6.2 m, indicando un rango menor de longitudes, en las que se pueden presentar variaciones espaciales q_t y f_s .

De los resultados y análisis anteriores se puede concluir, como ya se mencionó, que la variabilidad completa que se representa en las simulaciones depende completamente de los registros de campo, sin embargo, permite extender esas variaciones a lo largo de la dirección horizontal, tomando en consideración la influencia de los registros cercanos. Además, de acuerdo con los resultados de las simulaciones es posible evidenciar que aunque el procedimiento utilizado para representar la variabilidad es diferente al propuesto por Bong and Stuedlein (2017), se obtienen resultados muy similares.

En la siguiente sección, se presentan análisis adicionales con respecto a la caracterización del depósito, incorporando además la estimación de parámetros de resistencia y comportamiento.

5.2. Representación y cuantificación de la variabilidad en función de los parámetros correlacionados a partir de datos de CPTu

Como una primera validación de la variabilidad que puede obtenerse de parámetros de diseño o comportamiento, al ser estimados por medio de diferentes correlaciones, se analizó la variación en profundidad de dos de los parámetros de resistencia definidos en la sección 4.2.1.

Específicamente se estudiaron el peso específico total (γ_t), y la velocidad de propagación de onda de corte (V_s). Donde para el análisis, se utilizaron las mediciones directas de los sondeos y el procedimiento mostrado en la figura 4.2.1. En este caso se buscó validar las

variaciones de γ_t , utilizando las ecuaciones 4.2.1 y 4.2.2, mientras que para V_s se emplearon las ecuaciones 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5.

En los cuadros 5.2.1 y 5.2.2 se presentan los parámetros estadísticos calculados para γ_t y V_s , al ser obtenidos con las diferentes correlaciones, mientras que en las figuras 5.2.1 y 5.2.2 se muestra su variación en profundidad.

| Datos considerados | Correlación | Rango de valores kN/m ³ | | Media kN/m ³ | COV % |
|--------------------|-------------|---------------------------------------|-------|----------------------------|----------|
| P1-1 | M2014 | 13.81 | 18.98 | 16.97 | 6.38 |
| | M&P2012 | 14.67 | 18.89 | 17.14 | 5.03 |
| P2-1 | M2014 | 13.81 | 18.95 | 17.06 | 5.75 |
| | M&P2012 | 14.67 | 18.86 | 17.22 | 4.56 |
| P3-1 | M2014 | 13.81 | 19.39 | 17.19 | 5.25 |
| | M&P2012 | 14.67 | 19.30 | 17.33 | 4.22 |
| P4-1 | M2014 | 13.81 | 19.39 | 16.60 | 5.80 |
| | M&P2012 | 14.67 | 19.30 | 16.98 | 4.61 |
| P5-1 | M2014 | 15.27 | 19.99 | 17.29 | 4.68 |
| | M&P2012 | 15.81 | 19.96 | 17.41 | 3.92 |

Cuadro 5.2.1: Variaciones de γ_t en función de variables estadísticas al ser estimado con diferentes correlaciones

La variación en profundidad para γ_t , muestra alta proximidad al ser estimado con las ecuaciones 4.2.1 y 4.2.2, en este caso ambas relaciones fueron calibradas con varios tipos de suelos. En general los datos estimados a partir de la ecuación 4.2.1, propuesta por Mayne (2014), presenta mayor COV, para cada sondeo. La ecuación de Mayne (2014), también permite encontrar rangos de variación más amplios. Sin embargo, al mirar el comportamiento en profundidad de los datos, en la figura 5.2.1 se evidencia una tendencia muy similar en cuanto al comportamiento de los datos en profundidad.

Para V_s se evidencian valores con mayor aproximación, al emplear las ecuaciones 4.2.4 y 4.2.5, las cuales también fueron calibradas a partir de información aportada para diferentes tipos de materiales, mientras que la ecuación , algo que podría estar relacionado con que su calibración se hizo solamente con arenas. Esta ultima ecuación, propuesta por Baldi et al. (1990) muestra valores mucho menores de V_s , lo que se puede ver con detalle en la figura 5.2.2. (Ver cuadro 5.2.2 y figura 5.2.2)

Los COV determinados para V_s , al ser estimada con cada correlación indican que

| Datos considerados | Correlación | Rango de valores m/s | | Media m/s | COV % |
|--------------------|-------------|-------------------------|--------|--------------|----------|
| P1-1 | B1990 | 27.86 | 200.02 | 149.31 | 21.95 |
| | M2006 | 100.62 | 254.91 | 193.34 | 16.20 |
| | M&H1995 | 89.78 | 279.27 | 196.51 | 18.77 |
| P2-1 | B1990 | 29.46 | 196.07 | 151.81 | 20.78 |
| | M2006 | 100.62 | 253.82 | 196.04 | 14.51 |
| | M&H1995 | 63.12 | 276.21 | 199.38 | 17.99 |
| P3-1 | B1990 | 29.13 | 204.02 | 152.39 | 21.81 |
| | M2006 | 100.62 | 269.36 | 199.95 | 13.10 |
| | M&H1995 | 42.72 | 297.51 | 203.04 | 17.15 |
| P4-1 | B1990 | 31.46 | 194.24 | 152.67 | 20.07 |
| | M2006 | 100.62 | 269.22 | 187.45 | 15.07 |
| | M&H1995 | 105.24 | 300.68 | 189.96 | 17.00 |
| P5-1 | B1990 | 30.84 | 194.39 | 151.74 | 19.77 |
| | M2006 | 145.31 | 292.04 | 202.88 | 11.89 |
| | M&H1995 | 87.73 | 346.89 | 206.74 | 16.11 |

Cuadro 5.2.2: Variaciones de V_s en función de variables estadísticas al ser estimado con diferentes correlaciones

la ecuación 4.2.4 propuesta por [Hegazy and Mayne \(1995\)](#), siempre están de manera intermedia a los definidos con las otras ecuaciones. En general los valores promedios de los datos encontrados con la ecuaciones 4.2.4 y 4.2.5, son muy próximos manteniendo una diferencia de 3.0 m/s en la mayoría de casos.

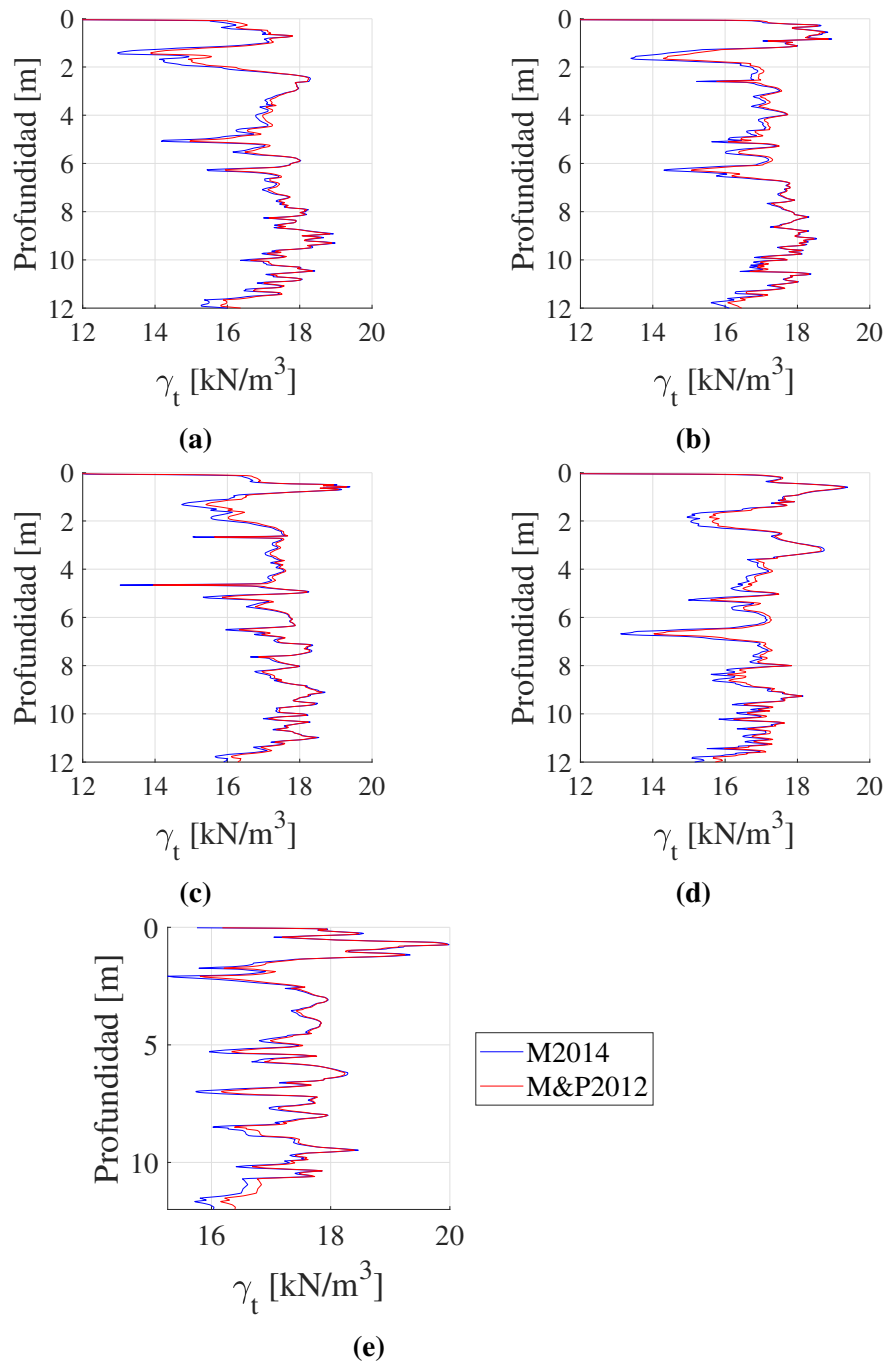


Figura 5.2.1: Variación en profundidad de los valores de γ_t definidos por diferentes correlaciones: (a) P1-1 (b) P2-1 (c) P3-1 (d) P4-1 (e) P5-1

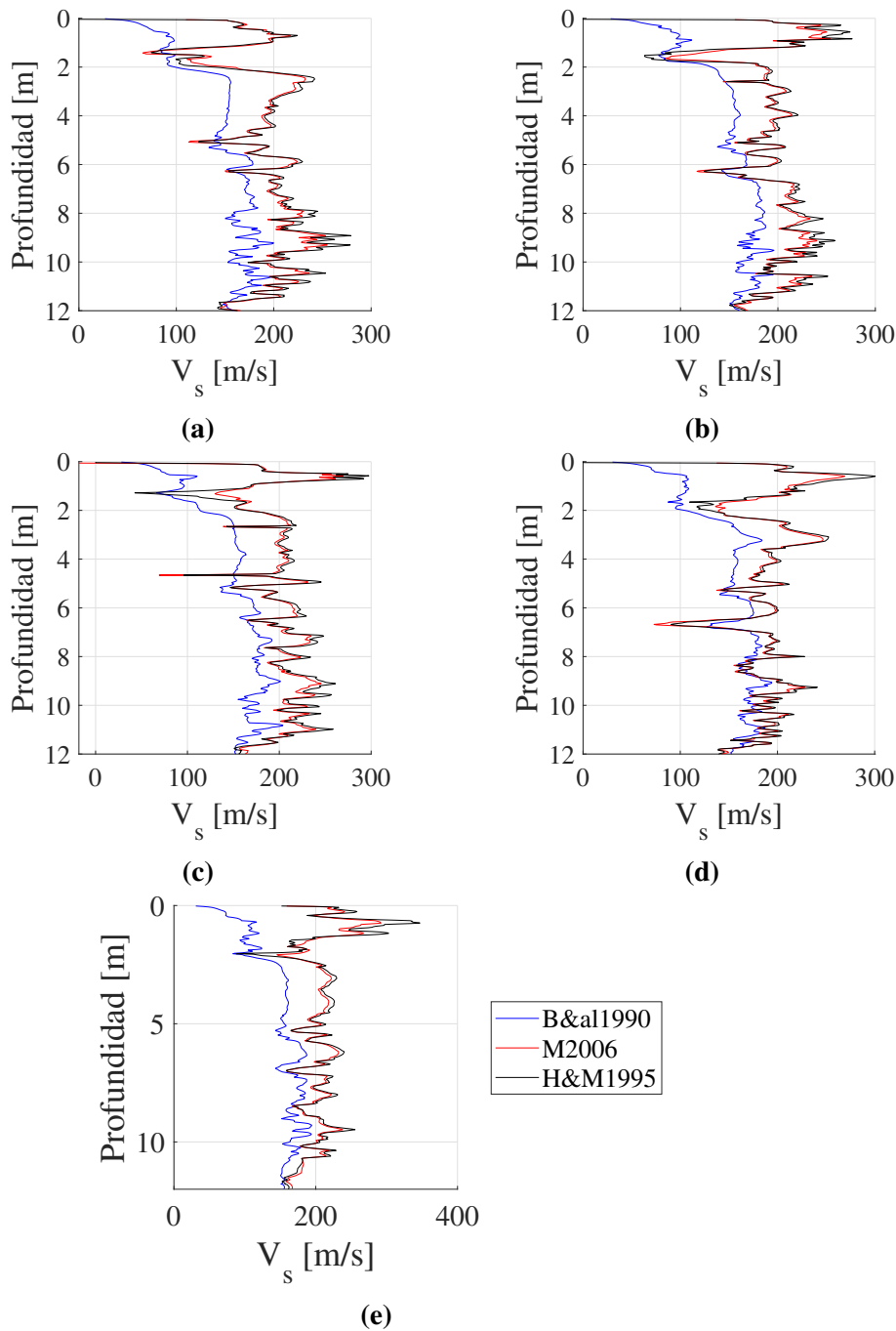


Figura 5.2.2: Variación en profundidad de los valores de V_t definidos por diferentes correlaciones: (a) P1-1 (b) P2-1 (c) P3-1 (d) P4-1 (e) P5-1

Lo anterior permite validar la influencia que tienen las correlaciones sobre el incremento o decremento de la variación de los parámetros estimados, dependiendo en gran medida de la

manera como fueron estimadas y calibradas las relaciones propuestas por cada autor.

Luego, se procedió a estimar la variabilidad de todos los parámetros de diseño y comportamientos definidos en la sección 4.2 tomando en cuenta los valores simulados de los parámetros q_t y f_s . Para esto nuevamente se tuvo en cuenta la metodología propuesta en la figura 4.2.1.

En este caso, se utilizó la ecuación 4.2.1 para el cálculo de γ_t y la ecuación 4.2.5 para el cálculo de V_s . De manera adicional se utilizó la ecuación 4.2.6 para el cálculo de ϕ' , y las ecuaciones propuestas por Robertson (2016), para la estimación del tipo de comportamiento del material (SBT). Además, como se describió en la sección 4.2 se asumió que para todos los casos la profundidad del nivel freático es constante e igual a 2.40 m.

Inicialmente se define el SBT, de cada punto del depósito, representado por la malla de 600×53 datos. Esto se hizo a partir de los campos de q_t , f_s y en este caso también de la variable u_2 . Los resultados se muestran en el cuadro 5.2.3 donde además se presenta una comparación con respecto al SBT obtenido para los datos totales de los sondeos.

| Zonas | Cantidad de datos por zona para todas las simulaciones | Porcentaje de datos por zona para todas las simulaciones | Cantidad de datos por zona para los datos de los sondeos | Porcentaje de datos por zona para los datos de los sondeos |
|----------------|--|--|--|--|
| Zona 1 | 54096 | 2 % | 76 | 3 % |
| Zona 2 | 190899 | 6 % | 157 | 5 % |
| Zona 3 | 65152 | 2 % | 63 | 2 % |
| Zona 4 | 208330 | 7 % | 252 | 8 % |
| Zona 5 | 179767 | 6 % | 202 | 7 % |
| Zona 6 | 463973 | 15 % | 403 | 13 % |
| Zona 7 | 2017631 | 63 % | 1847 | 62 % |
| Total de datos | 3180000 | 100 % | 3000 | 100 % |

Cuadro 5.2.3: Cantidad y porcentaje de datos por zona de tipo de comportamiento para los datos de las simulaciones y los sondeos

El cuadro 5.2.3 permite nuevamente validar la relación directa que hay entre la variabilidad registrada en campo y los datos simulados, en función del porcentaje de datos que se ubican en cada zona del SBT, donde la diferencia de porcentajes no supera el 1.0 %.

Además de lo anterior, nuevamente es posible validar que más del 75.0 % del depósito se comporta como un suelo arenoso, y que de ese porcentaje, más del 60.0 %, se dilata ante grandes deformaciones de acuerdo con la zonificación mostrada en el cuadro 4.2.1

y la visualización mostrada en la figura 5.2.3. El 25.0 % restante del suelo tiene un comportamiento entre material de transición y arcillas, donde el material de transición ocupa entre el 15.0 % y el 17.0 % de ese 25.0 %.

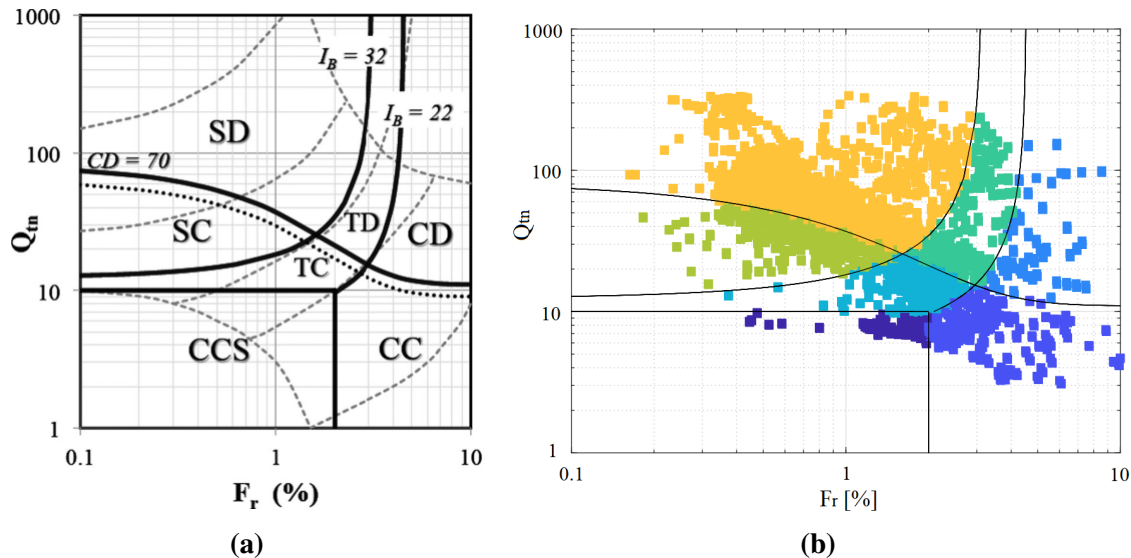


Figura 5.2.3: (a) Esquema de referencia propuesto por Robertson (2016) con respecto a zonificación de SBT (b) Esquema con distribución de datos en zonas de STB, a partir de los campos simulados para las variables del CTPu

De manera adicional se muestra una representación visual de la zonificación del material, pero tomando en cuenta su localización dentro del depósito en la figura ??, donde nuevamente es posible validar que el material se comporta principalmente como arenas dilatantes. Adicionalmente, es posible apreciar la localización de las diferentes zonas de comportamiento. En este caso la visualización se presenta para la campo aleatorio (RF) número 50.

Una vez fue identificado el SBT general del depósito, se procedió a obtener una representación de la variabilidad de cada uno de los parámetros correlacionados. Lo anterior se muestra en la figura 5.2.5, donde nuevamente el gráfico representa una malla de 600×53 y cada punto es el promedio de las 100 simulaciones, realizadas para cada parámetro de diseño.

Es importante notar que, aunque las figuras 5.1.1 y 5.2.5, muestran una buena representación de la variación de cada parámetro a la horizontal y la vertical, estas visualizaciones fueron

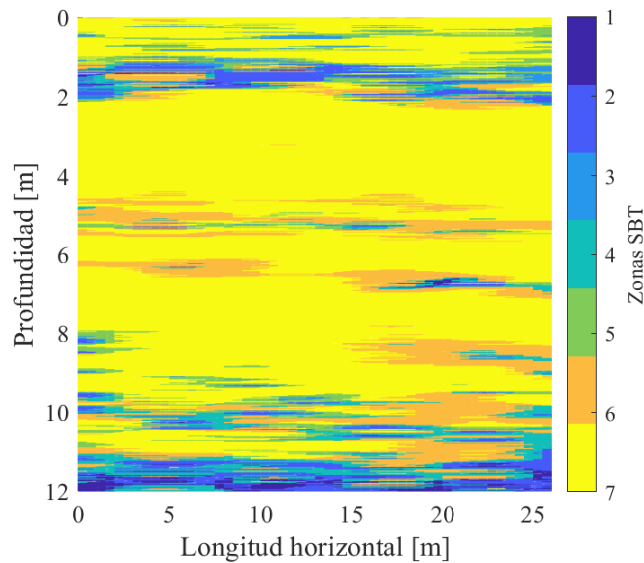


Figura 5.2.4: Visualización de la zonificación del suelo según la estimación del SBT-RF=50

construidas a partir de los datos promedios obtenidos con las 100 simulaciones en cada punto de la malla. Es por esto que en la figura 5.2.6 se presentan de manera adicional los cambios de una simulación a otra, para los valores de V_s .

En este caso se observa cómo cada una de las visualizaciones varía sobre todo para profundidades superiores a los 2.0 m, y valores de V_s entre 50.0 m/s y 150.0 m/s. A pesar de que las variaciones no son muy grandes es importante mantener presente la aleatoriedad de los resultados en cada simulación, y que esto puede representar diferencias al implementar los resultados en cálculos o diseños.

El análisis anterior se realizó específicamente para V_s con la intención de visualizar los cambios en la velocidad de propagación de onda, y relacionarlos con los cambios en los horizontes de suelo. Como se puede ver en la figura 5.2.6, el comportamiento de V_s guarda una estrecha relación con el comportamiento del SBT mostrado en la figura 5.2.4.

En ambos casos es posible evidenciar un cambio en el rango de variación de cada parámetro cerca a los 2.0 m de profundidad, lo que coincide con las descripciones de la sección 4.1.1, donde a esa profundidad Bong and Stuedlein (2017), detectaron un cambio de horizonte. Sin embargo, luego de esa profundidad las velocidades de propagación varían desde aproximadamente 50.0 m/s hasta casi 300 m/s de manera irregular, mientras que se

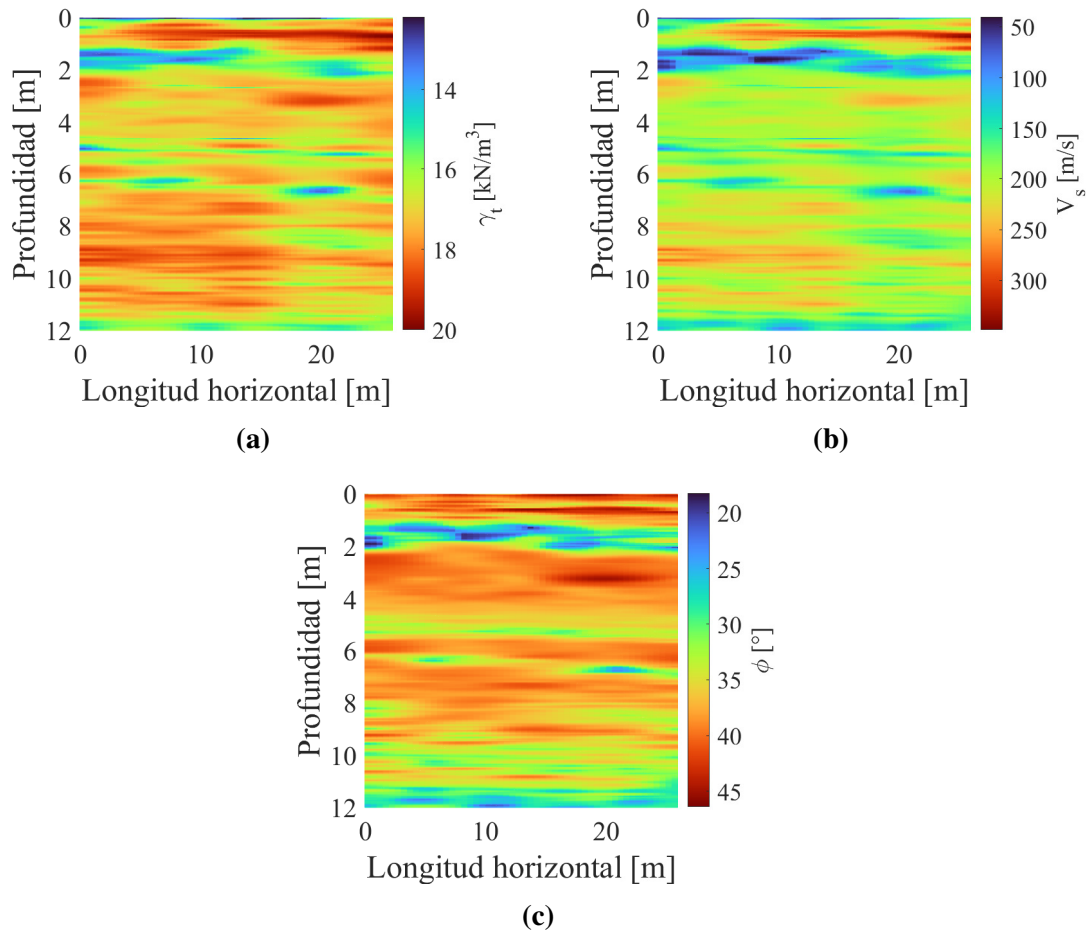


Figura 5.2.5: Representación de campos aleatorios promedios con una resolución vertical de 0.02 m y una resolución horizontal de 0.05m: (a) γ_t (b) V_s (c) ϕ'

aprecia una variación más homogénea al observar los cambios del STB, donde predominan las zonas de material 6 y 7.

En la figura 5.2.6 se evidencia que las velocidades de propagación de onda tuvieron incrementos más significativos después de los 8.0 m de profundidad, estando más cerca de los 250.0 m/s. Lo que también guarda relación con la aproximación del perfil estratigráfico de [Bong and Stuedlein \(2017\)](#), y con los cambios de zonificación mostrados en la figura 5.2.4.

Ahora bien, al unificar la información de los tipos de comportamiento estimados a lo largo y ancho del depósito, con la información de los parámetros de diseño, fue posible tener una

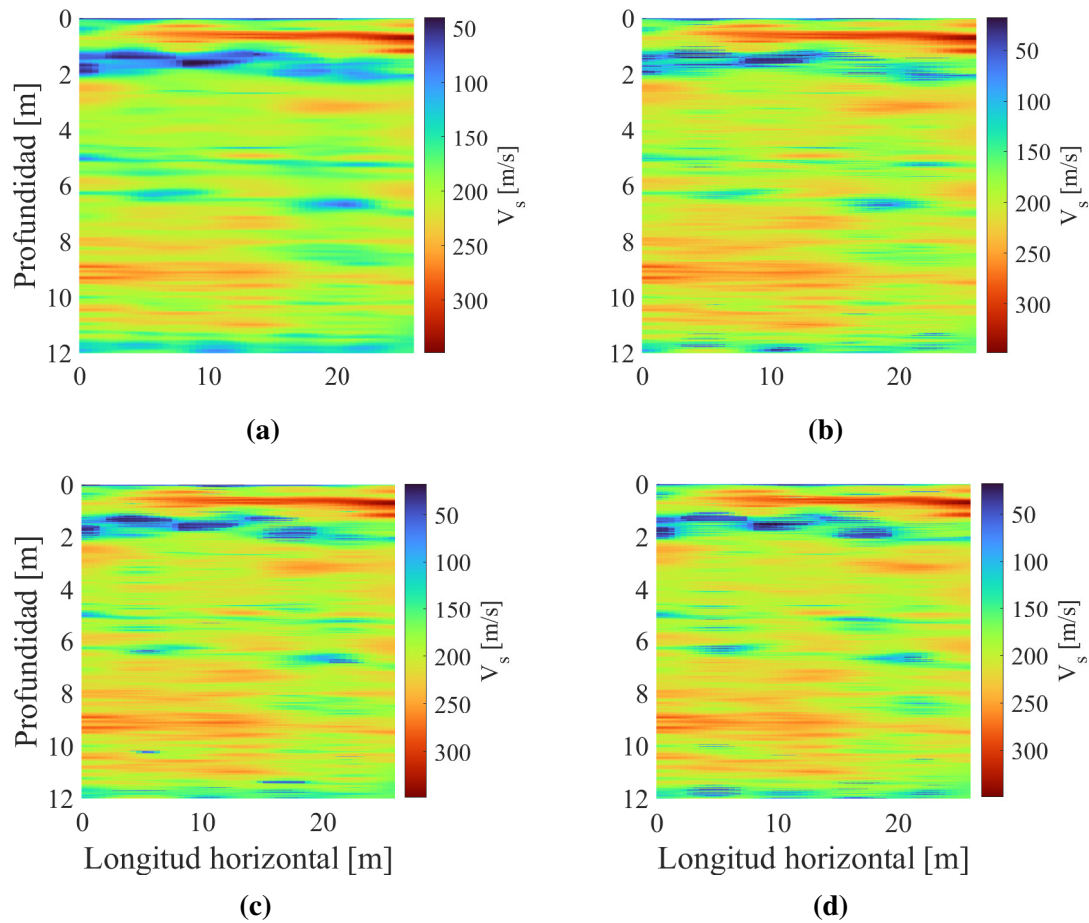


Figura 5.2.6: Representación de campos aleatorios para V_s con una resolución vertical de 0.02 m y una resolución horizontal de 0.05m: (a) Datos promedios (b) Simulación 1 (c) Simulación 50 (d) Simulación 100

visión más específica del comportamiento del suelo. Lo anterior sumado a la información que se muestra en el cuadro 5.2.3 y las figuras 5.2.3 y 5.2.4, con respecto al porcentaje de datos por zonas y su localización, permitió conocer las variaciones de cada parámetro de diseño dentro de la masa de suelo.

En los cuadros 5.2.4, 5.2.5 y 5.2.6 se muestra la variación completa de los parámetros de diseño correlacionados tanto para los datos de los sondeos como para los datos simulados. De igual manera en la figura 5.2.7 se muestran de manera gráfica las variaciones con respecto a los valores normalizados, donde es posible además indicar la distribución de los datos para cada zona y variable.

| Datos considerados | γ_t | | | | |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------|--|
| | Valor mínimo kN/m ³ | Valor máximo kN/m ³ | Media kN/m ³ | COV % | SO _F _{Vertical} m |
| P1-1 | 12.10 | 18.98 | 16.95 | 6.69 | 0.90 |
| P2-1 | 12.10 | 18.98 | 17.05 | 5.97 | 0.47 |
| P3-1 | 12.10 | 19.39 | 17.18 | 5.51 | 0.73 |
| P4-1 | 12.10 | 19.39 | 16.75 | 6.06 | 0.39 |
| P5-1 | 15.26 | 19.98 | 17.29 | 4.68 | 0.59 |
| Todos los sondeos | 12.10 | 19.98 | 17.04 | 5.91 | - |
| Zona 1 | 12.10 | 18.26 | 15.22 | 8.13 | - |
| Zona 2 | 12.10 | 18.96 | 16.01 | 7.41 | - |
| Zona 3 | 12.68 | 19.80 | 17.43 | 5.23 | - |
| Zona 4 | 12.10 | 17.84 | 16.48 | 6.17 | - |
| Zona 5 | 12.29 | 20.02 | 17.67 | 4.51 | - |
| Zona 6 | 12.10 | 17.73 | 16.02 | 6.63 | - |
| Zona 7 | 12.10 | 20.01 | 17.37 | 4.21 | - |
| Todas las simulaciones | 12.10 | 20.02 | 17.02 | 6.23 | - |

Cuadro 5.2.4: Datos de caracterización para γ_t para los datos de los sondeos y los datos simulados

Los valores calculados de γ_t tuvieron un rango de variación muy similar para los datos estimados directamente con la información de los sondeos y los datos simulados, donde la diferencia del límite superior está dada por sólo 0.04 kN/m³, como se muestra en el cuadro 5.2.4. En este caso el rango de valores medios osciló entre 15.22 kN/m³ y 17.67 kN/m³, donde los datos simulados se encuentran entre 12.10 kN/m³ y 20.02 kN/m³.

De acuerdo con la figura 5.2.7, las distribuciones de datos por zonas, se encuentran principalmente entre los 15.0 kN/m³ y 19.0 kN/m³, lo que coincide con los valores máximos registrados en [Sariosseiri and Muhunthan \(2009\)](#) de γ_t para arcillas, materiales mixtos y arenas. En este caso la zona que presenta un rango mayor de valores, es la de la zona 7, la cual corresponde a la zona con mayor número de datos clasificados con un tipo de comportamiento de arena dilatante.

Vale la pena notar que los valores del *COV* para γ_t alcanzaron valores entre 4.21 y 8.13, a pesar de ser función directa de f_s , la cual tuvo valores de *COV* promedio de 50.48, incluyendo los rangos por zonas de SBT, lo que podría relacionarse con las variaciones que se derivan del uso de correlaciones.

Por otra parte, las distribuciones de los valores obtenidos para V_s , dentro de las zonas con

| Datos considerados | V_s | | | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------------|----------|---------------------------|
| | Valor mínimo m/s | Valor máximo m/s | Media m/s | COV % | $SOF_{V_{vertical}}$ m |
| P1-1 | 50.73 | 279.27 | 196.13 | 19.39 | 0.99 |
| P2-1 | 53.66 | 276.21 | 199.14 | 18.42 | 0.47 |
| P3-1 | 42.72 | 297.51 | 202.73 | 17.68 | 0.75 |
| P4-1 | 56.02 | 300.67 | 189.62 | 17.55 | 0.42 |
| P5-1 | 87.73 | 346.89 | 206.74 | 16.11 | 0.57 |
| Todos los sondeos | 42.71 | 346.89 | 198.87 | 18.07 | - |
| Zona 1 | 17.82 | 175.03 | 111.44 | 41.23 | - |
| Zona 2 | 17.81 | 251.44 | 131.86 | 43.89 | - |
| Zona 3 | 26.51 | 335.01 | 198.05 | 22.15 | - |
| Zona 4 | 17.82 | 225.58 | 179.70 | 17.81 | - |
| Zona 5 | 21.83 | 349.81 | 220.57 | 15.31 | - |
| Zona 6 | 17.82 | 232.74 | 169.41 | 17.66 | - |
| Zona 7 | 17.82 | 345.02 | 210.67 | 13.11 | - |
| Todas las simulaciones | 17.82 | 349.81 | 196.50 | 20.43 | - |

Cuadro 5.2.5: Datos de caracterización para V_s para los datos de los sondeos y los datos simulados

mayor cantidad de datos, es decir las zonas 4, 5, 6 y 7 presentan en su mayoría valores de V_s que van desde 125.0 m/s hasta 280.0 m/s, como se puede ver en la figura 5.2.7, lo que coincide con los rangos de valores registrados para arenas no alteradas en [Mayne \(2007\)](#). Lo anterior a pesar de que el rango de variación general tanto para los datos simulados como para los obtenidos directamente al correlacionar los datos de los sondeos va desde 17.0 m/s hasta 349.81 m/s, como se indica en el cuadro 5.2.5.

Adicionalmente, la figura 5.2.7, permite visualizar que los rangos de V_s para las zonas 1 y 2, es decir las zonas que representan un comportamiento de suelos arcillosos contractantes, corresponden a las que mayor cantidad de datos de V_s tienen por debajo de los 50.0 m/s, sin embargo, estas dos zonas sólo corresponden al 8.0 % de la totalidad de los datos, por lo que no se consideran representativas.

En general los valores del COV , también son menores que los obtenidos para q_t y f_s , excepto nuevamente para las zonas 1, y 2, que presentaron valores superiores a 40.

Finalmente, los rangos y valores de variación para ϕ' se muestran en el cuadro 5.2.6 y la figura 5.2.7

| Datos considerados | V_s | | | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------------|----------|-----------------------|
| | Valor mínimo (°) | Valor máximo (°) | Media (°) | COV % | $SOF_{vertical}$ m |
| P1-1 | 25.54 | 41.90 | 35.63 | 11.06 | 0.63 |
| P2-1 | 21.11 | 43.56 | 35.78 | 11.27 | 0.63 |
| P3-1 | 17.75 | 46.03 | 35.85 | 11.25 | 0.64 |
| P4-1 | 24.25 | 45.97 | 35.91 | 10.91 | 0.58 |
| P5-1 | 19.64 | 44.96 | 35.47 | 11.63 | 0.93 |
| Todos los sondeos | 17.75 | 46.03 | 35.72 | 11.23 | - |
| Zona 1 | 13.77 | 29.66 | 24.15 | 25.52 | - |
| Zona 2 | 16.36 | 31.28 | 24.68 | 18.54 | - |
| Zona 3 | 21.76 | 40.02 | 30.94 | 9.17 | - |
| Zona 4 | 23.93 | 33.51 | 31.02 | 4.24 | - |
| Zona 5 | 25.63 | 42.45 | 33.73 | 6.98 | - |
| Zona 6 | 25.03 | 40.96 | 34.24 | 4.27 | - |
| Zona 7 | 26.80 | 50.27 | 38.14 | 5.38 | - |
| Todas las simulaciones | 13.77 | 50.27 | 35.66 | 12.92 | - |

Cuadro 5.2.6: Datos de caracterización para ϕ para los datos de los sondeos y los datos simulados

Para este último caso, y teniendo en cuenta que la resistencia al corte del material puede darse completamente en función del parámetro ϕ' , es importante notar cómo para las diferentes zonas hay un incremento en función de la frecuencia de los datos, y de los rangos de valores. Donde el valor medio de la distribución de datos en la zona 7, se encuentra cerca a los 38° , mientras que para para las zonas 1 y 2 se encuentran por debajo de 30° . Lo anterior a pesar de que para cada zona y sondeo se presenten rangos de variación más amplios, como se observó de manera similar para los parámetros γ_t y V_s . De acuerdo con los valores para arenas no alteradas que se presentan en [Mayne \(2006\)](#) y en [Mayne \(2007\)](#), el rango de variación oscila entre 37° y 42° .

En general y nuevamente considerando que el material de las zonas 4, 5, 6 y 7, tiene la mayor representación en porcentaje dentro del depósito, y al observar la figura 5.2.7, se puede decir que los valores de ϕ' , se encuentran predominantemente entre 30° y 40° . Con respecto a los valores de COV obtenidos se observa un decremento con respecto a las de las mediciones de CTPu, incluso en las zonas 1 y 2, donde el valor de COV se encuentra entre 4.24 y 25.52 %.

Los valores de $SOF_{vertical}$ de cada uno de los parámetros analizados, y mostrados en los

cuadros 5.2.4, 5.2.5 y 5.2.6, se encuentran en su mayoría entre 0.50 m y 1.0 m, guardando una estrecha relación con los calculados para los datos obtenidos directamente en el CPTu y mostrados en el cuadro 5.1.5.

Es importante notar los picos de valores sobre el rango inferior de cada una de las variables mostradas en la figura 5.2.7. Específicamente, se observa un incremento significativo para γ_t y ϕ' en las zonas 1 y 2, el cuál debería estar relacionado con el ajuste que se hizo sobre los valores negativos obtenidos en las simulaciones de los datos del CPTu. De acuerdo con esto, se puede concluir que hay una influencia directa del ajuste sobre los datos de dichas zonas, las cuales representan el 8.0 % de todos los datos simulados. Es importante mencionar que el porcentaje de datos ajustados estuvo cerca del 2.0 %. En general las zonas con mayor porcentaje de datos presentan un comportamiento uniforme, asemejándose a una distribución normal.

Finalmente, los resultados y análisis presentados con relación a los parámetros correlacionados, son consistentes con valores reportados en la literatura, especialmente para materiales arenosos no moldeados, lo que nuevamente permite tener un acercamiento con las características de estratigráficas descritas por Bong and Stuedlein (2017). Además, al unificar toda la información consolidada a lo largo de las secciones y , se visualiza como a través de las medidas de CPTu, y las simulaciones, se pueden lograr muy buenas aproximaciones en cuanto a la caracterización geotécnica completa.

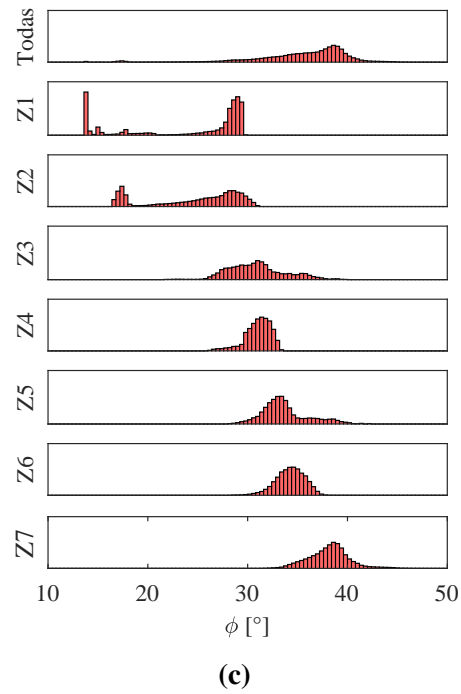
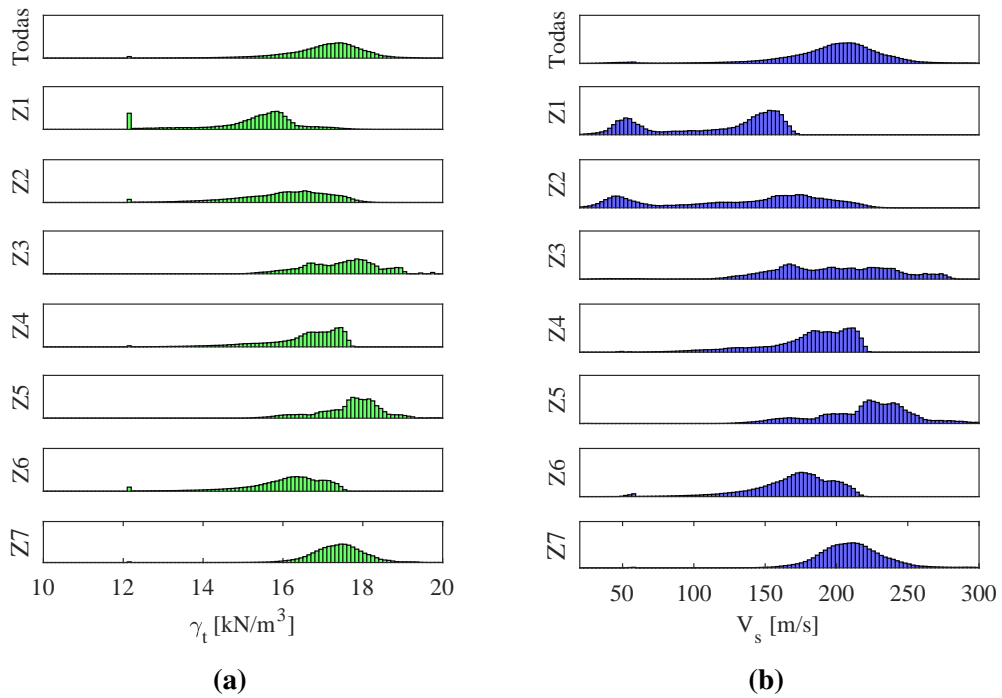


Figura 5.2.7: Rangos de distribución por tipo de zonas de comportamiento para (a) γ_t (b) V_s (c) ϕ

5.3. Estimación del potencial de licuación incorporando la variabilidad medida en campo

De acuerdo con la metodología propuesta en la sección 4.4, se calcularon los valores de CRR , CSR y FS para cada punto de la malla, por lo que nuevamente se obtuvieron 100 campos en dos dimensiones de 600×53 . Específicamente, se utilizó una magnitud de 7.5 para el sismo, y se tomaron valores de aceleración dentro del rango de valores establecidos por [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), el cual va de 0.10 g a 0.40 g. En este caso también se despreció el error de medición en los datos del CPTu, con el fin visualizar la contribución de la variabilidad inherente en la respuesta del suelo y todos los resultados se analizaron para profundidades con influencia del nivel freático.

Específicamente, se tomaron valores de a_{max} iguales a 0.12 g, 0.15 g, 0.20 g y 0.30 g, donde los valores mínimo y máximo corresponden a los analizados en [Bong and Stuedlein \(2018\)](#). Los resultados mostraron que para las simulaciones realizadas con las aceleraciones máxima y mínima, el mayor asentamiento se registró en la simulación número 13, por lo que en la figura 5.3.1 se muestra la variación del factor de seguridad en $2D$, para todas las aceleraciones en $RF=13$.

La figura 5.3.1 permite visualizar que la variación de FS hacia valores menores a la unidad, esta directamente relacionada con el incremento del valor de a_{max} . En ella se muestra como la activación de la licuación en función del FS inicia sobre materiales más sueltos y se propaga hacia materiales más densos con los incrementos de aceleración.

Los análisis permitieron identificar que aún para una aceleración de 0.12 g, el depósito presenta zonas de suelo licuable. Al comparar los resultados obtenidos con los de [Bong and Stuedlein \(2018\)](#), se encuentran similitudes para los resultados obtenidos con una aceleración de 0.12 g, sin embargo, al comparar el potencial de activación de licuación, en función del FS , para la aceleración de 0.30 g, los presentes análisis muestran mayor cantidad de zonas dentro del depósito que presentan riesgo de activación del fenómeno.

Al comparar los resultados de la variación del FS con la zonificación mostrada en la figura 5.2.4, se puede concluir que a pesar de que la mayoría de materiales, según el STB, presenta un comportamiento de arenas dilatantes, pueden ser susceptibles a licuarse.

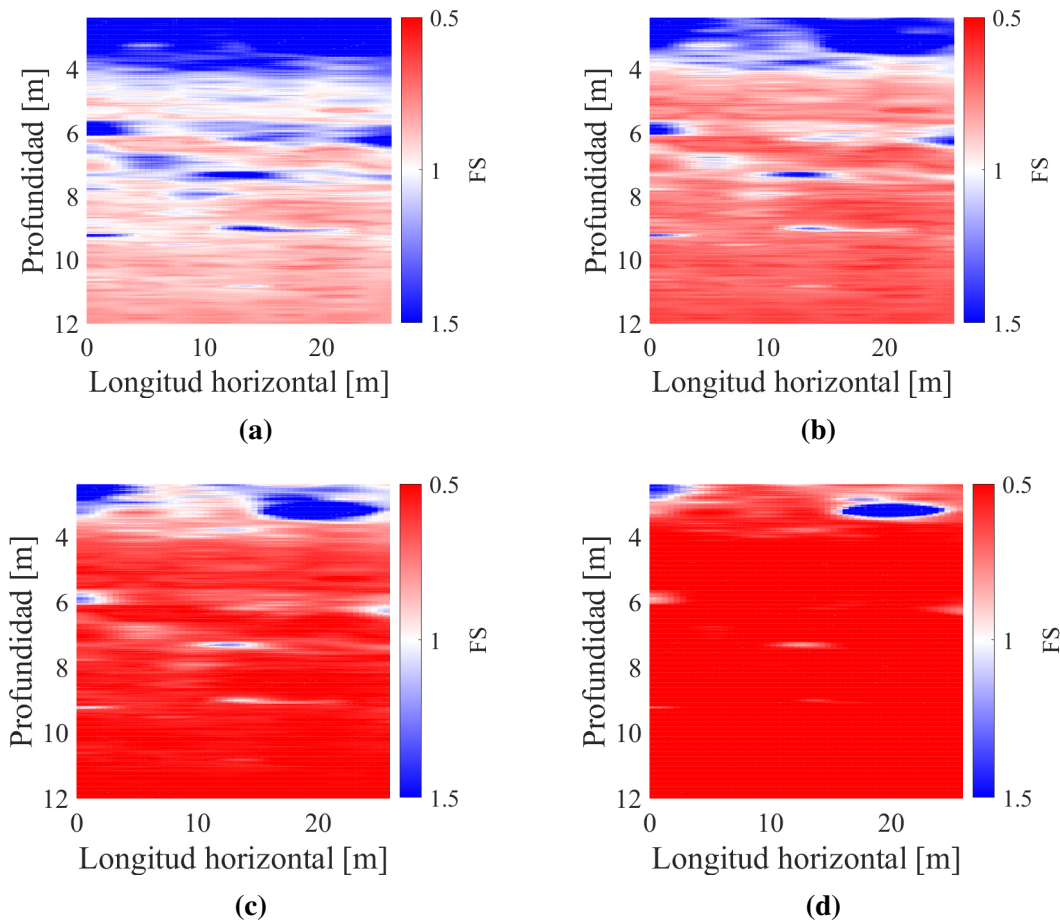


Figura 5.3.1: Visualización de resultados típicos de FS en $2D$ para $RF=13$, $M = 7.5$: (a) $a_{max} = 0.12g$ (b) $a_{max} = 0.15g$ (c) $a_{max} = 0.20g$ (d) $a_{max} = 0.30g$

Adicionalmente, y con el fin de validar la influencia de la variabilidad sobre la respuesta del material, se comparó la variación en profundidad del FS obtenido para los valores de aceleración mínimo y máximo ($0.12g$ y $0.30g$), tomando en cuenta los 100 valores simulados, sobre la posición en la horizontal que registró los mayores asentamientos diferenciales. La variación se muestra en la figura 5.3.2, donde es posible visualizar, que existe mayor dispersión para la variación de los valores de FS obtenidos con la menor aceleración. Lo anterior muestra como al incrementar la intensidad de la carga sísmica, la variación espacial del material disminuye su efecto sobre la respuesta del suelo.

Finalmente, la figura 5.3.3 permite visualizar los asentamientos registrados para las aceleraciones mínima y máxima evaluadas. Las variaciones en la respuesta del material, en

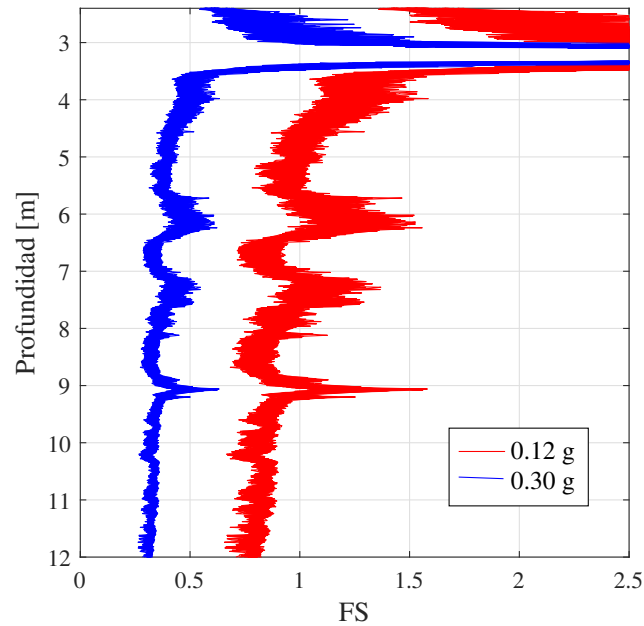


Figura 5.3.2: Visualización de la zonificación del suelo según la estimación del SBT-RF=50

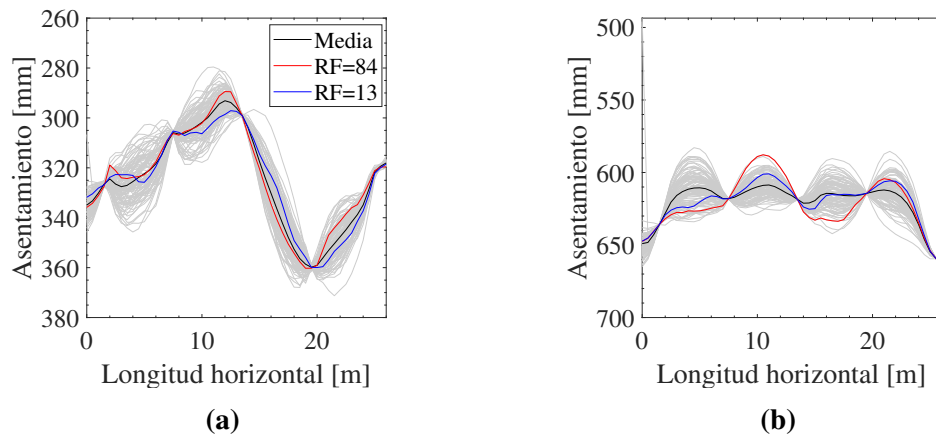


Figura 5.3.3: Variación de los asentamientos diferenciales en la dirección horizontal para $M = 7.5$ a) 0.12 g (b) 0.30g

puntos intermedios a la localización de los sondeos es mucho mayor (ver cuadro 5.1.4), y nuevamente se observa mayor dispersión para los asentamientos obtenidos con un valor de $a_{max} = 0.12$ g. En este caso se presentan los valores registrados de todos los asentamientos simulados, y se muestran en detalle los valores de los RF 13 y 84, los cuales presentaron el máximo y el mínimo asentamiento respectivamente.

A pesar de que fue posible obtener una primera aproximación de la respuesta del material frente a cargas sísmicas, es necesario mencionar que el método utilizado no toma en cuenta por ejemplo el comportamiento de la presión de poros dentro de la masa de suelo, a pesar de ser una de las variables de mayor interés en el análisis.

Es por esto, que se es necesario continuar estudiando y desarrollando metodologías que permitan comprender cada vez con mejores aproximaciones el papel de la variabilidad espacial en el comportamiento de suelos susceptibles de licuación, migrando a metodologías completamente probabilistas, y que den cuenta del carácter no lineal del fenómeno.

Capítulo 6

Conclusiones y Perspectivas

El presente estudio logró articular las mediciones de campo provenientes del CPTu, a una metodología para la representación de la variabilidad espacial del suelo, resaltando la importancia de la comprensión de la magnitud de la variabilidad espacial de los suelos, y su papel fundamental en el diseño geotécnico. Además, permitió incorporar a través de la metodología propuesta, incluir la variabilidad espacial de campo en la caracterización completa del sitio de interés y el análisis de susceptibilidad de licuación.

Este trabajo muestra que la variabilidad representada y caracterizada por medio de campos aleatorios depende completamente de la variabilidad registrada en campo, extendiendo dichas variaciones a lo largo de la dirección horizontal, y concluye que el efecto de la variabilidad espacial es más importante en la evaluación de la susceptibilidad a la licuación cuando las aceleraciones son menores. Además, válida que es posible lograr una caracterización geotécnica completa, que incluya la variabilidad de propiedades de diseño y comportamiento, a partir de mediciones limitadas de campo, logrando tener una buena aproximación con las características estratigráficas del sitio.

Es importante mencionar que, este trabajo enmarca una primera aproximación de la respuesta del material frente a cargas sísmicas, sin embargo también señala la necesidad de continuar estudiando y desarrollando metodologías que permitan comprender cada vez con mejores aproximaciones el papel de la variabilidad espacial en el comportamiento de suelos susceptibles de licuación, migrando a métodos numéricos que integren sus

efectos espaciales. en cuanto a la caracterización, concluye sobre la necesidad de incluir la incertidumbre asociada a las correlaciones empíricas en la generación de los campos aleatorios.

Bibliografía

- Baecher, G. (1999). Expert elicitation in geotechnical risk assessments.
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Lo Presti, D. (1990). Modulus of sands from cpt's and dmt's. *Proc. 12th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro, 1989. Vol. 1*, pages 165–170.
- Been, K. and Jefferies, M. (1985). A state parameter for sands. *Geotechnique*, 35:99–112.
- Bong, T. and Stuedlein, A. (2017). Spatial variability of cpt parameters and silty fines in liquefiable beach sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143.
- Bong, T. and Stuedlein, A. (2018). Effect of cone penetration conditioning on random field model parameters and impact of spatial variability on liquefaction-induced differential settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144.
- Boulangier, R. and Idriss, I. (2014). Cpt and spt based liquefaction triggering procedures. *Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis*.
- Cao, Z.-J., Shuo, Z., Li, D., and Phoon, K.-K. (2018). Bayesian identification of soil stratigraphy based on soil behaviour type index. *Canadian Geotechnical Journal*, 56.
- Cao, Z.-J. and Wang, Y. (2013). Bayesian approach for probabilistic site characterization using cone penetration tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139:267–276.
- Ching, J. and Schweckendiek, T., editors (2021). *State-of-the-art review of inherent variability and uncertainty in geotechnical properties and models*. ISSMGE Technical Committee 304.
- Fenton, G. A. and Vanmarcke, E. H. (1998). Spatial variation in liquefaction risk. *Géotechnique*, 48(6):819–831.
- Hegazy, Y. and Mayne, P. (1995). Statistical correlations between vs and cpt data for different soil types. *Proc. Cone Penetration Testing (CPT'95)*, 2:173–178.

- Jones, A., Kramer, S., Arduino, P., and Center, P. E. E. R. (2003). *Estimation of Uncertainty in Geotechnical Properties for Performance-based Earthquake Engineering*. Number v. 2002-2016 in *Estimation of Uncertainty in Geotechnical Properties for Performance-based Earthquake Engineering*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Kavazanjian, E., Andrade, J., Arulmoli, K., Atwater, B., Christian, J., Green, R., Kramer, S., Mejia, L., Mitchell, J., Rathje, E., Rice, J., and Wang, Y. (2016). State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its consequences.
- Kulhawy, F. and Mayne, P. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*.
- Marcuson, W. F. (1978). Definition of terms related to liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104:1191–1200.
- Mayne, P. (2006). The second james k. mitchell lecture undisturbed sand strength from seismic cone tests. *Geomechanics and Geoengineering*, 1:239–257.
- Mayne, P. (2007). In-situ test calibrations for evaluating soil parameters. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 3:1601–1652.
- Mayne, P. (2014). Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. *Proceedings, 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT14, las Vegas)*, 102:47–73.
- Mayne, P., Board, N. R. C. U. T. R., Program, N. C. H. R., of State Highway, A. A., Officials, T., and Administration, U. S. F. H. (2007). *Cone Penetration Testing*. Nchrp Synthesis. Transportation Research Board, National Research Council.
- Mayne, P. and Peuchen, J. (2012). Unit weight trends with cone resistance in soft to firm clays. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, 1.
- Montoya-Noguera, S., Lopez-Caballero, F., and Modaresi-Farahmand-Razavi, A. (2014). Numerical modeling of discrete spatial heterogeneity in seismic risk analysis: Application to treated ground soil foundation.
- Phoon, K.-K. and Kulhawy, F. (1999). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4):625–639.
- Popescu, R. (2008). Effects of soil spatial variability on liquefaction resistance: Experimental and theoretical investigations.
- Popescu, R., Prevost, J., and Deodatis, G. (1997). Effects of spatial variability of soil liquefaction: Some design recommendations. *Géotechnique*, 47.
- Robertson, P. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 27:151–158.

- Robertson, P. (2016). Cone penetration test (cpt)-based soil behaviour type (sbt) classification system — an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12):1910–1927.
- Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some washington state soils. *Engineering Geology*, 104:119–125.
- Seed, H. and Idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 107(SM9):1249–1274.
- Seed, H. and Idriss, I. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Technical report, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Vanmarcke, E. (2010). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. World Scientific.
- Vanmarcke, E. H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103.
- Viviescas, J., Griffiths, D., and Osorio, J. (2021). Geological influence on the spatial variability of soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, pages 1–9.
- Zhao, T., Xu, L., and Wang, Y. (2020). Fast non-parametric simulation of 2d multi-layer cone penetration test (cpt) data without pre-stratification using markov chain monte carlo simulation. *Engineering Geology*, 273:105670.