

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE
SUELOS EN EL CENTRO POBLADO EL PASTO, DISTRITO DE
SOCABAYA, AREQUIPA”**

Tesis presentada por los bachilleres:
Guillén Seminario, Andrea Lucía
Mendoza Pinto, Víctor Andrés
para optar el Título Profesional de:
Ingeniero Civil

Asesor de Tesis:
Ing. Chávez Vega, Óscar Félix

AREQUIPA – PERÚ

2018

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS CIVIL Y DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS

VISTO

El BORRADOR DE TESIS Titulado:

*Evaluación del Potencial de Insuficiencia de Suelo en el
centro poblado El Pastor, Distrito de Socabaya, Arequipa*

Presentado por el (la) (los) Bachiller (es):

Br. Andrea Lucía, Guillón Seminario

Br. Víctor Andrés, Medoza Pinto

Nuestro DICTAMEN es:

Apto para sustentación

OBSERVACIONES:

Arequipa, 03 de diciembre del 2018

Chays.
cod. 1732

[Signature]
cod. 2115

[Signature]
cod. 3044

DEDICATORIA

Agradezco a todos mis profesores quienes encuentran en la docencia su vocación, a mis padres quienes me brindaron el apoyo y las facilidades de estudio y a mis amigos quienes me acompañaron a lo largo de estos años. Todos ellos, con los que logré superar cada uno de los retos puestos en el camino.

Victor Mendoza Pinto

Agradezco a mis padres, quienes me han brindado a lo largo de toda mi vida y mi carrera su amor y apoyo incondicional. A mi hermano, por estar siempre dispuesto a escucharme y hacerme reír cuando más lo necesitaba. A mis amigos, por tantos momentos y alegrías que vivimos juntos. Y, por supuesto a mis profesores, por los conocimientos brindados a lo largo de toda la carrera.

Gracias a todas aquellas personas que sin esperar nada a cambio, alguna vez me tendieron la mano. Gracias por tanto cariño, gracias por tanta amabilidad, dedico este trabajo y mi futura carrera profesional a todos ellos.

Andrea Guillén Seminario

INTRODUCCIÓN

La licuefacción o licuación de suelos es uno de los más importantes temas de la ingeniería geotécnica. El fenómeno captó la atención de la comunidad científica e ingenieril por sus devastadores efectos en el año 1964, en los terremotos de Alaska, en Estados Unidos y Niigata, en Japón.

El comportamiento del suelo ante un sismo de gran intensidad y las fallas que pueda presentar, han ocasionado tanto grandes pérdidas humanas como económicas alrededor del mundo. Debido a esto es que se han realizado muchos estudios e investigaciones con el fin de desarrollar métodos para evaluar la susceptibilidad y probabilidad de licuefacción de suelos, y de esta manera prevenir y mitigar en la medida de lo posible, los efectos de este fenómeno.

No obstante, las condiciones bajo las cuáles se desarrolla la licuefacción y la cantidad de variables que intervienen en este proceso, hacen del fenómeno un tema muy complejo representando un muy buen campo de investigación, especialmente en nuestra ciudad; Arequipa, donde pese a haber experimentado los efectos de licuefacción de suelos la investigación sobre este tema ha sido y continúa siendo muy escasa.

RESUMEN.

En términos generales la licuefacción se presenta cuando un depósito de arena saturada se somete a fuerzas sísmicas y por acción de éstas su estructura cambia y tiende a densificarse, dada la corta duración de aplicación de las tensiones, se imposibilita el drenaje, produciéndose así un incremento progresivo de la presión de poros, reduciendo a su vez la tensión efectiva y por lo tanto la resistencia al corte. Al perder completamente su resistencia al corte, el suelo se licúa comportándose como un líquido viscoso y generando grandes deformaciones y otros efectos, que causan severos daños a las estructuras.

El presente trabajo de investigación seleccionó como área de estudio, un sector vulnerable de la ciudad, debido a sus condiciones geotécnicas, conocido como centro poblado El Pasto, en el distrito de Socabaya. Se realizaron los ensayos exploratorios correspondientes. Las calicatas y los ensayos de penetración estándar SPT (Standard Penetración Test) fueron convenientemente distribuidos y las muestras obtenidas ensayadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Santa María.

Para evaluar el potencial de licuefacción, se analizó la susceptibilidad en varios grados, partiendo de criterios de evaluación simples (Grado 1) a criterios más elaborados (Grado 3), siendo necesario para este último análisis la aplicación de la metodología probabilística propuesta por Cetin y otros en el año 2004, la cual proporciona como resultado la probabilidad de licuefacción expresada numéricamente como un porcentaje.

Finalmente se determinó que los suelos del centro poblado El Pasto son susceptibles a experimentar licuefacción, exceptuando casos en los cuáles exista presencia de suelos gravosos, por lo cual siempre se recomienda efectuar los ensayos exploratorios correspondientes tales como calicatas y ensayos de penetración estándar.

Palabras clave: Licuefacción, dinámica de suelos, SPT, terremoto.

ABSTRACT

In general terms liquefaction occurs when a deposit of saturated sand is subjected to seismic forces and by their action their structure changes and tends to densify, given the short duration of application of the stresses, drainage is impossible, thus producing an increase progressive pore pressure, reducing in turn the effective tension and therefore the shear resistance. When completely losing its shear resistance, the soil liquefies behaving like a viscous liquid and generating large deformations and other effects, which cause severe damage to the structures.

The present research work selected as a study area a vulnerable sector of the city, known as El Pasto, in the district of Socabaya. The corresponding exploratory tests were carried out. Borings and standard penetration tests, SPT, were conveniently distributed and the samples obtained were tested in the soil laboratory of the Catholic University of Santa María.

To evaluate the liquefaction potential, the susceptibility was analyzed in different degrees, starting from very simple evaluation criteria (Grade 1) to more elaborated criteria (Grade 3), being necessary for this last analysis the application of the probabilistic methodology, proposed by Cetin et al. in 2004, which provides as a result the probability of liquefaction expressed numerically as a percentage.

Finally, it was determined that the soils of the “El Pasto” are susceptible to experiencing liquefaction, except in cases where there is a presence of coarse soils, therefore it is always recommended to carry out the corresponding exploratory tests such as borings and standard penetration tests.

Keywords: Liquefaction, soils dynamics, SPT, earthquake.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	
INTRODUCCIÓN	
RESUMEN	
ABSTRACT	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	
ÍNDICE DE TABLAS	
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
El Problema de Investigación.....	1
Antecedentes	1
Identificación del Problema	3
Planteamiento del Problema.....	5
Justificación e Importancia.....	5
Objetivos	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos.....	6
Alcance.....	8
Metodología	9
Proceso	9
Fase 1: Selección del área de estudio.....	9
Fase 2: Selección del ensayo de campo.	13
Fase 3: Elección del método de evaluación del potencial de licuefacción.	15

Fase 4: Puntos de exploración.....	16
Fase 5: Muestreo.....	17
Fase 6: Ensayos de laboratorio.....	18
Fase 7: Evaluación de los diferentes grados de susceptibilidad.....	18
Fase 8: Cálculo del potencial de licuefacción.....	19
Fase 9: Análisis de resultados.....	19
Resumen.....	20
CAPÍTULO 2. PRECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
Introducción.....	21
Ubicación.....	21
Condiciones locales.....	23
Geomorfología.....	23
Características geomorfológicas locales.....	23
Características geomorfológicas del centro poblado El Pasto.....	24
Geología.....	26
Características geológicas locales.....	26
Características geológicas del centro poblado El Pasto.....	29
Geotecnia.....	29
Características geotécnicas locales.....	29
Características geotécnicas del centro poblado El Pasto.....	30
Sismicidad.....	32
Microzonificación sísmica local.....	32
Microzonificación sísmica del centro poblado. El Pasto.....	32

Zonas de riesgo.....	32
Aguas subterráneas.....	34
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO	35
Antecedentes internacionales y locales de licuefacción de suelos.....	35
Casos históricos fuera de Sudamérica.....	35
Niigata, Japón (1964).....	35
Alaska, EE. UU (1964).....	36
Loma Prieta, EE. UU (1989).....	38
Kobe, Japón (1995).....	38
Lefkada, Grecia (2003).....	39
Casos históricos en Sudamérica.....	40
Chile (1960).....	40
El Salvador (2003).....	41
Casos históricos en Perú.....	42
Arequipa (1582).....	42
Pisco (1716).....	42
Piura (1857).....	42
Moyobamba (1945).....	42
Cusco (1950).....	43
Arequipa (1958).....	43
Chimbote (1970).....	43
Arequipa (2001).....	47
Pisco (2007).....	49

Definición del fenómeno de licuación de suelos.....	53
Factores que influyen en la susceptibilidad a la licuefacción	55
Criterio Histórico.....	55
Criterios Geológicos.....	55
Criterios basados en la composición del suelo.....	56
Criterios basados en el estado del suelo	57
Condiciones de nivel freático	59
Criterios basados en la consistencia y plasticidad del suelo	60
Otros criterios.....	62
Criterios de sollicitación sísmica.....	63
Iniciación del fenómeno de licuefacción.....	65
Fallas asociadas con la licuefacción de suelos.....	67
Desarrollo de volcanes de arena.....	67
Asentamientos	68
Fallas de flujo.....	68
Fallas de deformación	69
Resumen.....	71
Mitigación y prevención de daños por licuefacción	72
Metodología de evaluación del potencial de licuefacción de suelos.....	74
Grados de evaluación de licuefacción.....	74
Grado 1.....	74
Grado 2.....	80
Grado 3.....	86
Metodologías subsuperficiales para evaluar el potencial de licuefacción de suelos	87

Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores .88	
Métodos basados en el número de golpes SPT.88	
Métodos basados en la resistencia por punta (q_c) del CPT93	
Métodos basados en la propagación de ondas de corte (V_s).....94	
Métodos basados en la teoría de la probabilidad.98	
Elección del método a utilizar en la investigación..... 112	
Interpretación de la probabilidad de licuefacción (P_L)..... 114	
Ensayo de Penetración Estándar (SPT)..... 115	
Constantes sísmicas representativas..... 117	
Velocidad de propagación de onda..... 117	
Correlación entre el valor N del SPT y la V_s 118	
Correlación utilizada en la investigación. 119	
Aceleración máxima del suelo 123	
Procedimiento de cálculo. 124	
Isoaceleraciones. 126	
Servicio Web de Consultas para la determinación del peligro sísmico en el territorio nacional. 126	
Sismo de diseño del C.P El Pasto..... 127	
Magnitud del sismo de diseño..... 128	
Distancia al centro poblado El Pasto..... 129	
Leyes de atenuación para ordenadas espectrales. 130	
Calculo de la magnitud del sismo. 132	
Resumen de constantes sísmicas 133	

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DEL CENTRO POBLADO DE EL PASTO.....	134
Introducción	134
Análisis de licuefacción acorde a los niveles de evaluación.....	134
Grado 1	134
Criterio geológico y geomorfológico con datos existentes	134
Criterio de intensidad	135
Criterio de distancia máxima	136
Resumen Grado 1	139
Grado 2	140
Criterio geológico y geomorfológico	140
Grado 3	142
Evaluación de la Susceptibilidad del C.P El Pasto.....	142
Determinación de la Probabilidad de Licuefacción en el C.P El Pasto.....	160
Mapeo del Potencial de Licuefacción	172
Zona 1: Suelo altamente licuable	172
Zona 2: Suelo no licuable	173
Zona 3: Zona a ampliar estudios	173
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
CONCLUSIONES	174
RECOMENDACIONES	177
BIBLIOGRAFÍA	179
ANEXOS	191

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Grietas en el terreno de la Urb. Las Magnolias, Socabaya.	1
Ilustración 2 Inclinación de postes en el Sector Lara, Socabaya.	2
Ilustración 3 Asentamiento en la Urb. Las Magnolias, Socabaya.	2
Ilustración 4 Zonificación urbana del C. P. EL Pasto del PDM 2002-2015.	4
Ilustración 5 Zonificación urbana del C.P El Pasto del actual PDM 2016-2025.	4
Ilustración 6a) Calicata de exploración en el C. P. El Pasto b) Profundidad total de 3m c) Medición del nivel freático establecido en 0.78 m d) Toma de muestras.	11
Ilustración 7 Granulometría por tamizado.	12
Ilustración 8 Ensayo de límite líquido y límite plástico.	12
Ilustración 9 Diagrama del flujo del método Cetin y otros (2004).	15
Ilustración 10. Ubicación de las calicatas en el centro poblado El Pasto.	17
Ilustración 11 Ubicación de los sondajes SPT en el centro poblado El Pasto.	17
Ilustración 12 Clasificación de métodos por grados para la evaluación del potencial de licuefacción.	19
Ilustración 13 Proceso de la metodología de trabajo.	20
Ilustración 14 Ubicación del distrito de Socabaya.	22
Ilustración 15 Mapa de ubicación del área de estudio.	22
Ilustración 16 Mapa Geomorfológico de Arequipa, señalizando el área de estudio.	25
Ilustración 17 Mapa Geológico de la Ciudad de Arequipa.	27
Ilustración 18 Columna estratigráfica de la ciudad de Arequipa.	28
Ilustración 19 Mapa Geotécnico de Arequipa.	31
Ilustración 20 Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa.	33
Ilustración 21 Mapa de riesgo sísmico del distrito de Socabaya.	34
Ilustración 22 Colapso de edificios de apartamentos en Kawagishi-cho.	35

Ilustración 23 a) Volcanes de arena y fisuras en el terreno. b) Buzón flotante como resultado de la licuefacción después del terremoto en Niigata, Japón. F. c) Falla del puente de Showa.	36
Ilustración 24 Geografía del sur y centro de Alaska, incluyendo los principales sitios involucrados en el terremoto de 1964	37
Ilustración 25 a) Los rieles en esta aproximación fueron arrancados y desplazados lateralmente por el movimiento de la ribera. b) Deslizamiento en Potter Hill.	37
Ilustración 26 Volcanes de arena a lo largo del río Salinas y en la estación de aterrizaje marítima del aeropuerto de Oakland.	38
Ilustración 27 a) Colapso de los pilares de la autopista de Hanshin. b) Deslizamiento lateral y hundimiento del pavimento. c) Inclinación del edificio debido a fallos del terreno por licuación	39
Ilustración 28: Cráteres de arena en la playa de Pefkoulia.	39
Ilustración 29 Licuefacción del terreno en la ciudad de Lefkada (A) eyección de limo arenoso desde las grietas del suelo, (B) roturas de suelo en la línea costera, (C) desplazamientos horizontales del pavimento y eyección de material limo arenoso.	40
Ilustración 30 Efectos de licuación en el terremoto de Chile.....	41
Ilustración 31 Las Lisas, fotos de las grietas debido al terremoto de EL Salvador.....	41
Ilustración 32 Desmoronamiento y fisuración en un campo de regadío en el valle de río Santa, cerca de Yungay.	44
Ilustración 33 a) Parte de una planta de harina de pescado en puerto Casma severamente agrietada como resultado de la expansión lateral. Pudiéndose notar además el efecto de extensión en las losas de piso de concreto. b) Casa de concreto destrozada por licuefacción y flujo lateral de sedimentos de playa que constituían el material de fundación.	45

Ilustración 34 a) Cráter de arena en un campo cerca del río Casma. b) Inundación de un área residencial en el sureste de Chimbote donde el suelo se asentó sustancialmente debido a la compactación de sedimentos saturados de agua	45
Ilustración 35 Desmoronamiento y fisuración de la carretera cerca de la costa de la bahía en el oeste de Chimbote debido a la licuefacción y la expansión lateral de los sedimentos. ..	46
Ilustración 36 Línea férrea de Chimbote-Huallaca dañada como resultado de la compactación diferencial y el desplazamiento lateral de sedimentos no consolidados saturados.....	47
Ilustración 37 a) Agrietamiento de la superficie del suelo. Huaranguillo, Sachaca. b) Grietas en el terreno Urb. Las Magnolias, Lara, Socabaya. b) Inclinación de muro. Urb. Las Magnolias, Lara, Socabaya.	48
Ilustración 38: a) Margen izquierda del río Camaná donde se observaron fenómenos de expansión lateral y licuación de suelos arenosos b) Volcanes de arena por efecto de licuación de suelo. c) Volcanes de arena alineados en la vega del río Camaná.....	49
Ilustración 39: Desplazamiento lateral del terreno asociado a la licuación en Canchamaná.	50
Ilustración 40 Desplazamiento vertical producto del desplazamiento lateral del terreno en Canchamaná.	50
Ilustración 41 a) Daños en berma y pavimentos de la calzada norte de la carretera Panamericana. b) Volcanes de arena en la carretera Panamericana.	51
Ilustración 42 Asentamiento de aproximadamente 0.90 m en Tambo de Mora.....	51
Ilustración 43 Desplazamientos laterales y fallas asociadas a licuefacción en el completo Las Lagunas.	52
Ilustración 44 Relación entre la densidad relativa ($D_r\%$) y N.	57

Ilustración 45 Susceptibilidad a la licuefacción de suelos con contenido de finos significativo.....	61
Ilustración 46 Licuefacción de suelos	66
Ilustración 47 Formación de capas intermedias de agua en pruebas de mesa de sacudimiento de Liu y Qiao (1984).	67
Ilustración 48 Pérdida de suelo debido a la densificación cíclica.	68
Ilustración 49 Ejemplos esquemáticos de inestabilidad global del sitio inducida por licuefacción.	69
Ilustración 50 Ejemplos esquemáticos de modos limitados de traslación lateral inducidos por licuefacción.	70
Ilustración 51 Rangos de tamaño de grano aplicables para diferentes métodos de estabilización	73
Ilustración 52 Distancia epicentral a los sitios licuados más lejanos, R , en km para la magnitud de la onda de superficie M_s	76
Ilustración 53 Distancia del plano de falla del terremoto a los sitios licuados más lejanos	76
Ilustración 54 Correlación de escala de intensidad entre J.M.A., M.M., M.S.K., Y R.F....	77
Ilustración 55 Comparación entre diferentes magnitudes de escala	77
Ilustración 56 Curvas de índice de severidad de licuefacción para el oeste de Estados Unidos trazadas en función de la distancia desde la fuente de energía sísmica.	80
Ilustración 57 Mapa del potencial de falla de tierra inducida por licuefacción para el área hipotética.	82
Ilustración 58 Mapa de clasificación geomorfológica de la llanura de Shonai que muestra susceptibilidad de licuefacción.	83
Ilustración 59 Relación entre la posibilidad de licuefacción y los valores N_{SPT} para diferentes profundidades $Z(m)$	89

Ilustración 60 Correlación de campo entre la relación de esfuerzos cíclicos $\tau\sigma'v$, y el valor de N_{SPT} corregido, N_1 para arenas limpias.	90
Ilustración 61 Curvas limites obtenidas en base a datos de los Valles de Mexicali e Imperial.	94
Ilustración 62 Relación de esfuerzos cíclicos que causan licuación en función de $(N_1)_{60}$ y de V_s para arenas limpias y sismos de magnitud diferentes.	96
Ilustración 63 Relación de esfuerzos cíclicos que causan licuación en función de la velocidad de ondas de corte corregidas, V_{s1}	97
Ilustración 64 Valores de CR recomendados (longitud de varilla desde el punto de impacto del martillo hasta la punta de la muestra).	104
Ilustración 65 Correlación de Magnitud	105
Ilustración 66 Valores recomendado dos de $K\sigma$ para $\sigma'v > 2atm$	106
Ilustración 67 Recomendación Probabilística de Licuefacción basada en SPT.....	107
Ilustración 68: Esquema resumen de la clasificación de métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción.....	111
Ilustración 69: Muestreador de tubo partido del ensayo SPT.	115
Ilustración 70: Esquema general del ensayo de penetración estándar SPT.....	116
Ilustración 71 Mapa sísmico del Perú (1960-2012) (a) Superficiales (b) Intermedios.....	125
Ilustración 72 (a) Fuentes sismogénicas superficiales (b) Fuentes sismogénicas de subducción	125
Ilustración 73 Mecanismo focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto del 23 de junio de 2001. Se indican la ubicación de 3 réplicas principales y los valores de magnitud.	129
Ilustración 74 Mapa Geológico del Centro Poblado el Pasto. Fuente.....	135

Ilustración 75 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 7.8) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto.....	136
Ilustración 76 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 7.9) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto.....	137
Ilustración 77 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 8.3) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto.....	138
Ilustración 78 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 8.4) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto.....	139
Ilustración 79 Fragmento de la Columna estratigráfica de la ciudad de Arequipa.	140
Ilustración 80 Fragmento del Mapa Geotécnico de Arequipa.....	140
Ilustración 81: Estratos susceptibles por consistencia y plasticidad de la calicata 01 en la gráfica.....	146
Ilustración 82 Estratos susceptibles por consistencia y plasticidad de la calicata 03 en la gráfica.....	148
Ilustración 83 Estratos susceptibles por consistencia y plasticidad de la calicata 04 en la gráfica.....	149
Ilustración 84: Mapa de licuefacción del área de estudio.	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de clasificación SUCS de la investigación exploratoria.....	10
Tabla 2 Comparación de las ventajas y desventajas de varios ensayos de campo para la evaluación de la resistencia a la licuefacción del suelo	13
Tabla 3 Aplicación y Limitaciones de los Ensayos de Campo.....	14
Tabla 4: Selección del número de puntos de investigación.....	16
Tabla 5 Ensayos aplicados.	18
Tabla 6 Características del suelo Eluvial Reciente (G10-ser).....	30
Tabla 7 Correlación entre el número de golpes N y la densidad relativa de las arenas.	57
Tabla 8: Clasificación de Terzagui y Peck (1948) modificada por Skempton (1986)	58
Tabla 9 Criterio de evaluación de la susceptibilidad de acuerdo al nivel freático.	59
Tabla 10 Criterio de licuefacción por granos finos.	60
Tabla 11 Correlaciones aproximadas entre magnitud, aceleración y duración de un sismo.	64
Tabla 12 Clasificación de las consecuencias de la licuefacción de suelos.....	71
Tabla 13 Lista de métodos seleccionados para mitigar el peligro de licuefacción del suelo sísmico	73
Tabla 14 Susceptibilidad de las unidades geomorfológicas a la licuefacción.....	79
Tabla 15 Susceptibilidad de depósitos sedimentación a licuefacción durante movimientos fuertes.....	84
Tabla 16 Susceptibilidad de unidades geomorfológicas detalladas a la licuefacción sometida a movimiento de tierra de J.M.A. intensidad V o M.M.S. VIII.	85
Tabla 17 Incremento equivalente de N en función del contenido de finos (CF).....	90
Tabla 18 Valores de N* en función de la intensidad del sismo, según la escala Mercalli Modificada	91

Tabla 19 Correcciones recomendadas del equipo SPT	103
Tabla 20 Rango P_L para definir los efectos de la licuación en superficie	114
Tabla 21 Correlaciones existentes entre la velocidad de onda de corte y la residencia a la penetración estándar.	119
Tabla 22 Resultados de la cuantificación del análisis de regresión lineal involucrando V_s y el valor de N del SPT.	120
Tabla 23: Resultados del cálculo de la V_s en el área de estudio, sondeo SPT N°1.	121
Tabla 24 Resultados del cálculo de la V_s en el área de estudio, sondeo SPT N°2.	121
Tabla 25 Resultados del cálculo de la V_s en el área de estudio, sondeo SPT N°3.	121
Tabla 26 Velocidad de ondas de corte promedio en el área de estudio, SPT N°1.	122
Tabla 27 Velocidad de ondas de corte promedio en el área de estudio, SPT N°2.	122
Tabla 28 Velocidad de ondas de corte promedio en el área de estudio, SPT N°3.	123
Tabla 29 Softwares utilizados en los recientes estudios de peligro sísmico en el Perú. ...	124
Tabla 30 Resumen de leyes de atenuación según los métodos de cálculo de peligro sísmico.	126
Tabla 31 Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño.	127
Tabla 32 Principales propuestas de aceleración pico del suelo.	128
Tabla 33 Aceleración máxima del suelo en el C. P. El Pasto.	128
Tabla 34 Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 y de tres de sus réplicas principales.	129
Tabla 35 Distancia hipocentral de sismo del 23 de junio del 2001 y sus principales replicas.	130
Tabla 36 Coeficientes para la ley de atenuación de aceleración espectral en suelo.	131
Tabla 37 Coeficientes de regresión para sismos interfase.	131

Tabla 38 Variables requeridas para el cálculo de Mw.	132
Tabla 39 Resumen de las magnitudes momento calculadas.....	132
Tabla 40 Resumen de constantes sísmicas del C. P. El Pasto.	133
Tabla 41 Susceptibilidad a la licuefacción.	135
Tabla 42 Valores de magnitud momento (Mw) para la zona de estudio.	136
Tabla 43 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw=7.8.	136
Tabla 44 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw=7.9.	137
Tabla 45 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw=8.3.	138
Tabla 46 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw= 8.4.	139
Tabla 47 Resumen susceptibilidad a la licuefacción grado 1.....	139
Tabla 48 Susceptibilidad estimada de licuefacción para el suelo presente en C. P. El Pasto.	141
Tabla 49 Susceptibilidad estimada de licuefacción para las condiciones geomorfológicas de C. P. El Pasto.....	141
Tabla 50: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 1 del área de estudio.	142
Tabla 51: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 2 del área de estudio.	142
Tabla 52: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 3 del área de estudio.	143
Tabla 53: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 4 del área de estudio.	143
Tabla 54: Inspección Visual de las calicatas del área de estudio.	144
Tabla 55: Nivel freático de las calicatas del área de estudio.	144

Tabla 56: Densidad Relativa en función del número de golpes del ensayo SPT N°01 en el área de estudio.	145
Tabla 57: Densidad Relativa en función del número de golpes del ensayo SPT N°02 en el área de estudio.....	145
Tabla 58: Densidad Relativa en función del número de golpes del ensayo SPT N°03 en el área de estudio.	145
Tabla 59: Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 01 del área de estudio	146
Tabla 60 Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 02 del área de estudio.	147
Tabla 61 Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 03 del área de estudio.	147
Tabla 62 Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 04 del área de estudio.	149
Tabla 63: Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°01 en función del D50, porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de Gonzáles de Vallejo.	150
Tabla 64 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°02 en función del D50, porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de Gonzáles de Vallejo.	150
Tabla 65 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°03 en función del D50, porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de Gonzáles de Vallejo.	151

Tabla 66 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°04 en función del D50, porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de Gonzáles de Vallejo.	151
Tabla 67 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°01 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	152
Tabla 68: Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°01 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	153
Tabla 69 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°02 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	154
Tabla 70 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°02 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	155
Tabla 71 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°03 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	156
Tabla 72 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°03 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	157
Tabla 73 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°04 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	158
Tabla 74 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°04 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).	159
Tabla 75: Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.8$ del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).	160

Tabla 76 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.9$ del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	161
Tabla 77 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.3$ del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	162
Tabla 78 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.4$ del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	163
Tabla 79 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.8$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	164
Tabla 80 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.9$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	165
Tabla 81 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.3$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	166
Tabla 82 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.4$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	167
Tabla 83 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.8$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	168
Tabla 84 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.9$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	169
Tabla 85 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.3$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	170
Tabla 86 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.4$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004).....	171

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

El Problema de Investigación

Antecedentes

Yanqui (2001) señala que el terremoto del 23 de junio del 2001 provocó la licuación del suelo en tres lugares de la ciudad de Arequipa: Urbanización Semi Rural Pachacútec en Cerro Colorado, anexo de Huaranguillo en el distrito de Sachaca, y en la urbanización Las Magnolias, distrito de Socabaya, donde el impacto en el terreno y en las construcciones fue muy severo, presentándose agrietamiento del suelo, levantamiento de buzones de desagüe, desplome de postes de luz, rotura y desnivelación de pisos, asentamiento de veredas y agrietamiento de las viviendas.(Ilustración 1, Ilustración 2, Ilustración 3).



Ilustración 1 Grietas en el terreno de la Urb. Las Magnolias, Socabaya. Fuente (Aguilar Bardales & Alva Hurtado, Noviembre, 2002).



Ilustración 2 Inclinación de postes en el Sector Lara, Socabaya. Fuente (Aguilar Bardales & Alva Hurtado, Noviembre, 2002).



Ilustración 3 Asentamiento en la Urb. Las Magnolias, Socabaya. Fuente (Aguilar Bardales & Alva Hurtado, Noviembre, 2002).

Identificación del Problema

El Perú se encuentra geográficamente ubicado en una zona de alta sismicidad (Red Acelerográfica CIP CN / UPG-FIC-UNI), los antecedentes históricos demuestran los devastadores efectos que los sismos pueden ocasionar. La licuefacción de suelos es uno de estos efectos y en el país se ha podido evidenciar la ocurrencia de este fenómeno en más de una ocasión.

Por lo tanto, realizar estudios que permitan estimar el potencial de licuefacción es necesario y de gran importancia especialmente cuando las condiciones locales: geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, y demás; den indicios de la vulnerabilidad del suelo ante este fenómeno.

El centro poblado El Pasto, ubicado en el distrito de Socabaya, según la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Arequipa, realizada por Aguilar en 1991; pertenece a la zona D, la cual presenta las condiciones geotécnicas más desfavorables para la cimentación, debido a su suelo eluvial reciente, conformado por arenas-limosas peligrosas en estado suelto y por su nivel freático, muy cercano a la superficie.

Igualmente, Núñez y otros (2001) basados en el potencial riesgo sísmico que pueda inducir el suelo en las edificaciones, catalogan al C.P El Pasto como una zona de alto riesgo, donde los materiales piroclásticos, arenas, limos orgánicos y la presencia de un nivel freático que corta la superficie, hacen de esta zona un sector muy inestable.

Todos estos estudios guardan relación con la anterior zonificación urbana de Arequipa expuesta en el Plan Director de Arequipa Metropolitana 2002-2015, donde la zona de El Pasto estaba considerada como de Alto Peligro por Suelos Inestables o APSI (Ilustración 4); sin embargo, en la actual zonificación del Plan de Desarrollo Metropolitano 2016-2025 se le clasifica como zona de Residencial de Densidad Baja o RDB (Ilustración 5)

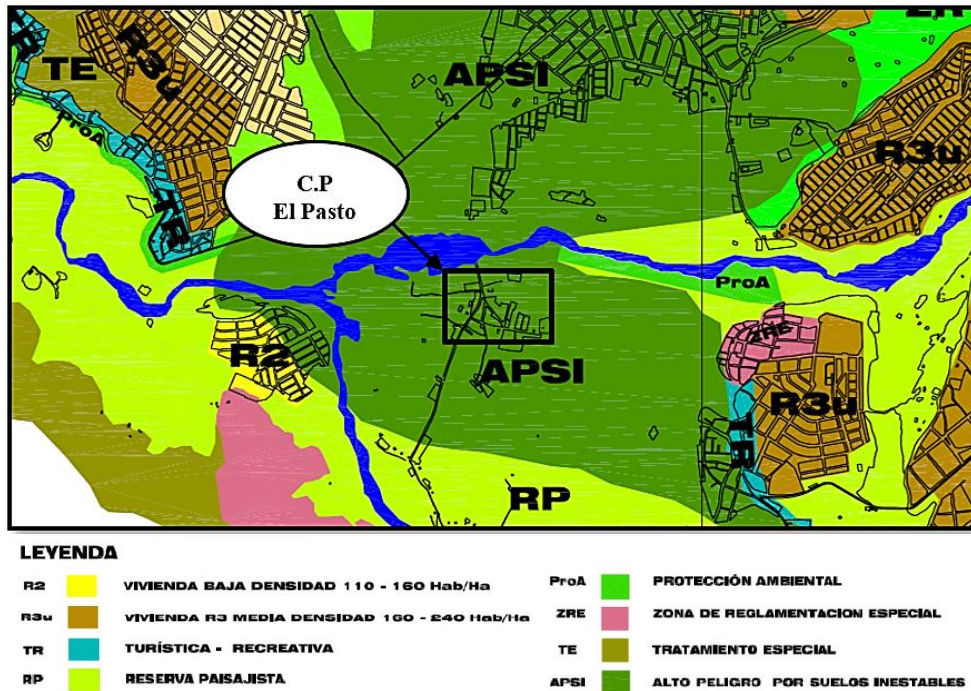


Ilustración 4 Zonificación urbana del C. P. EL PASTO del PDM 2002-2015. Fuente (Plan Director de Arequipa Metropolitana 2002-2015)

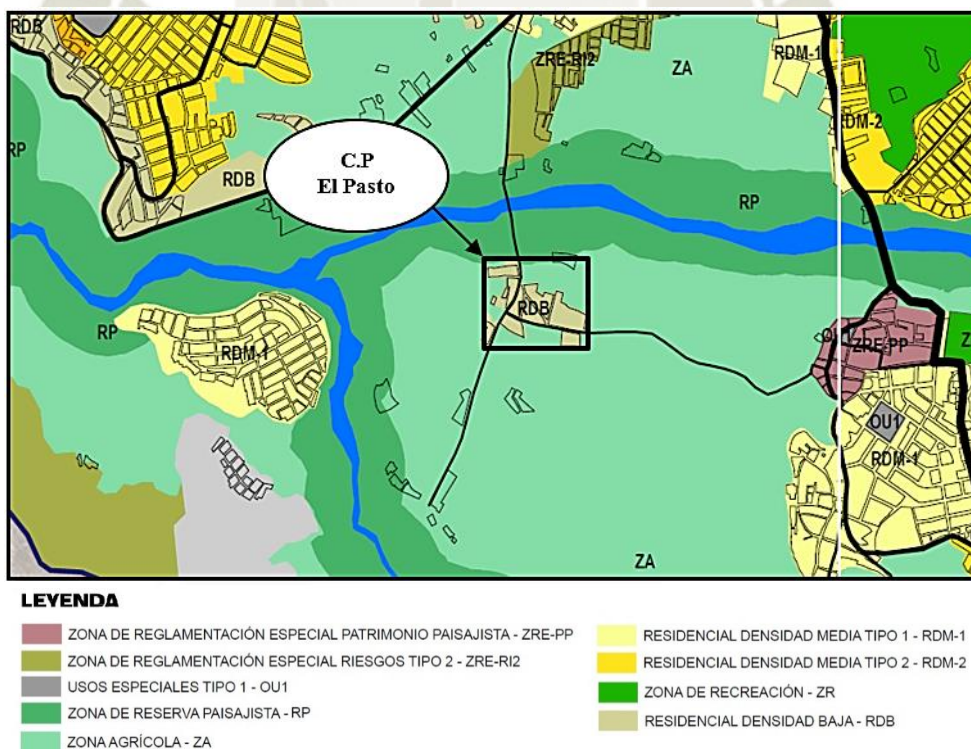


Ilustración 5 Zonificación urbana del C.P El Pasto del actual PDM 2016-2025. Fuente (Plan de Desarrollo Metropolitana de Arequipa 2016-2025)

Planteamiento del Problema

¿Es realmente el suelo del Centro Poblado el Pasto susceptible a experimentar el fenómeno de licuefacción ante la ocurrencia de un evento sísmico de alta magnitud?

Justificación e Importancia

La naturaleza sísmica de nuestro país y los antecedentes históricos demuestran que gran parte de los daños estructurales ocasionados por los terremotos, se deben a comportamientos desfavorables de los suelos de fundación, tales como: deformaciones excesivas, disminución de la capacidad portante, amplificaciones de los movimientos sísmicos y licuefacción. (Troncoso, 1992), siendo este último fenómeno, el tema principal de esta tesis, debido a los catastróficos efectos que produce los cuales se ven reflejados en daños a edificios, puentes, redes de agua y desagüe y obras de infraestructura en general. (Coronado, Villafañe, & Ríos, 1999)

Es por estas razones, que nace la importancia de estudiar e investigar sobre el fenómeno de licuefacción de suelos en el Perú y específicamente en la ciudad de Arequipa, donde son muy pocos los estudios que se han realizado sobre este tema, sin mencionar que los mismos se realizaron con fines aplicativos para proyectos privados y casi ninguno se hizo por temas de investigación o como parte de un plan de prevención de riesgos.

Objetivos

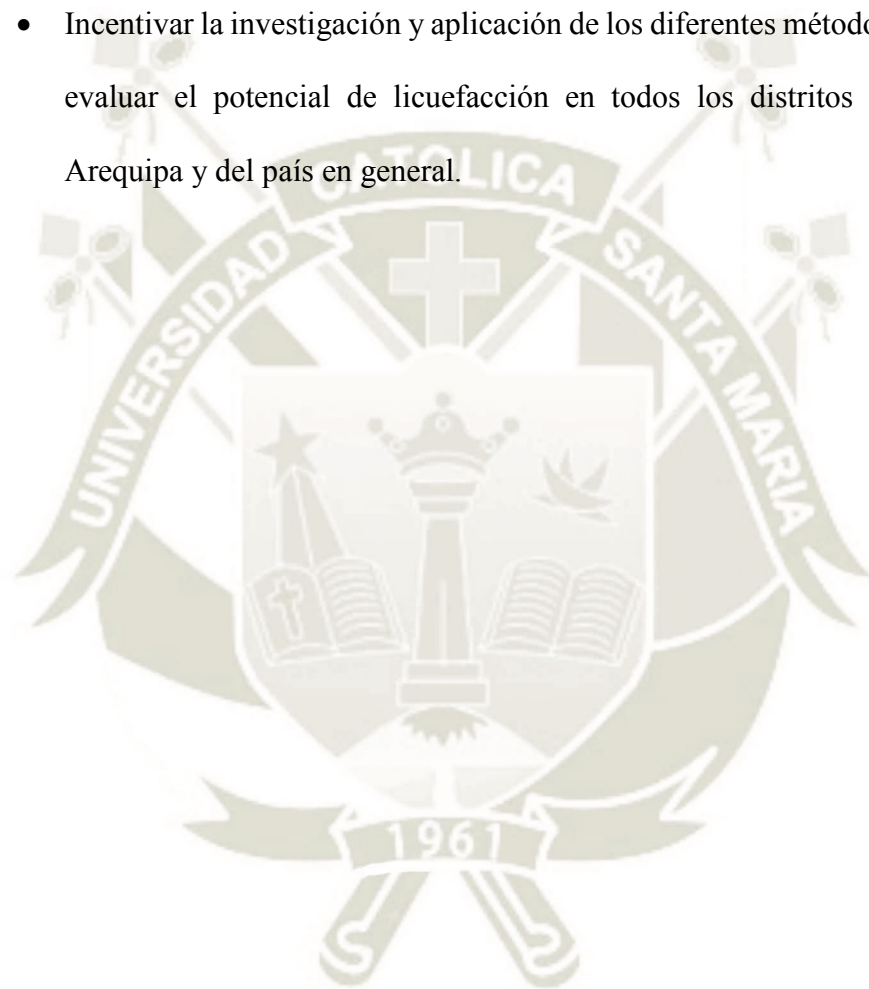
Objetivo General

Evaluar el potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado El Pasto perteneciente al distrito de Socabaya en la ciudad de Arequipa.

Objetivos Específicos

- Comprender el fenómeno de licuefacción de suelos cuando estos son sometidos a cargas sísmicas y cuantificarlo mediante la aplicación de la metodología probabilística propuesta en el año 2004. por Cetin y otros, siendo este método una actualización del método simplificado de Seed & Idriss propuesto en el año 1971 y que actualmente la norma técnica peruana E 050 usa como referencia para la evaluación del potencial de licuefacción.
- Exponer la metodología de Cetin y otros para evaluar la probabilidad de ocurrencia de licuefacción, sus semejanzas y diferencias con otros métodos y explicar el porqué de la selección de dicha metodología.
- Identificar las características geotécnicas del área de estudio como parte de una evaluación preliminar de la susceptibilidad de la zona al fenómeno de licuefacción.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo del C.P El Pasto mediante la realización de ensayos in situ y de ensayos de laboratorio.
- Medir la resistencia del suelo a la penetración en el C.P El Pasto usando el ensayo de campo de penetración estándar (SPT).
- Obtener una base de datos geotécnicos del C.P El Pasto que pueda ser utilizado como referente en el diseño sismo-resistente de futuras estructuras permitiendo reducir daños y/ o evitar el colapso de estas en caso de eventos sísmicos de mediana y alta intensidad.

- Evaluar la decisión del IMPLA (Instituto Municipal de Planeamiento) al realizar el cambio de uso del suelo del centro poblado El Pasto, pasando así de ser considerada una zona APSI (de Alto Peligro por Suelos Inestables) a una zona RDB (Residencial Densidad Baja) en la actual zonificación urbana del Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa.
- Incentivar la investigación y aplicación de los diferentes métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción en todos los distritos de la ciudad de Arequipa y del país en general.



Alcance

El estudio del fenómeno de licuefacción mediante ensayos de laboratorio presenta dos limitaciones principales, la primera es que, debido a la perturbación originada en el proceso de toma de muestras, las propiedades mecánicas de los suelos pueden verse afectadas, y la segunda es en cuanto a la limitación de los equipos utilizados ya que ninguno de ellos reproduce de manera fidedigna las condiciones de esfuerzo y de frontera a las que está sometido el suelo en el campo.

Es por estas razones que los métodos de predicción basados en ensayos in-situ son mucho más aconsejables. (Henríquez Pantaleón, 2007). Sin embargo, estos ensayos de campo suelen tener un costo significativo, además la caracterización en el laboratorio de las muestras obtenidas implica un costo adicional y un tiempo requerido para su ejecución, por lo que delimitar el área de estudio es primordial en este tipo de trabajos.

Esta investigación tiene como área de estudio la zona urbana del centro poblado El Pasto, es decir aquellos lotes que actualmente son o están destinados a ser viviendas. Este sector se encuentra ubicado en el distrito de Socabaya, en la ciudad de Arequipa.

El método que se utilizará para cuantificar el potencial de licuefacción es la metodología probabilística propuesta por Cetin y otros en el año 2004, que expresa el desencadenamiento del fenómeno por la probabilidad de licuefacción representada como P_L .

El método de predicción elegido para la presente investigación es uno basado en la resistencia a la penetración estándar (SPT), y que, dada la gran cantidad de datos estudiados con él, ha demostrado confiabilidad para este tipo de estudios.

Se incluye de igual manera el análisis de susceptibilidad a la licuefacción del área de estudio como análisis preliminar que debe realizarse antes de calcular numéricamente la probabilidad de licuefacción.

Metodología

Proceso

Fase 1: Selección del área de estudio.

Revisión bibliográfica preliminar.

Siendo los principales temas de investigación:

- El fenómeno de licuefacción y sus efectos.
- Antecedentes históricos a nivel internacional y a nivel local.
- Gestión de riesgos y mitigación de desastres.
- Geología, geomorfología y sismicidad de Arequipa.

Para identificar posibles áreas vulnerables se tomaron en cuenta principalmente dos criterios que influyen directamente en el fenómeno de licuefacción: (1) Presencia de nivel freático cercano a la superficie, (2) Características desfavorables del suelo.

Presentándose las condiciones anteriormente mencionadas en zonas pertenecientes a los siguientes distritos de la ciudad:

- Cerro Colorado
- Socabaya
- Sachaca
- Cercado

Visitas a municipalidades distritales.

Realizadas las visitas a las municipalidades de los cuatro distritos mencionados, en la Municipalidad Distrital de Socabaya se obtuvo el apoyo necesario para realizar el trabajo de investigación.

El director del área de Defensa Civil, el ingeniero Renzo Benavente, señaló una zona conocida como El Pasto, la cual presentaba continuos problemas; especialmente en época de lluvias, cuando el nivel freático se elevaba tanto que afloraba a la superficie ocasionando problemas en las vías, viviendas y causando malestar entre los pobladores.

Visitas de campo.

Se visitó el centro poblado El Pasto para conversar con los pobladores, quienes confirmaron la existencia de problemas por el agua subterránea, debido a su cercanía a la superficie. Indicaron además que para la construcción de sus viviendas dado el material “blando” de la zona, suelen tener problemas para realizar sus cimentaciones.

Investigación exploratoria.

Buscando verificar las condiciones del suelo, se decidió efectuar una calicata de 3 metros de profundidad (Ilustración 6a y 6b) encontrando el nivel freático en la zona a 0.78 m de profundidad (Ilustración 6c). Se tomaron muestras inalteradas y alteradas (Ilustración 6d) cada 0.50 m para realizar posteriormente los ensayos de granulometría (Ilustración 7) y de límite líquido y límite plástico (Ilustración 8) en el laboratorio de la Universidad Católica de Santa María.

Los resultados de la clasificación SUCS se muestran en la Tabla 1.

Muestra	Prof. (m)	Clasificación SUCS	Descripción
M-1	0.5	SM	Arena limosa
M-2	1	ML	Limo de baja plasticidad
M-3	1.5	SM	Arena limosa
M-4	2	SM	Arena limosa
M-5	2.5	SM	Arena limosa
M-6	3	SM	Arena limosa

Tabla 1 Resumen de clasificación SUCS de la investigación exploratoria. Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 6a) Calicata de exploración en el C. P. El Pasto b) Profundidad total de 3m c) Medición del nivel freático establecido en 0.78 m d) Toma de muestras. Fuente: Propia.



Ilustración 7 Granulometría por tamizado. Fuente: Propia



Ilustración 8 Ensayo de límite líquido y límite plástico. Fuente: Propia

Fase 2: Selección del ensayo de campo. Como se explicará con más detalle en los siguientes capítulos la evaluación de la resistencia del suelo a la licuefacción utilizando ensayos in situ es más precisa que la basada en ensayos de laboratorio.

Entre los ensayos de campo más comúnmente utilizados se tienen:

- Ensayo de penetración estándar, SPT
- Ensayo de penetración de cono, CPT
- Ensayos basados en medición de la velocidad de propagación de ondas de corte, V_s
- Ensayo de penetración Becker, BPT

Todos estos ensayos proveen resultados consistentes por lo que la elección depende de la disponibilidad de equipo, condiciones de sitio, costo y preferencia. (Workshop Participants, ed. (s) Youd, T. L.; Idriss, I. M., 1997).

Adicionalmente se tomó en cuenta las aplicaciones y limitaciones de estos ensayos expuestas en la Norma E 050 Suelos y Cimentaciones (Tabla 3) y la comparación entre los 4 ensayos realizada en el taller del NCCER (Tabla 2)

El ensayo de penetración estándar (SPT) se seleccionó como ensayo de campo para medir la resistencia del suelo a la licuefacción.

Características	Tipo de Ensayo			
	SPT	CPT	V_s	BPT
Número de ensayos realizados en sitios de licuefacción	Abundante	Abundante	Limitado	Escaso
Tipo de comportamiento esfuerzo-deformación influyente en el ensayo	Parcialmente drenado, grandes deformaciones	Drenado, grandes deformaciones	Pequeñas deformaciones	Parcialmente drenado, grandes deformaciones
Control de Calidad y Repetibilidad	Pobre a Bueno	Muy Bueno	Bueno	Pobre
Detección de la variabilidad de los depósitos de suelo	Bueno	Muy Bueno	Justo	Justo
Tipos de suelo donde se recomienda el ensayo	Sin gravas	Sin gravas	Todos	Gravas principalmente
El ensayo provee muestras de suelo	Sí	No	No	No
El ensayo mide propiedades índices o ingenieriles.	Índice	Índice	Ingenieriles	Índice

Tabla 2 Comparación de las ventajas y desventajas de varios ensayos de campo para la evaluación de la resistencia a la licuefacción del suelo (Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils., 1997).

Ensayos in-situ	Norma Aplicable	Aplicación Recomendada			Aplicación Restringida		Aplicación No Recomendada	
		Técnica de Investigación	Tipo de Suelo ⁽¹⁾	Parámetro para obtener ⁽²⁾	Técnica de Investigación	Tipo de Suelo ⁽¹⁾	Técnica de Investigación	Tipo de Suelo ⁽¹⁾
SPT	NTP 339.133 (ASTM D1586)	Perforación	SW, SP, SM, SC-SM	N	Perforación	CL, ML, SC, MH, CH	Calicata	Lo restante
DPSH	UNE 103801:1 994	Auscultación	SW, SP, SM, SC-SM	N ₂₀	Auscultación	CL, ML, SC, MH, CH	Calicata	Lo restante
Cono Tipo Peck	UNE 103801:1 994 ⁽⁴⁾	Auscultación	SW, SP, SM, SC-SM	C _n	Auscultación	CL, ML, SC, MH, CH	Calicata	Lo restante
CPT	NTP 339.148 (ASTM D3441)	Auscultación	Todos excepto gravas	q _c , f _c	Auscultación	-	Calicata	Gravas
DPL	NTP 339.159 (DIN 4094)	Auscultación	SP	n	Auscultación	SW, SM	Calicata	Lo restante
Veleta de Campo ⁽³⁾	NTP 339.155 (ASTM D2573)	Perforación / Calicata	CL, ML, CH, MH	C _u , St	-	-	-	Lo restante
	NTP 339.153 (ASTM D1194)	-	Suelos granulares y rocas blandas	Asentamiento vs. Presión	-	-	-	-

(1) Según Clasificación SUCS, cuando los ensayos son aplicables a suelos de doble simbología, ambos están incluidos.

(2) Leyenda:

Cu= Cohesión en condiciones no drenadas.

N= Número de golpes por cada 0,30 m de penetración en el ensayo estándar de penetración.

N 20 = Número de golpes por cada 0,20 m de penetración mediante auscultación con DPSH.

Cn = Número de golpes por cada 0,30 m de penetración mediante auscultación con Cono Tipo Peck.

n = Número de golpes por cada 0,10 m de penetración mediante auscultación con DPL.

q_c = Resistencia de punta del cono en unidades de presión

f_c = Fricción en el manguito

St = Sensitividad

(3) Sólo para suelos finos saturados, sin arenas ni gravas

Tabla 3 Aplicación y Limitaciones de los Ensayos de Campo. Fuente (Norma Técnica de Edificación E.050 Suelos y Cimentaciones, 2006).

Fase 3: Elección del método de evaluación del potencial de licuefacción. La información respecto a las metodologías existentes para la evaluación del potencial de licuefacción se obtuvo de fuentes primarias, incluyendo: libros, revistas científicas, actas de congresos, tesis doctorales y tesis de grado. Algunas de las bases de datos más utilizadas fueron Research Gate, Scielo, Geotechnica y Web Of Science.

La metodología elegida fue la propuesta por Cetin y otros (2004). El proceso de aplicación de este método se explica en la Ilustración 9.

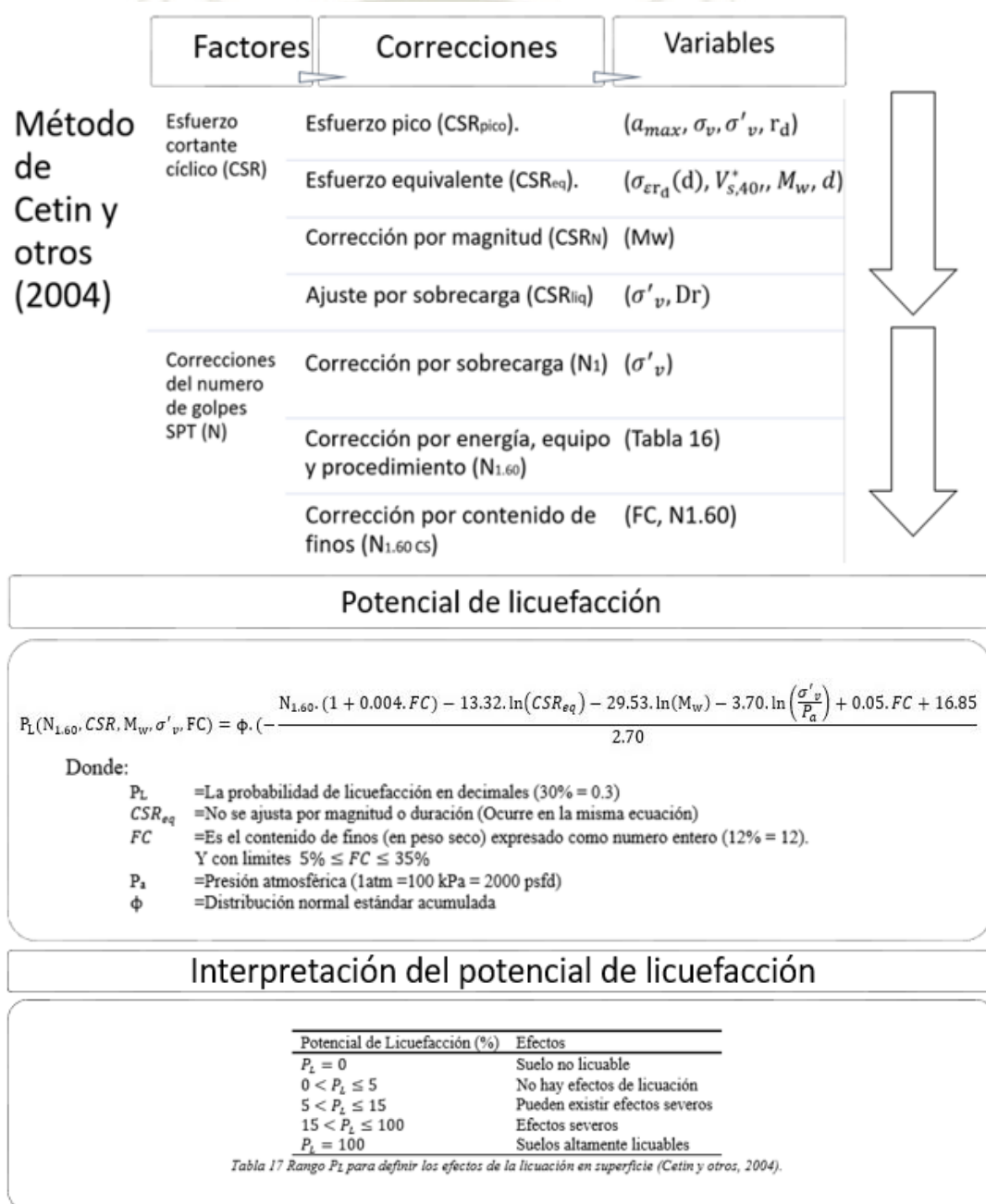


Ilustración 9 Diagrama del flujo del método Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Fase 4: Puntos de exploración.

Para la determinación del número de calicatas y sondajes SPT a realizar en la zona de estudio; se tomó de referencia la Tabla N°6: Número de puntos de investigación, de la norma técnica peruana de edificaciones E 050 Suelos y Cimentaciones. Seleccionándose el último criterio para el área de estudio como se muestra en la Tabla 4

TABLA N° 6 NÚMERO DE PUNTOS DE INVESTIGACION	
Tipo de edificación	Número de puntos de investigación (n)
A	1 cada 225 m ²
B	1 cada 450 m ²
C	1 cada 800 m ²
Urbanizaciones para Viviendas Unifamiliares de hasta 3 pisos	3 por cada Ha. de terreno habilitado

(n) nunca será menor de 3.

Tabla 4: Selección del número de puntos de investigación. Fuente (Norma Técnica de Edificación E.050 Suelos y Cimentaciones)

El C.P El Pasto abarca una extensión aproximada de 3.5 Ha de terreno habilitado (Plan Urbano Distrital de Socabaya 2009-2019) ,sin embargo y teniendo en cuenta primordialmente el aspecto económico, se plantearon un total de siete (07) puntos de investigación, cuatro (04) puntos para la ejecución de calicatas de 3 m de profundidad, permitiendo así una observación directa del terreno, y tres (03) puntos correspondientes al ensayo de penetración estándar, SPT con una profundidad de sondaje de 3 metros cada uno.

Se muestran las ubicaciones de las calicatas en la Ilustración 10 y en el plano U-02 adjunto en Anexos, así como las ubicaciones de los sondajes SPT en la Ilustración 11 y en el plano U-03 de Anexos.

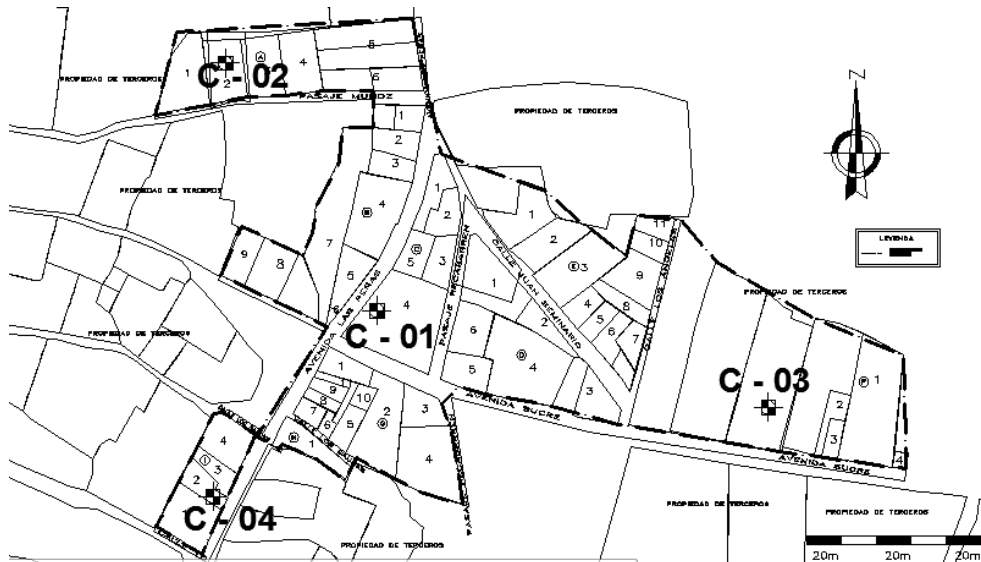


Ilustración 10. Ubicación de las calicatas en el centro poblado El Pasto. Fuente: Elaboración Propia.

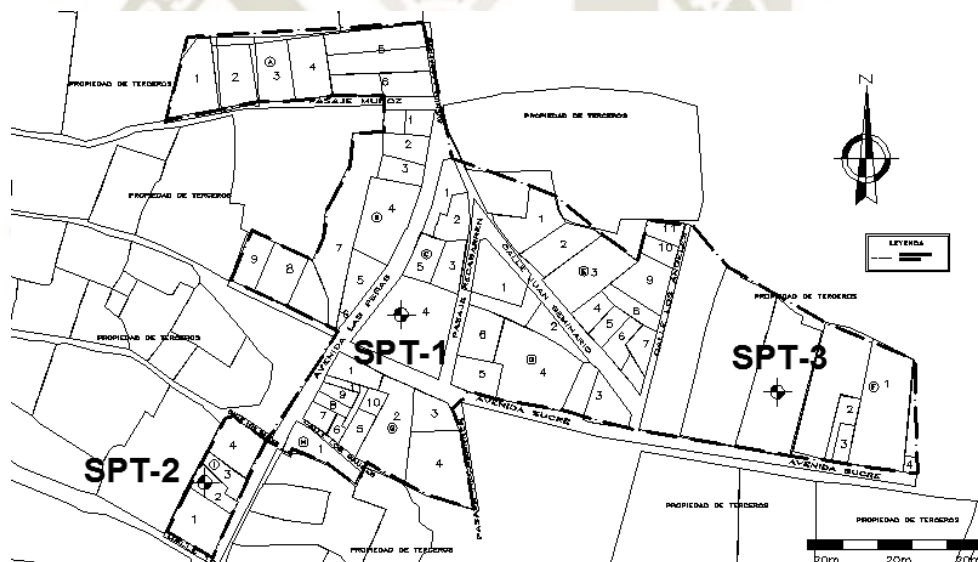


Ilustración 11 Ubicación de los sondajes SPT en el centro poblado El Pasto. Fuente: Elaboración propia.

Fase 5: Muestreo. El ensayo SPT además de medir la resistencia del suelo permite la obtención de muestras inalteradas. Se extrajeron muestras cada 50 cm haciendo un total de seis (06) muestras por sondaje. De la exploración mediante calicatas se extrajeron las muestras alteradas de aproximadamente 5 kg cada una cada 50 cm.

Fase 6: Ensayos de laboratorio. Según los parámetros necesarios para evaluar la susceptibilidad y para el cálculo de la probabilidad de licuefacción se realizaron los siguientes ensayos (Tabla 5) en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Santa María.

Ensayo	Norma aplicable
Análisis granulométrico	NTP. 339.128 (ASTM D422)
Contenido de humedad	NTP 339.127 (ASTM D2216)
Límite líquido y plástico	NTP 339.129 (ASTM D4318)
Peso específico (método de la parafina)	-
Gravedad Específica de Sólidos	NTP 339.131 (ASTM D854)
Clasificación unificada de suelos (SUCS)	NTP 339.134 (ASTM D2487)

Tabla 5 Ensayos aplicados. Fuente: Elaboración Propia.

Fase 7: Evaluación de los diferentes grados de susceptibilidad. Ordenados por su costo de aplicación, disponibilidad de información y grado de precisión propuestos por el comité técnico de ingeniería geotécnica sísmica, TC4, de la sociedad internacional para mecánica de suelos e ingeniería geotécnica (1999). Los parámetros, obtenidos por mediante revisión bibliográfica, ensayos in situ y de laboratorio, se evalúan siguiendo criterios propuestos por diferentes autores que evalúan la susceptibilidad del suelo ante la licuefacción. Los diferentes grados, criterios que componen cada uno de ellos y sus respectivos autores, se presentan en la Ilustración 12.

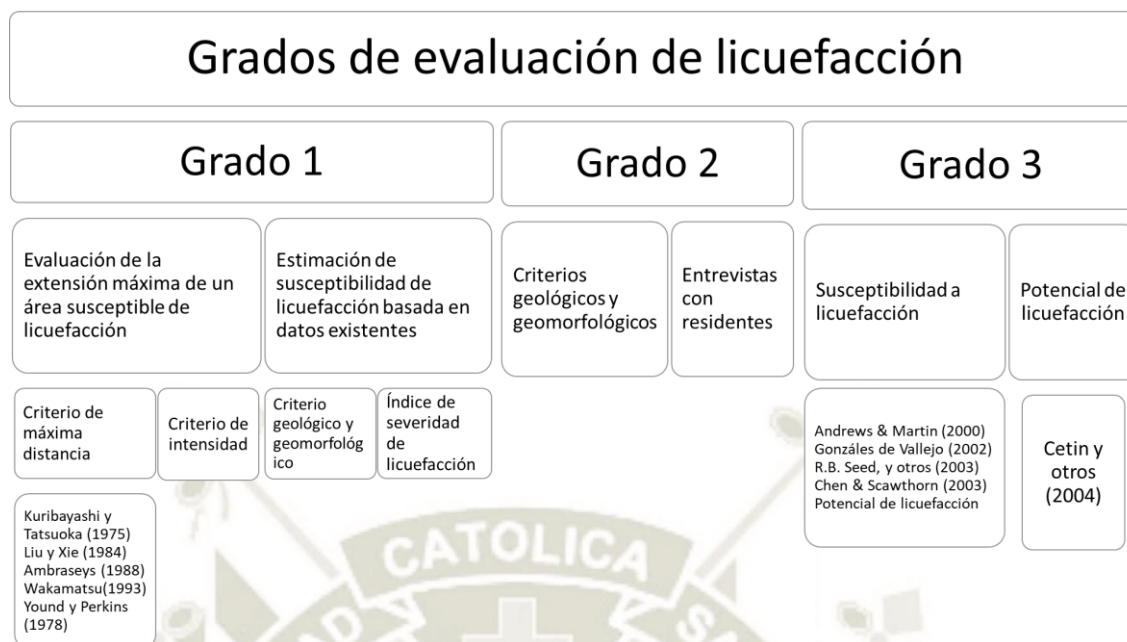


Ilustración 12 Clasificación de métodos por grados para la evaluación del potencial de licuefacción. Fuente: Elaboración propia.

Fase 8: Cálculo del potencial de licuefacción. Se evaluó la probabilidad de ocurrencia de licuefacción de cada uno de los estratos de suelo aplicando la metodología propuesta por Cetin y otros (2004).

Fase 9: Análisis de resultados. Corresponde a la interpretación de los valores obtenidos de la probabilidad de licuefacción y a la elaboración de cuadros que faciliten la comprensión de los resultados obtenidos de cada una de las muestras analizadas.

Resumen

El resumen de proceso se muestra en la Ilustración 13.

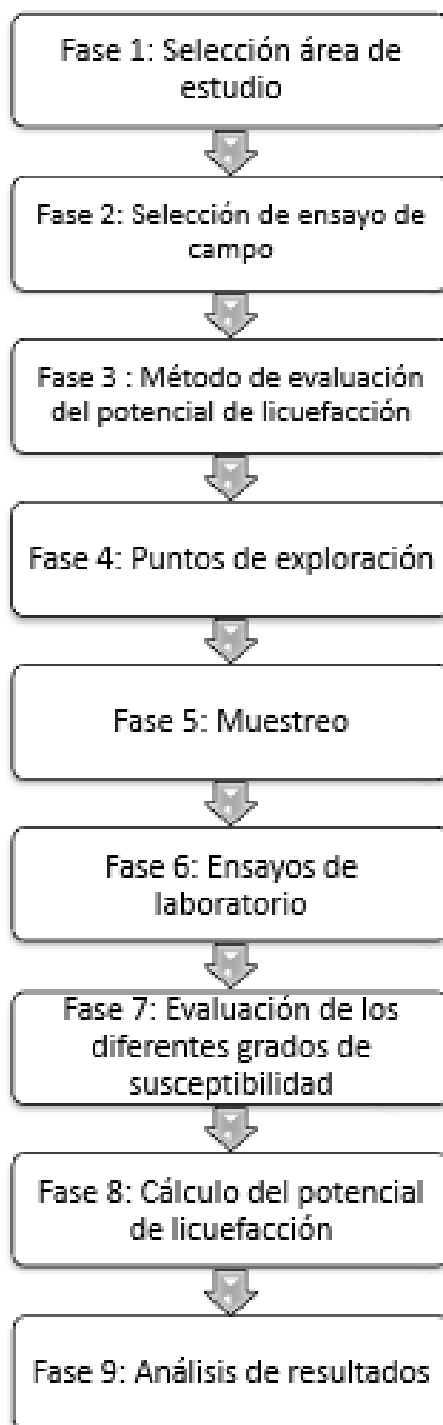


Ilustración 13 Proceso de la metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 2. PRECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Introducción

El distrito de Socabaya es uno de los 29 distritos que conforman la provincia de Arequipa, se encuentra bajo la administración del gobierno regional, en la región sur del Perú.

Cuenta con una superficie de 18.64 km² y alberga a una población de 59 671 habitantes (INEI, 2007).

Ubicación

El centro poblado El Pasto pertenece al distrito de Socabaya. Ubicado en la provincia y departamento de Arequipa, este distrito está situado al sur oeste de la ciudad a 12 km de distancia del centro histórico.

Como se puede apreciar en la Ilustración 14, los límites del distrito son:

- Por el norte: con el distrito de José Luis Bustamante y Rivero.
- Por el sur: con el distrito de Yarabamba.
- Por el este: con los distritos de Mollebaya, Characato y Sabandía.
- Por el oeste: con el distrito de Jacobo D. Hunter.

El centro poblado El Pasto está ubicado en la margen inferior del río Socabaya, al este de la zona conocida como La Mansión (Ilustración 15). Este sector está asentado en el cruce de dos avenidas principales:

- Av. Las Peñas.
- Av. Sucre.

Las coordenadas geográficas UTM sobre las que se extiende el centro poblado El Pasto son las siguientes:

- N 8 178 000 – 8 178 500.
- E 228 500 – 229 000.

El plano de ubicación y delimitación del área de estudio se adjuntan en Anexos.

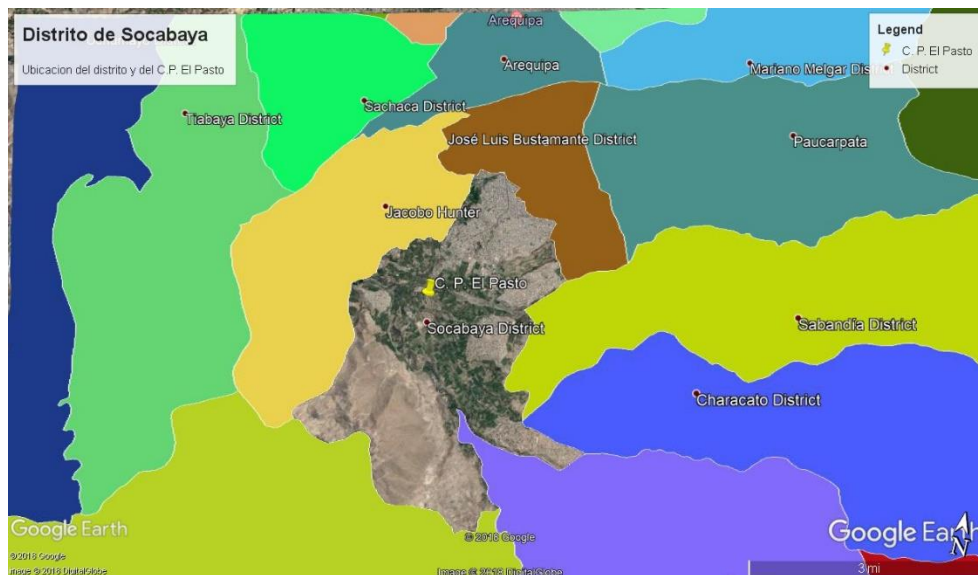


Ilustración 14 Ubicación del distrito de Socabaya. Fuente: Google Earth.

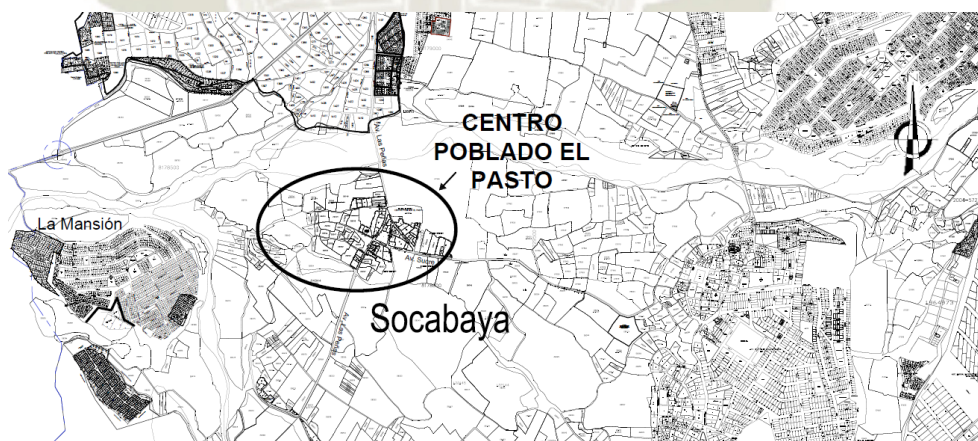


Ilustración 15 Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia en base al plano catastral de Arequipa.

Condiciones locales

En la actualidad es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio constituyen uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación ante eventos sísmicos de gran intensidad.

Este factor es fuertemente dependiente de las condiciones geológicas, geodinámicas, geotécnicas, sísmicas y geofísicas de las zonas en estudio y que en conjunto controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en superficie después de ocurrido un sismo.

Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica obtenida de observaciones de campo y de la toma de data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana. (Tavera H. , 2013).

Geomorfología

Características geomorfológicas locales.

Los terrenos que ocupa la ciudad de Arequipa presentan tres unidades geomorfológicas mayores:

- Cordillera de Laderas (GM-cL)
- Cadena del Barroso (DM-cB).
- Penillanura de Arequipa (GM-pA).

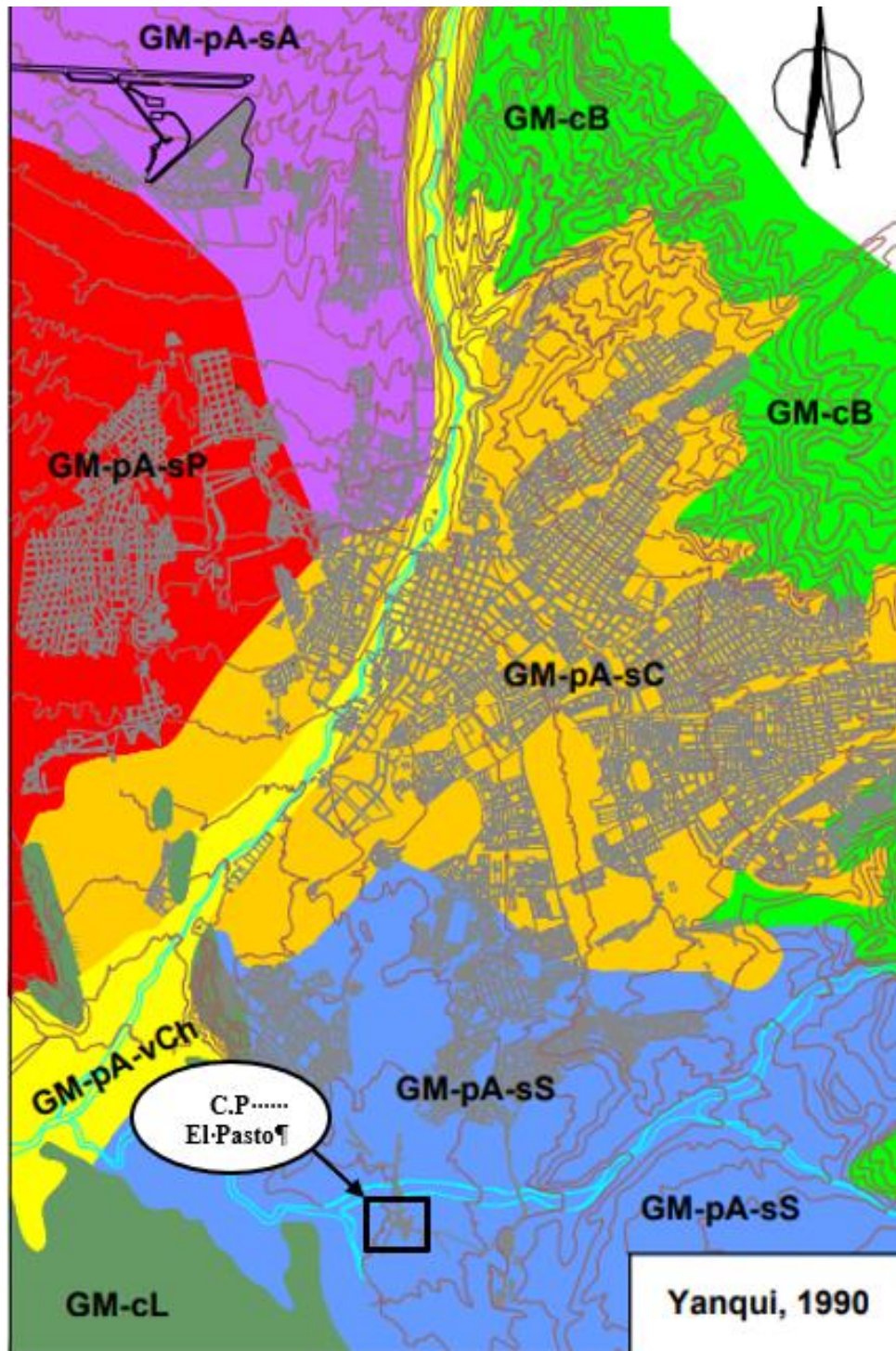
El distrito de Socabaya se encuentra en la Penillanura de Arequipa, esta tiene una superficie ligeramente plana, conformada por materiales tufáceos hacia el oeste y materiales detríticos hacia el este. (Aguilar, 1991)

La Penillanura de Arequipa está conformada por las siguientes subunidades:

- Valle del Chili (GM-pA-vCh).
- Superficie del Cercado (GM-pA-sC).
- Superficie de Socabaya (GM-pA-sS).
- Superficie de Pachacútec (GM-pA-sP).
- Superficie del Aeropuerto (GM-pA-sA).

Características geomorfológicas del centro poblado El Pasto.

Según el mapa geomorfológico de Arequipa (Ilustración 16) el C.P. El Pasto pertenece a la subunidad geomorfológica de la Superficie de Socabaya (GM-pA-sS), la cual se caracteriza por exhibir una textura suave y una tendencia casi horizontal, con abundancia de geoformas positivas suaves, tales como cerros y montes y por presentar en algunas de sus depresiones, un nivel freático que alcanza la superficie del terreno formando pequeños pantanos. (Yanqui C. , 1988).



LEYENDA

	GM-cL	Cordillera de Laderas		GM-pA-sP	Superficie de Pachacútec
	GM-cB	Cadena del Barroso		GM-pA-sA	Superficie del Aeropuerto
	GM-pA-vCh	Valle del Chili		GM-pA-sS	Superficie de Socabaya
	GM-pA-sC	Superficie del Cercado			

Ilustración 16 Mapa Geomorfológico de Arequipa, señalizando el área de estudio. Fuente (Yanqui C. , 1990).

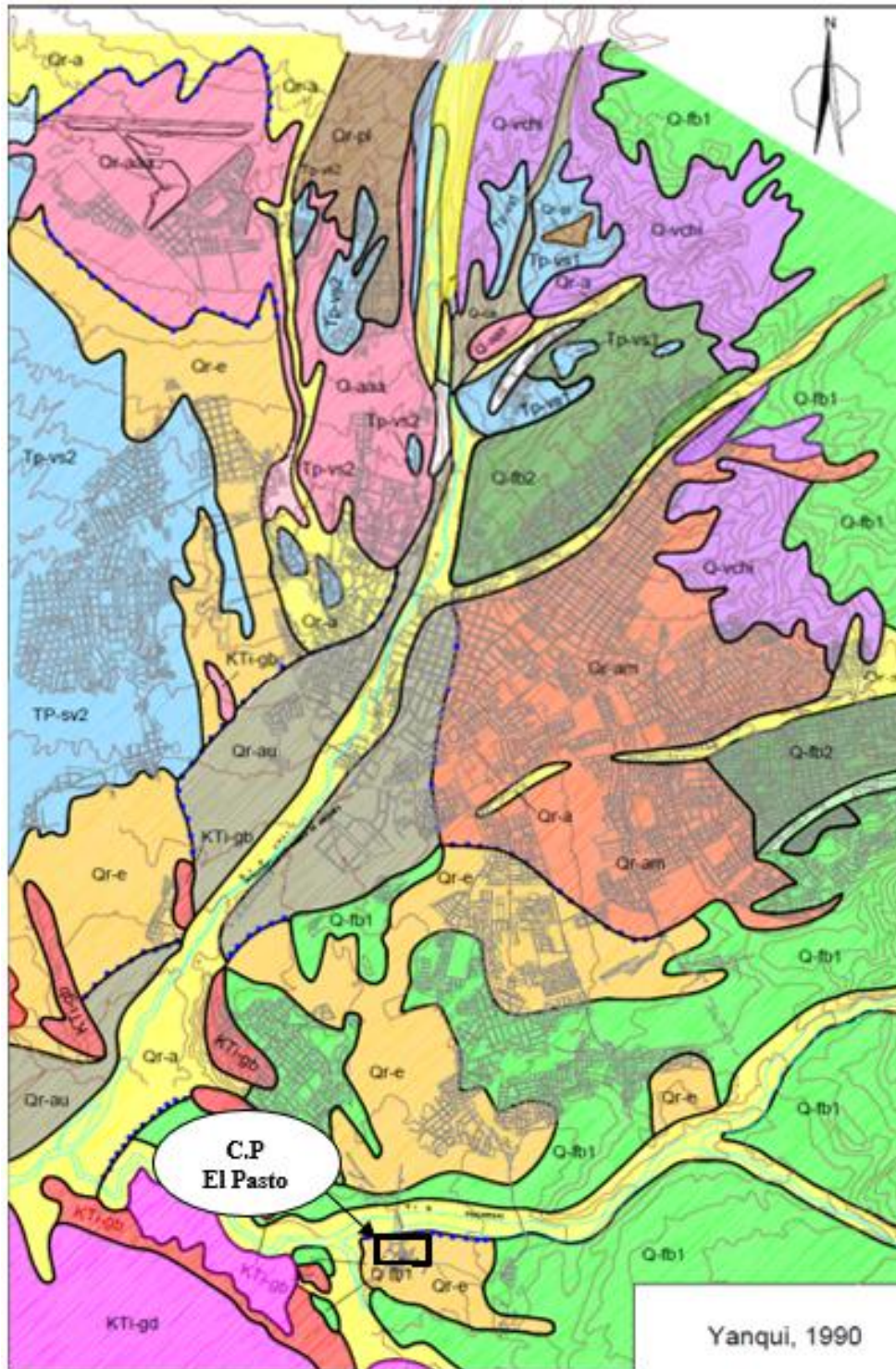
Geología

Características geológicas locales. En la geología de Arequipa se puede encontrar unidades litológicas de naturaleza ígnea, sedimentaria y metamórfica, cuyas edades comprenden desde el precambriano hasta el cuaternario reciente.

Aguilar (1991) distingue las siguientes unidades:

- Gneas Charcani (Pe-gn).
- Rocas Sedimentarias Mesozoicas.
- Rocas Ígneas de la Caldera. Comprenden el complejo gabrodiorítico (KTi-gbdi) y la granodiorita de Tiabaya (KTi-gd).
- Volcánico Sencca Compacto (sillar) (Tp-vse1).
- Volcánico Sencca Salmón (puzolana) (Tp-vse2).
- Formación Capillune. (Q-ca).
- Volcánico Chila (Q-vchi).
- Volcánico Barroso (Q-vba).
- Aluvial de Acequia Alta (Q-aaa).
- Flujo de Barro (brechoso) (Q-fb1).
- Flujo de Barro (rosáceo) (Q-fb2).
- Depósitos Piroclásticos (Qr-pi).
- Aluvial de Umacollo (Qr-au).
- Aluvial de Miraflores (Qr-am).
- Eluvial Reciente (Qr-e).
- Aluvial Reciente (Qr-a).

Se presenta en la Ilustración 17 el mapa geológico de la ciudad de Arequipa elaborado por (Yanqui C. , 1990) y en la Ilustración 18 la columna estratigráfica de Arequipa realizada por (Vargas, 1970).



LEYENDA

Qr-e Eluvial Reciente	Q-fb1 Flujo de Barro Brechoso	Tp-vs2 Volcánico Sencca 2
Qr-a Aluvial Reciente	Q-fb2 Flujo de Barro Rosáceo	Tp-vs1 Volcánico Sencca 1
Qr-am Aluvial Miraflores	Q-aaa Aluvial Acequia Alta	KTI-gd Granodiorita Tiabaya
Qr-au Aluvial Umacollo	Q-vchi Volcánico Chila	KTI-gb Gabrodiorita
Qr-pi Depósitos Piroclásticos	Q-ca Formación Capillune	

Ilustración 17 Mapa Geológico de la Ciudad de Arequipa. Fuente (Yanqui C. , 1990)

EDAD	UNIDAD Y DESCRIPCION	EROSOR	
Reciente	Depósitos eólicos y aluviales de gravas, limos, etc. Discordancia		
	Depósitos piroclásticos recientes.- Bancos de lapilli alternado con capas de arena. Discordancia		
Pleistoceno	Morrenas y Fluvioglaciares Discordancia		
	Flujos de barro.- Fragmentos y bloques angulares de origen volcánico, en matriz arenotufácea. Discordancia		
	B B A R R U R P O D S O	Volcánico Barrosos.- Andesitas gris oscuras porfídicas de grano grueso. Discordancia	2000 m.(?)
		Volcánico Chila.- Andesitas afaníticas gris oscuras, por intemperismo rojizas. Discordancia	+50 m.
		Conglomerado aluvial pleistocénico.- Rodados de intrusivos, gneis, cuarcitas y otras rocas. Discordancia erosional	
Plioceno	Volcánico Sencca.- Tufos de composición dacítica o riolítica Discordancia erosional	+150 m.	
	Formación Millo.- Conglomerado y areniscas tufáceas Discordancia	60 m.	
Terciario medio	Grupo Tacaza.- Derrames volcánicos, tufos y sedimentos en la parte inferior. Discordancia	800 m.	
Terciario inferior	Formación Sotillo.- Areniscas arcóicas y lutitas verdes que alternan con capas de yeso. Discordancia	250 m.	
	Formación Huanca.- Conglomerados y areniscas marrón rojizas. Discordancia Angular	1400 m.	
Senoniano inf. Turoniano	Formación Chilcane.- Yeso de color blanco con tintes rojizos y verdosos	100 m.(?)	
Coniciano Alciano	Formación Arcurquina.- Calizas gris claras. Presenta concreciones y lentes de chert.	668 m.	
Aptiano-Neoceno superior	Formación Murco.- Lutitas abigarradas y areniscas sacaroideas	300 m.	
Hauteriviano- Valanginiano	Miembro Hualhuani.- Cuarcitas blancas de grano fino a medio, en capas gruesas.	65 m.	
Berriasiano	G R U P O	Miembro Gramadal.- Bancos gruesos de calizas marrón claras y gris oscuras.	95 m.
Titoniano		Miembro Labra.- Areniscas, areniscas cuarcíticas gris claro a parduscas, lutitas y limolitas verde amarillentas a marrón violáceas.	1070 m.
Kimmerigdiano Oxfordiano	Y U R A	Miembro Cachíos.- Lutitas gris oscuras a negruscas.	603 m.
Oxfordiano Calloviano		Miembro Puente.- Areniscas cuarcíticas gris parduscas interstratificadas con lutitas oscuras en cantidades menores Discordancia erosional	600 m.
Toarciense sup. Bajociense med.	Formación Socosani.- Calizas y lutitas con intercalaciones de areniscas y de algunos volcánicos hacia la base. Discordancia erosional	270 m.	
Liásico	Volcánico Chocolate.- Derrames y brechas volcánicas de color rojo opaco y gris oscuro, con algunas intercalaciones sedimentarias. Discordancia angular	1000 m.(?)	
Paleozoico inf. Pre-cambriano.	Complejo Basal de la Costa.- Gneis y granito potásico antiguo	(?)	

Ilustración 18 Columna estratigráfica de la ciudad de Arequipa. Fuente (Vargas, 1970).

Características geológicas del centro poblado El Pasto. El distrito de Socabaya se extiende sobre 3 unidades litológicas:

- Aluvial Reciente (Qr-a), en el cauce del río Socabaya.
- Flujo de Barro (brechoso) (Q-fb1).
- Eluvial Reciente (Qr-e).

Según el mapa geológico de la ciudad (Ilustración 17), el C.P El Pasto pertenece a la unidad Eluvial Reciente (Qr-e), la cual posee un suelo residual formado por procesos naturales y antrópicos que puede describirse como una arena limosa de color beige, de aproximadamente un metro de espesor, separada de las unidades inferiores mediante una capa de toba de aproximadamente 15 cm de grosor. (Aguilar, 1991)

En cuanto a la edad del depósito de acuerdo con la columna estratigráfica (Ilustración 18) los suelos eluviales pertenecen a la edad reciente.

Geotecnia

Características geotécnicas locales. Aguilar (1991) , en base a los estudios anteriores sobre zonificación geotécnica de Orihuela (1981) y Yanqui, (1990) , y a una recopilación de estudios geotécnicos realizados por particulares en la ciudad, junto a un trabajo de campo propio; definió 10 unidades geotécnicas para Arequipa:

- Rocas Ígneas de la Caldera (G1-rpt).
- Volcánico Chila (G2-rvch).
- Volcánico Sencca Compacto (Sillar) (G3-si).
- Aluvial de Acequia Alta (G4-saa).
- Flujos de Barro (G5-fb).
- Volcánico Sencca Salmón (Puzolana) (G6-spp).
- Aluvial de Umacollo (G7-sau).
- Aluvial de Miraflores (G8-sam).

- Depósitos Piroclásticos (g9-stc).
- Eluvial Reciente (G10-ser).

El distrito de Socabaya se extiende principalmente sobre 2 unidades geotécnicas: Flujo de Barro (G5-fb) depósito que representa el 57.32% del área del distrito y suelo Eluvial Reciente (G10-ser), que representa el 32.96%, como se puede apreciar en el mapa geotécnico de Arequipa (Ilustración 19) (Plan Urbano Distrital de Socabaya 2009-2019).

Características geotécnicas del centro poblado El Pasto.

El suelo eluvial reciente (G10-ser) se extiende a ambos márgenes del río Socabaya, abarcando las zonas pantanosas de Lara, Bellapampa y el área en estudio El Pasto.

H. Núñez de Prado, E Farfán, H. Díaz, R. Kosaka (2001) señalan que, debido a la presencia de arenas finas de origen eólico, peligrosas en estado suelto, esta unidad presenta las condiciones más desfavorables para la cimentación.

En la Tabla 6 se presentan las características geotécnicas de esta unidad.

Características geotécnicas	Valor
Ángulo de Fricción último	29°-36°
Cohesión Efectiva	0 kg/cm ²
Peso unitario en seco	1.4 -1.7 gf/cm ³
Gravedad específica de sólidos	2.2 -2.7
Densidad Relativa	0 - 50 %
Conductividad Hidráulica	1.5 x 10 ⁻² - 11.6 x 10 ⁻² mm/s

Tabla 6 Características del suelo Eluvial Reciente (G10-ser). Fuente (Aguilar, 1991)

Aguilar (1991), señala que esta unidad presenta un nivel freático muy cercano a la superficie y que posee una capacidad portante igual a $q_{adm}=0.50 \text{ kgf/cm}^2$.

Para el cálculo de la capacidad portante Aguilar (1991), consideró la cimentación de una vivienda de interés social típica, de zapata corrida, con un ancho de 0.40 a 0.50 m. y emplazada entre 0.80 y 1.50 m. de profundidad.

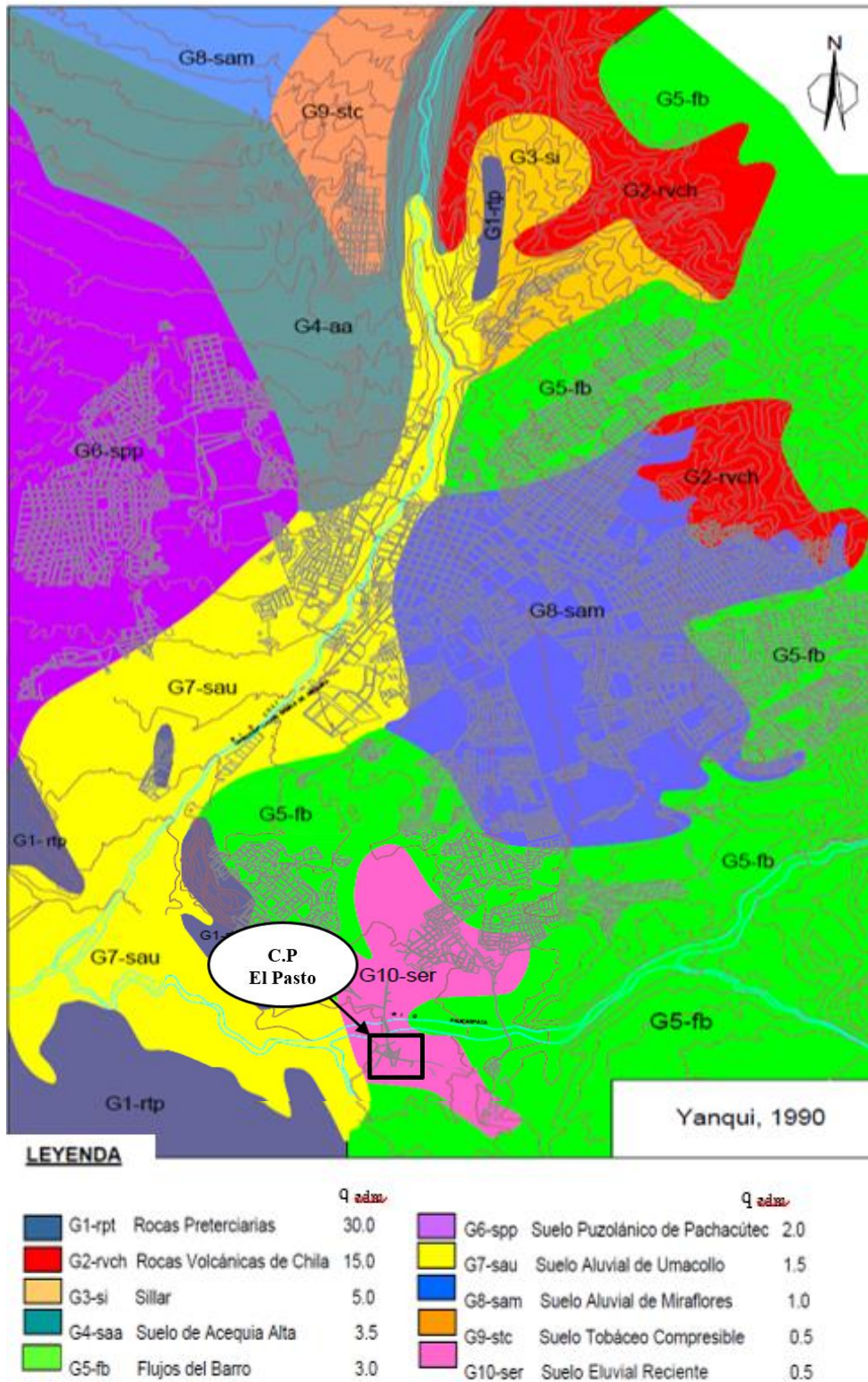


Ilustración 19 Mapa Geotécnico de Arequipa. Fuente (Yanqui C. , 1990)

Sismicidad

Microzonificación sísmica local. Aguilar (1991), de acuerdo tanto a los estudios e información geológica y geotécnica recopilada como a los ensayos de campo realizados para obtener las propiedades físicas, mecánicas y dinámicas del suelo, propone una zonificación sísmica de la ciudad de Arequipa, la cual distingue 4 zonas, como se muestra en el mapa de la Ilustración 20.

- Zona A.
- Zona B.
- Zona C.
- Zona D.

Microzonificación sísmica del centro poblado. El Pasto. El distrito de Socabaya se extiende predominantemente sobre la zona C y la zona D, siendo esta última sobre la cuál yacen los terrenos del área de estudio.

En esta parte de la ciudad, la zona D está conformada por suelos eluviales, donde el nivel freático se encuentra cercano a la superficie. Esta zona presenta condiciones geotécnicas desfavorables, encontrándose valores de capacidad portante de 0.50 kg/cm^2 .

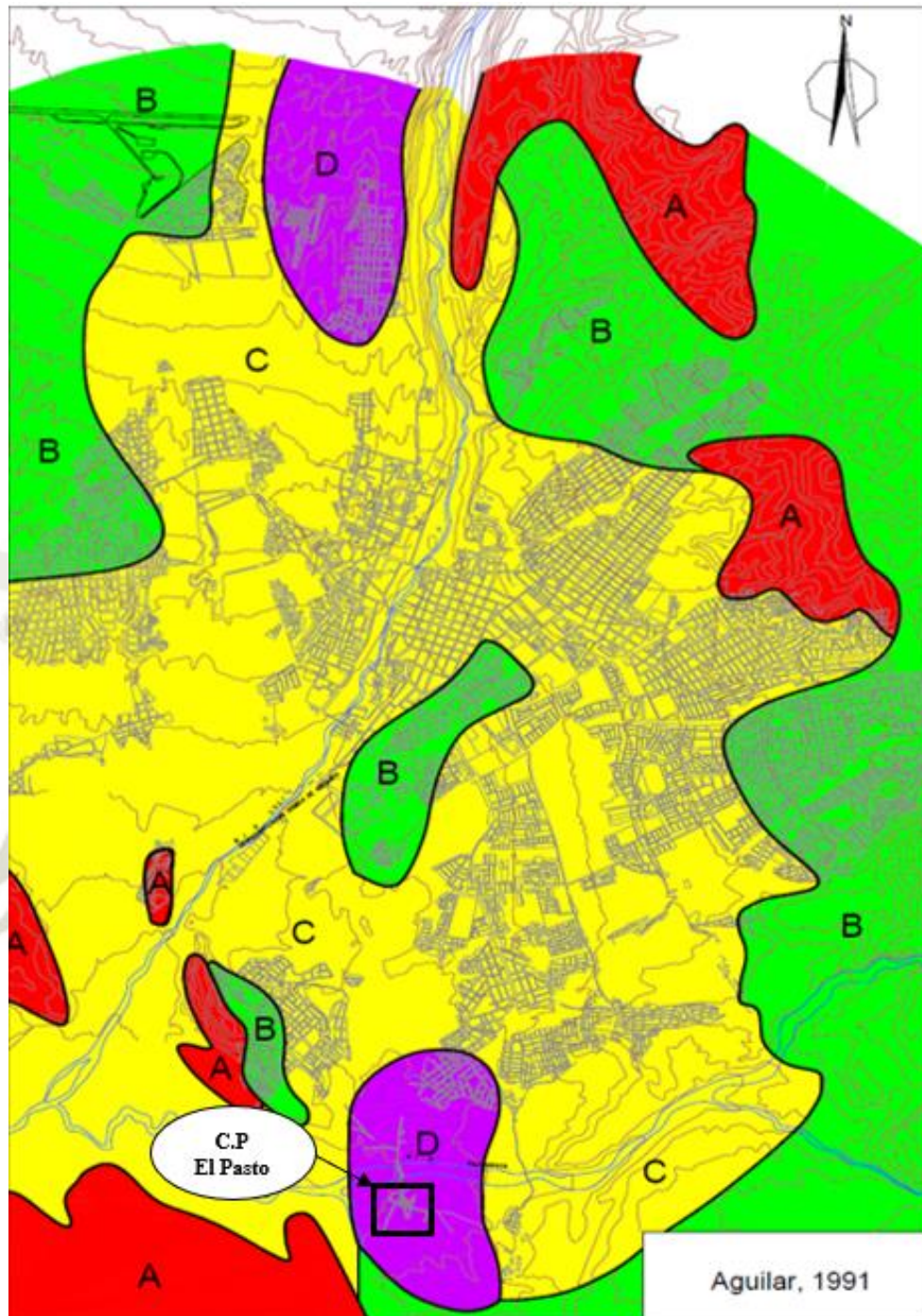
Los valores de períodos predominantes obtenidos en esta zona se encuentran en el rango de 0.30 a 0.45 s. (Aguilar, 1991).

Zonas de riesgo

Tomando en cuenta la potencialidad de riesgo sísmico que pueda inducir el suelo en las edificaciones, Núñez y otros (2001) proponen la siguiente zonificación para Arequipa:

- Zona de alto riesgo (color rojo).
- Zona de mediano riesgo (color naranja).
- Zona de moderado riesgo (color amarillo).
- Zona de bajo riesgo (color verde).

El mapa de la Ilustración 21, muestra que el distrito de Socabaya a ambas márgenes del río es una zona de alto riesgo, el centro poblado El Pasto se ubica dentro de esta zona.



LEYENDA

ZONA A		ZONA C	
ZONA B		ZONA D	

Ilustración 20 Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa (Aguilar, 1991).

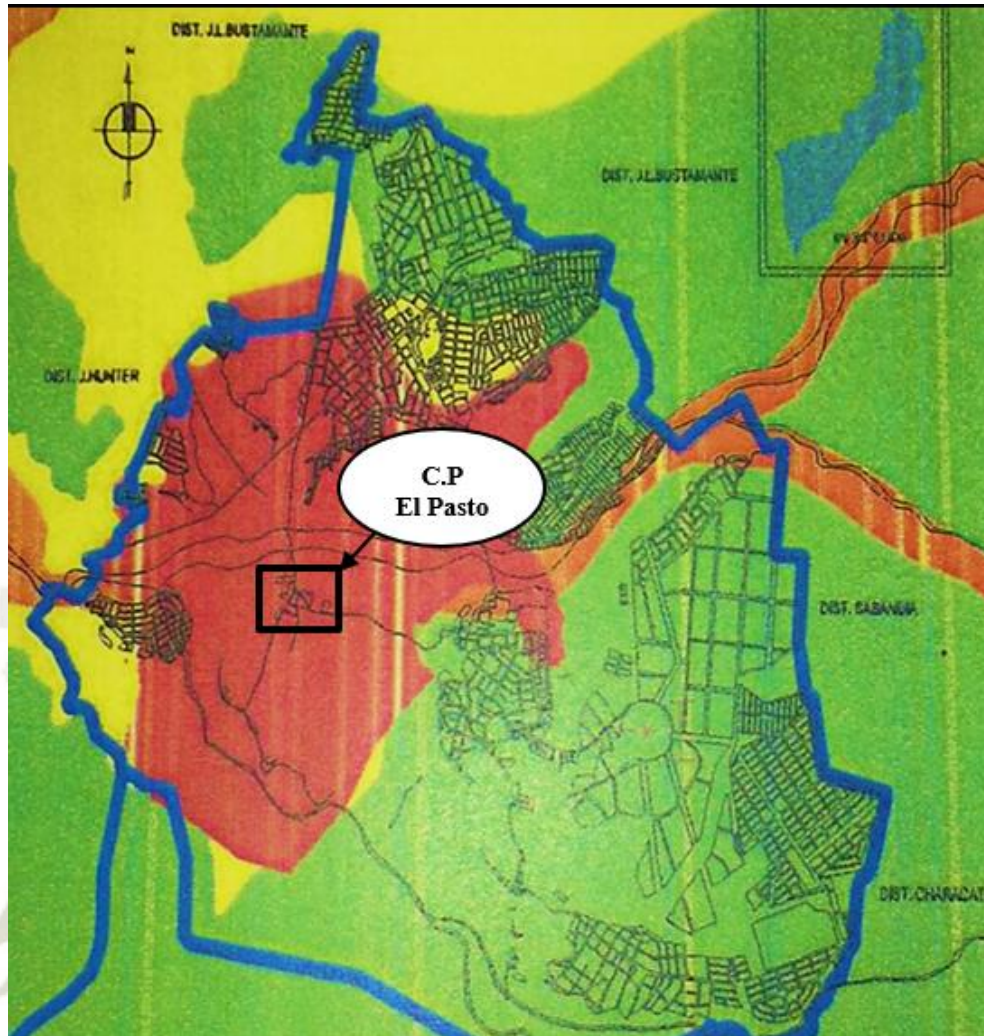


Ilustración 21 Mapa de riesgo sísmico del distrito de Socabaya. Fuente (H. Núñez de Prado, E Farfán, H. Díaz, R. Kosaka, 2001).

Aguas subterráneas

La perturbación hidrogeológica local más importante está dada por el río Chili ocasionando que el nivel freático en Socabaya coincida o esté muy cerca de la superficie del terreno en la línea limítrofe de la Cordillera de las Laderas, que comprende un tramo del río Socabaya y las zonas de Bellapampa, Huasacache, Las Peñas y el área en estudio, El Pasto.

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

Antecedentes internacionales y locales de licuefacción de suelos

Casos históricos fuera de Sudamérica.

Niigata, Japón (1964). En junio de 1964, a 60 km al norte de Niigata, tuvo lugar un terremoto de magnitud 7.5 en la escala de Richter que produjo daños muy graves causados por los efectos de licuefacción en arenas. (Parra, D., 2008).

Muchas estructuras se asentaron más de 50 cm, pero sin duda, el caso más espectacular fue el experimentado por el complejo de apartamentos en Kawagishi-cho.

Dicho complejo contaba con un total de 8 edificios, siendo el edificio No. 4 el que sufrió el daño más severo, inclinándose un ángulo de 80°. (Ishihara & Koga, 1981).

Según Parra (2008) a pesar de la excesiva inclinación, los edificios sufrieron poco daño estructural. (Ilustración 22).



Ilustración 22 Colapso de edificios de apartamentos en Kawagishi-cho (Cortesía de T. Mikumo).

Después del terremoto, una considerable cantidad de agua emergió del interior de la tierra, dejando numerosos volcanes de arena y fisuras en toda la superficie con se aprecia en la Ilustración 23a. (Ishihara & Koga, 1981). Casas y automóviles se hundieron; objetos

enterrados como tuberías y buzones emergieron a la superficie. (Ilustración 23 b) (Rodas, 2011)

Otro suceso importante fue el del puente de Showa, (Ilustración 23c) cuyo colapso se debió principalmente a la inestabilidad de sus columnas centrales, y al reducido soporte lateral del suelo licuado en su cimentación. (Bhattacharya, y otros, 2014)



Ilustración 23 a) Volcanes de arena y fisuras en el terreno. Fuente (Parra, D., 2008). b) Buzón flotante como resultado de la licuefacción después del terremoto en Niigata, Japón. Foto: D.B. Ballantyne. c) Falla del puente de Showa. Fuente: (Bhattacharya, y otros, 2014)

Alaska, EE. UU (1964). En la tarde del viernes 27 de marzo de 1964, uno de los terremotos más violentos de todos los tiempos sacudió el sur de Alaska. En minutos, miles de personas quedaron sin hogar, se perdieron 114 vidas y la economía de todo un estado se vio paralizada. (Grantz, Plafker, & Kachadoorian, 1964).

Este terremoto se caracterizó por su enorme destructividad, su larga duración y por la gran extensión de su zona de daños. Su magnitud fue calculada en 8.3-8.4 escala de Richter por el Servicio Costero y Geodésico de los Estados Unidos (USC&GS). Otros observatorios la calcularon en 8.4 (Observatorio de Pasadena) y 8.5-8.75 (Observatorio de Berkeley).

El epicentro se localizó en la cabecera de Prince William Sound, a unas 80 millas al sureste de Anchorage (Ilustración 24).



Ilustración 24 Geografía del sur y centro de Alaska, incluyendo los principales sitios involucrados en el terremoto de 1964 Fuente (Grantz, Plafker, & Kachadoorian, 1964).

El daño del terremoto fue causado principalmente por vibración sísmica, rotura del terreno, emisión de lodo o arena desde las grietas, sacudidas y deslizamientos de tierra, incendios, oleajes y cambios del nivel del terreno. (Grantz, Plafker, & Kachadoorian, 1964)

Entre los casos más resaltantes se puede mencionar el daño al ferrocarril de Alaska que se produjo a lo largo de las 150 millas de camino entre la terminal en Seward y Anchorage (Ilustración 25a) y los deslizamientos de tierra en Potter Hill los cuales causaron que secciones del terraplén y del carril del ferrocarril de Alaska, con una longitud total de 1.550 pies, fueran arrastradas (Ilustración 25b) (McCulloch & Bonilla, 1970).

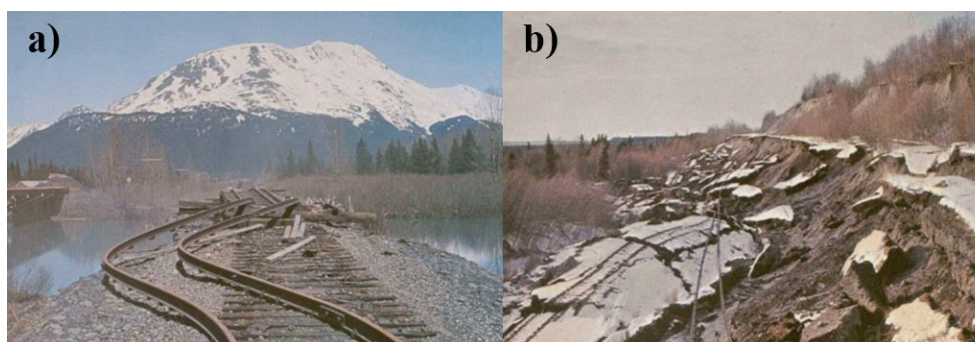


Ilustración 25 a) Los rieles en esta aproximación fueron arrancados y desplazados lateralmente por el movimiento de la ribera. b) Deslizamiento en Potter Hill. Fuente: (Grantz, Plafker, & Kachadoorian, 1964).

Loma Prieta, EE. UU (1989). Sismo ocurrido en la falla de San Andrés el 17 de octubre de 1989 con una magnitud de 7.1 en escala de Richter, la licuefacción de suelos ocasionó daños importantes en estructuras, tuberías enterradas e instalaciones marinas ubicadas en la Bahía, área donde se encuentran suelos arenosos, sueltos y saturados. En el área aparecieron numerosos volcanes de arena debido a la licuefacción (Ilustración 26). (Rodas, 2011), (Parra, D., 2008).



Ilustración 26 Volcanes de arena a lo largo del río Salinas y en la estación de aterrizaje marítima del aeropuerto de Oakland. Fuente (Parra, D., 2008)

Kobe, Japón (1995). El terremoto de Hanshin de 1995 ($M_s=6.9$), comúnmente llamado terremoto de Kobe fue uno de los más devastadores terremotos que golpearon a Japón dejando más de 5 500 muertos y otros 26 000 heridos. La pérdida económica se ha estimado cerca de los 200 billones de dólares. La proximidad del epicentro a la región altamente poblada explica la gran pérdida de vidas y el alto nivel de destrucción. (Johansson, 2000)

El colapso de la autopista Hanshin (Ilustración 27a) ilustra los efectos de las altas cargas inducidas por el terremoto. Los fuertes movimientos del terreno que llevaron al colapso de esta vía también causaron graves daños por licuefacción en las instalaciones portuarias y del muelle, como se puede observar en la Ilustración 27b e Ilustración 27c. (Johansson, 2000)



Ilustración 27 a) Colapso de los pilares de la autopista de Hanshin. b) Deslizamiento lateral y hundimiento del pavimento. Fuente: (Johansson, 2000) c) Inclinación del edificio debido a fallos del terreno por licuación Fuente. (Tupak, 2009)

Lefkada, Grecia (2003). El 14 de agosto de 2003, se produjo un fuerte terremoto ($M_w = 6.2$) en la costa de Lefkada cuyos efectos sismológicos más característicos de acuerdo con Papathanassiou, Pavlides, & Ganas (2005) fueron fallas de suelo típicas como caídas de rocas, licuefacción del suelo, grietas en la tierra y fallas en las pendientes.

En la playa de Pefkoulia, se observaron cráteres de arena cuyo diámetro oscilaba entre 1 y 3 metros, y su profundidad entre 0,4 y 2 metros, respectivamente (Ilustración 28).

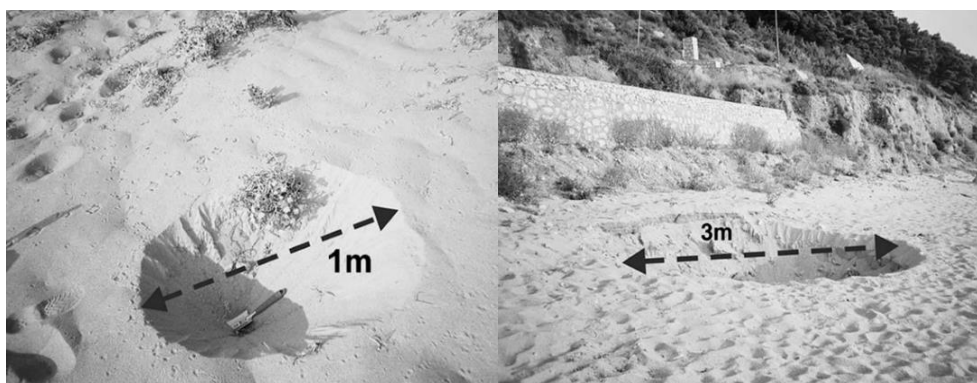


Ilustración 28: Cráteres de arena en la playa de Pefkoulia. Fotos: Papathanassiou

También se observó el pavimento de asfalto cubierto por una delgada capa arenolimsa proyectada desde las fisuras del suelo (Ilustración 29). La longitud de estas fisuras variaba desde unos pocos, hasta varias decenas de metros y su ancho desde unos pocos milímetros hasta 8 centímetros.



Ilustración 29 Licuefacción del terreno en la ciudad de Lefkada (A) eyección de limo arenoso desde las grietas del suelo, (B) roturas de suelo en la línea costera, (C) desplazamientos horizontales del pavimento y eyección de material limo arenoso. Fotos: Papathanassiou

Casos históricos en Sudamérica.

Chile (1960). Un 22 de mayo de 1960, ocurrieron varios asentamientos de zapatas aisladas, fallas en rampas de acceso a puentes y muros de contención. La mayoría de estas fallas se debieron a la licuefacción, ya que ocurrieron en zonas de suelos arenosos y saturados. En la Ilustración 30a y 30b se observa la licuefacción de suelos de relleno en la Costanera, el deslizamiento del terreno en el puerto (Ilustración 30c), así como, el hundimiento de una estatua por pérdida de la capacidad soporte. (Ilustración 30d) (Rodas, 2011).



Ilustración 30 Efectos de licuación en el terremoto de Chile. Fuente (Kurt Grassau por Parra 2008).

El Salvador (2003). El sismo del 13 de enero de 2003 con una magnitud de 7.6 grados de la escala de Richter causó varios daños, en especial en la costa del pacífico. (Ilustración 31) El terremoto se atribuyó al fenómeno de subducción de la placa del Caribe con la de Cocos. También se detectaron daños en la costa sur de Guatemala, a un costado de El Salvador; a pocos kilómetros de Las Lisas se detectó un afloramiento de arena, que se encontraba a cuatro metros por debajo de una capa de arcilla, este fenómeno se le atribuye a la licuefacción. (Rodas, 2011)



Ilustración 31 Las Lisas, fotos de las grietas debido al terremoto de EL Salvador Fotos: (Palma Ponce, 2003).

Casos históricos en Perú.

Arequipa (1582). Silgado (1978), basado en la obra de Barriga (1951), “Los Terremotos de Arequipa”, menciona un terremoto ocurrido el 22 de enero de 1582 que dejó en ruinas a la ciudad de Arequipa.

Cayeron alrededor de 300 casas y perecieron más de 35 personas. Se informó que los templos de San Francisco y La Merced, aunque no fueron derribados del todo, quedaron con serios maltratos.

En el Valle de Vítor y en toda la comarca hubo destrozos. Después del mismo toda la ciudad quedó anegada por la mucha agua que corrió por sus calles, fenómeno que se atribuye hoy al asentamiento de la capa freática. En la costa se sumergió un arroyo de agua que entraba al Puerto de Islay.

Pisco (1716). La Barbinais (1728) relata: "Como al cuarto de hora tembló de nuevo la tierra, que, abriéndose en algunos lugares, expelió chorros de polvo y agua con ruido pavoroso".

Piura (1857). Silgado (1978) indica un fuerte sismo en Piura que destruyó muchos edificios. Se abrió la tierra, de la cual emanaron aguas negras. Daños menores en el puerto de Paita. De acuerdo con Alva Hurtado (2011) la máxima intensidad de este sismo fue de 8 MM.

Moyobamba (1945). De acuerdo con Silgado (1946), se formaron grietas en la quebrada de Shango. Posteriormente, el temblor del día 8 produjo nuevas grietas vecinas a las primeras, una de ellas semicircular de 15 m. de diámetro y 4 cm. de separación, de las cuales emanaron aguas cargadas de limo durante dos días. Las grietas se presentaron también en los bordes de los barrancos en Tahuisco, cerca del río Mayo y en la quebrada Azungue. La máxima intensidad de este sismo fue de 7 MM (Alva Hurtado J. , 2011).

Cusco (1950). Silgado, Fernández-Concha, & Ericksen (1952) notaron en el lado sur del valle, al sureste del pueblo de San Sebastián, una zona de extensa fisuración. También observaron dos pequeñas fracturas en una zona pantanosa a 300 m. al sur de San Sebastián, de las cuales surgió agua y arena durante el terremoto.

Durante el movimiento sísmico estas fracturas y otras producidas a lo largo del cerro, vertieron chorros de agua que alcanzaron 1 a 2 m. de altura. El nivel de la capa freática se levantó en el lado sur del valle. Áreas que habían estado casi secas antes del terremoto, aparecieron cubiertas con 10 a 40 cm. de agua, semana y media después del sismo. Un claro indicativo del aumento del nivel freático fue el del pozo de la Hacienda San Antonio que subió a 1.80 m. por encima de su nivel normal después del terremoto.

Según Alva Hurtado (2011) la máxima intensidad de este sismo fue de 7 MM y su magnitud fue de Ms 6.0.

Arequipa (1958). Terremoto ocurrido en la ciudad de Arequipa Silgado (1978) indicó agrietamiento del terreno cerca de la zona de Camaná, con eyección de aguas negras. La máxima intensidad del sismo fue de 8 MM y su magnitud fue de Ms 7.0. de acuerdo con Alva Hurtado (2011).

Chimbote (1970). El 31 de mayo de 1970 se produjo a 25 km de la costa de Chimbote, un terremoto que se convertiría en uno de los casos mejor documentados de licuación de suelos en el Perú.

Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha (1970, pág. 15) indican que casi todos los pueblos y aldeas en el valle de Río Santa estaban construidas sobre materiales fluvio-glaciares no consolidados o semi-consolidados y sobre depósitos de flujo de escombros en los que el nivel freático generalmente se encontraba a menos de 5 metros bajo la superficie.

A su vez se señalaron como principales efectos superficiales del terreno: la fisuración, el hundimiento y el asentamiento diferencial ocurridos en áreas pantanosas donde la capa freática se encontraba cercana a la superficie (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).(Ilustración 32)



*Ilustración 32 Desmoronamiento y fisuración en un campo de regadío en el valle de río Santa, cerca de Yungay.
Fuente (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).*

El movimiento prácticamente horizontal de depósitos arenosos saturados, movilizados hacia las superficies libres ocurrido en estas zonas, se ha denominado como "esparcimiento" o "expansión lateral" para diferenciarlo del deslizamiento de tierra, el cual connota más bien a un movimiento descendente del terreno. (McCulloch & Bonilla, 1970, pág. 1)

Esta expansión lateral comúnmente acompañada de asentamientos y agrietamientos ocasionó daños notables a las estructuras de Chimbote. Entre los principales daños se reportaron los siguientes:

Puerto de Casma. Los depósitos deltaicos y de playa licuados se extendieron lateralmente hacia la costa produciendo grietas, de hasta 10 cm de ancho, que destrozaron una planta de harina de pescado, un muelle e instalaciones aledañas, a menos de 300 m de la costa (Ilustración 33) (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).

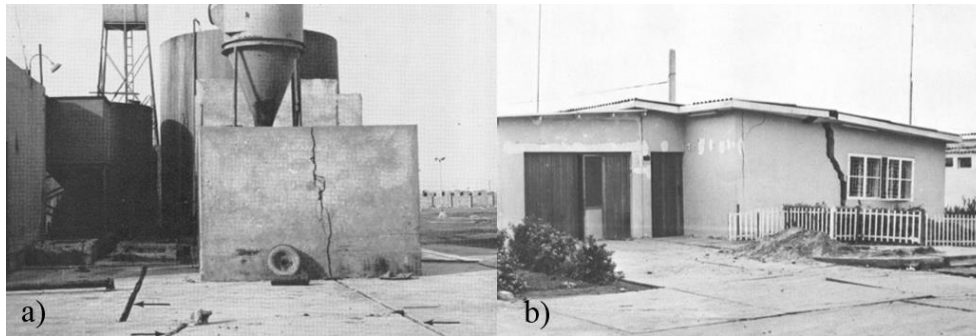


Ilustración 33 a) Parte de una planta de harina de pescado en puerto Casma severamente agrietada como resultado de la expansión lateral. Pudiéndose notar además el efecto de extensión en las losas de piso de concreto. b) Casa de concreto destrozada por licuefacción y flujo lateral de sedimentos de playa que constituían el material de fundación. Fuente (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970)

La compactación sísmica de los materiales saturados acompañada por la eyección de agua y la formación de volcanes de arena (Ilustración 34a), fue tal, que causó serias inundaciones, como por ejemplo la de un área residencial al este de Chimbote, que se extiende sobre un área de casi 1 kilómetro cuadrado, lugar donde extensos tramos de casas fueron inundados con agua, a profundidades de hasta 30 cm (Ilustración 34b) (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).

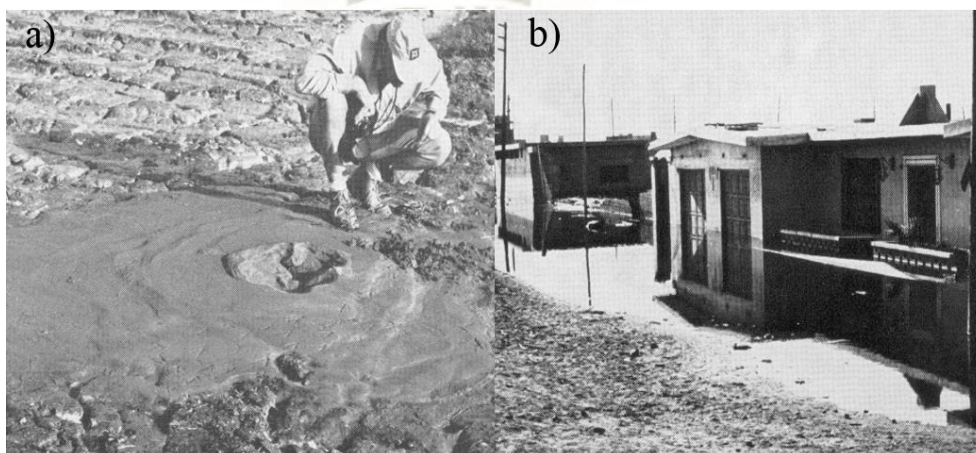


Ilustración 34 a) Cráter de arena en un campo cerca del río Casma. b) Inundación de un área residencial en el sureste de Chimbote donde el suelo se asentó sustancialmente debido a la compactación de sedimentos saturados de agua. Fuente (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).

Planta siderúrgica. Cerca del muelle de la planta siderúrgica, carreteras y un rompeolas resultaron dañados por una combinación de expansión lateral y asentamiento diferencial (Ilustración 35) (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).



Ilustración 35 Desmoronamiento y fisuración de la carretera cerca de la costa de la bahía en el oeste de Chimbote debido a la licuefacción y la expansión lateral de los sedimentos. Fuente (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).

Ferrocarril Chimbote-Huallaca. La expansión lateral del suelo saturado ocasionó un desplazamiento horizontal diferencial de los rieles, que estuvo acompañado por el hundimiento del terraplén del ferrocarril y por el asentamiento diferencial del mismo en los sedimentos subyacentes. Este asentamiento produjo ondulaciones de 30 a 60 cm de amplitud a lo largo de una distancia de 30 metros (Ilustración 36) (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).



Ilustración 36 Línea férrea de Chimbote-Huallaca dañada como resultado de la compactación diferencial y el desplazamiento lateral de sedimentos no consolidados saturados. Fuente (Ericksen, Plafker, & Fernández-Concha, 1970).

Finalmente, Plafker y otros (1970) concluyeron que se necesitan estudios detallados sobre la distribución de daños en la zona, ya que se observaron por ejemplo aldeas que quedaron destruidas casi en su totalidad, mientras que, otras aldeas cercanas, de construcción y cimientos geológicos aparentemente similares, sólo sufrieron daños moderados o no sufrieron daños.

Entre los posibles factores que expliquen estas notables variaciones mencionan: leves diferencias en la composición y/o el contenido de agua del material de fundación, pequeñas variaciones en la construcción y en el patrón de propagación de ondas sísmicas.

Arequipa (2001). El terremoto del 23 de junio del 2001 provocó la licuación del suelo en tres lugares de la ciudad de Arequipa: 1) Urbanización Semi Rural Pachacútec en el distrito de Cerro Colorado, 2). Anexo de Huaranguillo en el distrito de Sachaca, y 3). Urbanización Las Magnolias en el distrito de Socabaya.

En Pachacútec el efecto más importante fue el alabeamiento y colapso de los muros perimetrales. En Huaranguillo se produjo agrietamiento del terreno, (Ilustración 37a). y la aparición de ebullideros o cráteres de arena. (Yanqui C. , 2001)

En la urbanización Las Magnolias el impacto en el terreno y en las construcciones fue muy severo, presentándose agrietamiento del suelo, ebullición de agua con arena, levantamiento de buzones de desagüe, desplome de postes de luz, rotura y desnivelación de pisos, asentamiento de veredas y agrietamiento de las viviendas (Ilustración 37) (b, c)



Ilustración 37 a) Agrietamiento de la superficie del suelo. Huaranguillo, Sachaca. b) Grietas en el terreno Urb. Las Magnolias, Lara, Socabaya. c) Inclínación de muro. Urb. Las Magnolias, Lara, Socabaya. Fuente (Yanqui C. , 2001).

Fuera de la ciudad la zona de mayor evidencia de licuación ocurrió a lo largo del río Camaná y la franja costera entre Mejía y la Punta de Bombón. Así, en el cauce del río Camaná las numerosas evidencias de licuación afectaron el terraplén de la margen izquierda del río donde los volcanes de arena tuvieron diámetros de hasta 2 metros. En ocasiones, los volcanes de arena se organizaban en sucesiones de cráteres, alineados o no a lo largo de las grietas (Ilustración 38c) (Audemard, Gómez , & Quijano , 2002). También se midieron fracturas longitudinales a los bancos con eyección de arena de unos pocos metros de longitud. (Ilustración 38a)

Asimismo, se pudo constatar la ocurrencia de evidencias de licuación, específicamente en el sector de Cerrillos, donde se localizaron conos de arena formados posterior al tsunami ocurrido minutos después del sismo. (Ilustración 38b) (Gómez, Audemard, & Quijano, 2002)



Ilustración 38: a) Margen izquierdo del río Camaná donde se observaron fenómenos de expansión lateral y licuación de suelos arenosos b) Volcanes de arena por efecto de licuación de suelo. c) Volcanes de arena alineados en la vega del río Camaná. Fuente (Gómez, Audemard, & Quijano, 2002)

Pisco (2007). El 15 de agosto de 2007 un sismo de magnitud 8.0 (M_w , escala de momento) sacudió la región costera de Perú central causando severos daños a las ciudades de Pisco, Ica, Cañete y Chincha (Rodríguez-Marek, y otros, 2007).

El Instituto Geofísico del Perú reportó intensidades, en la escala modificada de Mercalli (MM), de 7 en las ciudades de Pisco, Chincha y Cañete, 5 a 6 en Lima, 6 en Cuzco, y 2 en Arequipa (Tavera, Bernal, & Salas, 2007).

Según Rodríguez-Marek, y otros (2007) este terremoto generó una amplia variedad de fallas del terreno por licuación entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

Desplazamiento lateral en Canchamaná. de un área aproximada de 1 km de ancho por 3 km de largo (Ilustración 39) con desplazamiento relativo vertical máximo de 3 metros (Ilustración 40).



Ilustración 39: Desplazamiento lateral del terreno asociado a la licuación en Canchamaná. Fuente: Google Earth



Ilustración 40 Desplazamiento vertical producto del desplazamiento lateral del terreno en Canchamaná. Fuente: (Rodríguez-Marek, y otros, 2007).

Desplazamiento en Jahuay de un talud de 400m de largo. formado por depósitos eólicos de arenas limosas, inducido por licuación en su base. La berma y el pavimento se levantaron aproximadamente 3 m (Ilustración 41a). Asimismo, se encontraron volcanes de arena en ambos lados de la carretera. (Ilustración 41b).

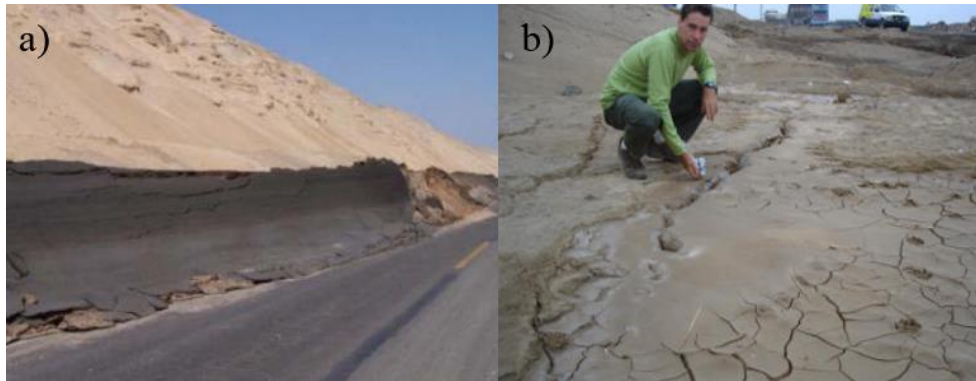


Ilustración 41 a) Daños en berma y pavimentos de la calzada norte de la carretera Panamericana. b) Volcanes de arena en la carretera Panamericana. Fuente (Rodríguez-Marek, y otros, 2007).

Asentamientos de hasta 0.90 m. en las viviendas de la calle Alfonso Ugarte, al noroeste de Tambo de Mora. Se puede apreciar la magnitud del asentamiento en la Ilustración 42.



Ilustración 42 Asentamiento de aproximadamente 0.90 m en Tambo de Mora. Fuente (Rodríguez-Marek, y otros, 2007).

Desplazamiento lateral en Las Lagunas. Complejo de casas de playa que fueron construidas alrededor de lagunas artificiales. Los bancos de estas lagunas eran taludes cubiertos de pasto. El desplazamiento lateral observado en estos taludes variaba desde unos

pocos centímetros, para las casas junto al océano, a casos que involucran hasta 3.9 metros de movimiento hacia las lagunas interiores (Ilustración 43).



*Ilustración 43 Desplazamientos laterales y fallas asociadas a licuefacción en el complejo Las Lagunas.
Fuente (Rodríguez-Marek, y otros, 2007).*

Definición del fenómeno de licuación de suelos

La licuefacción es una de las fallas más comunes del suelo causadas por terremotos. Los estratos de arena saturados son más susceptibles porque el suelo depende de la fricción entre sus partículas para obtener resistencia al corte y estabilidad. Braja M. Das (1993) explica que la destrucción de varios tipos de estructuras ocurre debido a la creación de fisuras, movimientos anormales y/o no uniformes, y pérdida de la rigidez del suelo. La pérdida de resistencia o rigidez del suelo resulta en el asentamiento de edificios, fallas en las presas de tierra, deslizamientos de tierra y otros peligros.

Una definición más técnica de la licuación de suelos es proporcionada por Sladen , D'Hollander, & Krahn (1985). La licuefacción es un fenómeno en el que una masa de suelo pierde un gran porcentaje de su resistencia al corte, cuando se somete a cargas monótonas, cíclicas o de choque, y fluye de forma similar a un líquido hasta que las tensiones de corte que actúan sobre la masa sean tan bajas como la resistencia de corte reducida.

La licuefacción se define como la transformación de un material granular de un estado sólido a uno licuado como consecuencia del aumento de la presión del agua intersticial y la reducción del esfuerzo efectivo (Marcuson, 1978).

Según Rauch (1997) en el uso común, la licuefacción se refiere a la pérdida de fuerza en suelos saturados y sin cohesión, debido a la acumulación de presión de agua intersticial durante la carga dinámica.

A su vez R.B. Seed, y otros (2003) definen el término licuación cíclica "clásica" como una pérdida significativa de resistencia y rigidez debido a la generación de presión de poro cíclica, en contraste con la "sensibilidad" o pérdida de fuerza debido a la cortante monótona y/o al reacomodo como resultado de un mayor desplazamiento unidireccional del cortante monótonos.

Asimismo, Youd & Idriss (2001) indican que la licuefacción se refiere a los fenómenos de generación sísmica de grandes presiones de agua intersticial y el consecuente ablandamiento de los suelos granulares.

González de Vallejo (2002) denomina fenómeno de licuación a la respuesta de aquellos suelos con un contenido predominante areno-limoso, que, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, provocan un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), hasta valores del orden de la presión total existente. En este caso la presión efectiva se anula prácticamente, con lo que los granos dejan de estar en contacto, la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como un líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos (en caso de taludes), o en grandes asentamientos.

Ante la diversidad de definiciones, se ha hecho notoria la repetición de los siguientes términos en la mayoría de los autores citados anteriormente:

- Pérdida de resistencia al corte.
- Carga cíclica.
- Aumento de la presión de agua intersticial.
- Ablandamiento de suelos.

Finalmente, se puede dar la siguiente definición al fenómeno de licuación de suelos: “Es un fenómeno que ocurre en suelos mayormente granulares, de mediana o baja densidad, donde la resistencia del suelo que se da principalmente por la fricción entre sus partículas se ve reducida, al no poder drenar el agua en su interior ante una carga cíclica (sismos, demoliciones, explosiones), dada la corta duración de esta. Presentándose así un aumento de la presión de agua intersticial y como consecuencia una reducción gradual de la resistencia al corte y capacidad portante del suelo. Produciéndose un ablandamiento y fluidificación del suelo que provoca movimientos anormales y deslizamientos de suelo”.

Factores que influyen en la susceptibilidad a la licuefacción

No todos los suelos presentan condiciones que propicien el fenómeno de licuefacción y para llevar a cabo investigaciones de sitio, con la finalidad de evaluar esta susceptibilidad a la licuefacción, se deben tomar en cuenta diversos factores o criterios, los cuáles se presentan a continuación:

Criterio Histórico

Estudios cronológicos de Wieczorek & Youd (1984) indican que la licuefacción ocurre frecuentemente en el mismo lugar cuando las condiciones de sitio, correspondientes al suelo y al agua subterránea, se han mantenido constantes. Por lo que la ocurrencia histórica de licuefacción puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad en un determinado lugar.

Criterios Geológicos

- **Origen del Suelo:**

El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse (Lara, 2013)

- **Edad del depósito:**

A cuanto más tiempo se somete un suelo a determinada presión de confinamiento, mayor será su resistencia a la licuefacción. A su vez suelos que ya han sido sometidos a eventos sísmicos, tienen mayor resistencia a la licuefacción comparados con especímenes recién formados con densidad idéntica (Day,

2012). En general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles a la licuefacción que los depósitos más antiguos. (Kramer & Stewart, 2004)

Criterios basados en la composición del suelo

La propuesta más general está asociada con depósitos que constan de arena fina a mediana y arenas que contienen finos de baja plasticidad. Muy ocasionalmente se reportan casos de licuefacción en suelos con grava (Ishihara K. , 1985).

La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuefacción.

- Gradación: Las arenas de gradación uniforme, limpias, y en general los suelos mal graduados compuestos principalmente de partículas redondeadas son más susceptibles a experimentar licuefacción, mientras que los suelos bien graduados y con partículas angulares son menos susceptibles. (Kramer & Stewart, 2004).

A diferencia de los suelos uniformes donde el suelo tiende a formar estructuras más inestables, un suelo bien graduado llena los vacíos entre partículas más grandes con partículas más pequeñas dando como resultado un menor potencial de cambio de volumen en condiciones de drenaje y, en consecuencia, un menor exceso de presión de poros que en suelos uniformes (Kramer S. , 1996).

- Forma de las partículas: Se sabe que los suelos con formas de partículas redondeadas se densifican más fácilmente que los suelos con granos angulares. Las partículas redondeadas se producen con frecuencia en los entornos fluviales y aluviales donde los suelos se encuentran saturados y depositados de forma suelta. En resumen, un suelo que contiene partículas redondeadas es más susceptible a la licuefacción que un suelo que contiene partículas angulares. (Kramer S. , 1996).

Criterios basados en el estado del suelo

- Densidad relativa: Según Day (2012) suelos sin cohesión en un estado de densidad relativa baja son susceptibles a la licuefacción. Cuanto menor es la presión de confinamiento, más susceptible es el suelo.
- Terzagui y Peck (1948) establecieron una clasificación de la compacidad de las arenas en base al número de golpes obtenido del ensayo de penetración estándar, la cual se muestra en la Tabla 7 y en el gráfico de la Ilustración 44.

N (para hundir 30 cm)	Densidad Relativa
< 4	Muy Suelta
4-10	Suelta
10-30	Medianamente Densa
30-50	Densa
> 50	Muy Densa

Tabla 7 Correlación entre el número de golpes N y la densidad relativa de las arenas. Fuente: (Terzagui & Peck, 1948)

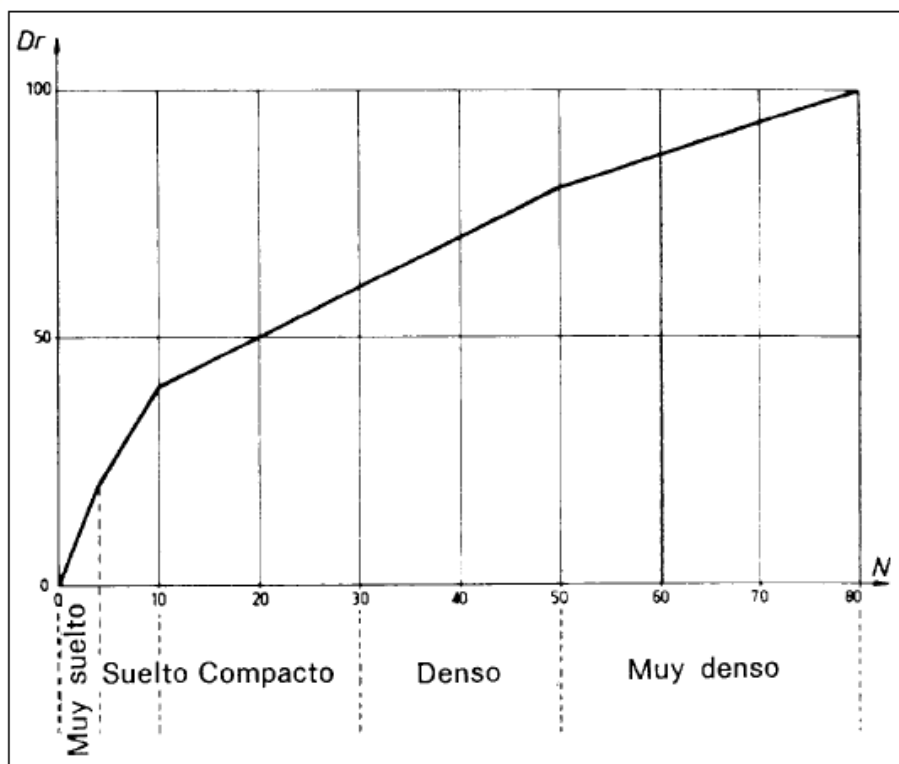


Ilustración 44 Relación entre la densidad relativa ($Dr\%$) y N . Fuente (Terzagui & Peck, 1948)

Posteriormente en 1986 Skempton modificó esta clasificación para tener en cuenta las correcciones al valor del número de golpes $N_{1,60}$ del ensayo de penetración estándar, obteniéndose así una correlación entre el valor $N_{1,60}$ y la densidad relativa del suelo, la cual se muestra en la Tabla 8.

$N_{1,60}$	Compacidad	Dr (%)
< 4	Muy Suelta	0-15
4-10	Suelta	15-35
10-30	Medianamente Densa	35-65
30-50	Densa	65-85
> 50	Muy Densa	85-100

Tabla 8: Clasificación de Terzagui y Peck (1948) modificada por Skempton (1986). Fuente (Skempton, 1986)

- Permeabilidad: Si la presión del exceso de agua intersticial puede disiparse rápidamente, el suelo puede no licuarse. Así, los desagües de grava altamente permeables o las capas de grava pueden reducir el potencial de licuefacción del suelo adyacente. (Day, 2012)

Esta condición guarda relación con la densidad relativa y la presión de confinamiento, siendo en la mayoría de los casos el estrato más profundo el que reúne las condiciones antigüedad, siendo afectos a una mayor presión de confinamiento, provocando una mayor densidad relativa. Por ello comúnmente se evalúa el potencial de licuefacción hasta un máximo de 15m, existiendo pocas excepciones.

- Sobrecarga del terreno: La construcción de un edificio pesado sobre un depósito de arena puede disminuir la resistencia a la licuación del suelo. La razón es que se requerirá una tensión de cizalladura adicional más pequeña del terremoto para provocar la contracción y, por lo tanto, la licuefacción del suelo (Day, 2012).

Condiciones de nivel freático

En la mayoría de los casos donde se ha observado licuefacción, el nivel freático se encontraba a poca profundidad, inferior a los 3 m. Por debajo de los 5 m, la susceptibilidad de licuefacción es muy baja (González de Vallejo, 2002). La condición más propicia para la licuefacción es un nivel freático cercano a la superficie. Los sitios donde el nivel de agua fluctúa, el potencial de licuefacción también fluctuará. En general, el nivel histórico más alto de agua subterránea se debe usar en el análisis de licuefacción. (Division of Mines and Geology, 1997).

El nivel estático de aguas es un factor imprescindible si se quiere evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, debido a que el fenómeno sólo ocurre en un ambiente saturado. Mientras más superficial sea el nivel estático de aguas mayor será la probabilidad que se desencadene el fenómeno ya que la presión de poro necesaria para igualar la tensión total aumenta con la profundidad. (Lara, 2013)

Tinsley y otros., (1985), propusieron rangos críticos de susceptibilidad a la licuefacción para niveles freáticos de 3, 10 y 15 metros, de profundidad asociándolos al mismo tiempo con la edad de los depósitos, como se puede observar en la Tabla 9

Edad del depósito suelo	Nivel freático (m)			
	0-3	3-10	10-15	>15
Holoceno				
Final	Muy Alto a Alto	Moderado	Poco	Muy Poco
Inicial	Alto	Moderado	Poco	Muy Poco
Pleistoceno				
Final	Poco	Poco	Muy Poco	Muy Poco
Medio e Inicial	Muy Poco	Muy Poco	Muy Poco	Muy Poco
Terciario y Pre-terciario	Muy Poco	Muy Poco	Muy Poco	Muy Poco

Tabla 9 Criterio de evaluación de la susceptibilidad de acuerdo al nivel freático. Fuente: Tinsley y otros (1985)

Criterios basados en la consistencia y plasticidad del suelo

Andrews & Martin (2000) reevaluaron una gran cantidad de casos de licuefacción (incluyendo la base de datos de Wang, 1979) y adaptaron las consideraciones del Criterio Chino Modificado (Wang, 1979) sobre el tamaño de partículas que define a las arcillas a las convenciones estadounidenses (donde el tamaño de partículas para una arcilla es menor a 0.002 mm). Estos criterios se resumen en la Tabla 10.

	Limite Liquido < 32	Limite Liquido ≥ 32
Contenido de arcillas < 10%	Susceptible	Puede ser susceptible (requiere pruebas adicionales)
Contenido de arcillas ≥ 10%	Puede ser susceptible (requiere pruebas adicionales)	No susceptible

Tabla 10 Criterio de licuefacción por granos finos. Fuente (Andrews & Martin, 2000).

R.B. Seed, y otros (2003) presentan un resumen de lo estudiado a la fecha sobre el proceso de delimitar un suelo licuable de otro: “Licuefactibilidad de suelos con contenido de finos significativo” (Ilustración 45). Este es un paso adelante, ya que extiende y corrige los criterios de los estudios previos de Wang (1979) y de Andrews & Martin (2000), donde el porcentaje de arcilla era un factor determinante en la susceptibilidad a la licuefacción.

Actualmente se ha demostrado que la contribución general de finos a la plasticidad del suelo es más relevante que el porcentaje de arcillas, ya que se han dado muchos casos de licuefacción donde este porcentaje ha sido mayor al 10 % o 15 % considerado en estos estudios.

Es importante destacar que estos criterios de susceptibilidad son aplicables para suelos con contenido de finos (pasantes del tamiz #200) significativo o suficiente para separar o llenar los vacíos entre las partículas gruesas (de tamaños mayores a 0.074 mm). Dicho porcentaje se ha establecido aproximadamente entre el 15% y 35% y depende principalmente de la gradación del suelo y del carácter de los finos (limos o arcillas).

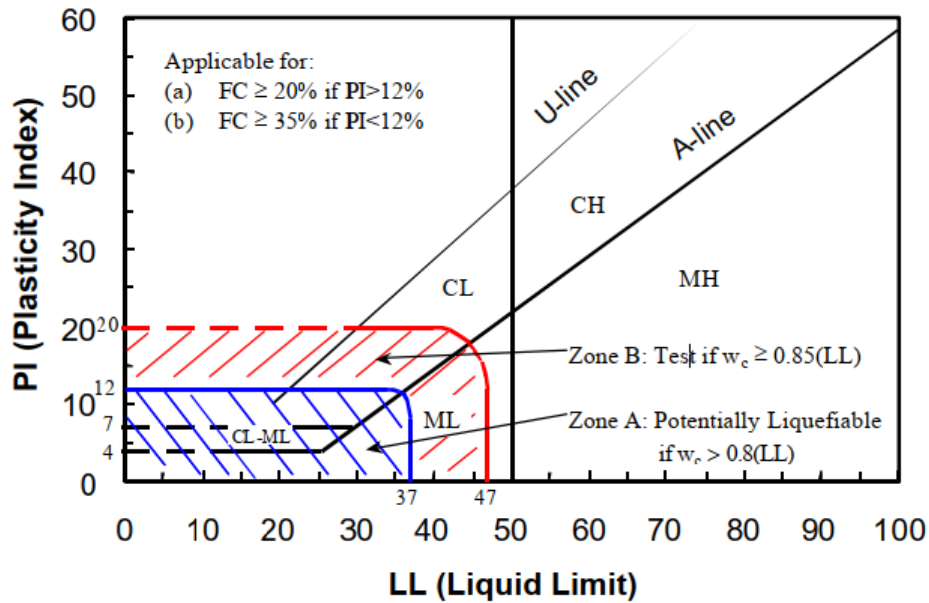


Ilustración 45 Susceptibilidad a la licuefacción de suelos con contenido de finos significativo. Fuente (R.B. Seed, y otros, 2003)

- Suelos dentro de la Zona A: Se consideran potencialmente susceptibles a la licuefacción "clásica" inducida cíclicamente. La baja plasticidad o los limos no plásticos y las arenas limosas ($IP \leq 12\%$, y $LL \leq 37\%$) y con alto contenido de agua en relación con su límite líquido ($w_c > 0.85 \cdot LL$) pueden estar entre los suelos más peligrosos de los licuables, ya que no sólo pueden licuarse cíclicamente; también "retienen bien el agua" y disipan el exceso de presión de poro lentamente debido a sus bajas permeabilidades (R.B. Seed, y otros, 2003).
- Suelos dentro de la Zona B: Pueden ser licuables, caen en un rango de transición, en algunos casos pueden ser susceptibles a la licuefacción (especialmente si $w_c > 0.85 \cdot LL$), pero tienden a ser más dúctiles y no suelen licuarse (R.B. Seed, y otros, 2003).
- Suelos dentro de la Zona C: generalmente no son susceptibles a la licuefacción cíclica "clásica", sin embargo, debe verificarse su posible sensibilidad de pérdida de resistencia con la remodelación o acumulación monotónica de deformación cortante (R.B. Seed, y otros, 2003).

Otros criterios

Algunos autores cuantificaban estas condiciones, como Chen & Scawthorn (2003) quien toma como referencia la densidad del suelo. El criterio de distinción dado por la densidad agrupa intrínsecamente la antigüedad del suelo, disposición, gradación y forma de partículas. Chen & Scawthorn (2003) da como reglas generales:

- Valores de penetración estándar corregidos en profundidad $(N_1)_{60} < 30$.
- Valores de resistencia a la penetración del cono normalizados corregidos en profundidad $q_{cIN} < 175$.
- Velocidad de onda de corte corregida por esfuerzo $V_{S1} < 230$ m/s.

Por su parte González de Vallejo (2002) propone de manera más amplia las propiedades que caracterizan a los suelos licuefactibles. Siendo estas las siguientes son las siguientes:

- Grado de saturación de 100 %.
- Diámetro medio D_{50} entre 0.05 y 1.0 mm.
- Coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10} < 15$.
- Contenido de finos inferior al 10%.
- Bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades menores a 10 m y $N < 20$ para profundidades mayores a 10 m.

Reforzando la postura de varios investigadores con respecto a que se requiere más investigación en este campo, se mencionan algunos casos de licuefacción de suelos fuera de los límites de riesgo antes vistos:

Ishihara (1985) describe el caso de relaves derivados de la industria minera que estaban compuestos esencialmente por rocas trituradas y que se clasificaron como harina de roca. Afirmando que en un estado saturado de agua no posee cohesión significativa y se

comporta como si fuera una arena limpia. Estos relaves mostraron una baja resistencia a la licuefacción como arena limpia.

En otro ejemplo, se ha demostrado claramente que una arena arcillosa (SC) al sudeste de EE. UU. es potencialmente susceptible a la licuación cíclica, a pesar de tener un contenido de arcilla del orden del 15%, y un índice de plasticidad de hasta 30% (Day, 2012).

Por ello aún el juicio de un ingeniero con experiencia puede determinar la necesidad de estudio en una zona donde teóricamente no hay riesgo de licuefacción, citando a (R.B. Seed, y otros, 2003) “Se deben anticipar excepciones, y el juicio continuará siendo necesario para evaluar si los suelos específicos son potencialmente licuables”.

Criterios de sollicitación sísmica

Al igual que en punto anterior, los investigadores no han llegado a una certeza. (R.B. Seed, y otros, 2003), “es difícil evaluar rigurosamente cuantitativamente los niveles de carga sísmica necesarios para activar la licuefacción [...] en la actualidad”.

González de Vallejo (2002) indica que terremotos de magnitud igual o superior a una magnitud momento de unos 5.5 Mw, con aceleraciones superiores o iguales a 0.2 g. en cuyo radio de afección se encuentra un suelo potencialmente susceptible, puede llegar a desencadenar el fenómeno de licuefacción.

Así mismo Ishihara (1985) de manera más conservadora sugiere que valores de aceleración máxima del terreno aproximadamente de 0,10 g y una magnitud local de unos 5 Ml son suficientes para que se inicie el fenómeno.

El potencial de licuefacción aumenta a medida que aumenta la intensidad del terremoto y la duración de la sacudida. Aquellos terremotos que tengan la magnitud más alta producirán tanto la aceleración del suelo más grande como la duración más larga de la sacudida del suelo (Chen & Scawthorn, 2003). La Tabla 11 nos proporciona un panorama aproximado de la relación entre magnitud y aceleración.

La magnitud, así como la aceleración y el tiempo de duración, son características de un evento sísmico que afectan directamente el potencial de licuefacción. Estas a su vez dependen de varios factores, como su ubicación, eventualidad y medio de propagación, generando un marco de incertidumbre.

Si bien, son parámetros generales, Ayala (2010) indica que, en el sismo de Pisco, su condición de corta duración no permitió la disipación de la presión de poros en el suelo granular, provocando una condición prácticamente no drenada. Generando por tanto una condición de esfuerzo efectivo nulo, lo cual ocasiono la licuación de suelos.

Magnitud Local M_L	Típica aceleración máxima de terreno, cerca de la falla	Típica duración de movimiento, cerca de la falla	Mercalli Modificada, cerca de la falla
<2	-	-	I-II
3	-	-	III
4	-	-	IV-V
5	0.09g	2 s	VI-VII
6	0.22g	12 s	VII-VIII
7	0.37g	24 s	IX-X
>8	>0.5g	>34 s	XI-XII

Tabla 11 Correlaciones aproximadas entre magnitud, aceleración y duración de un sismo. Fuente (Yeats, 1997).

Con la finalidad de complementar el accionar tectónico, otras condiciones pueden causar licuefacción, como voladuras subsuperficiales, conducción de pilotes y vibraciones del tráfico ferroviario (Chen & Scawthorn, 2003).

Iniciación del fenómeno de licuefacción

La licuefacción no necesariamente se producirá ante cierto evento sísmico sólo por el hecho de que el suelo sea susceptible a la licuefacción., comprender la situación, requiere la identificación del estado del suelo cuando la licuefacción es desatada (Kramer S. , 1996).

Lara (2013) explica que existen diferentes interpretaciones. Sin embargo, una manera simple de describir el proceso es como se detalla a continuación:

- **Definición simple de suelo:** Consiste en un grupo de partículas individuales, cada una de ellas en contacto con las otras circundantes. Las partículas de alrededor se apoyan entre si produciendo fuerzas de contacto que las hacen trabajar como un conjunto, proporcionando resistencia y estabilidad.
- **Definición simple de vulnerabilidad:** Cuando se tiene un grupo de partículas de suelo no cohesivo, suelto y saturado, y se le aplica una carga violenta, suficiente, se genera una ruptura de su estructura anteriormente descrita. Al producirse esto, las partículas se mueven libremente buscando la manera de reacomodarse y formar estructuras más densas. (Lara, 2013)
- **Durante el sismo:** La aplicación de carga es rápida y espontanea, no da tiempo a que la estructura se reacomode, ni que libere la presión acumulada en los poros. Lo que provoca el incremento en la presión del agua, reduciendo la fricción entre sus partículas, produciendo ablandamiento y pérdida de resistencia de los suelos.
- **Licuefacción propiamente dicha:** La fuerza de contacto ente partículas se vuelve mínima debido sobre todo a la presión de agua. En casos puntuales, la presión de poros es tan elevada que las partículas se ven separadas y comienzan a moverse sin ningún impedimento, asemejándose más al movimiento de un líquido viscoso que al de un sólido. (Lara, 2013)

Antes de un evento sísmico, la presión de agua es relativamente baja. Al ocurrir un sismo, la presión de agua puede ser tan grande, como para ocasionar que las partículas se muevan libremente, para posteriormente reacomodarse de manera más estable. (Ilustración 46).

LICUEFACCION DE SUELOS

La licuefacción es un fenómeno en el que las capas arenosas saturadas de agua actúan como líquidos debido a la presión creada por los terremotos.

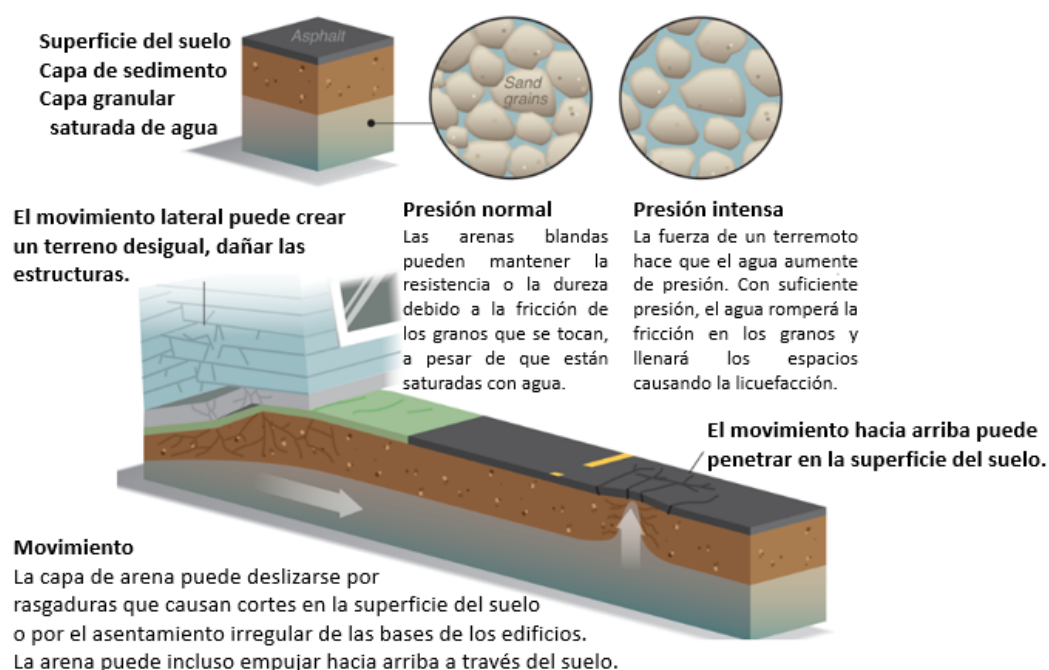


Ilustración 46 Licuefacción de suelos Fuente (Brian Cragin).

Fallas asociadas con la licuefacción de suelos

Desarrollo de volcanes de arena

La presión de poros excesiva inducida sísmicamente se dispara predominantemente por el flujo ascendente de agua intersticial (Kramer S. , 1996). A su vez se produce una pérdida secundaria de tierra como resultado de la erosión de partículas de suelo transportadas por el agua que escapa a través de grietas y fisuras, dejando al suelo en un estado susceptible a la licuefacción ante un futuro sismo. (R.B. Seed, y otros, 2003).

Estos volcanes o cráteres pueden producirse en la superficie del suelo, o en enterrados accesibles (sótanos, alcantarillas), ubicándose a menudo en las grietas o fisuras de este. (Day, 2012).

Son de poca importancia para la ingeniería en sí mismos, pero son indicadores útiles de una alta generación de exceso de presión de poros (Kramer S. , 1996). Según R.B. Seed y otros (2003) son imposibles de predecir. La mejor manera de evitarlos es con una cimentación continua lateral para poder pasar encima de hundimientos localizados (Ilustración 47), otra solución sería emplear cimentaciones profundas.

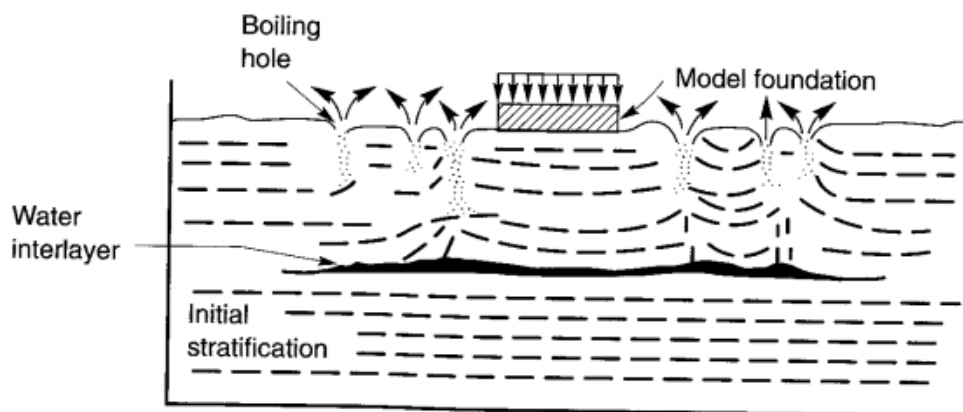


Ilustración 47 Formación de capas intermedias de agua en pruebas de mesa de sacudimiento de Liu y Qiao (1984).

Asentamientos

La tendencia de las arenas a densificarse cuando son sometidas a sismos está muy bien documentada. La densificación subsuperficial se manifiesta en la superficie del suelo en forma de asentamientos como se muestra en la Ilustración 48 (Kramer S. , 1996).

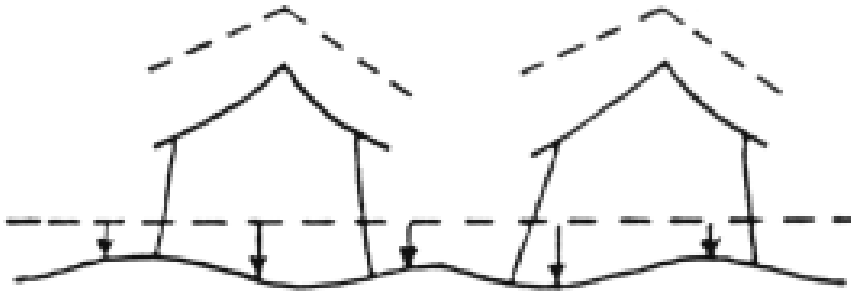


Ilustración 48 Pérdida de suelo debido a la densificación cíclica. Fuente (R.B. Seed, y otros, 2003)

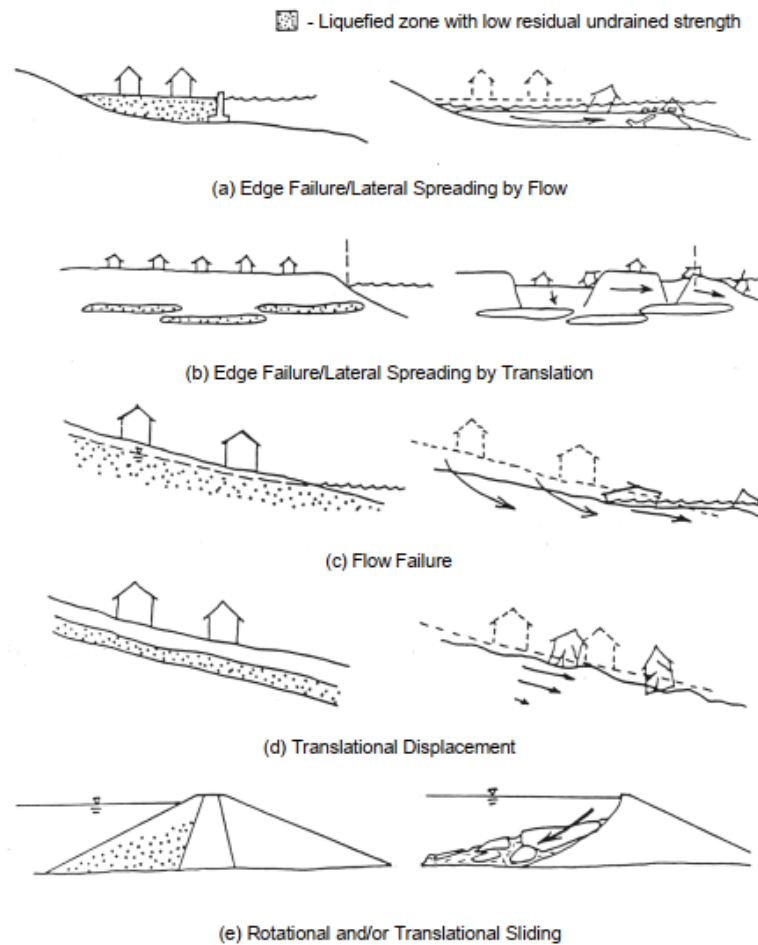
La densificación cíclica de suelos no saturados se completa generalmente al final de un sismo, con respecto a la re-consolidación volumétrica de suelos licuados o parcialmente licuados, ésta requiere más tiempo a medida que las presiones de poro inducidas por el terremoto desaparecen (R.B. Seed, y otros, 2003). El tiempo requerido para que ocurra este asentamiento depende de la permeabilidad, de la compresibilidad del suelo, y de la longitud del camino de drenaje, pudiendo variar desde unos pocos minutos hasta aproximadamente un día (Kramer S. , 1996).

Fallas de flujo

Las fallas de flujo en suelos sueltos y contractivos inducidas por licuefacción (Ilustración 49), ocurren cuando la resistencia de corte requerida para mantener el equilibrio estático es mayor que el esfuerzo contante de un suelo licuado inducido por la gravedad, resultando en deformaciones muy grandes.

La mayoría de las deformaciones, en estos casos, generalmente ocurren después de que cesó el sismo fuerte, de modo que las fuerzas de inercia cíclicas no son muy importantes

para "impulsar" las deformaciones, aunque son muy importantes para "activar" el ablandamiento inducido por licuefacción. (R.B. Seed, y otros, 2003).



*Ilustración 49 Ejemplos esquemáticos de inestabilidad global del sitio inducida por licuefacción.
Fuente (R.B. Seed, y otros, 2003).*

Fallas de deformación

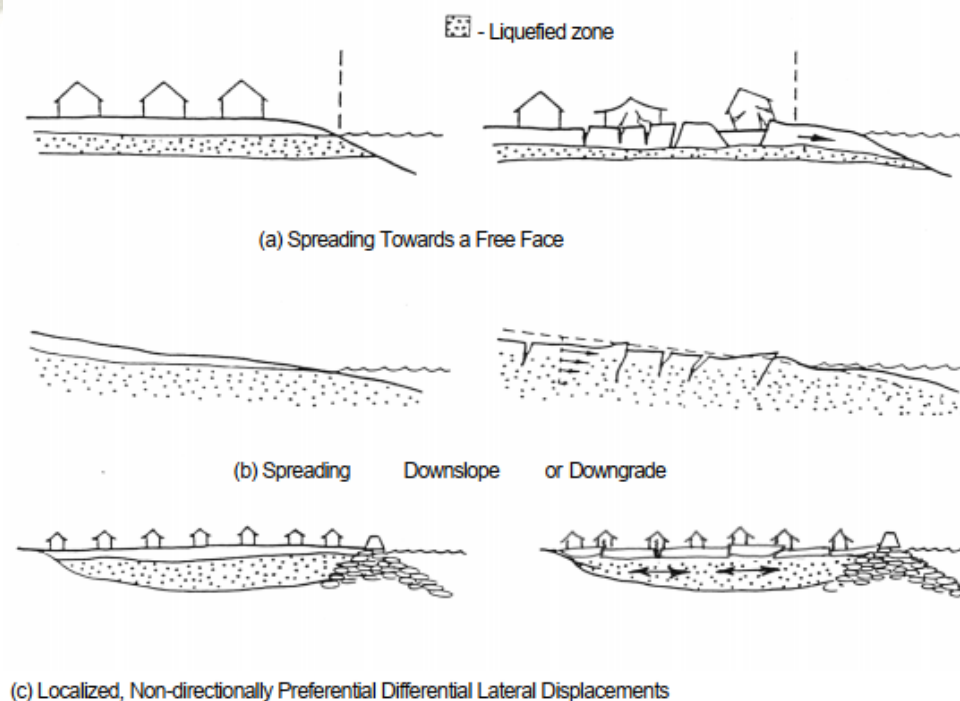
Ocurre cuando el suelo licuado gana resistencia al corte en general produciendo deformaciones limitadas sin pérdida de estabilidad. (Robertson, Woeller, & Finn, 1992). El suelo se ve muy afectado por fuerzas inerciales cíclicas producidas por fuertes sacudidas.

Generalmente se controlan en gran parte mediante un complicado ablandamiento cíclico inducido por la presión de poros (R.B. Seed, y otros, 2003).

Todo esto produce deformaciones pequeñas, incrementales y permanentes que, al final de un terremoto, pueden ser suficientes para producir un daño extenso si los suelos

licuables son muy sueltos. y la geometría es lo suficientemente adversa (R.B. Seed, y otros, 2003). La superficie del suelo puede presentar fisuras y escarpas en la parte superior de la extensión lateral, compartir zonas a lo largo de sus márgenes laterales, y comprimirse o abrocharse (Kramer S. , 1996).

En la Ilustración 50 se presenta algunos ejemplos de fallas como: extensión lateral limitada hacia una cara libre (Ilustración 50a), pendiente descendente lateral limitada (Ilustración 50b) y licuación bajo una costra superficial no licuada (Ilustración 50c), con una cara lateralmente restringida y otra libre. En el ejemplo (Ilustración 50c) la corteza puede separarse en distintas secciones y estas secciones de la corteza pueden moverse diferencialmente entre sí, esto puede producir cortes, compresiones y separaciones de tensión en los bordes de los bloques de superficie. Esto, a su vez, puede ser dañino para estructuras que tienen la mala suerte de abarcar los límites del bloque (R.B. Seed, y otros, 2003).



*Ilustración 50 Ejemplos esquemáticos de modos limitados de traslación lateral inducidos por licuefacción.
Fuente (R.B. Seed, y otros, 2003)*

Resumen.

Castro (1987) clasificó las posibles consecuencias de la licuefacción, como se muestra en la Tabla 12 en base a la magnitud de los esfuerzos cortantes estáticos que pueden existir debido a una pendiente de superficie o una carga de cimentación.

Condición de esfuerzo in situ	Comportamiento del suelo	Observación típica de campo
Sin esfuerzo cortante estático	<ul style="list-style-type: none"> Disminución de volumen Aumento de la presión del poro 	<ul style="list-style-type: none"> Asentamiento de terreno Volcanes de arena y eyección de fisuras en la superficie
Esfuerzo cortante estático mayor a la resistencia residual	<ul style="list-style-type: none"> Perdida de estabilidad Licuefacción 	<ul style="list-style-type: none"> Deslizamientos Hundimiento de edificios Elevación de estructuras livianas
Esfuerzo cortante estático menor a la resistencia residual	<ul style="list-style-type: none"> Distorsión de cortante limitada La masa de suelo permanece estable 	<ul style="list-style-type: none"> Caída de pendientes Asentamiento de construcciones Desplazamiento lateral

Tabla 12 Clasificación de las consecuencias de la licuefacción de suelos. Fuente (Castro, 1987).

Siendo necesaria la lectura de la totalidad de fallas asociadas a la licuefacción, dónde se explica de forma detallada como se produce cada evento geológico y lo que a su vez ocasiona. La Tabla 12 facilita el entendimiento, organizando la información convirtiéndose así en un material valioso de consulta.

Mitigación y prevención de daños por licuefacción

No es objeto de la presente investigación, proponer soluciones a los problemas ingenieriles que ocasiona la licuefacción, sin embargo, se resalta la importancia de entender el contexto y lo que conlleva construir en un suelo susceptible de experimentar licuefacción. Generalmente se requiere la mitigación cuando el peligro de licuefacción es inaceptable.

R.B. Seed, y otros (2003) sugieren que se considere los siguientes temas clave en la selección e implementación de métodos de mitigación:

- Aplicabilidad
- Efectividad
- Capacidad de verificar la confiabilidad de la mitigación lograda
- Costo
- Impacto Ambiental
- Normatividad

Hay muchos procedimientos y variaciones en los métodos actualmente disponibles para esto, y muchos otros están aún en desarrollo. Algunos métodos de mitigación, clasificados en categorías generales se presentan en la Tabla 13:

	Método de mitigación	Notas
I. Excavación y / o compactación	(a) Excavación y eliminación de suelos licuables	
	(b) Excavación y re-compactación	
	(c) Compactación (para nuevo llenado)	
II. Densificación de suelo in situ	(a) Compactación con sondas vibratorias (p. ej.: vibro-flotación, etc.)	-Puede ser acoplado con la instalación de columnas de grava
	(b) Consolidación dinámica (compactación pesada)	-También puede proporcionar refuerzo
	(c) Pilas de compactación	
	(d) Densificación profunda por voladura.	
	(e) Inyección de compactación	
III. Otros tipos seleccionados de tratamiento de suelo	(a) Inyección de permeación	
	(b) Jet Grouting	
	(c) Mezcla profunda	
	(d) Desagües - Drenajes de grava - Drenajes de arena - Drenajes de cinta prefabricados	-Muchos procesos de instalación de desagües también proporcionan densificación in-situ.
	(e) Precarga de recargo	
	(f) Rellenos estructurales	

IV. Bermas, diques, muros de contención y otras estructuras contención de bordes	(a) Estructuras y / o estructuras de tierra construidas para proporcionar contención de bordes y así evitar una gran expansión lateral	
V. Cimentaciones profundas	(a) Pilotes (instaladas por conducción o vibración) (b) Anclajes (instalados por perforación o excavación)	-Puede proveer también densificación del terreno
VI. Cimentaciones superficiales reforzadas	(a) Vigas Conectadas (b) Losa de cimentación reforzada (c) Losa reforzada post-tensada (d) Cimentación flotante	

Tabla 13 Lista de métodos seleccionados para mitigar el peligro de licuefacción del suelo sísmico (R.B. Seed, y otros, 2003).

Chen & Scawthorn (2003) clasifican la aplicabilidad de diversas técnicas de estabilización, de acuerdo con el tamaño de las partículas de suelos (Ilustración 51).

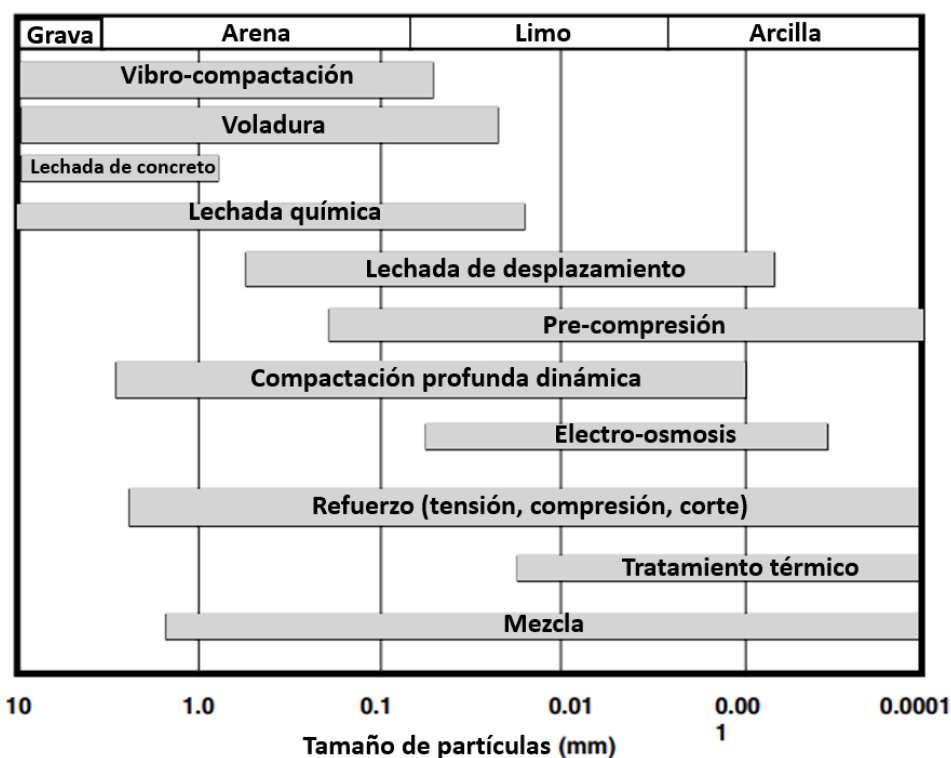


Ilustración 51 Rangos de tamaño de grano aplicables para diferentes métodos de estabilización
Fuente (Mitchell, J.K. 1981).

Otro tipo de infraestructura propensa a sufrir daños son los servicios públicos, producto del movimiento relativo entre las estructuras relativamente estacionarias y el suelo de sedimentación. Para mitigar el daño a los servicios públicos se pueden proporcionar conexiones flexibles en el lugar donde ingresen al edificio (Day, 2012).

Metodología de evaluación del potencial de licuefacción de suelos

La licuefacción ha sido una causa importante de daños a estructuras del suelo, instalaciones y fundaciones de edificios en eventos sísmicos pasados. Claramente representa una amenaza para la integridad de las estructuras. Por tanto, las zonas de licuefacción han sido objetivo importante de estudios. El comité técnico de ingeniería geotécnica-sísmica (1999) propone varios métodos para predecir la licuefacción, clasificándolos en tres clases. Las cuales se diferencian por el costo de implementación del estudio, nivel de profundidad de investigación y precisión de resultados. Siendo el “Grado 1” el básico y el “Grado 3” el más avanzado.

Grados de evaluación de licuefacción

Grado 1

Evaluación de la extensión máxima de un área susceptible de licuefacción

Criterio de distancia máxima. Si se conoce datos sísmicos históricos de una determinada área, la extensión del área susceptible al fenómeno de licuación puede estimarse directamente a partir de la magnitud del terremoto pronosticado. Varios investigadores han analizado la distribución de la licuefacción durante los terremotos y han comparado la distancia desde el epicentro al sitio licuado más alejado (R) con la magnitud del terremoto (M) (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

- Kuribayashi & Tatsuoka (1975). En su estudio con base a 32 terremotos en Japón. Definiendo la distancia más larga desde el epicentro a un sitio licuado como R , en km y magnitud del terremoto según la Agencia Meteorológica de Japón como M_j . Delimitándola por la siguiente ecuación:

$$\log R = 0.77 \times M_j - 3.6$$

- Liu & Xie (1984). Desarrollo un límite promedio basado en los datos de licuefacción chinos. Definiendo R , en km y la magnitud (M_L) según Richter. La superficie fue delimitada por la siguiente ecuación:

$$R = 0.82 \times 10^{0.862(M_L-5)}$$

- Ambraseys (1988). Analizo los datos de una serie de investigaciones, agregando 70 casos adicionales. Además, estandarizó la medición de la magnitud sísmica, introduciendo “magnitud momento (M_w)” y mantuvo R_e como distancia epicentral en km:

$$M_w = 4.64 + 2.65 \times 10^{-3} + 0.99 \times \log R_e$$

- Wakamatsu (1991). Complemento el trabajo de Karibayashi y Tatsuoka añadiendo 67 terremotos japoneses en los últimos 106 años, como resultado se propuso un nuevo límite para $M_L > 5$ de la siguiente manera:

$$\log R = 2.22 \times \log(4.22 \times M_j - 19)$$

- Wakamatsu (1993). En su trabajo previo incluyo incluso signos menores de efectos de licuefacción, por ello que considerado muy conservador. En su siguiente trabajo considero solo aquellos datos que indicaban una licuefacción significativa

$$\log R = 3.5 \times \log(1.4 \times M_j - 6)$$

Estas relaciones pueden usarse para predecir el rango máximo de licuefacción para una magnitud particular y con Wakamatsu (1991) una evaluación del rango probable de daño menor. Todo esto se puede apreciar mejor en la Ilustración 52, para la cual se necesita las equivalencias de cada escala en Magnitud de Onda Superficial (M_s), dónde: (a) M.M. escala de Mercalli Modificada, (b) J.M.A. o M_j escala de la agencia meteorológica de Japón y (c) M_w escala Magnitud Momento. Para las conversiones se usaron los ábacos de la Ilustración 54 e Ilustración 55.

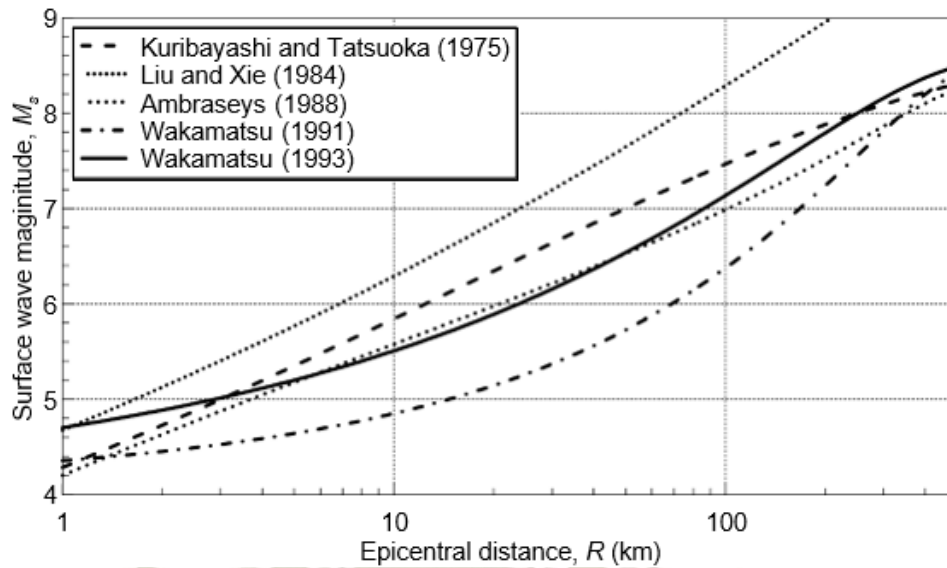


Ilustración 52 Distancia epicentral a los sitios licuados más lejanos, R , en km para la magnitud de la onda de superficie M_s Fuente (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999)

- Youd & Perkins (1978). Definen la distancia R_f , como más adecuada para terremotos de mayor magnitud ($M_w < 5.5$) y con fallas bien definidas. Trazaron la distancia horizontal desde la fuente de energía sísmica hasta la ubicación más lejana de licuefacción significativa. (Ambraseys, 1988) definió la siguiente ecuación para terremotos poco profundos. Se puede observar la curva en la Ilustración 53

$$M_w = 4.68 + 9.2 \times 10^{-3} R_f + 0.9 \log R_f$$

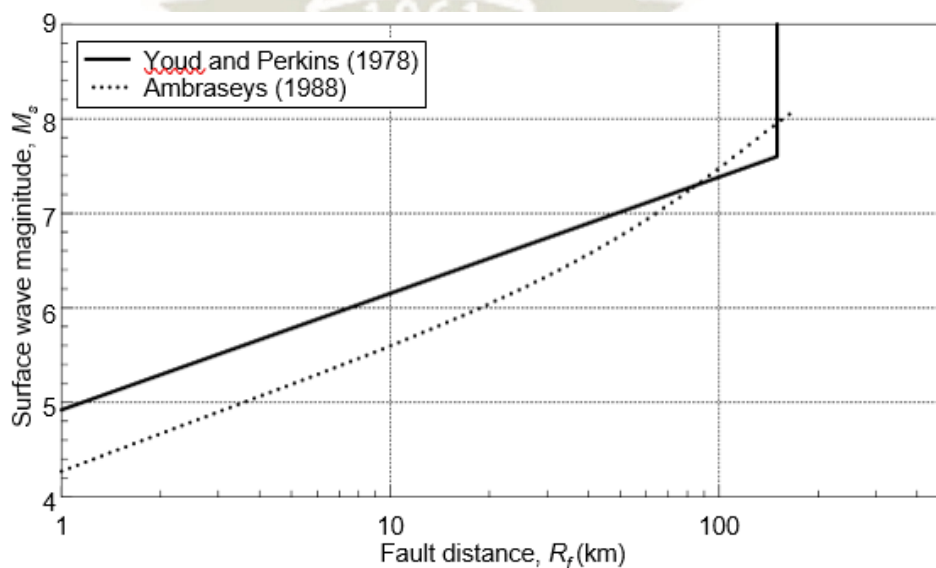


Ilustración 53 Distancia del plano de falla del terremoto a los sitios licuados más lejanos. Fuente (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999)

VII	XII XI X	XI X	XII X
VI	IX	IX	
V	VIII	VIII	IX
IV	VII	VII	VIII
	VI	VI	VII
III	V	V	VI
	IV	IV	V
II	IV	IV	IV
	III	III	III
I	II	II	II
	I	I	I
0	I	I	I
J.M.A. scale	M.M. scale	M.S.K. scale	R.F. scale

Ilustración 54 Correlación de escala de intensidad entre J.M.A., M.M., M.S.K., Y R.F. Fuente (Seismological Division, J.M.A., 1971).

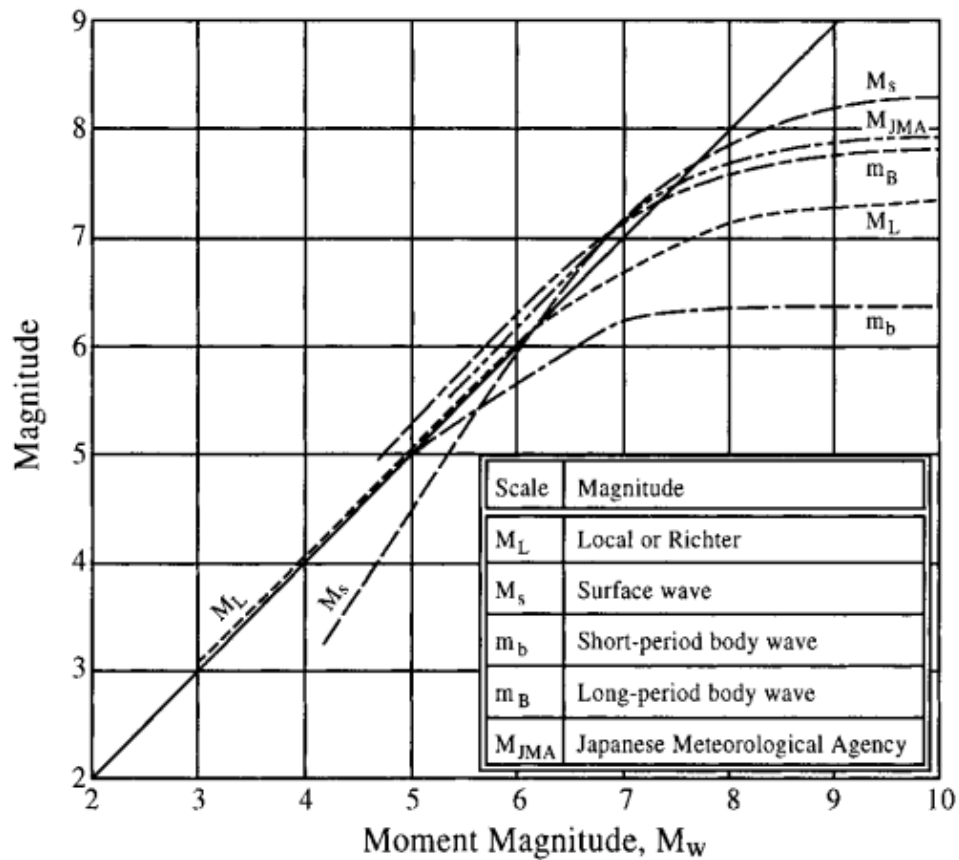
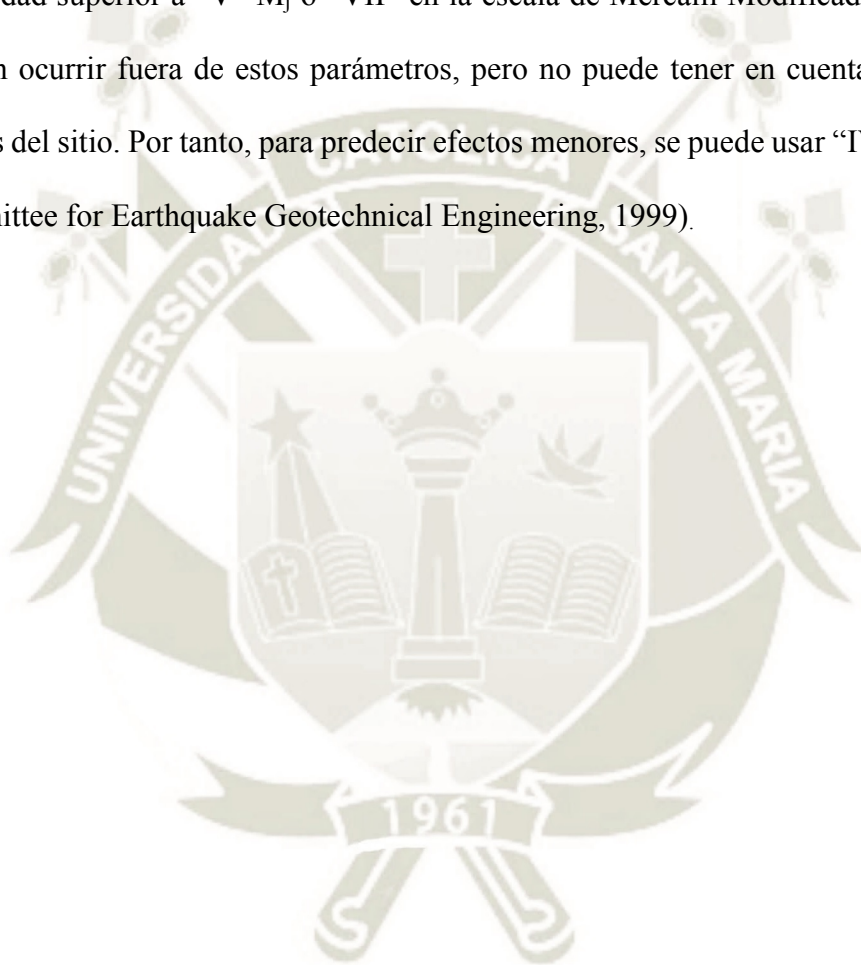


Ilustración 55 Comparación entre diferentes magnitudes de escala (Utse, 1982).

Criterio de intensidad.

La extensión máxima del área vulnerable al fenómeno de licuación también puede estimarse en función a la intensidad sísmica. (Kuribayashi & Tatsuoka, 1975) y (Wakamatsu, 1991) analizaron los incidentes sísmicos de anteriores eventos de licuefacción y mostraron que esta se producía generalmente en áreas subyacentes a sedimentos del Holoceno con una intensidad superior a “V” M_j o “VII” en la escala de Mercalli Modificada, casos menores pueden ocurrir fuera de estos parámetros, pero no puede tener en cuenta las condiciones locales del sitio. Por tanto, para predecir efectos menores, se puede usar “IV” M_j . (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).



Estimación de susceptibilidad de licuefacción basada en datos existentes.

Criterio geológico y geomorfológico.

Es sabido que el fenómeno de licuación ocurre repetidamente en el mismo sitio. Por lo tanto, los mapas que muestran las localidades que han experimentado efectos de licuefacción ante eventos sísmicos pasados, pueden considerarse áreas potenciales de licuefacción. Aún más si existe una correlación entre ocurrencia de licuefacción pasada y criterios geológicos y geomorfológicos.

(Iwasaki, y otros, 1982) analizaron varias decenas de terremotos en Japón y desarrollaron los criterios enumerados en la Tabla 14.

Rango	Unidades geomorfológicas	Potencial de licuefacción
A	Lecho del río, antiguo lecho del río, pantanos, rellenos y tierras bajas	Licuefacción probable
B	Diques naturales, Dinás de arena, Planicie inundable, Playas y otras planicies	Licuefacción posible
C	Terrazas, colinas y montañas	Licuefacción no probable

Tabla 14 Susceptibilidad de las unidades geomorfológicas a la licuefacción. Fuente (Iwasaki, y otros, 1982)

Índice de severidad de licuefacción (LSF).

Para cuantificar la severidad de la licuefacción, Youd & Perkins (1978) introdujeron el concepto de “índice de severidad de licuefacción”. LSF se define como el desplazamiento horizontal máximo medido en milímetros dividido por 25. Analizaron estadísticamente los datos para definir límites y desarrollaron una ecuación de regresión como se muestra en la Ilustración 56 . Estos límites se pueden usar como funciones de atenuación LSF.

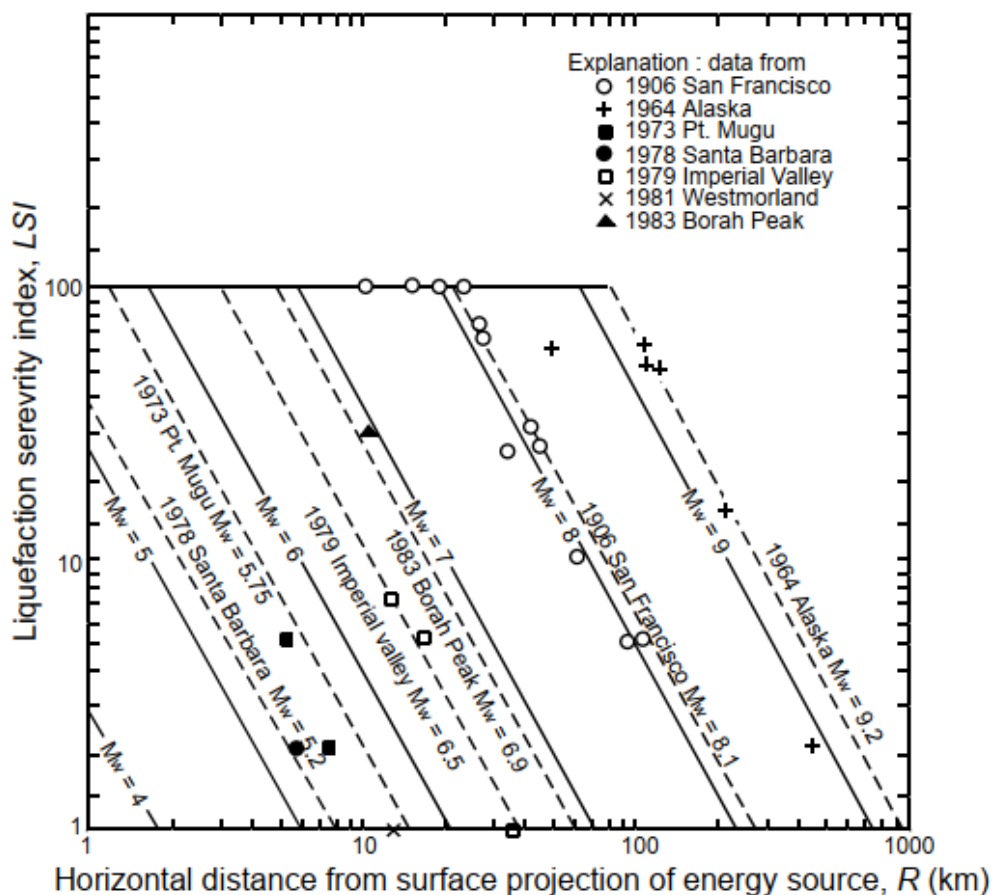


Ilustración 56 Curvas de índice de severidad de licuefacción para el oeste de Estados Unidos trazadas en función de la distancia desde la fuente de energía sísmica.

Grado 2.

El enfoque del grado 2 a diferencia del grado 1 incorpora datos disponibles de fuentes públicas y privadas, pero generalmente no publicados. Debido a la falta de una relación exacta entre los criterios geológicos, geomorfológicos con las propiedades geotécnicas los criterios de Grado 1 generalmente no brindan información definitiva para la evaluación de sitios específicos.

Otros datos que pueden estar disponibles son:

- Interpretaciones fotográficas aéreas que ayuden a definir unidades geomorfológicas y geológicas detalladas.
- Estudios de campo.

- Análisis de fotografías aéreas poco después de grandes inundaciones; delineado de zonas de inundación y acumulación de sedimentos.
- Entrevistas con residentes locales, quienes brindan información de terremotos pasados.

Cabe destacar que la cantidad de esfuerzo necesario para la recopilación de datos con el detalle requerido para el Grado 2, puede ser en muchos casos, mucho mayor que el requerido para el Grado 1. (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

Criterios geológicos y geomorfológicos para evaluar el potencial de licuefacción.

Los criterios geológicos y geomorfológicos para identificar áreas de alto potencial de licuefacción se resumen en la Tabla 15 y Tabla 16. Estos criterios indican, por ejemplo, que los procesos fluviales y eólicos ayudan a sedimentar los suelos granulares en un estado relativamente suelto, una condición de alta susceptibilidad a la licuefacción.

Estos factores por lo tanto influyen directa o indirectamente en la susceptibilidad a la licuefacción y a pesar de que generalmente son confiables, no pueden definir por si solos el potencial de licuefacción en un determinado lugar.

La información de sitio específica, como por ejemplo relacionar la ocurrencia de licuefacción en el pasado en la zona con las configuraciones geológicas y/o geomorfológicas, mejorará el valor de este enfoque. (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999)

El mapeo geológico y geomorfológico, acompañado de entrevistas a residentes locales y de una recopilación de documentos sobre daños por licuefacción, forman parte importante en la zonificación Grado 2

Ejemplos de estimación del potencial de licuefacción basados en investigaciones.

Mapas para los EE. UU.

Un mapa hipotético de suelo inducido por licuefacción fue compilado por Youd & Perkins (1978) donde se muestra la susceptibilidad de licuefacción y oportunidad de licuefacción, como se aprecia en la Ilustración 57. Para ello se utilizó como referencia la Tabla 15, para delinear donde es más probable que exista materiales licuables. La oportunidad se compila en función a los intervalos de ocurrencia de eventos sísmicos suficientemente fuertes como para generar licuefacción en el área de estudio (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

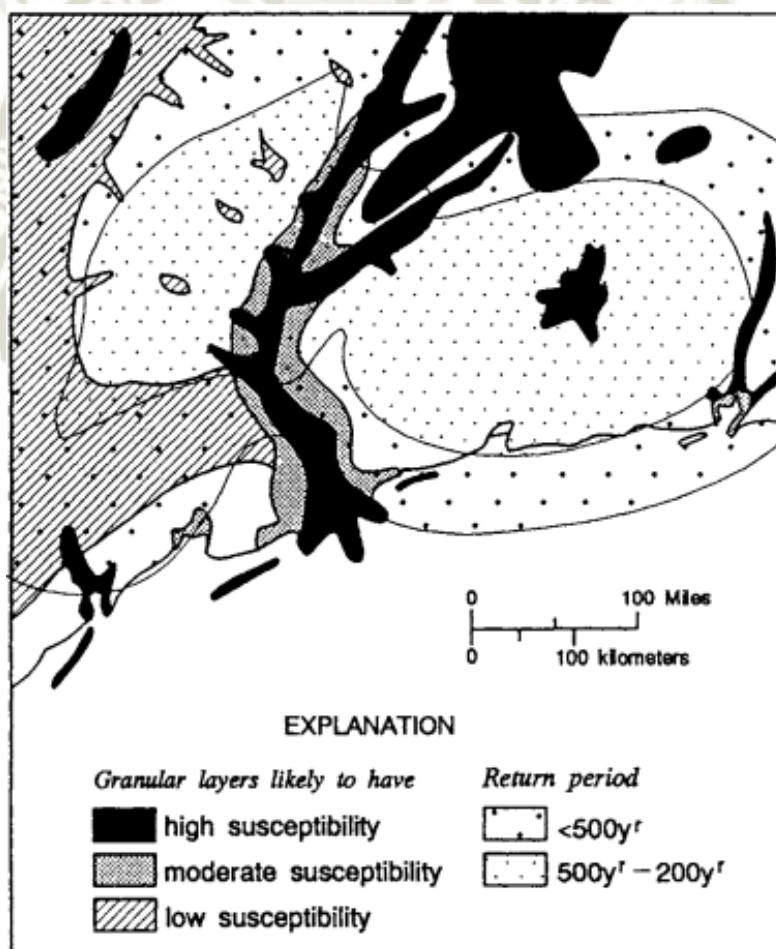


Ilustración 57 Mapa del potencial de falla de tierra inducida por licuefacción para el área hipotética. Fuente (Youd & Perkins, 1978).

Mapas para Japón.

Se centro en los factores claves pertinentes para estimar el potencial de licuefacción:

(a) La relación entre unidades geomorfológicas y las propiedades geotécnicas, (b) la identificación de antiguos canales de flujo, (c) las fechas aproximadas, materiales y métodos de recuperación y (d) condiciones del agua subterránea, tales como la profundidad de la capa freática y la distribución de manantiales. Las correlaciones con estos factores y la intensidad de eventos sísmicos se usaron para definir susceptibilidad de licuefacción de cada unidad geomorfológica considerada (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

Este mapa se validó en el terremoto de Nihonkai-Chubu de 1983, produciéndose los incidentes de licuefacción únicamente en la zona que se predijo con alta probabilidad, (Ilustración 58).

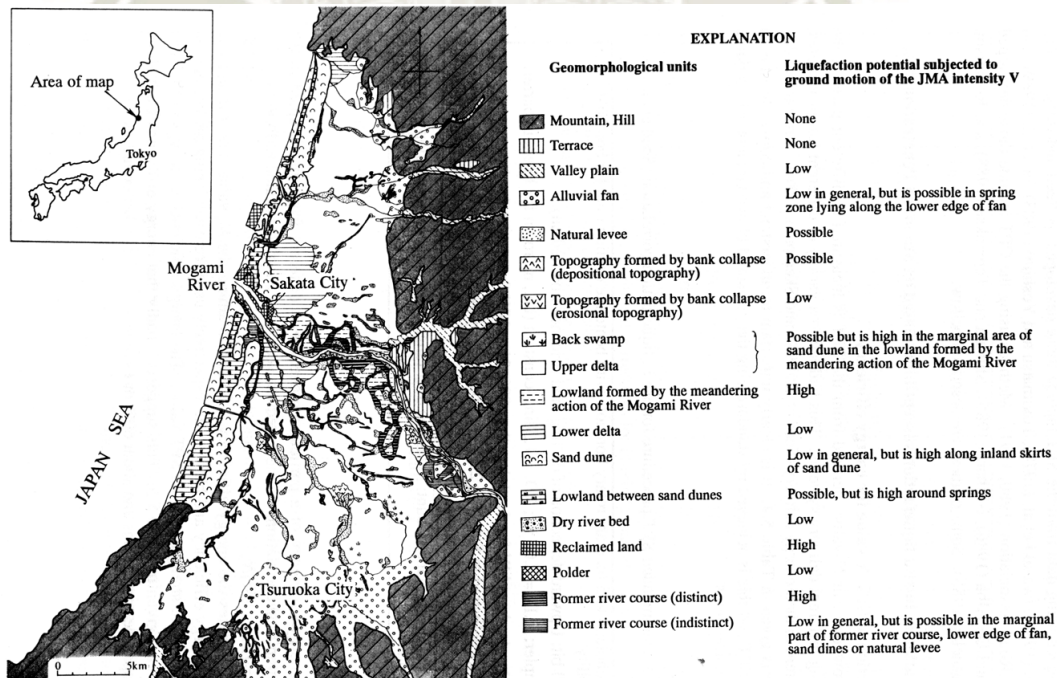


Ilustración 58 Mapa de clasificación geomorfológica de la llanura de Shonai que muestra susceptibilidad de licuefacción. Fuente (Modificado de Oya et al., 1982)

Tipo de depósito	Distribución general de sedimentos sin cohesión en depósitos	Probabilidad de que los sedimentos sin cohesión, cuando están saturados, sean susceptibles de licuarse (por edad de depósito)			
		<500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre pleistoceno
Depósitos continentales					
Canal de río	Localmente variable	Muy alto	Alto	Bajo	Muy Bajo
Llanura inundable	Localmente variable	Alto	Moderada	Bajo	Muy Bajo
Abanico y llanura aluvial	Extendido	-	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Terrazas y llanuras marinas	Extendido	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo
Delta y abanico deltaico	Extendido	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Lacustre y playas	Variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Baja
Coluvial	Variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Taludes	Extendido	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Dunas	Extendido	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Eólico	Variable	Alto	Alto	Alto	Muy Bajo
Glacial	Variable	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Toba volcánica	Raro	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Tefra	Extendido	Alto	Alto	-	Muy Bajo
Suelo residual	Raro	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Sebkha	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Zona Costera					
Delta	Extendido	Muy alto	Alto	Bajo	Muy Bajo
Estuario	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Playa					
Marea alta	Extendido	Moderado	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Marea baja	Extendido	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Lagunar	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Franja costera	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Artificial					
Relleno no compactado	Variable	Muy alto	-	-	-
Relleno compactado	Variable	Bajo	-	-	-

Tabla 15 Susceptibilidad de depósitos sedimentación a licuefacción durante movimientos fuertes. Fuente (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

Condiciones Geomorfológicas		
Clasificación	Condiciones específicas	Potencial de licuefacción
Llanura de valle	Valle que consiste en grava y bolonería	No probable
	Valle que consiste en arena	Posible
Abanico aluvial	Gradiente vertical de más de 0.5%	No probable
	Gradiente vertical de menos de 0.5%	Posible
Dique natural	Cima de dique natural	Posible
	Orilla de dique natural	Probable
Lagunilla		Posible
Cauce de río abandonado		Probable
Embalse antiguo		Probable
Lagunilla y pantano		Posible
Cauce de río seco	Banco que consiste en grava	No probable
	Banco que consiste en arena	Probable
Delta		Posible
Bancos	Banco de arena	Posible
	Banco de grava	No probable
Duna arenosa	Cima de duna	No probable
	Orilla de duna	No probable
Playa	Playa	No probable
	Playa artificial	Probable
Inter dique bajo		Probable
Terreno reclamado por drenaje		Posible
Terreno reclamado		Probable
Manantial		Probable
Relleno	Relleno sobre zona limítrofe entre arena y hondonada	Probable
	Relleno adyacente a un barranco	Probable
	Relleno sobre lagunilla o pantano	Probable
	Relleno sobre terreno reclamado por drenaje	Probable
	Otro tipo de relleno	Posible

Tabla 16 Susceptibilidad de unidades geomorfológicas detalladas a la licuefacción sometida a movimiento de tierra de J.M.A. intensidad V o M.M.S. VIII. Fuente (Wakamatsu, 1993)

Grado 3. Al combinar estudios geotécnicos específicos con los enfoques del Grado 1 y Grado 2, se puede lograr alta precisión y una zonificación detallada para el potencial de licuefacción. El grado 3 requiere investigaciones y pruebas de sitio subsuperficiales especializadas, pruebas de campo y laboratorio. Por ello el costo es significativamente mayor que el requerido en los grados anteriores.

Los enfoques de Grado 3 para evaluar el potencial de licuefacción consisten en los siguientes pasos:

- Estimación de la resistencia a la licuefacción de los depósitos de suelo
- Estimación de la fuerza cortante cíclica máxima o equivalente que probablemente se inducirá en el suelo durante un terremoto.
- Estimación del potencial de licuefacción del suelo.

La evaluación de los enfoques anteriores puede realizarse de diversas formas variando en equipo y nivel de complejidad, por citar algunas:

- Andrews & Martin (2000) por medio de la evaluación de una gran cantidad de casos de licuefacción de campo, proponen una actualización al Criterio Chino Modificado inicialmente propuesto por Wang (1979), la cual se resumen en la Tabla 10.
- Gonzáles de Vallejo (2002) propone de manera más amplia las propiedades que caracterizan a los suelos potencialmente licuables.
- R.B. Seed, y otros (2003) en este estudio proponen una serie de criterios aplicables para evaluar la susceptibilidad de suelos con un porcentaje de finos significativo.
- Por su parte, Chen & Scawthorn (2003), tomando como referencia la densidad del suelo logran estimar los enfoques requeridos de susceptibilidad.

- Finalmente, los enfoques basados en ensayos de campo subsuperficiales presentan mayor exactitud de evaluación: (1) SPT, (2) CPT, (3) velocidad de ondas de corte, (4) teorías probabilísticas, (5) otros. Los cuales son tratados a detalle más adelante.

Metodologías subsuperficiales para evaluar el potencial de licuefacción de suelos

Las metodologías subsuperficiales, relacionadas con el Grado 3 de la metodología de evaluación del potencial de licuefacción, propuesto por el comité técnico de ingeniería geotécnica sísmica, requiere investigaciones y pruebas de sitio subsuperficiales especializadas, pruebas de campo y laboratorio. Por ello el costo es significativamente mayor que el requerido en los grados anteriores.

Los métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos pueden dividirse en tres grupos (Henríquez Pantaleón, 2007):

1. Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: Se sustentan en correlaciones empíricas de algunas características de los suelos, obtenidas mediante pruebas de campo junto con algunos ensayos simples de laboratorio, si fuese el caso. A su vez emplea el comportamiento de los suelos observado en sismos pasados. El “Standard Penetration Test” (SPT) es el procedimiento más común, el cual forma parte de diversas metodologías, por citar algunas de las más conocidas: Seed e Idriss (1971), Iwasaki y otros (1978), Tokimatsu y Yoshimi (1983), Seed et al. (2003), entre otros.
2. Métodos simplificados: Se basan en la comparación de la resistencia obtenida en ensayos cíclicos de laboratorio con los esfuerzos que provocaría el sismo, calculados en forma simplificada. Para su determinación requiere ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas,

3. Métodos basados en modelo matemáticos: Corresponden a un número creciente de modelos para el análisis de la respuesta dinámica y la generación de presión de poros, de suelos granulares sujetos a fuerzas sísmicas.

Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores

Estos métodos se pueden subdividir a su vez en 5 subcategorías:

Métodos basados en el número de golpes SPT.

Método de Kishida y Ohsaki (1969 y 1970). Apoyados en las condiciones observadas en distintos sismos, especialmente el ocurrido en Niigata en 1964.

Kishida (1969) indica que puede ocurrir licuación bajo sismos de magnitud $M \geq 7$, si cumple las siguientes condiciones: (1) El nivel freático cercano a la superficie, (2) $2 \text{ mm} > D_{50} > 0.074 \text{ mm}$ y $C_u < 10$, (3) El espesor del estrato de suelo no licuable, arriba del licuable sea menor a 8m (4) relación entre estrato no licuable y el licuable, sea menor que 1, (5) La presión efectiva de confinamiento menor a 2 kg/cm^2 y (6) La compacidad relativa (C_r) menor que 75%.

Ohsaki (1970) varia algunos criterios, como: (1) $2 \text{ mm} > D_{60} > 0.2 \text{ mm}$ y $D_{10} < 0.1 \text{ mm}$, (2) El número de golpes (N_{SPT}) menor que 2 veces la profundidad “z” expresada en metros. Los criterios de ambos estudios en función del número de golpes del ensayo de penetración estándar SPT y de la profundidad, se grafican en la Ilustración 59.

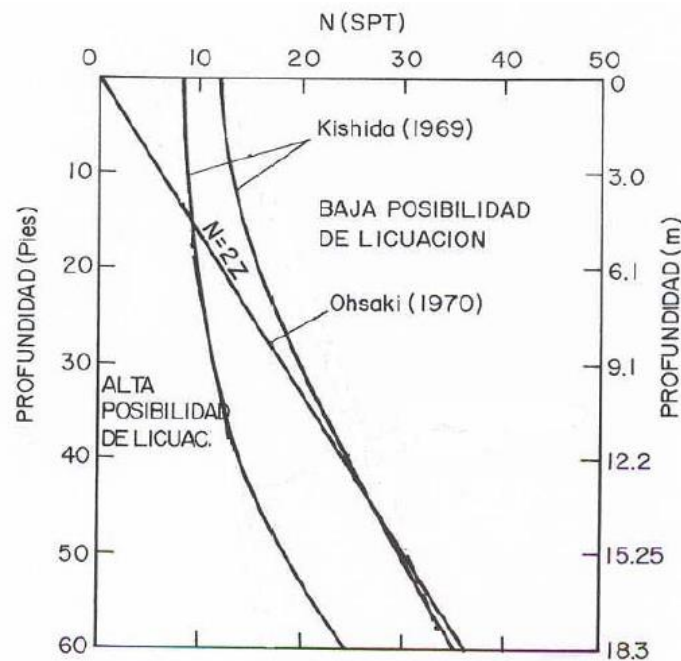


Ilustración 59 Relación entre la posibilidad de licuefacción y los valores N_{SPT} para diferentes profundidades $Z(m)$
Fuente (Ohsaki, 1970).

Método de Tokimatsu & Yoshimi (1983). En base a estudios en depósitos de suelos arenosos con énfasis en características tales como el número de golpes (N_{SPT}) y el contenido de finos (CF). Se apoya en la realización de ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras inalteradas obtenidas por congelamiento “in situ”.

Proponen un procedimiento para estimar el potencial de licuefacción, que consta de los siguientes pasos:

1. Se debe calcular los esfuerzos de corte dinámicos con la expresión:

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.1(M - 1) \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} (1 - 0.015z)$$

Siendo z la profundidad expresada en metros.

2. Se deben corregir los valores de N_{SPT} considerando que se aplica una energía del orden del 80% de la teórica. (N_1)
3. Para obtener los valores de N_{SPT} ajustados (N_a) para una $\sigma'_v = 1kg/cm^2$, teniendo N_F como variable, debe usarse la siguiente expresión junto con la Tabla 17:

$$N_a = \left(\frac{1.7}{\sigma_v + 0.7} \right) N + \Delta N_F = N_1 + \Delta N_F$$

Contenido de finos (%)	ΔN_F
0 a 5	0
5 a 10	Interpolación
10	0.1CF+4

Tabla 17 Incremento equivalente de N en función del contenido de finos (CF). Fuente (Tokimatsu & Yoshimi, 1983)

4. Para determinar la resistencia a la licuefacción se debe utilizar la Ilustración 60, en función de τ_d/σ'_v , N_1 y γ (deformación angular en %)

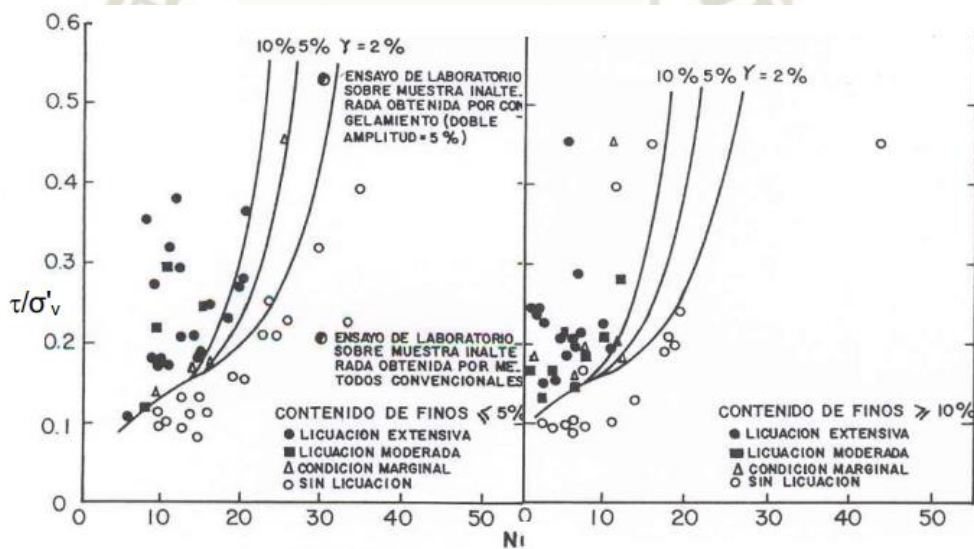


Ilustración 60 Correlación de campo entre la relación de esfuerzos cíclicos τ/σ'_v , y el valor de N_{SR} corregido, N_1 para arenas limpias. Fuente (Tokimatsu & Yoshimi, 1983).

5. Finalmente se calcula el factor de seguridad:

$$FS = \frac{\tau/\sigma'_v}{\tau_d/\sigma'_v}$$

El cual es conveniente que sea al menor a 1.5 para $N_1 \leq 10$ y menor a 1.3 para arenas medianamente densas a densas.

Método de Taipong, Chenchun, Lunian, & Hoishan (1984). Estudios de licuefacción en China, hacen uso de una correlación entre los valores críticos de N_{STP} y las características sísmicas que causan la licuefacción, sumado a un análisis estadístico. Separan condiciones de licuación y de no licuación a menos de 15 m aproximadamente.

$$N_{crit} = N^*[1 + 0.125(d_s - 3) - 0.05(d_w - 2) - 0.07p_c]$$

Donde:

- d_s = profundidad en metros de la capa arenosa considerada.
- d_w = profundidad en metros del nivel freático.
- p_c = porcentaje en peso de partículas con tamaño de arcilla.
- N^* = Número de golpes en función de la intensidad del sismo en escala Mercalli Modificada, según la Tabla 18.

Intensidad	N^* (golpes/30cm)	M	a_{max}
VII	6	7.5	0.10g
VIII	10	7.5	0.20g
IX	16	7.5	0.35g
X			

Tabla 18 Valores de N^* en función de la intensidad del sismo, según la escala Mercalli Modificada (Taipong y otros, 1984)

Método de Ambraseys (1988)

Realizó su trabajo en base a datos de diversos investigadores japoneses. Con el objeto de obtener una correlación entre el (N_{STP}) y la relación τ/σ'_v que produce licuación, para sismos de diferente magnitud, en forma directa. Llegando a las siguientes expresiones:

- Para $M \geq 7.5$ y $CF < 5\%$, o $6.0 \leq M < 7.5$ y $CF < 13\%$:

$$\tau/\sigma'_v = 3.29[(N_1)_{60}]^{0.755} \cdot e^{[0.06(N_1)_{60} - 0.81M]}$$

- Para $6.0 \leq M < 7.5$ y $CF < 5\%$

$$\tau/\sigma'_v = 0.4[(N_1)_{60}] \cdot e^{[0.06(N_1)_{60} - 0.525M]}$$

Donde $(N_1)_{60}$ es la energía realmente aplicada, del orden del 60% de la teórica.

$$(N_1)_{60} = (0.77 \cdot \log_{10} \frac{20}{\sigma'_v}) N_{60}$$

Procedimiento simplificado del comité técnico de ingeniería geotécnica-sísmica, de la sociedad internacional para mecánica de suelos e ingeniería geotécnica (1999).

Se basa en un procedimiento desarrollado por Iwasaki (1978). Similar al enfoque de Seed e Idriss donde está presente el factor de capacidad de licuefacción del suelo (R), así como una carga dinámica (L). La relación “R/L” representa la resistencia de licuefacción (FL).

La capacidad de suelo ante la licuefacción se determina a partir de la suma de tres factores, que toman en cuenta la presión de sobrecarga, el tamaño de grano y el contenido de finos:

- $R = R_1 + R_2 + R_3$
- $R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_{v} + 0.7}}$
- $R_2 = 0.19$ (0.02mm $\leq D_{50} < 0.05$ mm)
- $= 0.225 \log_{10} \frac{0.35}{D_{50}}$ (0.05mm $\leq D_{50} < 0.6$ mm)
- $= -0.05$ (0.6mm $\leq D_{50} < 2.0$ mm)
- $R_3 = 0.0$ (0% $\leq FC < 40$ %)
- $= 0.04FC - 0.16$ (40% $< FC \leq 100$ %)

Donde la presión efectiva (σ'_{v}) esta en kgf/cm², R₁, R₂ R₃ son aplicables para arenas sueltas medianas con densidad relativa menor de 60%.

La carga dinámica inducida en el suelo está determinada por:

$$L = \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

El factor de reducción por rigidez r_d depende de la profundidad (z), en metros

$$r_d = 1 - 0.015z$$

Métodos basados en la resistencia por punta (q_c) del CPT

Método de Teparaksa (1991). Utiliza datos de sismos pasados, obteniendo una correlación entre la resistencia a la penetración por punta CPT y la resistencia a la licuefacción:

$$\frac{\tau_l}{\sigma'_v} = 0.1 + 0.2 \left[\frac{(q_c^1 + \Delta q_c^1) - 50}{250 - (q_c^1 + \Delta q_c^1)} \right]$$

Δq_c^1 es el incremento de la resistencia en función al contenido de finos, CF, que es igual a 0 en suelos con $D_{50} \geq 0.25$ mm y al valor dado por la siguiente ecuación para los restantes.

$$q_c^1 = q_c \left(\frac{1.7}{\sigma'_v + 0.7} \right)$$

$$\Delta q_c^1 = q_c^1 \left(\frac{0.25 - D_{50}(mm)}{D_{50}(mm)} \right)$$

La relación de esfuerzo cíclico que se desarrolla en el campo durante un terremoto se estima a partir de la siguiente ecuación (Tokimatsu & Yoshimi, 1983):

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.1(M - 1) \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} (1 - 0.015z)$$

Se puede determinar el factor de seguridad utilizando la expresión:

$$\frac{\tau/\sigma'_v}{\tau_d/\sigma'_v}$$

Método de Armijo Palacios (1995). Este método permite evaluar el potencial de licuación en función de q_c y de la profundidad. Ha sido desarrollado a partir de un estudio de sismos ocurridos en Mexicali, México en 1980 y en el Valle Imperial, EE. UU en 1981.

Todo se resume a la Ilustración 61, q_c/σ'_v vs z , modelada para una aceleración máxima de 0.6g. Con la finalidad de darle un carácter más general se extrapoló a otros valores de aceleración.

$$q_c = 34.14 \left(\sigma'_v \right)^{0.71} \cdot e^{\left(\frac{1.5a_{max}}{g} \right)}$$

Todos los suelos con las siguientes características no serán susceptibles a la licuefacción

- $f_s/q_c > 2.5\%$
- $IP > 10\%$
- $LL > 35\%$

Donde f_s es la fricción lateral desarrollada en el CPT. Sin embargo, debido a que los valores son muy pequeños deja de ser confiable. Puede suceder que, en estratos de suelos arcillosos muy blandos, no susceptibles a licuarse, dicho parámetro se encuentre debajo del 2.5%.

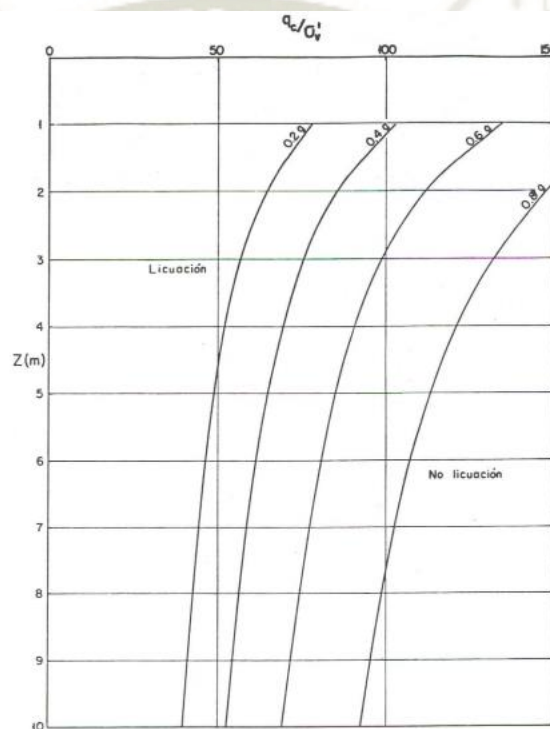


Ilustración 61 Curvas límites obtenidas en base a datos de los Valles de Mexicali e Imperial. Fuente (Armijo Palacios, 1995).

Métodos basados en la propagación de ondas de corte (Vs)

El uso de la velocidad de propagación de las ondas de corte, como un factor de la resistencia a la licuefacción, se justifica en que la resistencia y la velocidad de propagación de estas ondas, están influenciadas por la densidad, confinamiento, edad geológica e historial de tensiones.

Como todo método, presenta algunas ventajas y desventajas. A continuación, las ventajas más resaltantes:

1. Su medición es posible efectuarla en suelos donde se dificulta la toma de muestras o donde los sondeos están restringidos.
2. Está directamente relacionada, para pequeñas deformaciones, al módulo de corte G_{MAX} , es cual es un parámetro de las deformaciones tangenciales dinámicas.
3. Se puede llevar a cabo mediciones en laboratorio, haciendo posible una comparación directa laboratorio-campo.
4. La velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) puede ser medida mediante ensayos in situ como “cross-hole”, ensayo de penetración estático sísmico (SCPT), o mediante el análisis espectral de ondas superficiales. (Henríquez Pantaleón, 2007)

A su vez las principales limitaciones de este método de evaluación son las siguientes:

1. Conjuntamente se deben ejecutar sondeos para identificar los suelos frágilmente cementados y los arcillosos. Las mediciones son muy sensitivas a la cementación intergranular.
2. La carencia de una muestra para identificar los finos que no son susceptible a sufrir licuefacción. (Henríquez Pantaleón, 2007)

Método de Seed, Tokimatsu, Harder, & Chung (1985). Señalan de forma general, que, en los 15 metros superiores de un depósito de suelo potencialmente licuable, la tensión efectiva vertical σ'_v se mantiene menor que 1.9 kg/cm^2 y que el factor C_N oscila entre 0.7 y

1.3. Teniendo en cuenta la siguiente relación aproximada:

$$V_s(m/s) = 56\sqrt{N}$$

Y tomando como criterio conservador $\sqrt{C_N}=0.9$, se llega a la expresión:

$$V_s(m/s) = 56 \sqrt{\frac{N_1}{C_N}} = \frac{56\sqrt{N_1}}{0.9} = 60\sqrt{N_1}$$

A partir de esta expresión se grafica la correlación entre la velocidad de ondas de corte (V_s) y los valores de la relación de esfuerzos cíclicos que producen licuación ante determinada magnitud sísmica, en la Ilustración 62.

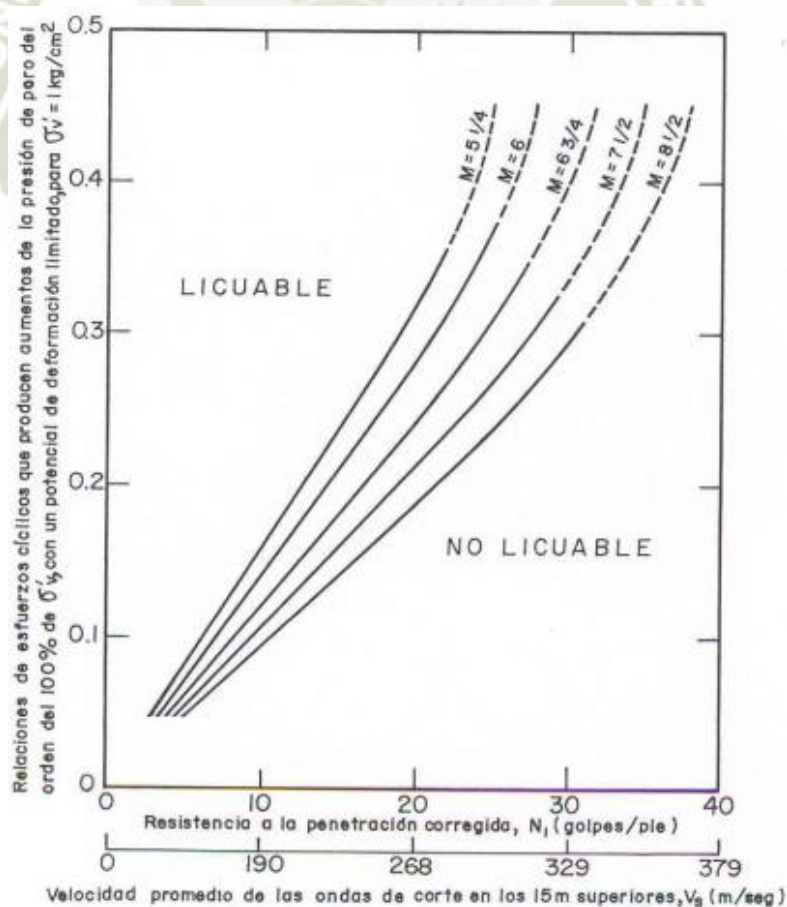


Ilustración 62 Relación de esfuerzos cíclicos que causan licuación en función de $(N_1)_{60}$ y de V_s para arenas limpias y sismos de magnitud diferentes. Fuente (Seed y otros, 1983).

Método de Robertson, Campanella, & Wightman (1983). Siendo la base principalmente los valores de V_s obtenidos en sitios donde se presentó el fenómeno de licuefacción en el Valle Imperial de California, Robertson (1990) elaboro la Ilustración 63.

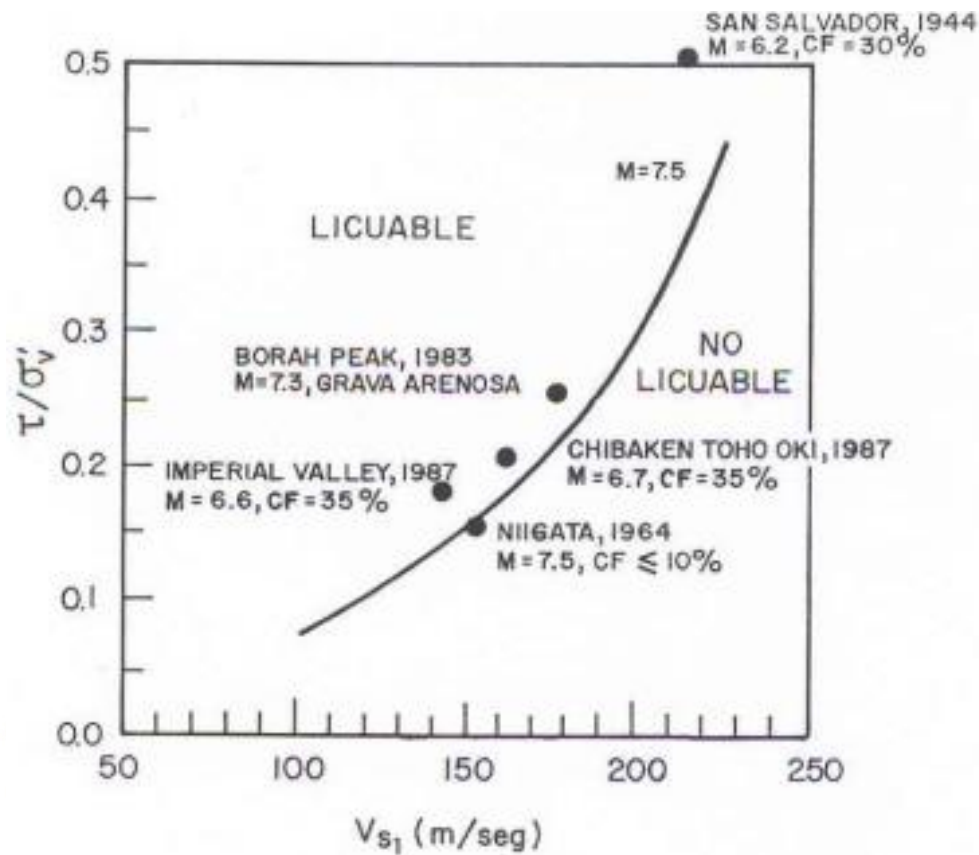


Ilustración 63 Relación de esfuerzos cíclicos que causan licuación en función de la velocidad de ondas de corte corregidas, V_{s1} . Fuente (Robertson, 1990).

Esta gráfica, permite obtener el valor de τ/σ'_v que produciría licuefacción en función de la velocidad de onda de corte normalizada (V_{s1}) la cual se calcula con la siguiente ecuación

$$V_{s1}(m/s) = V_s(P_a/\sigma'_v)^{0.25}$$

Donde P_a es la presión atmosférica y debe expresarse en las mismas unidades que la tensión vertical efectiva σ'_v .

Métodos basados en la teoría de la probabilidad. Como en todo proceso experimental, en la evaluación del potencial de licuefacción, existen varias fuentes de incertidumbre, tanto en la estimación de las fuerzas sísmicas actuantes, como en la determinación de la resistencia de respuesta del terreno. Lo cual ha propiciado el desarrollo de métodos probabilísticos con el objetivo de manejar estas variables (Henríquez Pantaleón, 2007).

Las incertidumbres debido a las cargas sísmicas actuantes pueden analizarse utilizando un sistema probabilístico de peligrosidad sísmica, mientras que las ligadas a la resistencia del suelo ante el fenómeno de licuefacción pueden ser tratadas de dos maneras:

1. El primer grupo se basa en los parámetros obtenidos en ensayos de laboratorio, que influyen en la generación de la presión intersticial. Hadar y Tang (1979), representaron la incertidumbre de los parámetros en ensayos cíclicos de tensión controlada. Chaneau y Clough (1983) analizaron la generación de la presión interna utilizando información experimental y a su vez un modelo de tensiones efectivas. Cualquiera de estos métodos puede calcular la probabilidad que tiene un suelo de licuarse ante determinadas condiciones de partida. (Henríquez Pantaleón, 2007).
2. El segundo grupo se basa en la caracterización de la resistencia a través de ensayos “in situ”. Este conjunto de análisis se basa en el uso de diversos modelos estadísticos y métodos de regresión, con el objetivo de asignar probabilidades de licuación para diferentes parámetros de resistencia y carga. (Henríquez Pantaleón, 2007).

Youd y Noble excluyen los más cuestionables datos utilizados por Liao. Sin embargo, a juicio de (R.B. Seed, y otros, 2003) sus resultados mantienen una exagerada incertidumbre

general. Toprak realiza una regresión básica binaria, y de similar forma mantiene una incertidumbre grande de acuerdo a (R.B. Seed, y otros, 2003).

Con la llegada de la propuesta de (Cetin & Seed, 2001) se logró implementar elementos claves, así como resolver algunos de los problemas relacionados con la incertidumbre.

Método de Cetin & Seed (2001). Se logró proporcionar una incertidumbre global muy reducida. Considerándola y citando a los autores: “lo suficiente como para que la incertidumbre principal ahora resida donde pertenece, en la habilidad del ingeniero para evaluar valores adecuados de CSR y $N_{1.60}$ representativos para casos de diseño”.

Los elementos clave en el desarrollo de esta nueva correlación son:

- La acumulación de una base de datos del desempeño del suelo.
- Uso de conocimiento mejorado y comprensión de los factores que afectan la interpretación del SPT.
- Mejor comprensión de los factores que afectan el movimiento del terreno específico.
- Uso de métodos mejorados para la evaluación de la relación del esfuerzo cortante cíclico (CSR)
- Selección de datos de campo en base a su calidad e incertidumbre.
- Uso de herramientas probabilísticas de orden superior (regresión bayesiana), permitiendo el uso simultáneo de varias variables descriptivas y un tratamiento apropiado a varias fuentes que contribuían con la incertidumbre.

La relación resultante no solo proporciona una incertidumbre muy reducida, sino que también ayuda a resolver problemas controvertidos y difíciles, como:

- Factores de ponderación de duración correlacionados con la magnitud.
- Ajuste por contenido de finos.

- Correlación por la tensión efectiva de sobrecarga.

Esfuerzo cortante cíclico pico (CSR_{pico}). La mejor manera de evaluar las tensiones de corte cíclicas (CSR) es por medio de un análisis de respuesta de sitio dinámico. No obstante, a veces y en varios de los estudios previos se puede utilizar el método simplificado de Seed e Idriss (1971) para estimar las tensiones cíclicas a cualquier profundidad como:

$$CSR_{pico} = \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

Donde:

- a_{max} = la aceleración horizontal máxima de la superficie del suelo.
- g = la aceleración de la gravedad.
- σ_v = tensión vertical total.
- σ'_v = tensión vertical efectiva.
- r_d = factor de participación de masa de corte no lineal.

Factor de reducción de tensiones (rd). Este coeficiente está en función de las propiedades del suelo y de las variables sísmicas. Tiene el valor de 1 en la superficie del suelo y disminuye con la profundidad, pero no de una manera lineal. Por lo que Cetin & Seed, en su estudio: Nonlinear Shear Mass Participation Factor (Rd) For Cyclic Shear Stress Ratio Evaluation (2001) proponen una nueva correlación empírica para estimar r_d en función de:

- La profundidad.
- La magnitud del terremoto.
- La intensidad de la sacudida.
- La rigidez del sitio.

Resultando en las siguientes ecuaciones:

$d < 65$ ft

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,40r}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40r}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(-d + 0.0785 \cdot V_{s,40r}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40r}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(0.0785 \cdot V_{s,40r}^* + 24.888)}} \right]} \pm \sigma_{\epsilon r_d}$$

$$d \geq 65 \text{ ft}$$

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,40}^*)$$

$$= \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(-65 + 0.0785 \cdot V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(0.0785 \cdot V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]} - 0.0014 \cdot (d - 65)$$

$$\pm \sigma_{\varepsilon r_d}$$

Donde:

$$\sigma_{\varepsilon r_d}(d) = d^{0.850} \cdot 0.0072 \text{ [para } d < 40 \text{ ft]} \quad \sigma_{\varepsilon r_d}(d) = 40^{0.850} \cdot 0.0072 \text{ [para } d \geq 40 \text{ ft]}$$

$V_{s,40}^*$ = velocidad "media" de la onda de corte sobre los 40 pies superiores de un sitio (en unidades de ft / s)

M_w = magnitud del terremoto

d = profundidad

Esfuerzo cortante cíclico equivalente (CSReq): A la relación de tensiones cíclicas in situ, se le denomina "CSR uniforme equivalente" o CSReq y es igual al 65% del CSR pico.

$$CSR_{eq} = (0.65) \cdot CSR_{pico}$$

Corrección del número de golpes del SPT (N_1).

1. Corrección por sobrecarga (N_1): Todos los valores deben corregirse al valor hipotético de N_1 , el cual se habría medido si la tensión de sobrecarga efectiva en la profundidad del SPT hubiera sido $1 \text{ atm} \approx 2000 \text{ lb/ft}^2 \approx 1 \text{ kg/cm}^2$

$$N_1 = N \cdot C_N$$

Donde se toma C_N según (Liao & Whitman, 1986) como:

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_v}}$$

Con un valor límite para $C_N \leq 1.6$.

Donde σ'_v es la tensión de sobrecarga real efectiva en la profundidad del SPT en atmósferas (atm).

2. Corrección por energía, equipo y procedimiento de valores ($N_{1,60}$): Los valores N_1 resultantes del punto anterior se corrigen posteriormente por: equipo utilizado, energía y procedimiento, llegando al valor de $N_{1,60}$ completamente estandarizado.

$$N_{1,60} = N_1 \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E$$

Donde:

- CR = corrección para longitud de varilla "corta"
CS = corrección para la configuración del muestreador no estandarizado
CB = corrección por diámetro
CE = corrección por la eficiencia energética del martillo (Youd & Idriss, 2001)

Para determinar los valores de estas correcciones utilizamos la Tabla 19



C_R	Ver la Ilustración 64
C_S	Para muestreadores con un espacio para recubrimientos interiores, pero con recubrimientos omitidos durante el muestreo

$$C_s = 1 + \frac{N_{1,60}}{100}$$

Con límites: $1.10 \leq C_s \leq 1.30$

C_B	<u>Diámetro de la perforación</u>	<u>Corrección (C_B)</u>
	65 a 115 mm	1.00
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15

C_E

$$C_E = \frac{ER}{60\%}$$

Donde ER (relación de eficiencia) es la fracción o porcentaje de la energía del martillo de impacto SPT teórica transmitida a la muestra, expresada como %

- El mejor enfoque es medir directamente la energía de impacto transmitida con cada golpe. Cuando está disponible, se emplearon mediciones de energía directa.
- El siguiente mejor enfoque es utilizar un martillo y un sistema de liberación de martillo mecánico que haya sido calibrado previamente en base a mediciones de energía directa.
- De lo contrario, ER debe ser estimado. Para buenos procedimientos de campo, equipo y monitoreo, se sugieren las siguientes pautas:

Equipo	Aproximación ER (ver Nota 3)	CE (ver Nota 3)
-Safety Hammer ¹	0.4 to 0.75	0.7 to 1.2
-Donut Hammer ¹	0.3 to 0.6	0.5 to 1.0
-Donut Hammer ²	0.7 to 0.85	1.1 to 1.4
-Automatic Trip Hammer (Donut or Safety Type)	0.5 to 0.8	0.8 to 1.4

- Para el trabajo de campo de menor calidad (por ejemplo, distancia irregular de caída del martillo, fricción deslizando excesiva del martillo sobre las barras, cuerda mojada o desgastada en la cabeza del gato, etc.), se necesitan ajustes de evaluación adicionales

Tabla 19 Correcciones recomendadas del equipo SPT (Seed, 2001).

Notas:

(1) Basado en un sistema de cuerda y cabeza de gato, dos vueltas de cuerda alrededor de la cabeza de gato, una liberación "normal" (no el "tiro" japonés) y una cuerda no mojada o excesivamente gastada.

(2) Cuerda y cabeza de gato con lanzamiento especial japonés "throw". (Ver también la Nota 4.)

(3) Para los rangos mostrados, los valores más o menos centrales en el tercio medio del rango son más comunes que los valores periféricos, pero ER y CE pueden ser incluso más altamente variables que los rangos mostrados si el equipo y / o monitoreo y procedimientos no son buenos.

(4) La práctica de SPT japonesa común requiere correcciones adicionales para el diámetro del pozo y para la frecuencia de golpes de martillo SPT. Para la práctica japonesa "típica" con cuerda y cabeza de gato, martillo de rosca y el lanzamiento japonés de "lanzamiento", el producto general de $C_B \times C_E$ está típicamente en el rango de 1.0 a 1.3.

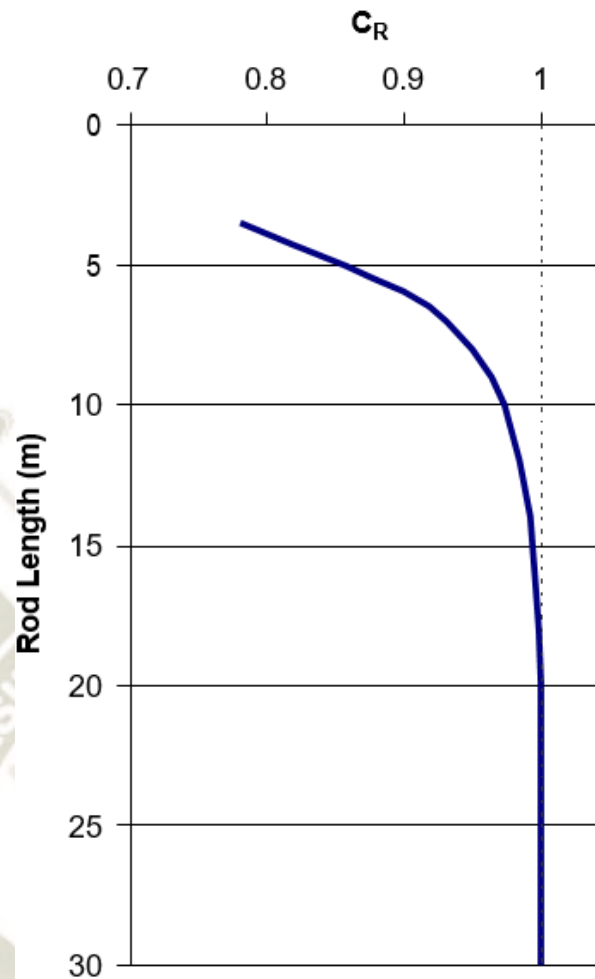


Ilustración 64 Valores de CR recomendados (longitud de varilla desde el punto de impacto del martillo hasta la punta de la muestra) (Seed, 2001).

- Ajuste por el contenido de finos ($N_{1.60.CS}$): Basados en una correlación general regresiva, los valores de N corregidos ($N_{1.60}$) se corrigen en mayor medida para el contenido de finos:

$$N_{1.60.CS} = N_{1.60} \cdot C_{\text{Finos}}$$

La corrección de finos es igual a 1.0 para contenido de finos (FC) $< 5\%$, y alcanza un valor máximo para $FC > 35\%$. La corrección máxima resulta en un aumento de valores de N de aproximadamente +6golpes/pie.

$$C_{\text{Finos}} = (1 + 0.004 \cdot FC) + 0.05 \cdot \frac{FC}{N_{1.60}}$$

El porcentaje de finos se ingresa tal cual, por ejemplo 15% se expresa como 15 y el valor de $N_{1.60}$ en golpes/pie.

4. Correcciones de magnitud (CSR_N): Se basa en la correlación de relación de esfuerzos cíclicos uniforme equivalente (CSR_{eq}) para diferentes magnitudes a CSR_N. CSR_{eq} representa una magnitud equivalente a M_w = 7.5, y por medio del factor de ponderación DWF_M se puede ponderar a otras magnitudes, como:

$$CSR_N = CSR_{eq.M=7.5} = \frac{CSR_{eq.M=M}}{DWF_M}$$

La Ilustración 65 muestra los valores resultantes de DWF, como una función de la variación corregida.

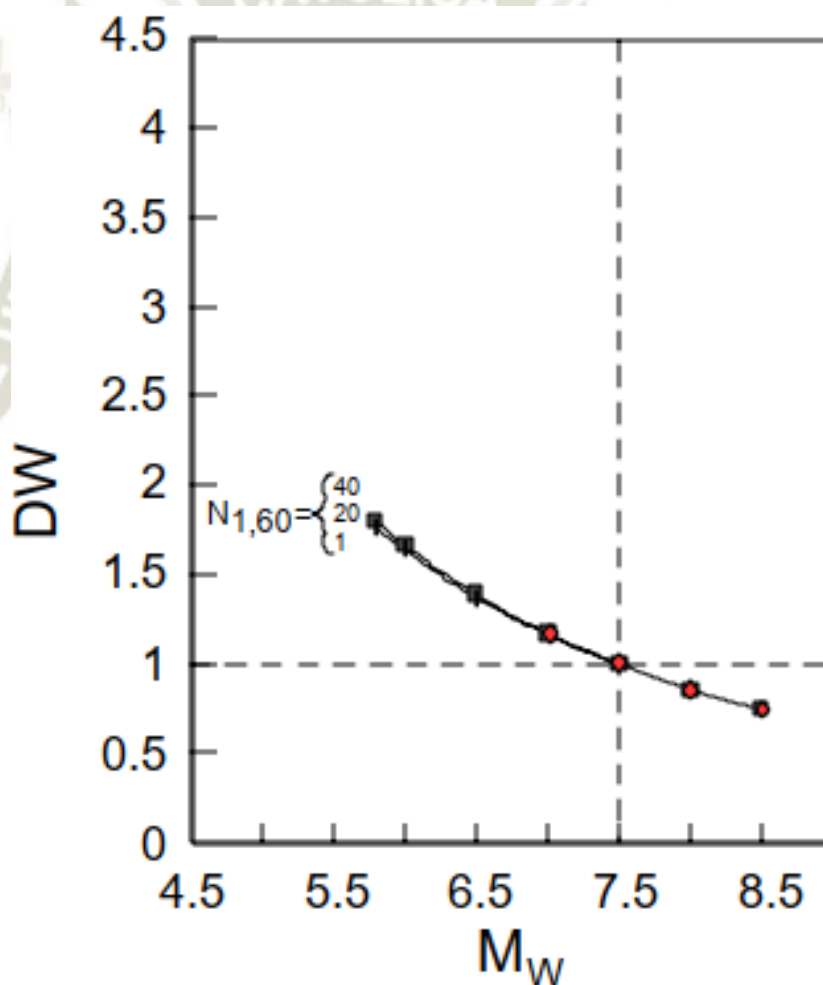


Ilustración 65 Correlación de Magnitud (Seed, 2001).

Ajuste por tensión vertical efectiva (K_σ). Este es un factor adicional al de la corrección ya realizada para la normalización del valor N , basado en historias de casos de campo, donde se observó que con el aumento del esfuerzo de sobrecarga efectivo el suelo es más susceptible a presentar licuefacción cíclica.

$$CSR_{liq} = CSR_{liq.1atm} \cdot K_\sigma$$

K_σ se obtiene de la Ilustración 66, en función al esfuerzo vertical efectivo (σ'_v) ingresado en unidades atm y a la densidad relativa (D_r)

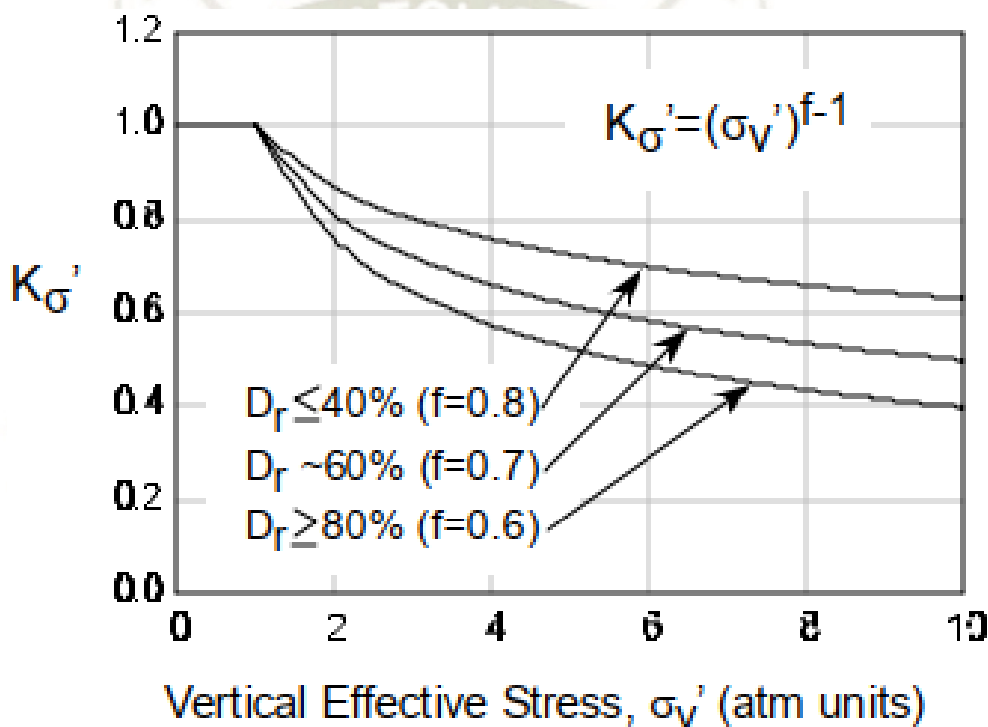


Ilustración 66 Valores recomendado dos de K_σ para $\sigma'_v > 2atm$ (Seed, 2001).

Resumen y recomendaciones. Las nuevas correlaciones probabilísticas se pueden usar de forma directa o por partes, siendo esta ultima la utilizada de manera convencional.

La directa consiste en la aplicación de la fórmula de potencial de licuefacción (P_L)

$$P_L(N_{1.60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC) = \phi \left(-\frac{N_{1.60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97}{2.70} \right)$$

Donde:

- P_L =La probabilidad de licuefacción en decimales
- ϕ =Distribución normal estándar acumulada

$$CRR(N_{1.60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC, P_L) = \exp\left[\frac{N_{1.60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97 + 2.70 \cdot \phi^{-1}(P_L)}{13.72}\right]$$

Donde:

$\phi^{-1}(P_L)$ = El inverso de la distribución normal estándar acumulada

Si se analiza por partes el procedimiento a seguir, sería:

1. Corregir el N medido por $N_{1,60}$
2. Corregir el $N_{1,60}$ por contenido de finos ($N_{1,60,CS}$)
3. Ajuste del CSR por magnitud (CSR_N)
4. Ajuste del CSR por sobrecarga ($CSR_{liq,1atm}$)

Posterior a ello y con $N_{1,60,CS}$ corregido, al igual que CSR se ingresa a la Ilustración 67 para conocer la probabilidad de licuefacción del suelo estudiado.

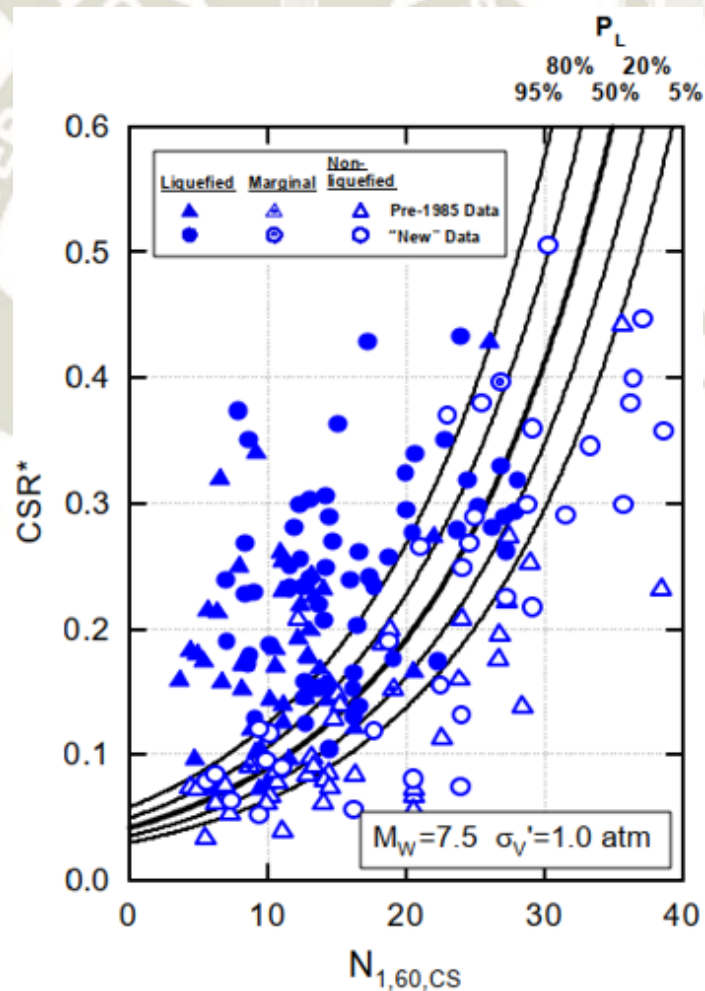


Ilustración 67 Recomendación Probabilística de Licuefacción basada en SPT (Seed, 2001)

Método de Cetin y otros (2004). Presenta gran similitud con lo presentado por Cetin & Seed en el año 2001, en cuanto a los factores y correcciones. El principal aporte de la investigación de Cetin es la incorporación de un criterio más estricto para la incorporación a la base de datos, clasificándolos en 4 categorías, según su fiabilidad. Para el presente estudio, se consideró exclusivamente los 2 primeros grupos.

La propuesta de este método es dejar atrás los esfuerzos por representar de mejor manera los estudios individuales en zonas específicas y proponer una herramienta probabilística más potente y flexible, aprovechando al máximo las historias de casos disponibles y el conocimiento actual que afecta el procesamiento e interpretación de estos. (Cetin, y otros, 2004).

Esfuerzo Cortante Cíclico equivalente (CSR_{eq}). Se evaluó utilizando valores estimados y siguiendo las mismas ecuaciones se (R.B. Seed, y otros, 2003).

$$CSR_{eq} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d$$

Donde:

- a_{max} = la aceleración horizontal máxima de la superficie del suelo.
- g = la aceleración de la gravedad.
- σ_v = tensión vertical total.
- σ'_v = tensión vertical efectiva.
- r_d = factor de participación de la masa de corte no lineal:

Para:

$d < 20$ m (~65 ft):

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,12m}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341(-d + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341(0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}} \right]} \pm \sigma_{\epsilon r_d}$$

$d \geq 20$ m (~65 ft):

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,12m}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341(-20 + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341(0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}} \right]} - 0.0046 \cdot (d - 20) \pm \sigma_{\epsilon r_d}$$

$$\sigma_{\epsilon r_d}(d) = d^{0.850} \cdot 0.0198 [\text{para } d < 12 \text{ m (40ft)}];$$

$$\sigma_{\epsilon r_d}(d) = 12^{0.850} \cdot 0.0198 [\text{para } d \geq 12 \text{ m (40ft)}]$$

Correcciones del valor N.

Este valor obtenido mediante el ensayo de campo de penetración estándar SPT, para ser considerado un valor sin sesgo y con la finalidad de corregir posibles errores o variaciones; tanto humanas, como del equipo empleado debe ser sometido a diversas correcciones:

$$N_{1.60.CS} = N \cdot C_N \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \cdot C_{Finos}$$

Donde:

- $C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_v}}$, $\lim C_N \leq 1.6$ (Liao & Whitman, 1986)
- C_R = Ilustración 64 Ilustración 64 Ilustración 64 Valores de CR recomendados (longitud de varilla desde el punto de impacto del martillo hasta la punta de la muestra) (Seed, 2001).
- C_S, C_B, C_E = Tabla 19
- $C_{Finos} = (1 + 0.004 \cdot FC) + 0.05 \cdot \frac{FC}{N_{1.60}}$

Factor de correlación por magnitud y sobrecarga.

Todos los ensayos y las correlaciones propuestas se realizaron para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$, y una sobrecarga inexistente. Por ello para reflejar las condiciones del suelo a estudiar, se introducen estos factores, dando de esta forma mayor semejanza a la realidad.

$$CSR^*_{eq} = \frac{CSR_{eq}}{DWF_M \cdot K_\sigma}$$

Donde:

- DWF_M = Ilustración 65 Ilustración 65 Correlación de Magnitud
 K_σ = Ilustración 66

Aplicación método determinístico. Con los dos valores calculados anteriormente:

$N_{1.60.CS}$ y CSR^*_{eq} se puede determinar el potencial de licuefacción mediante la Ilustración 67.

Aplicación método probabilístico simplificado.

Todas las ecuaciones expresadas con anterioridad se pueden expresar de manera concisa y completa en la probabilidad de licuefacción (P_L):

$$P_L(N_{1.60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC) = \phi \left(- \frac{N_{1.60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR_{eq}) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.05 \cdot FC + 16.85}{2.70} \right)$$

Donde:

P_L =La probabilidad de licuefacción en decimales (por ejemplo 30% = 0.3)

CSR_{eq} =No se ajusta por magnitud o tensión vertical efectiva (estos ajustes ocurren en la misma ecuación).

FC =Es el contenido de finos (en peso seco) expresado como número entero (12% = 12). Y con límites $5\% \leq FC \leq 35\%$

P_a =Presión atmosférica (1atm \approx 100 kPa \approx 2000 psf)

ϕ =Distribución normal estándar acumulada.

También la relación de resistencia cíclica o CRR por sus siglas en inglés “*Cyclic Resistance Ratio*”, para una probabilidad dada de licuefacción se puede expresar como:

$$CRR(N_{1.60}, M_w, \sigma'_v, FC, P_L) = \exp \left[\frac{N_{1.60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.05 \cdot FC + 16.85 + 2.70 \cdot \phi^{-1}(P_L)}{13.32} \right]$$

A manera de resumen de este acápite se presenta en la Ilustración 68 un cuadro con la clasificación de todos los métodos anteriormente mencionados.

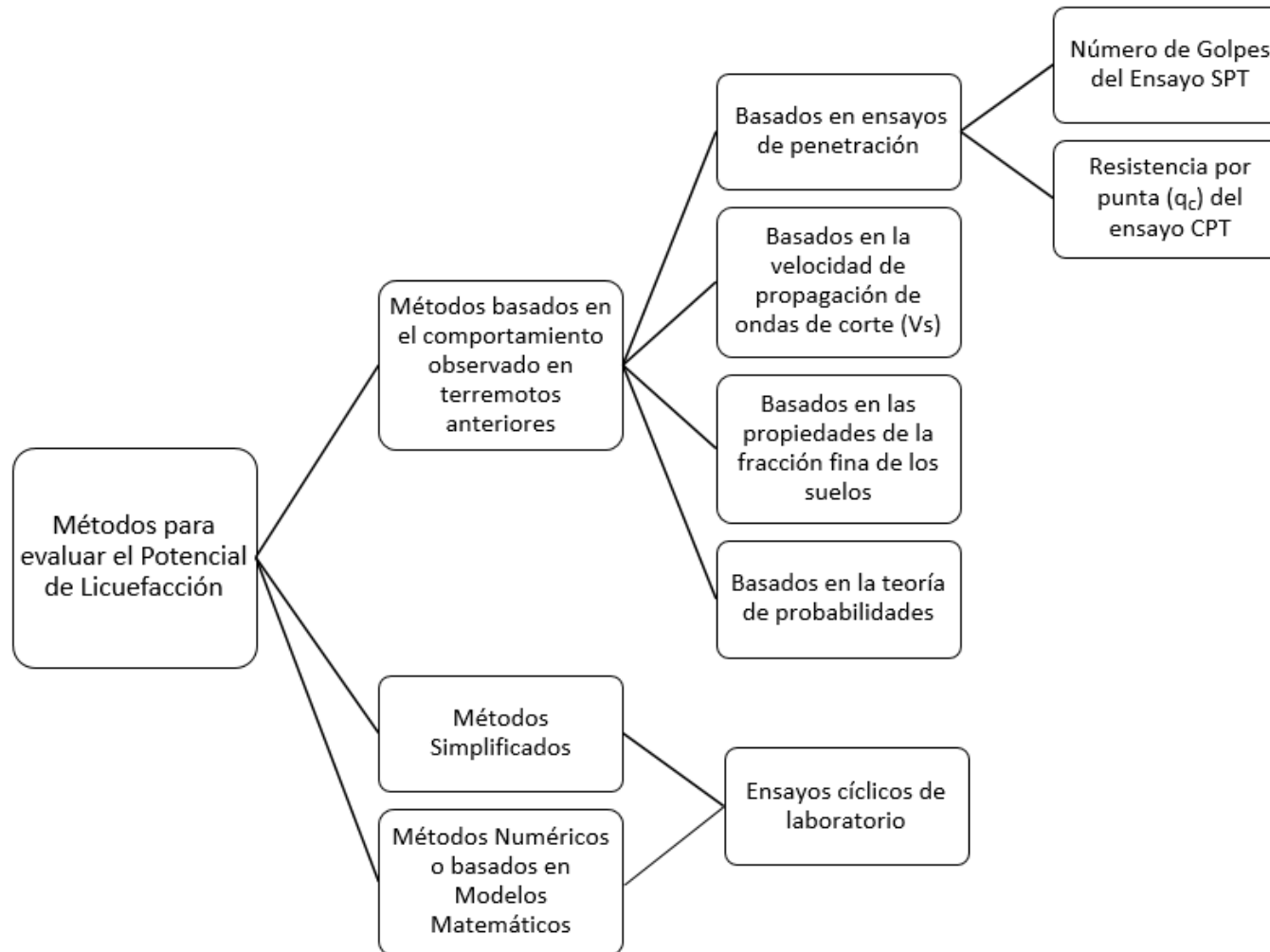


Ilustración 68: Esquema resumen de la clasificación de métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción. Fuente: Elaboración propia.

Elección del método a utilizar en la investigación

En los puntos anteriores se aprecia de manera profunda gran variedad de métodos para hallar el potencial de licuefacción. A su vez un avance sistemático al pasar los años, refinándolos tras cada investigación con la única finalidad de traspasar la incertidumbre a donde debe residir, en la experiencia y criterio del ingeniero encargado.

No sería adecuado considerar como una metodología válida a una que ha servido de base para otras (demostrando una evolución), las cuales (nuevas metodologías) en sus antecedentes describen claramente las carencias de aquellos métodos desfasados, buscando continuamente simplificar las variables en nada más que las esenciales para describir el fenómeno motivo de esta tesis. Un claro ejemplo es el uso actual del método simplificado de Seed & Idriss (1971) recomendado por la Norma E.050, “Suelos y Cimentaciones” del RNE – Perú el cual presenta más de 45 años de desfase. Por eso después de analizar los diversos métodos, se establecieron varios criterios de selección:

- Antigüedad del método.
- Precisión del método.
- Aplicabilidad del método.
- Disponibilidad de información.
- Accesibilidad del equipo.
- Costo de los ensayos

Cetin, y otros (2004) presentan una metodología basada en el ensayo de penetración estándar (SPT), si bien las más recientes investigaciones utilizan el ensayo de penetración de cono (CPT), la no disponibilidad del equipo en la ciudad de Arequipa, y el excesivo costo de del traslado y de operarios especializados, nos derivó a la metodología anteriormente mencionada.

La metodología propuesta utiliza una metodología probabilística, condensando todas las variables en una ecuación formulada mediante regresiones de alto nivel (bayesiana), permitiendo trabajar con diversas variables, una notable evolución con referencia a sus predecesoras. Las variables de este método se pueden clasificar en:

- Variables relacionadas la resistencia del suelo:
 - (1) N del SPT corregidos ($N_{1.60}$),
 - (2) esfuerzo vertical del punto estudiado (σ_v),
 - (3) esfuerzo efectivo vertical del punto estudiando (σ'_v),
 - (4) contenido de finos (FC) y
 - (5) profundidad de estudio (d).
- Variables relacionadas con el sismo de estudio:
 - (1) Aceleración pico (a_{max}).
 - (2) Velocidad de propagación de onda promedio en los 12m superiores ($V_{s,12m}^*$).
 - (3) Magnitud momento estudiada (M_w).

Si bien, no se cuenta con una microzonificación sísmica detallada de la zona de estudio: el centro poblado El Pasto, existe una diversidad de métodos para estimar los valores relacionados con el sismo ($a_{max}, V_{s,12m}^*$), las cuales se tratarán a detalle más adelante.

Interpretación de la probabilidad de licuefacción (P_L)

La incorporación de la probabilidad, valores de 0 a 100%, como forma directa de cuantificar la ocurrencia del fenómeno de licuefacción permite al ingeniero la opción de considerar un nivel de riesgo, o de excedencia como parte del análisis del fenómeno de licuefacción.

La experiencia al calcular este índice para 63 sitios licuados y 22 no licuados en Japón permitió a (Iwasaki, y otros, 1982) concluir que sitios con valores de P_L superiores a 15% sufren graves efectos de licuefacción, mientras que los efectos son significativamente menores en sitios con valores de P_L menores a aproximadamente 5%.

Cetin, y otros (2004) método a aplicar en la presente tesis, recomienda también $P_L < 0.15$ (es decir 15 %) como no licuable, de lo contrario, lo restante se considera licuable.

Plasmando la experiencia de Iwasaki, y otros (1982) y Cetin, y otros, (2004) se puede interpretar los efectos de la licuefacción según la Tabla 20, valores que serán usados posteriormente luego del cálculo previo de P_L .

Potencial de Licuefacción (%)	Efectos
$P_L = 0$	Suelo no licuable
$0 < P_L \leq 5$	No hay efectos de licuación
$5 < P_L \leq 15$	Podrían existir efectos severos por licuación
$15 < P_L \leq 100$	Efectos severos por licuación
$P_L = 100$	Suelo altamente licuable

Tabla 20 Rango P_L para definir los efectos de la licuación en superficie (Cetin y otros, 2004).

Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar, o SPT por sus siglas en inglés (Standard Penetration Test), es el ensayo de campo más comúnmente utilizado para medir la resistencia del suelo a la penetración dinámica de un muestreador de tubo partido de 2" de diámetro.

Este ensayo fue creado en el año 1927, por un sondista de la Raymond Concrete Pile Co., quien propuso a Terzagui contabilizar el número de golpes necesarios para introducir la distancia de 1 pie, él toma-muestras que él solía utilizar en terrenos sin cohesión (arenas). (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2012)

El ensayo consiste en hincar el muestreador de tubo partido, (Ilustración 69), 45 cm en el suelo por medio de impactos o golpes, de un martillo de 63.5 kg que cae libremente desde una altura de 76.2 cm, mediante un sistema de caída automático, semiautomático o haciendo uso de un malacate con una sogas que se conecta al martillo. (Ilustración 70)

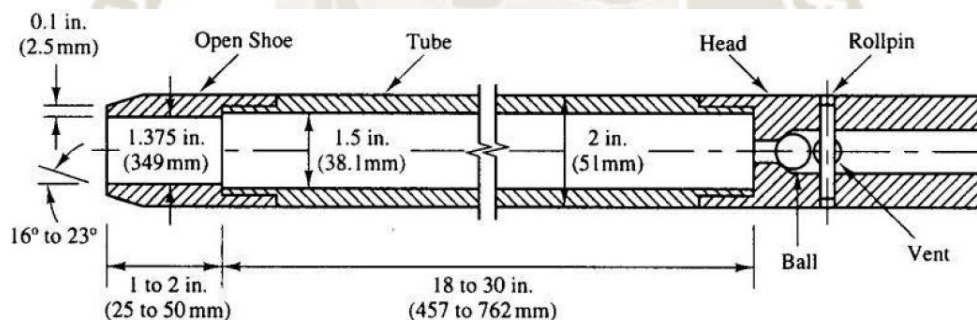


Ilustración 69: Muestreador de tubo partido del ensayo SPT. Fuente ASTM D-1586, Copyright ASTM.

Las especificaciones del equipo y detalles del procedimiento completo pueden encontrarse en las siguientes normas: ASTM D-1586, NTP 339.133 y MTC E 119 del manual de ensayo de materiales.

Se registra el número de golpes requerido para perforar cada tramo de 15 cm, la suma del número de golpes del segundo y tercer tramo (los últimos 30 cm) se denomina resistencia a la penetración estándar y se designa con la letra N. (Chozo Aldana & Peñaloza Villegas, 2016)

Se procede luego a extraer el varillaje junto con el tubo de caña partida y se obtiene la muestra inalterada con la que se puede efectuar posteriormente los respectivos ensayos de laboratorio.

El ensayo de penetración estándar se lleva a cabo especialmente en arenas o suelos finos, no se recomienda efectuarlo en depósitos de grava o roca, debido a los daños que podría sufrir el equipo durante la perforación. (Carmona Álvarez, 2014)

Se dará por finalizado el ensayo o se dice que el ensayo muestra rechazo si:

- N es mayor a 50 golpes/ 15 cm
- N es igual a 100 golpes / 30 cm
- No hay avance alguno luego de 10 golpes.

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones., 2016) (Carmona Álvarez, 2014)

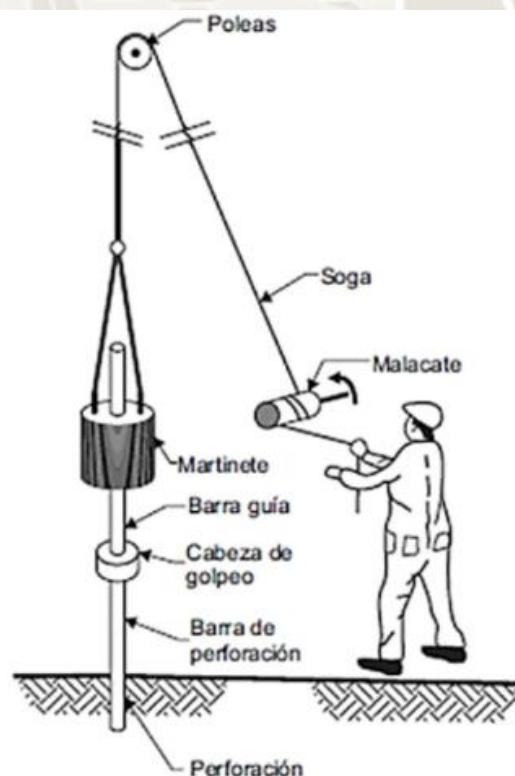


Ilustración 70: Esquema general del ensayo de penetración estándar SPT. Fuente (SDS, Sísmica de Suelos, 2018)

Constantes sísmicas representativas

Velocidad de propagación de onda

La velocidad de propagación de las ondas de corte del suelo juega un rol importante en el diseño geotécnico de estructuras sometidas a cargas dinámicas, ya sea para determinar la categoría sísmica a la que pertenece el sitio o como parámetro de entrada en las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (Fauzi, A, Irsyam, & Fauzi, U. J, 2014).

Los métodos más apropiados para medir la velocidad de propagación de ondas de corte, (V_s) son los métodos de campo. (Jhinkwan & Jain, 2016) (Ghazi, Hafezi Moghadas, Sadegui, Ghafoori, & Reza Lashkaripur, 2015).

Existen numerosos métodos in situ para medir V_s , incluyendo el estudio de refracción sísmica, ensayos down-hole, cross hole, CPT sísmico, micro tremor de refracción, análisis espectral de ondas de superficie (SASW) y uno de los más usados actualmente en el Perú, el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) (Park, Miller, & Xia, 1999), (Andrus & Stokoe, 1997), (Ghazi y otros. 2015), (Kayen, y otros, 2013).

Sin embargo, todos estos métodos suelen consumir mucho tiempo, son costosos, producen altos niveles de ruido, requieren de espacios abiertos para realizar el ensayo, muchas veces no se cuenta con la disponibilidad del equipo o requieren de grandes inversiones iniciales para costear los instrumentos necesarios. (Jhinkwan & Jain, 2016) (Ghazi y otros, 2015).

Por esto es importante determinar la velocidad de propagación de ondas de corte utilizando una correlación empírica (Jhinkwan & Jain, 2016).

Durante casi cuatro décadas, muchos investigadores han desarrollado relaciones entre la velocidad de las ondas de corte del suelo y otras propiedades geotécnicas. En la mayoría de estas, la V_s se considera como una función del valor N del ensayo SPT ya que es una de las pruebas más efectivas en la evaluación rápida y de bajo costo de las propiedades mecánicas del suelo. (Ghazi y otros, 2015).

Correlación entre el valor N del SPT y la Vs. Numerosas relaciones entre el número de golpes N del ensayo SPT y la velocidad de ondas de corte Vs pueden encontrarse en la literatura. La forma más convencional de estas relaciones es:

$$V_s = aN^b$$

Donde las constantes a y b son determinadas por regresión estadística de un conjunto de datos. (Fauzy y otros,2014) (Ghazi y otros, 2015).

Sykora y Stokoe (1983) concluyeron que el uso del valor N corregido por presión efectiva vertical de confinamiento para las correlaciones con la Vs es considerablemente menos preciso y más inconsistente que aquellas que utilizan el valor N sin corregir. Por ellos se utiliza el valor de N sin corregir para determinar Vs en el presente estudio.

La Tabla 21 presenta una recopilación de las correlaciones propuestas por diferentes autores a través de los años.

Investigador (es)	Todos los suelos (m/s)	Arena (m/s)	Limo (m/s)	Arcilla (m/s)
Kanai (1966) *	$V_s = 19 N^{0.6}$	-	-	-
Shibata (1970)	-	$V_s = 31.7 N^{0.54}$	-	-
Imai y Yoshimura (1970) *	$V_s = 76 N^{0.33}$	-	-	-
Ohba y Toriuma (1970) *	$V_s = 84 N^{0.31}$	-	-	-
Ohba y otros (1972)	-	$V_s = 87.2 N^{0.36}$	-	-
Fujiwara (1972)	$V_s = 92.1 N^{0.337}$	-	-	-
Ohsaki e Iwasaki (1973)	$V_s = 81.4 N^{0.39}$	-	-	-
Imai y otros (1975)	$V_s = 89.9 N^{0.341}$	-	-	-
Imai (1977)	$V_s = 91 N^{0.337}$	$V_s = 80.6 N^{0.331}$	-	$V_s = 80.2 N^{0.292}$
Ohta y otros (1978)	$V_s = 85.35 N^{0.348}$	-	-	-
Seed e Idriss (1981)	$V_s = 61.4 N^{0.5}$	-	-	-
Imai y Tonouchi (1982)	$V_s = 96.9 N^{0.314}$	-	-	-
Seed y otros (1983)	-	$V_s = 56.4 N^{0.5}$	-	-
Sykora y Stokoe (1983)	-	$V_s = 100.5 N^{0.29}$	-	-
Fumal y Tinsley (1985)	-	$V_s = 152 + 5.1 N^{0.27}$	-	-

Investigador (es)	Todos los suelos (m/s)	Arena (m/s)	Limo (m/s)	Arcilla (m/s)
Tonouchi y otros (1983)	$V_s = 97 N^{0.314}$	-	-	-
Jinan (1987)	$V_s = 116.1 (N + 0.3185)^{0.202}$	-	-	-
Okamoto y otros (1989)	-	$V_s = 125 N^{0.3}$	-	-
Lee (1990)	-	$V_s = 57.4 N^{0.49}$	$V_s = 105.64 N^{0.32}$	$V_s = 114.43 N^{0.31}$
Pitilakis y otros (1992)	-	$V_s = 162 N^{0.17}$	-	-
Raptakis y otros (1995)	-	$V_s = 100 N^{0.24}$	-	-
Sisman (1995)	$V_s = 32.8 N^{0.51}$	-	-	-
Iyisan (1996)	$V_s = 51.5 N^{0.516}$	-	-	-
Kayabali (1996)	-	$V_s = 175 + (3.75 N)$	-	-
Jafari y otros (1997) *	$V_s = 22 N^{0.85}$	-	-	-
Pitilakis y otros (1999)	-	$V_s = 145 (N_{60})^{0.178}$	-	$V_s = 132 (N_{60})^{0.271}$
Kiku y otros (2001)	$V_s = 68.3 N^{0.292}$	-	-	-
Jafari y otros (2002)	-	-	$V_s = 22 N^{0.77}$	$V_s = 27 N^{0.73}$
Hasancebi y Ulusay (2006)	$V_s = 90 N^{0.309}$	$V_s = 90.82 N^{0.319}$	-	$V_s = 97.89 N^{0.269}$
Hasancebi y Ulusay (2006)	$V_s = 104.79 (N_{60})^{0.26}$	$V_s = 131 (N_{60})^{0.205}$	-	$V_s = 107.63 (N_{60})^{0.237}$
Dikmen (2009)	$V_s = 58 N^{0.39}$	$V_s = 73 N^{0.33}$	$V_s = 60 N^{0.36}$	$V_s = 44 N^{0.48}$
Uma Maheshwari y otros (2010)	$V_s = 95.64 N^{0.301}$	$V_s = 100.53 N^{0.265}$	-	$V_s = 89.3 N^{0.358}$
Fauzi y otros (2014)	$V_s = 105.03 N^{0.286}$	-	-	-

Tabla 21 Correlaciones existentes entre la velocidad de onda de corte y la residencia a la penetración estándar. Fuente (Gautam, 2017)

Sykora (1987) señala que la relación de vacíos y el esfuerzo efectivo, especialmente en suelos anisotrópicos, son las dos variables principales que afectan la velocidad de ondas de corte V_s , medida en campo. Sabiendo que el valor N del ensayo de penetración estándar está severamente influenciado por las condiciones de campo, especialmente relación de vacíos y estado de presiones efectivas, el uso de correlaciones basadas en este parámetro parece estar debidamente justificado. (Sykora D. W., 1987).

Correlación utilizada en la investigación. El uso de otras variables correlativas a parte del valor N de SPT para calcular el valor de V_s , como el tipo de suelo, la edad geológica y la profundidad, propuesto por Ohta y Goto (1978a) (1978b) arroja resultados más precisos

(coeficientes de correlación más altos) que anteriores estudios que relacionan únicamente el valor N y la Vs. (Sykora D. W., 1987).

La exactitud de las correlaciones mejora al incluir la profundidad, edad geológica y tipo de suelo, en ese orden de influencia de acuerdo con Sykora (1987).

En la Tabla 22 se muestran las ocho ecuaciones mejor ajustadas propuestas por Ohta y Goto, en (1978b) . Siendo la ecuación número 8 la más representativa al incluir las cuatro variables anteriormente mencionadas (Sykora D. W., 1987) y por lo tanto será la que se utilizará en esta investigación para determinar la velocidad de propagación de ondas de corte de cada muestra obtenida con el ensayo SPT.

Combinación de Parámetros de Correlación	Relaciones Mejor Ajustadas (Vs en pie/s) *	Coefficiente de Correlación
1. Valor N SPT	$V_S = 280 N^{0.348}$	0.719
2. Valor N SPT -Tipo de suelo	$V_S = 285 N^{0.333} \begin{matrix} 1.000 \\ 1.018 \\ 1.086 \end{matrix} \Big _S$ **	0.721
3. Valor N SPT -Edad Geológica	$V_S = 302 N^{0.265} \begin{matrix} 1.000 \\ 1.456 \end{matrix} \Big _G$ **	0.784
4. Valor N SPT -Edad Geológica -Tipo de suelo	$V_S = 155 N^{0.254} D^{0.222}$	0.786
5. Valor N SPT -Profundidad	$V_S = 306 N^{0.247} \begin{matrix} 1.000 \\ 1.458 \end{matrix} \Big _G \begin{matrix} 1.000 \\ 1.045 \\ 1.096 \end{matrix} \Big _S$	0.82
6. Valor N SPT -Profundidad -Tipo de suelo	$V_S = 146 N^{0.218} D^{0.288} \begin{matrix} 1.000 \\ 1.073 \\ 1.199 \end{matrix} \Big _S$	0.826
7. Valor N SPT -Profundidad -Edad Geológica	$V_S = 180 N^{0.209} D^{0.188} \begin{matrix} 1.000 \\ 1.308 \end{matrix} \Big _S$	0.848
8. Valor N SPT -Profundidad -Edad Geológica -Tipo de suelo	$V_S = 179 N^{0.173} D^{0.195} \begin{matrix} 1.000 \\ 1.306 \end{matrix} \Big _G \begin{matrix} 1.000 \\ 1.085 \\ 1.189 \end{matrix} \Big _S$	0.853

* Profundidad en pies

** Números ordinales deben ser interpretados como:

$\begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \end{matrix} \Big _G$	$Y_1 =$ factor correspondiente a suelos del Holoceno	$\begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{matrix} \Big _S$	$Y_1 =$ factor correspondiente a arcillas
	$Y_2 =$ factor correspondiente a suelos del Pleistoceno		$Y_2 =$ factor correspondiente a arenas
			$Y_3 =$ factor correspondiente a gravas

Tabla 22 Resultados de la cuantificación del análisis de regresión lineal involucrando Vs y el valor de N del SPT.

Fuente (Ohta & Goto, 1978b)

Se muestran los resultados del cálculo de la velocidad de propagación de ondas de corte, utilizando la ecuación número 8 de la Tabla 22 en la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25.

SPT 1								
Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	Vs (pie/s)	Vs (m/s)
1	1.64	11	Holoceno	1	Arena	1.085	323.86	98.71
2	3.28	4	Holoceno	1	Limo	1	286.83	87.43
3	4.92	2	Holoceno	1	Arena	1.085	298.76	91.06
4	6.56	19	Holoceno	1	Arena	1.085	466.47	142.18
5	8.20	11	Holoceno	1	Arena	1.085	443.26	135.11
6	9.84	10	Holoceno	1	Arena	1.085	451.79	137.71

Tabla 23: Resultados del cálculo de la Vs en el área de estudio, sondeo SPT N°1. Fuente Elaboración propia

SPT 2								
Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	Vs (pie/s)	Vs (m/s)
1	1.64	9	Holoceno	1	Arena	1.085	312.81	95.34
2	3.28	7	Holoceno	1	Arena	1.085	342.85	104.50
3	4.92	9	Holoceno	1	Limo	1	357.18	108.87
4	6.56	2	Holoceno	1	Arena	1.085	315.99	96.31
5	8.20	6	Holoceno	1	Arena	1.085	399.13	121.66
6	9.84	20	Holoceno	1	Arena	1.085	509.35	155.25

Tabla 24 Resultados del cálculo de la Vs en el área de estudio, sondeo SPT N°2. Fuente Elaboración propia

SPT 3								
Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	Vs (pie/s)	Vs (m/s)
1	1.64	4	Holoceno	1	Limo	1	250.57	76.37
2	3.28	6	Holoceno	1	Limo	1	307.67	93.78
3	4.92	9	Holoceno	1	Arena	1.085	387.54	118.12
4	6.56	16	Holoceno	1	Arena	1.085	452.81	138.02
5	8.20	9	Holoceno	1	Arena	1.085	428.14	130.50
6	9.84	22	Holoceno	1	Arena	1.085	517.82	157.83

Tabla 25 Resultados del cálculo de la Vs en el área de estudio, sondeo SPT N°3. Fuente Elaboración propia

Como se explicó anteriormente en los métodos de evaluación de potencial de licuefacción, para el cálculo del factor r_d , se requiere la rigidez de sitio o $V_{s,12m}^*$, definida como la velocidad de ondas de corte representativa o promedio del sitio, en los 12 metros superiores. (Cetin, y otros, 2004).

La determinación de este parámetro puede realizarse utilizando datos de mediciones de campo de V_s , o puede ser aproximada usando valores estimados de V_s , para los estratos de suelo correspondientes a los 12 m superiores. Finalmente, si la estimación de $V_{s,12 m}^*$ en un caso dado resulta complicada, este valor puede asumirse entre 150 -200 m/s (500-650 ft/s) para la mayoría de los sitios potencialmente licuables. (Cetin, y otros, 2004).

Todas las correlaciones de la ecuación para el cálculo de r_d fueron desarrolladas para lugares de rigidez “típica”. Para sitios de suelos muy blandos con $V_{s,12 m}^*$ menores a 120 m/s (400 ft/s), deben realizarse los respectivos análisis de respuesta de sitio o usarse un valor límite de $V_{s,12 m}^* = 120$ m/s. Similarmente para sitios de suelo muy duros con $V_{s,12 m}^*$ mayores a 250 m/s (820 ft/s), se realizarán los análisis de sitio correspondientes o se utilizará un valor límite de $V_{s,12 m}^* = 250$ m/s. (Cetin, y otros, 2004).

Se realizó el cálculo de la velocidad promedio de cada punto de exploración el resumen se muestra en la Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28.

SPT 1		
Estrato	V_s (m/s)	V_s Promedio (m/s)
1	98.71	
2	87.43	
3	91.06	
4	142.18	115.37
5	135.11	
6	137.71	

Tabla 26 Velocidad de ondas de corte promedio en el área de estudio, SPT N°1. Fuente Elaboración propia.

SPT 2		
Estrato	V_s (m/s)	V_s Promedio(m/s)
1	95.34	
2	104.50	
3	108.87	
4	96.31	113.66
5	121.66	
6	155.25	

Tabla 27 Velocidad de ondas de corte promedio en el área de estudio, SPT N°2. Fuente Elaboración propia.

SPT 3		
Estrato	Vs (m/s)	Vs Promedio(m/s)
1	76.37	
2	93.78	
3	118.12	
4	138.02	119.10
5	130.50	
6	157.83	

Tabla 28 Velocidad de ondas de corte promedio en el área de estudio, SPT N°3. Fuente Elaboración propia.

Los valores obtenidos corresponden a la velocidad representativa de los 3 metros superiores, pero para clasificar la rigidez del sitio se necesitaría efectuar el análisis en los 12 metros superiores. A falta de estos datos y por limitaciones económicas se considera complicada la estimación de este parámetro, por lo que se utilizarán los valores recomendados por Cetin en su estudio realizado el año 2004.

Si bien los depósitos de suelo analizados muestran valores relativamente bajos de Vs promedio con valores cercanos a 120 m/s, no se les podría clasificar como muy blandos y tomar el valor límite de 120 m/s, ya que de considerarse 9 metros más de profundidad en el análisis, estos se incrementarían, dado que a cuanto más denso sea el material más rápido se desplazarán las ondas a través de él.

Por lo que se asume el valor de $V_{s,12m}^* = 150$ m/s en el presente estudio siguiendo las recomendaciones de Cetin y otros (2004).

Aceleración máxima del suelo

Las aceleraciones máximas disponibles son: (1) la mayor aceleración horizontal registrada en un acelerograma de tres componentes, (2) la media geométrica (resultante), (3) una combinación vectorial de aceleraciones horizontales.

La aceleración recomendada por Cetin, y otros (2004) y a usarse en el presente estudio es la media geométrica de ambas componentes registrada. Ya que no difiere mucho de la aceleración máxima de una componente, presentando un criterio permisible. Por otra parte, la aceleración vectorial, raramente se calcula y no debería usarse.

Procedimiento de cálculo.

Los recientes estudios como los de: (1) (Castillo Aedo & Alva Hurtado, 1993), (2) (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004), (3) (Tavera H. , y otros, 2014) y (4) (ZER Geosystem Peru S.A.C., 2014) presentan aceleraciones horizontales máximas (PGA), para cierta probabilidad, en un determinado periodo de vida útil. Este conjunto de datos se tomará como referencia en el cálculo de potencial de licuefacción.

Si bien, las aceleraciones máximas horizontales, se encuentran a libre disposición, su sismo origen (Mw) será calculado posteriormente.

Resumiendo, la aplicación en software para el análisis de respuesta de sitio (Tabla 29) ante un evento sísmico, requiere como datos para su cálculo:

Estudios de Peligro Sísmico	Software de análisis de respuesta de sitio
(Castillo Aedo & Alva Hurtado, 1993)	RISK por McGuire (1976)
(Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004)	MRiesgo
(Tavera H. , y otros, 2014)	CRISIS por Ordaz y otros (2007)
(ZER Geosystem Peru S.A.C., 2014)	CRISIS por Ordaz y otros (2007)

Tabla 29 Softwares utilizados en los recientes estudios de peligro sísmico en el Perú. Fuente: Elaboración Propia.

- Una compilación de la base de datos sísmicos considerando la magnitud momento (Mw) de sismos superficiales (Ilustración 71a) y de subducción (Ilustración 71b)

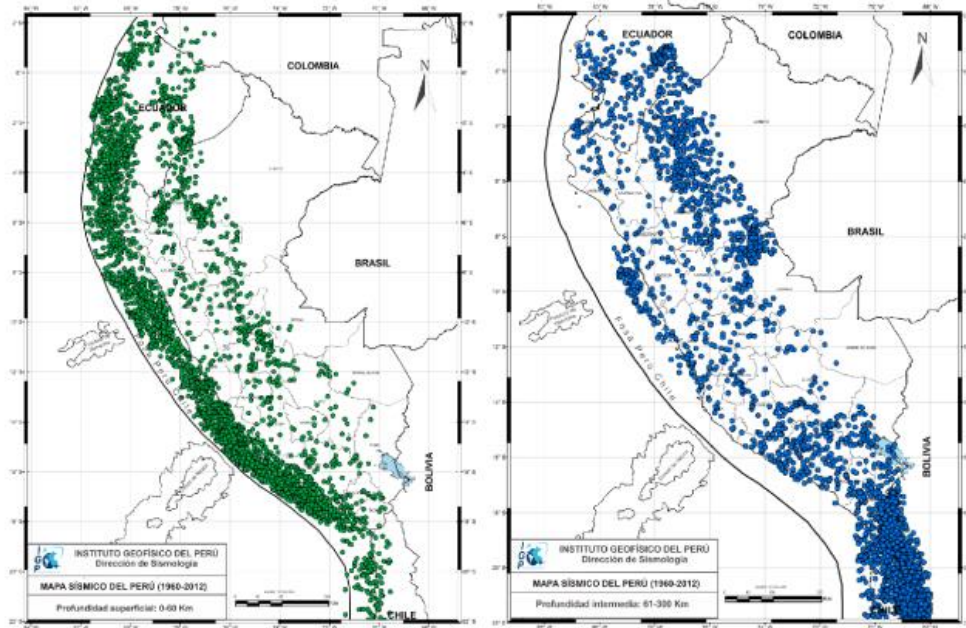


Ilustración 71 Mapa sísmico del Perú (1960-2012) (a) Superficiales (b) Intermedios (IGP, 2014).

- Fuentes sismogénicas cuyo número y geometrías son coherentes con las características sismo tectónicas en Perú (Ilustración 72).

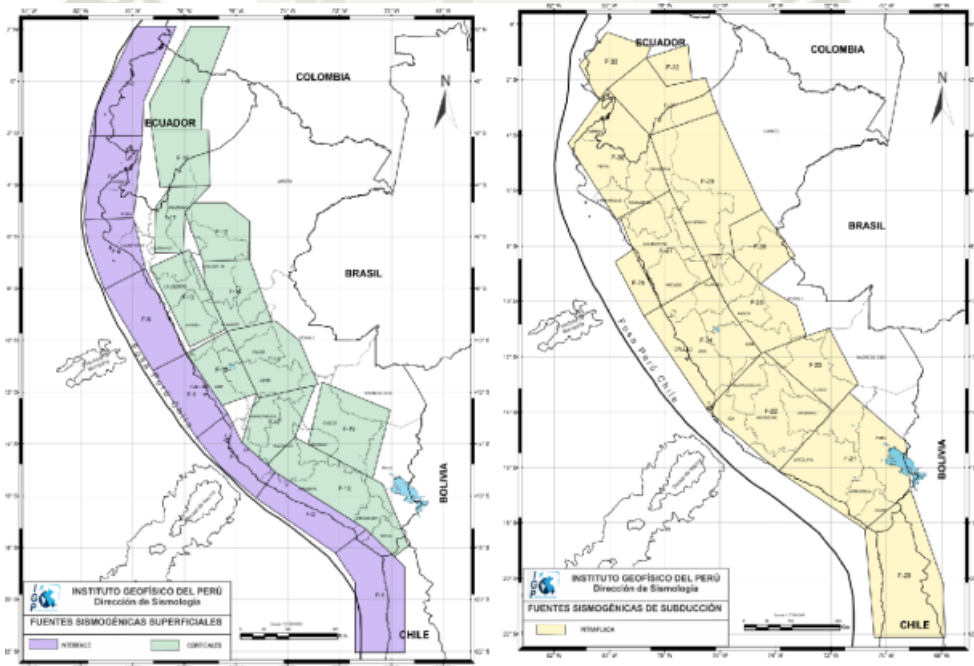


Ilustración 72 (a) Fuentes sismogénicas superficiales (b) Fuentes sismogénicas de subducción (IGP, 2014).

- Evaluar las leyes de atenuación utilizadas en los estudios de peligro sísmico en Perú y en América. A continuación, un resumen de las leyes de atenuación junto con su método de cálculo de peligro sísmico. (Tabla 30).

Estudios de Peligro Sísmico	Leyes de Atenuación	
(Castillo Aedo & Alva Hurtado, 1993)	Subducción	Casa verde (1980)
(Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004)	Sismos continentales	McGuire (1974)
(Tavera H. , y otros, 2014)	Subducción	Young et al (1997)
	Sismos continentales	Yadith et al. (1997).
	Subducción	Young et al (1997)
	Sismos continentales	Sadigh et al (1997)
(SENCICO, 2018)	Subducción	Young et al (1997)
	Sismos continentales	Zhao et al (2006)
	Sismos continentales	Sadigh et al (1997)

Tabla 30 Resumen de leyes de atenuación según los métodos de cálculo de peligro sísmico. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, el uso del algoritmo de los softwares de análisis de sitio realiza el cálculo de las aceleraciones del suelo para diferentes tiempos de exposición, probabilidad de excedencia, tiempo de retorno y lo más importante, ubicaciones diversas.

Isoaceleraciones. Corresponde a las máximas aceleraciones horizontales del suelo o PGA, por sus siglas en inglés, su cálculo se realiza utilizando algún software como los mencionados en la Tabla 29, con una probabilidad de excedencia, un tiempo de exposición y un periodo de retorno determinado como datos de entrada.

El Anexo B incluye mapas de peligro sísmico de la región de Arequipa y tablas disponibles.

Servicio Web de Consultas para la determinación del peligro sísmico en el territorio nacional. Es un servicio brindado por SENCICO (Servicio Nacional de Capacitación para la industria de la construcción) para la determinación del peligro sísmico probabilístico en el territorio nacional, elaborado a partir del análisis de data del catálogo sísmico actualizado hasta el 1 de enero del 2016 (SENCICO, 2018).

La información que brinda incluye:

- Curvas de probabilidad anual de excedencia vs. Aceleración espectral, para periodos desde $T=0.0$ s hasta $T=3.0$ s, y para amortiguamientos críticos que fluctúan entre 2% y 10%, en una malla con resolución de 0.10° grados geográficos.
- Espectros de peligro uniforme de aceleración para 475 años, 2500 años y cualquier otro periodo de retorno.

- Espectros de diseño sísmico determinados tomando en consideración la Norma E.030-2016 Diseño Sismorresistente (considerando tanto valores de “Z” genéricos según la zona, así como valores de “Z” específicos obtenidos del cálculo de peligro sísmico) y espectros de diseño sísmico determinados según ASCE/SEI 7 (2010) referidos a edificaciones. (SENCICO, 2018)

Sismo de diseño del C.P El Pasto.

La selección del movimiento sísmico de diseño depende del tipo de obra (Tabla 31) tanto como del punto geográfico por tomarse como referencia, en este caso: Longitud -71.54 y Latitud -16.46 grados geográficos. Donde se calcularon por métodos gráficos o por medio del servicio web de consulta considerando el tiempo de retorno y la aceleración pico del suelo (PGA) acorde al tipo de estructuras presentes en el C. P. El Pasto (Tabla 32).

Tipo de obra	Vida útil (años)	Probabilidad de excedencia	Tiempo de retorno (años)
Instalaciones esenciales	50 a 100	0.01	5000/9950
Equipos S/E eléctrica de alto voltaje	50	0.03	1600
Puentes o viaductos de arterias principales	100	0.1	950
Tanques de almacenamiento de combustible	30	0.05	590
Edificaciones para viviendas	50	0.1-0.2	225/500
Construcciones temporales	15	0.3	40

Tabla 31 Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño (Grases, 1989).

El tipo de edificaciones predominantes en el área de estudio son las edificaciones de viviendas, también en cierta medida algunas viviendas precarias, que podrían considerarse como viviendas de carácter temporal. A su vez se encuentra un almacén de gas licuado de petróleo (GLP).

Por ello con relación a la Tabla 31 y lo expuesto en el anterior párrafo, se seleccionaron los periodos de retorno (T_r) representativos 50, 100, 475 y 950 años. La información disponible se plasma en la Tabla 32.

t	Pex	Tr	A	Tn	Aceleraciones pico del suelo (a_{max} o PGA) (g)				
					Alva y Castillo (1993)	Monroy y Bolaños (2004)	Talavera y otros (2014)	SENCICO (2014)	IGP(2014)
5	10%	50	5%	0.0				0.2014	0.18
10	10%	100	5%	0.0				0.2636	0.223
50	10%	475	5%	0.0	0.395	0.37	0.3673	0.4605	0.391
100	10%	950	5%	0.0	0.455	0.45	0.4286	0.5774	

Tabla 32 Principales propuestas de aceleración pico del suelo. Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

- t: Tiempo de exposición (años)
- Pex: Probabilidad de excedencia (%)
- Tr: Periodo de retorno (años)
- A: Amortiguamiento (%)
- Tn: Periodo estructural (segundos)

Los 2 primeros periodos de retorno se obtendrán de los datos proporcionados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2004), al ser los más conservadores. Los dos siguientes debido a la gran varianza entre los diferentes autores, se considerará los de (Bolaños Luna & Monroy Concha (2004) por ser los más próximos a la media. Esto se resume en la Tabla 33.

Tiempo de exposición	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno (Tr)	Amortiguamiento	Periodo Estructural (Tn)	Aceleraciones pico del suelo (a_{max} o PGA) (g)	
					Monroy y Bolaños (2004)	IGP (2014)
5	10%	50	5%	0.0		0.18
10	10%	100	5%	0.0		0.223
50	10%	475	5%	0.0	0.37	
100	10%	950	5%	0.0	0.45	

Tabla 33 Aceleración máxima del suelo en el C. P. El Pasto. Fuente: Elaboración Propia.

Magnitud del sismo de diseño

Para la determinación del sismo a estudiar, se partió de las fuentes sismogénicas y su distribución de epicentros, así como las características tectónicas del área de influencia.

Tomando como referencia el terremoto del 23 de junio del 2001 donde la ubicación epicentral de sus réplicas de mayor magnitud sugiere un plano de ruptura en dirección de Sureste, como se aprecia en la Ilustración 73 (Tavera, y otros, 2002).

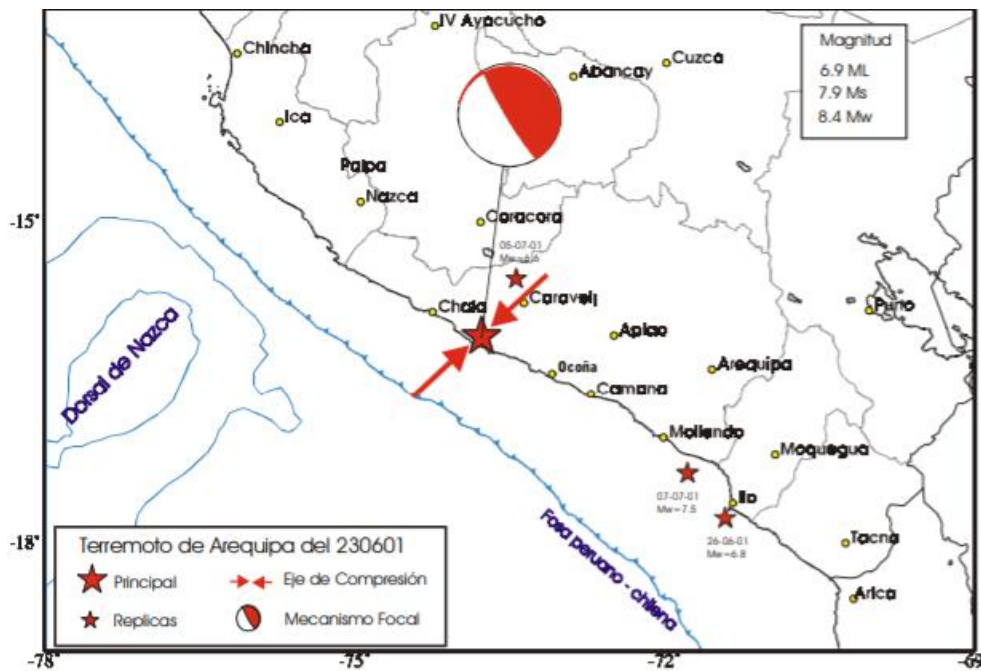


Ilustración 73 Mecanismo focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto del 23 de junio de 2001. Se indican la ubicación de 3 réplicas principales y los valores de magnitud.

De las réplicas de mayor magnitud se tomó la más cercana a la ciudad de Arequipa, siendo esta la ocurrida el 7 de julio del 2001. A continuación, se presentan los parámetros hipocentrales del terremoto y sus réplicas (Tabla 34):

Fecha	Hora	Lat. – S	Long. – W	Prof. Km	Mg.	Agencia
23/06/2001	20:23:04	16.20	73.75	29	6.9ML	IGP
23/06/2001	20:33:13	16.15	73.40	33	8.4Mw	NEIC
26/06/2001	04:18:31	17.73	71.34	31	6.8Mw	NEIC
05/07/2001	13:53:50	15.56	73.45	69	6.6Mw	NEIC
07/07/2001	9:48:43	17.38	71.78	26	7.5 Mw	NEIC

Tabla 34 Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 y de tres de sus réplicas principales. Fuente: Elaboración Propia.

Distancia al centro poblado El Pasto. Como parte del cálculo de susceptibilidad de licuefacción en el Grado 1, el radio (R) representa una variable, al igual de la magnitud. De igual forma, para el cálculo de la magnitud del sismo de estudio, se requiere la distancia hipocentral al área de estudio. Por ello mediante correlaciones matemáticas se obtuvo dicha distancia.

Como se mencionó en el párrafo anterior, se considerará la menor distancia, siendo esta la réplica cercana a la Punta de Bombón con una distancia R de 105.467 km (Tabla 35).

Sismo	Punto de estudio		Hipocentro		Distancia (km)
	Lat. - S	Long. - W	Lat. - S	Long. - W	
Sismo Principal - Atico	16.46	71.54	16.15	73.40	201.531
Replica – Ilo	16.46	71.54	17.73	71.34	142.848
Replica - Caravelí	16.46	71.54	15.56	73.45	227.416
Replica más cercana – Punta de Bombón	16.46	71.54	17.38	71.78	105.467

Tabla 35 Distancia hipocentral de sismo del 23 de junio del 2001 y sus principales replicas. Fuente: Elaboración Propia.

Leyes de atenuación para ordenadas espectrales. En este estudio, con objetivo de evaluar el potencial de licuefacción se requiere determinar la magnitud del momento sísmico (M_w) relacionada con las aceleraciones máximas del suelo (PGA) y con la distancia hipocentral mencionadas anteriormente.

Para este cálculo se requieren las leyes de atenuación para ordenadas espectrales (Tabla 30), en este caso las propuestas por Young y otros (1997) y por Chávez (2006) siendo este último, autor de un trabajo local, realizado en base a datos de la red acelerográfica del CISMID.

A continuación, se detallan las leyes correspondientes, y se definirán sus variables.

Leyes de atenuación propuesta por Young y otros (1997). La relación para ordenadas espectrales propuestas para suelos es:

$$\ln(S_a) = -0.6687 + 1.438 \cdot M + C_1 + C_2 \cdot (10 - M)^3 + C_3 \cdot \ln(R + 1.097 \cdot e^{0.617 \cdot M}) + 0.00648 \cdot H + 0.3643 \cdot Z_t$$

Con desviación estándar de

$$\ln(S_a) = C_4 + C_5 \cdot M$$

Donde:

- Sa = Aceleración espectral expresada en g.
- M = Magnitud de momentos sísmico M_w .
- R = Distancia hipocentral o distancia más cercana al área de ruptura en km.
- H = Profundidad focal en km.
- Zt = 0 para sismos interfase, 1 para sismos interplaca.
- C_i = Coeficientes Tabla 36.

Periodo (s)	C1	C2	C3	C4	C5
0	0	0	-2.329	1.45	-0.1
0.075	2.4	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1
0.1	2.516	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1
0.2	1.549	-0.0019	-2.464	1.45	-0.1
0.3	0.793	-0.002	-2.327	1.45	-0.1
0.4	0.144	-0.002	-2.23	1.45	-0.1
0.5	-0.438	-0.0035	-2.14	1.45	-0.1
0.75	-1.704	-0.0048	-1.952	1.45	-0.1
1	-2.87	-0.0066	-1.785	1.45	-0.1
1.5	-5.101	-0.0114	-1.47	1.5	-0.1
2	-6.433	-0.0164	-1.29	1.55	-0.1
3	-6.672	-0.0221	-1.347	1.65	-0.1
4	-7.618	-0.0235	-1.272	1.65	-0.1

Tabla 36 Coeficientes para la ley de atenuación de aceleración espectral en suelo (Young y otros, 1997).

Leyes de atenuación propuesta por Chávez (2006). Este procedimiento estadístico de análisis bayesiano presenta un nuevo modelo de regresión:

$$\ln Sa(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T) \cdot (M - 6) + \alpha_3(T) \cdot (M - 6)^2 + \alpha_4(T) \cdot \ln(R) + \alpha_5(T) \cdot R$$

Con desviación estándar de

$$\alpha_1(T) = \alpha_0(T) + \ln \alpha_6(T)$$

Donde:

- Sa(T) =Aceleración espectral expresada en cm/s².
- T =Periodo del sistema de un grado de libertad en s.
- M =Magnitud de momentos sísmico Mw.
- R =Distancia hipocentral o distancia más cercana al área de ruptura en km.
- $\alpha_i(T)$ =Coeficientes Tabla 37.

Periodos(s)	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	σ
0.01	5.847	0.803	0.156	-0.500	-0.003	0.890
0.05	6.524	0.659	0.187	-0.500	-0.005	1.113
0.10	6.734	0.745	0.117	-0.500	-0.004	1.014
0.20	6.439	0.891	0.101	-0.500	-0.002	0.791
0.30	5.855	0.917	0.127	-0.500	0.001	0.681
0.40	5.497	1.091	0.135	-0.500	0.001	0.679
0.50	4.918	1.104	0.112	-0.500	0.003	0.850
0.80	4.187	1.212	0.098	-0.500	0.004	0.707
1.00	3.730	1.270	0.111	-0.500	0.004	0.734
1.50	2.836	1.310	0.116	-0.500	0.006	0.771
2.00	2.421	1.396	0.135	-0.500	0.005	0.791
3.00	1.548	1.427	0.173	-0.500	0.006	0.827
4.00	1.396	1.478	0.205	-0.500	0.003	0.882

Tabla 37 Coeficientes de regresión para sismos interfase (Chávez, 2006)

Calculo de la magnitud del sismo.

Teniendo definidos en puntos anteriores las diversas variables (Tabla 38) y considerando el periodo de la estructura, al ras del suelo, como 0.0s. Se procede al cálculo de esta, la única incógnita, la magnitud momento (Mw).

Variables	Método de Young y otros (1997)	Método de Chávez (2006)		
R	105.467 km	105.467 km		
H	26km	-		
Zt	0	-		
Ci/ α_i	C1	0	α_1	5.847
	C2	0	α_2	0.803
	C3	-0.2329	α_3	0.156
	C4	1.45	α_4	-0.5
	C5	-0.1	α_5	-0.003

Tabla 38 Variables requeridas para el cálculo de Mw. Fuente: Elaboración Propia.

Posterior al cálculo, se presenta en la Tabla 39 resumen donde se aprecia los dos métodos de atenuación para ordenadas espectrales y los periodos de retorno con sus respectivas aceleraciones máximas del suelo (PGA) antes calculados.

Magnitud Momento (Mw)	Periodo de retorno (años)			
	50	100	475	950
	Aceleraciones máximas del suelo (g)			
	0.18	0.223	0.37	0.45
Método de Young y otros (1997)-suelo	8.4	8.9	10.7	12.5
Método de Chávez (2006)-Interfase	7.8	7.9	8.3	8.4

Tabla 39 Resumen de las magnitudes momento calculadas. Fuente: Elaboración Propia.

El método de Young y otros (1997) presenta ciertas inconsistencias en cuanto al orden de magnitud esperado, posiblemente debido a su origen (EE. UU.). Por ello para este estudio se tomó en cuenta los datos proporcionados por la ley de atenuación de Chávez (2006).

Resumen de constantes sísmicas

Se ha tocado y recopilado información referente a la representación sísmica que se requiere para cuantificar la magnitud y alcance de diversos fenómenos sísmicos, partiendo de sus periodos de retorno.

En la Tabla 40 se resumen los datos que se requerirán más adelante en los diversos cálculos de susceptibilidad y potencial de licuefacción.

Constantes sísmicas	Símbolo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Periodo de retorno (años)	T	50	100	475	950
Aceleraciones máximas del suelo (g)	a máx.	0.18	0.223	0.37	0.45
Distancia hipocentral o distancia más cercana al área de ruptura (km)	R	105.47	105.47	105.47	105.47
Magnitud momento	M _w	7.8	7.9	8.3	8.4
Velocidad de ondas de corte representativa en los 12 m superiores (m/s)	V _{s,12 m} *	150	150	150	150

Tabla 40 Resumen de constantes sísmicas del C. P. El Pasto. Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DEL CENTRO POBLADO DE EL PASTO

Introducción

La evaluación del potencial de licuefacción en el Centro Poblado El Pasto de forma óptima requiere el análisis multigrado (tres grados) teniendo como criterio de clasificación, el costo de implementación de cada nivel de investigación y precisión de los resultados todo esto explicado a detalle en el capítulo 3.

La evaluación del grado 1 se realiza mediante criterios de extensión máxima de susceptibilidad y de datos existentes geológicos y geomorfológicos. El grado 2 incluye estudios básicos de campo y su relación con la susceptibilidad a licuarse. Con respecto al grado 3 se realizaron estudios de campo subsuperficiales y pruebas de laboratorio en muestras extraídas de la caña partida del ensayo SPT, el método cuantificable del cálculo del potencial de licuefacción es el de Cetin, y otros (2004), presentando un potencial de licuefacción expresado en probabilidad

Análisis de licuefacción acorde a los niveles de evaluación

Grado 1

Criterio geológico y geomorfológico con datos existentes. La zonificación del potencial del fenómeno de licuefacción se puede estimar, partiendo de mapas geológicos y geomorfológicos tocados en el capítulo 2.

El Centro Poblado El Pasto se encuentra ubicado en la unidad geológica Eluvial Reciente (Qr-e) (Ilustración 74), la cual está compuesta por suelos residuales, y es descrita en su mayoría como una arena limosa. De acuerdo con el mapa geomorfológico de la ciudad (Ilustración 16), el C. P. El pasto se encuentra ubicado en la unidad geomorfológica Superficie de Socabaya (GM-mA-sS), presentando textura suave y tendencia casi horizontal, en algunas partes, el nivel freático alcanza el terreno, formando pequeños pantanos.

Esta información comparada con la Tabla 14, presenta a esta unidad geomorfológica geológica en el rango A, entrando a la clasificación de “rellenos y tierras bajas”, siendo su potencial de licuefacción considerado como “Licuefacción Probable” (Tabla 41)

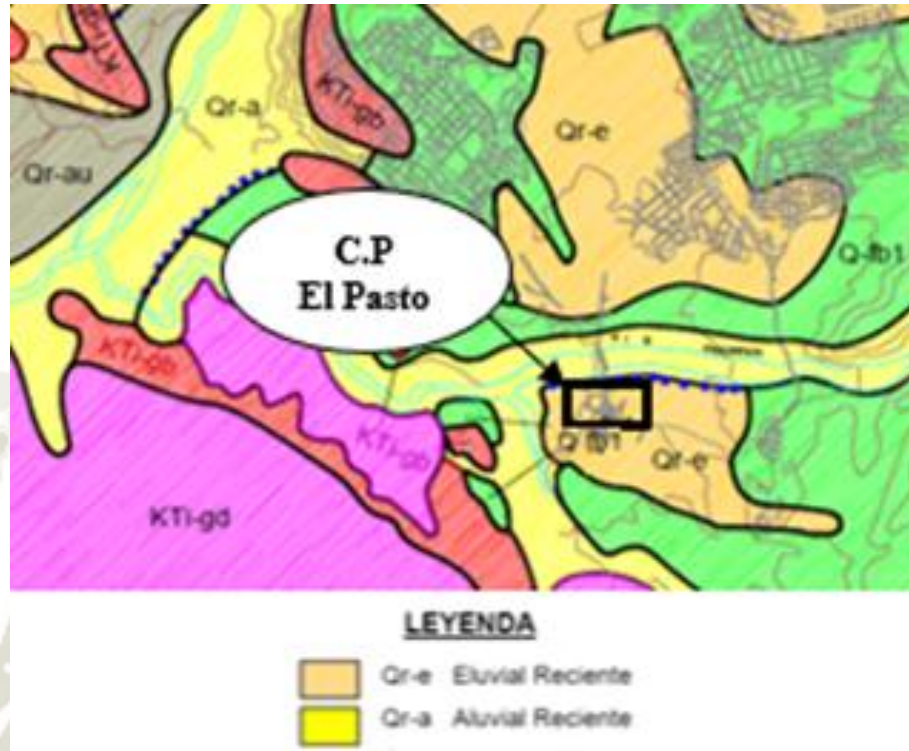


Ilustración 74 Mapa Geológico del Centro Poblado el Pasto. Fuente (Yanqui1 1990).

Rango	Unidades geomorfológicas	Potencial de licuefacción
A	Lecho del río, antiguo lecho del río, pantanos, rellenos y tierras bajas	Licuefacción probable

Tabla 41 Susceptibilidad a la licuefacción. Fuente (Iwasaki, y otros, 1982).

Criterio de intensidad. Bajo el criterio de intensidad y considerando que la edad del suelo residual sedimentario pertenece a la edad reciente, solamente ante un sismo de intensidad superior a “V” Mj, “VII” MM y 4.8 Mw, se puede desencadenar el fenómeno de licuefacción, catalogándolo como “Licuación Posible”

Se muestran en la Tabla 42 los valores de magnitud momento (Mw) calculados para los diferentes periodos de retorno propuestos en este trabajo. Todos tienen una magnitud momento mayor a 4.8 Mw por lo que bajo el criterio de intensidad se caracteriza la zona como de “Licuación Posible”.

Constantes sísmicas	Símbolo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Periodo de retorno (años)	T	50	100	475	950
Magnitud momento	Mw	7.8	7.9	8.3	8.4

Tabla 42 Valores de magnitud momento (Mw) para la zona de estudio. Fuente: Elaboración Propia

Criterio de distancia máxima. Varios investigadores han analizado la distribución de la licuefacción durante los terremotos y han comparado la distancia desde el epicentro al sitio licuado más alejado (R) con la magnitud del terremoto (M). A continuación, en la Tabla 43, Tabla 44, Tabla 45 y Tabla 46 se muestra el cálculo del radio por medio de los diferentes métodos, para cada magnitud momento de sismo a estudiar.

Método	Fórmula	Mw = 7.8		
		Mj	ML	R (km)
Kuribayashi & Tatsuoka (1975)	$\log R = 0.77 \times M_j - 3.6$	7.62	-	185.1
Liu & Xie (1984).	$R = 0.82 \times 10^{0.862(M_L - 5)}$	-	7.1	53.0
Wakamatsu (1993)	$\log R = 3.5 \times \log(1.4 \times M_j - 6)$	7.62	-	219.8
Youd & Perkins (1978)	$M_w = 4.68 + 9.2 \times 10^{-3} R_f + 0.9 \log R_f$	-	-	131.8

Tabla 43 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw=7.8. Fuente: Elaboración Propia.

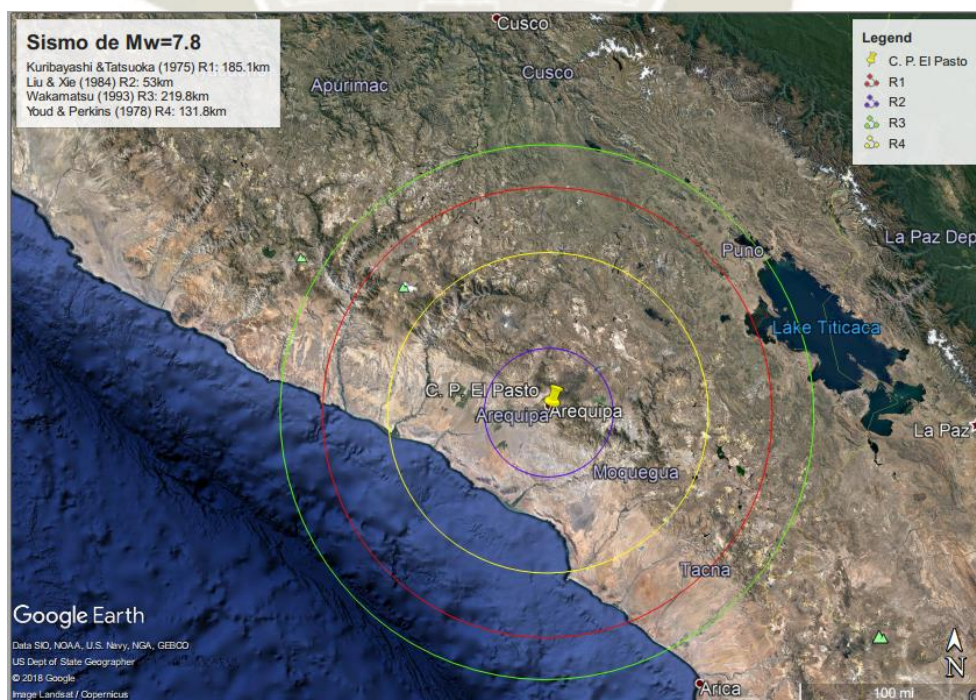


Ilustración 75 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 7.8) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto. Fuente: Elaboración Propia

Método	Fórmula	Mw = 7.9		
		Mj	ML	R(km)
Kuribayashi & Tatsuoka (1975)	$\log R = 0.77 \times M_j - 3.6$	7.65	-	195.2
Liu & Xie (1984).	$R = 0.82 \times 10^{0.862(M_L - 5)}$	-	7.14	57.3
Wakamatsu (1993)	$\log R = 3.5 \times \log(1.4 \times M_j - 6)$	7.65	-	226.8
Youd & Perkins (1978)	$M_w = 4.68 + 9.2 \times 10^{-3} R_f + 0.9 \log R_f$	-	-	140.0

Tabla 44 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw=7.9. Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 76 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 7.9) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto. Fuente: Elaboración Propia

Método	Fórmula	Mw = 8.3		
		Mj	ML	R(km)
Kuribayashi & Tatsuoka (1975)	$\log R = 0.77 \times M_j - 3.6$	7.76	-	237.2
Liu & Xie (1984).	$R = 0.82 \times 10^{0.862(M_L - 5)}$	-	7.24	69.9
Wakamatsu (1993)	$\log R = 3.5 \times \log(1.4 \times M_j - 6)$	7.76	-	253.8
Youd & Perkins (1978)	$M_w = 4.68 + 9.2 \times 10^{-3} R_f + 0.9 \log R_f$	-	-	174.2

Tabla 45 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw=8.3. Fuente: Elaboración Propia.

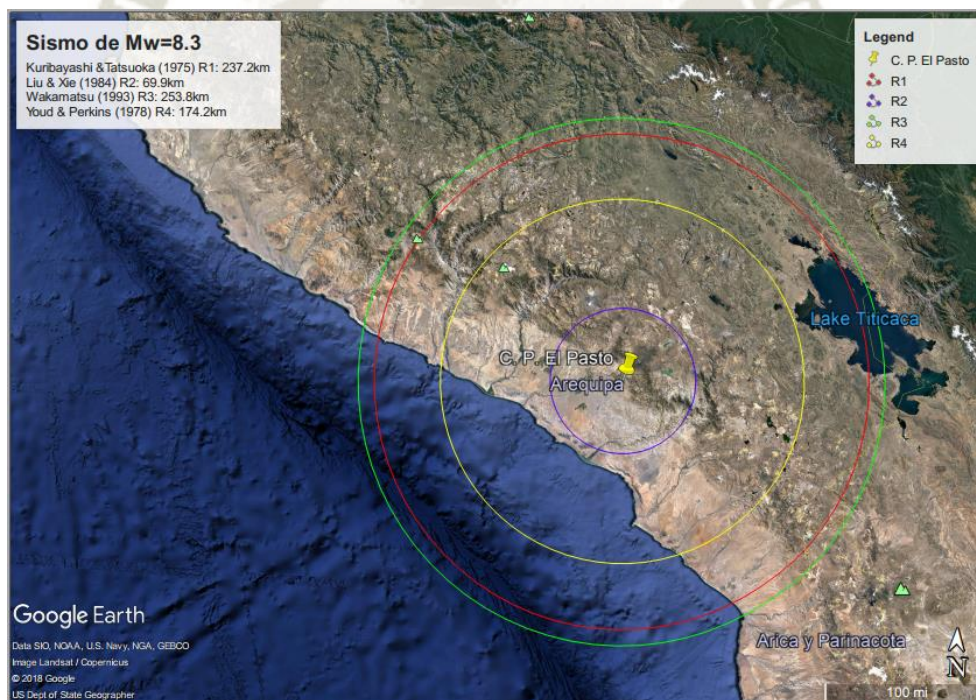


Ilustración 77 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 8.3) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto. Fuente: Elaboración Propia

Método	Fórmula	Mw = 8.4		
		Mj	ML	R(km)
Kuribayashi & Tatsuoka (1975)	$\log R = 0.77 \times M_j - 3.6$	7.78	-	245.8
Liu & Xie (1984).	$R = 0.82 \times 10^{0.862(M_L - 5)}$	-	7.26	72.8
Wakamatsu (1993)	$\log R = 3.5 \times \log(1.4 \times M_j - 6)$	7.78	-	258.9
Youd & Perkins (1978)	$M_w = 4.68 + 9.2 \times 10^{-3} R_f + 0.9 \log R_f$	-	-	183.0

Tabla 46 Evaluación del criterio de distancia máxima para una magnitud Mw= 8.4. Fuente: Elaboración Propia.

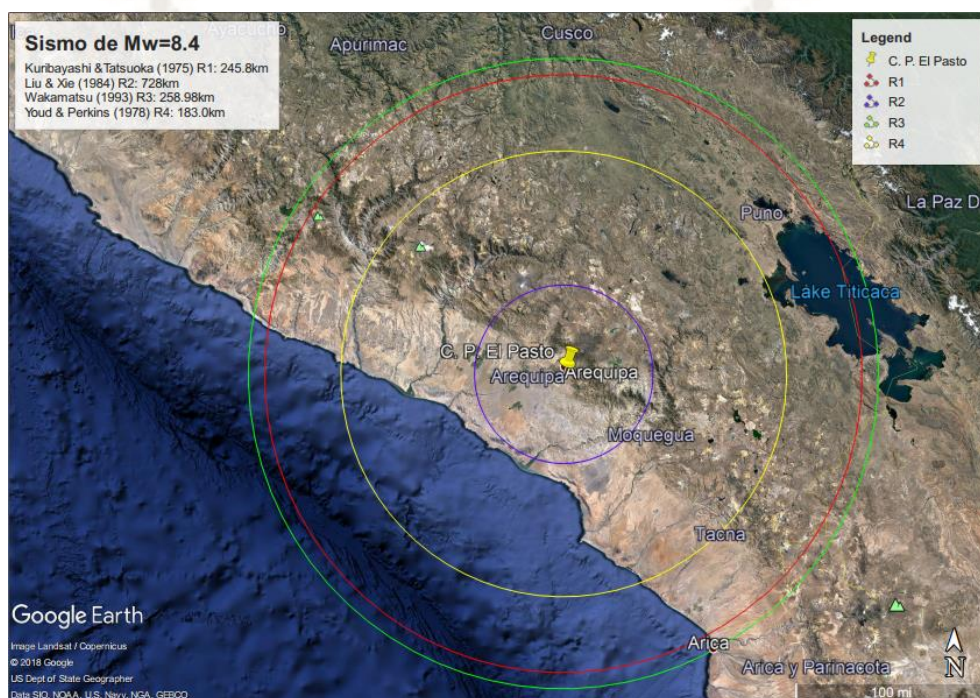


Ilustración 78 Área de posible ubicación del epicentro sísmico (Mw 8.4) donde se produciría una afección al C. P. El Pasto. Fuente: Elaboración Propia.

Resumen Grado 1

Criterio		Sismo (Mw)			
		7.8	7.9	8.3	8.4
Geológico y geomorfológico con datos existentes	Eluvial Reciente – Rellenos y tierras bajas	Licuación probable	Licuación probable	Licuación probable	Licuación probable
De intensidad.	>4.8Mw	Licuación Posible	Licuación Posible	Licuación Posible	Licuación Posible
De distancia máxima.	R máx.	219.8 km	226.8 km	253.8 km	258.9 km

Tabla 47 Resumen susceptibilidad a la licuefacción grado 1. Fuente: Elaboración propia.

Grado 2. Este grado incluye información que no siempre es publicada, pero si está a disposición del público. Dígase información proveniente del: Instituto Geofísico del Perú, Gobiernos regionales, provinciales, municipales o también por parte de la misma población.

Criterio geológico y geomorfológico. Usando otro tipo de información, como la edad geológica, reciente (Ilustración 79), sumado con la geomorfología del suelo del C. P. El Pasto, suelo residual, (Ilustración 80) se ingresa a la Tabla 15 de susceptibilidad de depósitos sedimentarios y la Tabla 16 de susceptibilidad de unidades geomorfológicas.

EDAD	UNIDAD Y DESCRIPCIÓN	GROSOR
Reciente	Depósitos eólicos y aluviales de gravas, liaos, etc.	
	Discordancia	
	Depósitos piroclásticos recientes.- Bancos de lapilli alternado con capas de arena.	
	Discordancia	

Ilustración 79 Fragmento de la Columna estratigráfica de la ciudad de Arequipa. Fuente (Vargas, 1970)

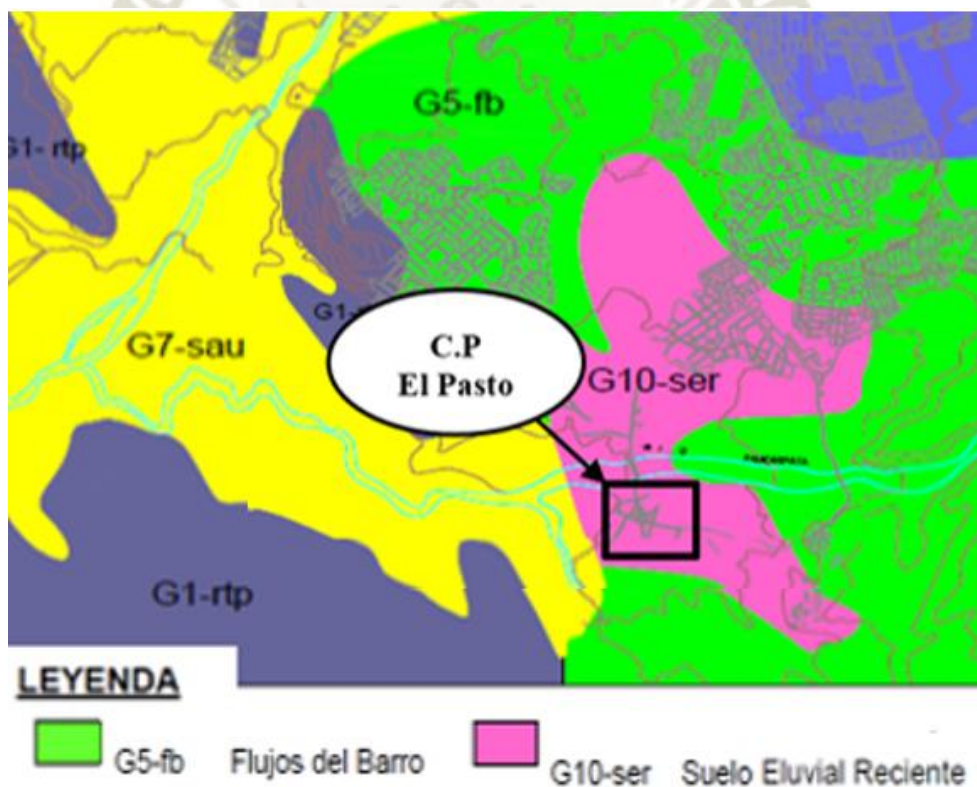


Ilustración 80 Fragmento del Mapa Geotécnico de Arequipa Fuente (Yanqui, 1990)

La susceptibilidad de depósitos sedimentarios continentales (Tabla 15), con una edad de inferior a 500 años y de tipo eluvial residual (desplazamiento de suelos a causa de lluvia) su potencial de licuefacción es considerado como “Baja susceptibilidad” tal como se observa en la Tabla 48.

Tipo de deposito	Distribución general de sedimentos sin cohesión en depósitos	Probabilidad de que los sedimentos sin cohesión, cuando están saturados, sean susceptibles de licuarse (por edad de depósito)			
		<500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre pleistoceno
Depósitos continentales					
Suelo residual	Raro	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo

Tabla 48 Susceptibilidad estimada de licuefacción para el suelo presente en C. P. El Pasto. Fuente (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

Considerando las condiciones geomorfológicas y tomando al depósito de C. P. El Pasto como una llanura de valle en la clasificación de la Tabla 16 , el potencial de licuefacción se considera como “Posible” como se observa en la Tabla 49.

Se puede apreciar la disminución del potencial de licuefacción, esto se debe a que el suelo residual presente en C. P. El Pasto presenta una distribución de sedimentos sin cohesión (arena) más extensa, el cual no es considerado en la Tabla 48, por ello la clasificación ideal del potencial de licuefacción sería el dado por la Tabla 49, donde si se considera un suelo residual compuesto por arenas. El suelo del área de estudio quedaría con un potencial de licuefacción “Posible”.

Clasificación	Condiciones Geomorfológicas	
	Condiciones específicas	Potencial de licuefacción
Llanura de valle	Valle que consiste en arena	Posible
	Otro tipo de relleno	Posible

Tabla 49 Susceptibilidad estimada de licuefacción para las condiciones geomorfológicas de C. P. El Pasto. Fuente (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999).

Grado 3.

Esta zonificación requiere investigaciones y pruebas de sitio subsuperficiales especializadas, se desarrollará en dos partes, la primera es la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción y la segunda es la determinación de la probabilidad de licuefacción utilizando la metodología determinística-probabilística de Cetin y otros (2004).

Evaluación de la Susceptibilidad del C.P El Pasto

Gradación

No aplica. De acuerdo a la clasificación SUCS de los estratos analizados se encuentra que ninguno de los suelos corresponde a una arena limpia, dado que el contenido de finos es mayor al 5% en todos los casos, exceptuando un estrato que presenta doble clasificación, como se puede observar en la Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52 y Tabla 53. Por lo que evaluar la susceptibilidad según la uniformidad en la gradación de las partículas no es posible en este estudio.

Calicata 01

Muestra	Prof. (m)	Clasificación SUCS	Descripción	% Finos
M-1	0.5	SM	Arena Limosa	39.43%
M-2	1	ML	Limo de Baja Plasticidad	70.53%
M-3	1.5	SM	Arena Limosa	27.73%
M-4	2	SM	Arena Limosa	28.42%
M-5	2.5	SM	Arena Limosa	39.75%
M-6	3	SM	Arena Limosa	34.59%

Tabla 50: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 1 del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Calicata 02

Muestra	Prof. (m)	Clasificación SUCS	Descripción	% Finos
M-1	0.5	SM	Arena Limosa	27.21%
M-2	1	GM	Grava Limosa	12.23%
M-3	1.5	GM	Grava Limosa	13.68%
M-4	2	GM	Grava Limosa	13.20%
M-5	2.5	GP-GM	Grava Mal Graduada Limosa	11.27%

Tabla 51: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 2 del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Calicata 03

Muestra	Prof. (m)	Clasificación SUCS	Descripción	% Finos
M-1	0.5	ML	Limo de Baja Plasticidad	51.89%
M-2	1	ML	Limo de Baja Plasticidad	56.65%
M-3	1.5	SM	Arena Limosa	34.06%
M-4	2	SM	Arena Limosa	41.31%
M-5	2.5	SM	Arena Limosa	38.75%
M-6	3	SM	Arena Limosa	37.75%

Tabla 52: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 3 del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Calicata 04

Muestra	Prof. (m)	Clasificación SUCS	Descripción	% Finos
M-1	0.5	SM	Arena Limosa	31.87%
M-2	1	SM	Arena Limosa	37.86%
M-3	1.5	ML	Limo de Baja Plasticidad	59.28%
M-4	2	SM	Arena Limosa	35.17%
M-5	2.5	SM	Arena Limosa	34.16%
M-6	3	SM	Arena Limosa	34.97%

Tabla 53: Clasificación SUCS y porcentajes de finos de la calicata 4 del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Forma de Partículas

Sólo en uno de los cuatro pozos exploratorios se encontró presencia de bolonería, con formas subredondeada predominantemente, en los demás pozos las escasas rocas o partículas de tamaño significativo que se encontraron presentaron formas igualmente sub redondeadas, pero por la cantidad encontrada no se considera una característica representativa.

Cabe resaltar que el pozo de exploración donde se encontró gran porcentaje de rocas es el punto más cercano al río Socabaya hecho que pudiera explicar el origen de las rocas y su forma redondeada que indicaría una mayor susceptibilidad a experimentar licuefacción.

Inspección visual de pozos de exploración					
Calicata N.º		1	2	3	4
Profundidad	Desde (m)	0	0	0	0
	Hasta (m)	3	2.5	3	3
Granulometría estimada					
% Bolones		0	15	0	0
% Grava		0	40	0	0
% Arena		60	25	60	70
% Finos		40	20	40	30
Características del suelo					
Color		Gris claro	Gris oscuro	Gris Negruzco	Marrón claro
Humedad		Saturado	Seco- Húmedo	Muy Húmedo- Saturado	Muy Húmedo- Saturado
Plasticidad		Alta	Nula	Alta	Media
Forma de las partículas		-	Sub- Redondeadas	-	-
Compacidad o Consistencia		Blanda- Muy Blanda	Densa	Blanda-Muy Blanda	Blanda-Muy Blanda
Presencia de materia orgánica		No	Sí	Sí	No

Tabla 54: Inspección Visual de las calicatas del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia

Condiciones de Nivel Freático

Según la tabla presentada por Tinsley, los suelos del C.P El Pasto presentarían una susceptibilidad a la licuefacción **Muy Alta a Alta**, debido al elevado nivel freático encontrado como se puede observar en la Tabla 55 y a que estos depósitos, como se mencionó en el apartado de geología y geomorfología de la zona, pertenecen a la edad reciente, es decir al holoceno final.

Calicata	NF (m)
01	0.78
02	2.2
03	1.8
04	2.4

Tabla 55: Nivel freático de las calicatas del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Densidad Relativa

Se muestran los resultados del análisis de la susceptibilidad de los suelos del C.P El Pasto, siguiendo el criterio propuesto por Day (2012) que relaciona el número de golpes obtenido del ensayo de penetración estándar SPT con la densidad relativa del suelo.

SPT 01			
Estrato	N	Dr	Condición
1	11	Medianamente Densa	Poco Susceptible
2	4	Suelta	Susceptible
3	2	Muy Suelta	Susceptible
4	19	Medianamente Densa	Poco Susceptible
5	11	Medianamente Densa	Poco Susceptible
6	10	Suelta	Susceptible

*Tabla 56: Densidad Relativa en función del número de golpes del ensayo SPT N°01 en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.*

SPT 02			
Estrato	N	Dr	Condición
1	9	Suelta	Susceptible
2	7	Suelta	Susceptible
3	9	Suelta	Susceptible
4	2	Muy Suelta	Susceptible
5	6	Suelta	Susceptible
6	20	Medianamente Densa	Poco Susceptible

*Tabla 57: Densidad Relativa en función del número de golpes del ensayo SPT N°02 en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.*

SPT 03			
Estrato	N	Dr	Condición
1	4	Suelta	Susceptible
2	6	Suelta	Susceptible
3	9	Suelta	Susceptible
4	16	Medianamente Densa	Poco Susceptible
5	9	Suelta	Susceptible
6	22	Medianamente Densa	Poco Susceptible

*Tabla 58: Densidad Relativa en función del número de golpes del ensayo SPT N°03 en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.*

Consistencia y Plasticidad de los Suelos

Siguiendo el criterio propuesto por R.B Seed y otros (2003) de “Licuefactibilidad de suelos con contenido de finos significativo” se analiza cada uno de los estratos del área de estudio. Los resultados se muestran en la Tabla 59, Tabla 60, Tabla 61, Tabla 62 y en la Ilustración 81, Ilustración 82 e Ilustración 83 se grafica la ubicación de los estratos según la zona de susceptibilidad a la que pertenecen.

Calicata-01										
Estrato	% f	L.L	L.P	IP	Ipc	w%	Ip	Estado	Zona	Susceptibilidad
M-1	39.43 %	35.20 %	33.39 %	1.81 %	11.10 %	52.54 %	<12 %	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable
M-2	70.53 %	42.17 %	41.61 %	0.57 %	16.19 %	65.17 %	<12 %	Aplicable	Zona B	Susceptible-Transición
M-3	27.73 %	40.49 %	39.94 %	0.55 %	14.96 %	53.96 %	<12 %	No Aplicable	-	-
M-4	28.42 %	32.44 %	29.62 %	2.83 %	9.08 %	36.98 %	<12 %	No Aplicable	-	-
M-5	39.75 %	37.04 %	32.67 %	4.38 %	12.44 %	54.09 %	<12 %	Aplicable	Zona B	Susceptible-Transición
M-6	34.59 %	35.01 %	33.47 %	1.53 %	10.95 %	63.03 %	<12 %	No Aplicable	-	-

Tabla 59: Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 01 del área de estudio. Elaboración propia

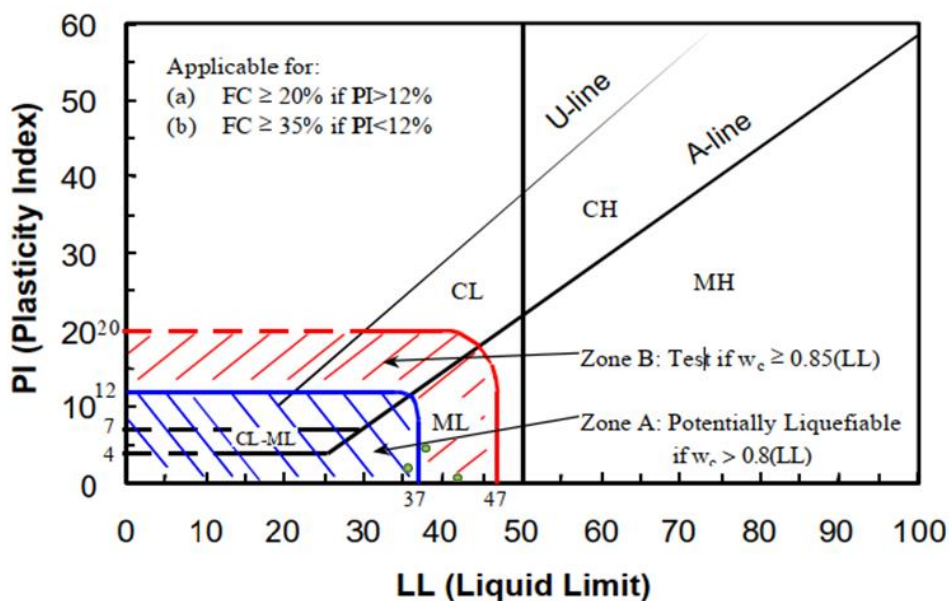


Ilustración 81: Estratos susceptibles por consistencia y plasticidad de la calicata 01 en la gráfica propuesta por R.B Seed y otros en el año 2003.

Calicata-02

Estrato	% f	L.L	L.P	IP	Ipc	w%	Ip	Estado	Zona	Susceptibilidad
M-1	27.21%	21.46%	-	NP	1.068%	30.21%	<12%	No Aplicable	-	-
M-2	12.23%	22.88%	-	NP	2.105%	20.51%	<12%	No Aplicable	-	-
M-3	13.68%	22.32%	-	NP	1.694%	20.06%	<12%	No Aplicable	-	-
M-4	13.20%	22.28%	-	NP	1.662%	20.07%	<12%	No Aplicable	-	-
M-5	11.27%	21.03%	-	NP	0.750%	21.03%	<12%	No Aplicable	-	-

Tabla 60 Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 02 del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Calicata-03

Estrato	% f	L.L	L.P	IP	Ipc	w%	Ip	Estado	Zona	Susceptibilidad
M-1	51.89%	37.32%	35.42%	1.90%	12.65%	59.31%	<12%	Aplicable	Zona B	Susceptible-Transición
M-2	56.65%	32.61%	32.10%	0.51%	9.20%	43.56%	<12%	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable
M-3	34.06%	33.16%	31.87%	1.29%	9.61%	34.89%	<12%	No Aplicable	-	-
M-4	41.31%	29.02%	28.12%	0.90%	6.59%	52.10%	<12%	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable
M-5	38.75%	27.60%	26.90%	0.70%	5.55%	56.17%	<12%	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable
M-6	37.75%	23.58%	22.63%	0.96%	2.61%	34.61%	<12%	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable

Tabla 61 Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 03 del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

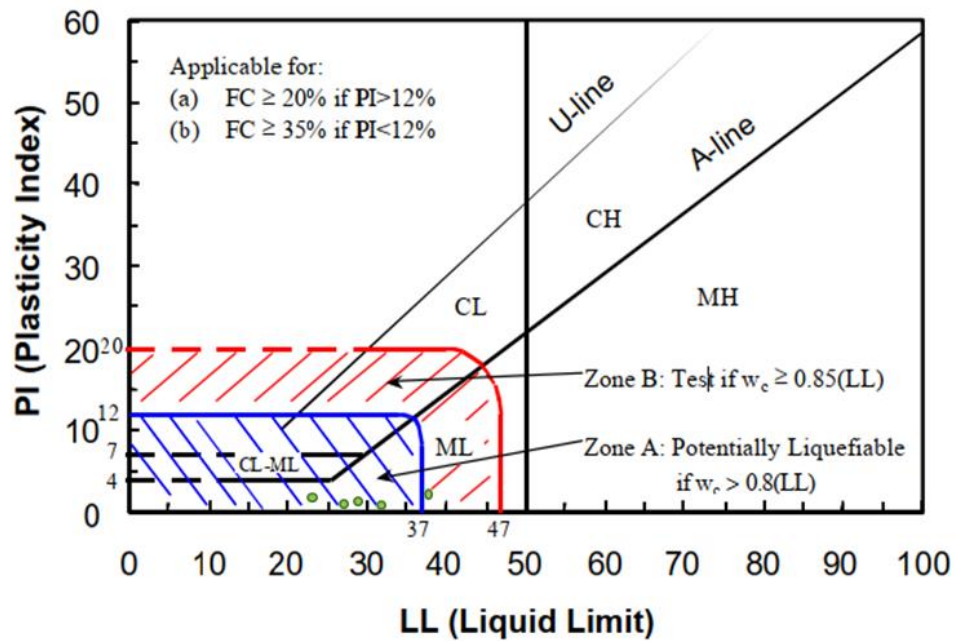


Ilustración 82 Estratos susceptibles por consistencia y plasticidad de la calicata 03 en la gráfica propuesta por R.B Seed y otros en el año 2003

Calicata-04

Estrato	% f	L.L	L.P	IP	Ipc	w%	Ip	Estado	Zona	Susceptibilidad
M-1	31.87 %	35.69 %	33.17 %	2.52 %	11.45%	31.68 %	<12 %	No Aplicable	-	-
M-2	37.86 %	30.32 %	28.58 %	1.74 %	7.53%	41.91 %	<12 %	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable
M-3	59.28 %	38.27 %	36.96 %	1.31 %	13.33%	47.53 %	<12 %	Aplicable	Zona B	Susceptible- Transición
M-4	35.17 %	28.12 %	25.40 %	2.72 %	5.93%	57.20 %	<12 %	Aplicable	Zona A	Potencialmente Licuable
M-5	34.16 %	32.57 %	32.27 %	0.31 %	9.18%	74.81 %	<12 %	No Aplicable	-	-
M-6	34.97 %	32.09 %	30.05 %	2.05 %	8.83%	70.00 %	<12 %	No Aplicable	-	-

Tabla 62 Susceptibilidad de suelos con contenido de finos significativo-Calicata 04 del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

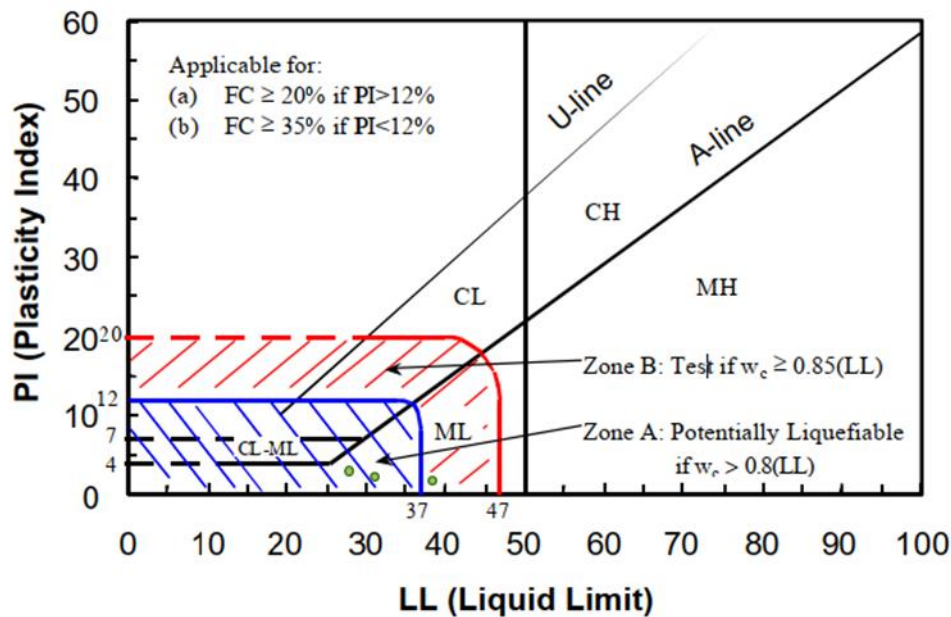


Ilustración 83 Estratos susceptibles por consistencia y plasticidad de la calicata 04 en la gráfica propuesta por R.B Seed y otros en el año 2003

Otros Criterios

González de Vallejo (2002) indica que el suelo será susceptible a experimentar licuefacción si tiene un diámetro medio: D_{50} , entre 0.05 y 1.0 mm, un contenido de finos inferior al 10% y un bajo grado de compactación considerando un $N < 10$ para profundidades menores a 10 m y $N < 20$ para profundidades mayores a 10 m.

Calicata 01 – SPT 01

Estrato	Prof. (m)	D_{50} (mm)	f %	N	Susceptibilidad		
					Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
1	0.5	0.1200	39.43%	11	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
2	1	0.0495	70.53%	4	No Susceptible	No Susceptible	Susceptible
3	1.5	0.2031	27.73%	2	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
4	2	0.2167	28.42%	19	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
5	2.5	0.1030	39.75%	11	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
6	3	0.1019	34.59%	10	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible

Tabla 63: Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°01 en función del D_{50} , porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de González de Vallejo. Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 02

Estrato	Prof. (m)	D_{50} (mm)	f %	N	Susceptibilidad		
					Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
1	0.5	0.1196	27.21%	-	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
2	1	9.2411	12.23%	-	No Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
3	1.5	4.9657	13.68%	-	No Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
4	2	5.0249	13.20%	-	No Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
5	2.5	3.3389	11.27%	-	No Susceptible	No Susceptible	No Susceptible

Tabla 64 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°02 en función del D_{50} , porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de González de Vallejo. Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 03 – SPT 03

Estrato	Prof.(m)	D ₅₀ (mm)	f %	N	Susceptibilidad		
					Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
1	0.5	0.0747	51.89%	4	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
2	1	0.0712	56.65%	6	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
3	1.5	0.1584	34.06%	9	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
4	2	0.1066	41.31%	16	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible
5	2.5	0.1612	38.75%	9	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
6	3	0.0657	37.75%	22	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible

Tabla 65 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°03 en función del D50, porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de Gonzáles de Vallejo. Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 04 – SPT 2

Estrato	Prof.(m)	D ₅₀ (mm)	f %	N	Susceptibilidad		
					Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
1	0.5	0.1672	31.87%	9	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
2	1	0.0770	37.86%	7	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
3	1.5	0.0660	59.28%	9	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
4	2	0.1063	35.17%	2	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
5	2.5	0.0955	34.16%	6	Susceptible	No Susceptible	Susceptible
6	3	0.0930	34.97%	20	Susceptible	No Susceptible	No Susceptible

Tabla 66 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°04 en función del D50, porcentaje de finos f% y número de golpes N del ensayo SPT, siguiendo los criterios de Gonzáles de Vallejo. Fuente: Elaboración Propia.

Chen & Scawthorn (2003) indica que un suelo será susceptible si presenta valores de penetración estándar corregidos por profundidad menores a 30; $(N_1)_{60} < 30$, o velocidades de ondas de corte corregidas por esfuerzo menores a 230 m/s; $V_{S1} < 230$ m/s.

NF (m) 0.78		Calicata 01 -SPT 1																Susceptibilidad
Estrato	Prof. (m)	Espesor (m)	Agua (m)	γ (t/m ³)	u (t/m ³)	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	σ'_v (kg/cm ²)	σ'_v (atm)	C_N	N	N_1	C_R	C_S	C_B	C_E	$N_{1,60}$	Criterio 1
1	0.5	0.5	0	1.652	0	0.826	0.826	0.083	0.080	1.6	11	17.6	1	1.154	0.8	0.95	15.44	Susceptible
2	1	0.5	0.22	1.694	0.22	1.673	1.453	0.145	0.141	1.6	4	6.4	1	1.1	0.8	0.95	5.35	Susceptible
3	1.5	0.5	0.5	1.548	0.72	2.447	1.727	0.173	0.167	1.6	2	3.2	1	1.1	0.8	0.95	2.68	Susceptible
4	2	0.5	0.5	1.766	1.22	3.330	2.110	0.211	0.204	1.6	19	30.4	1	1.3	0.8	0.95	30.04	No Susceptible
5	2.5	0.5	0.5	1.739	1.72	4.199	2.479	0.248	0.240	1.6	11	17.6	1	1.154	0.8	0.95	15.44	Susceptible
6	3	0.5	0.5	1.617	2.22	5.008	2.788	0.279	0.270	1.6	10	16	1	1.138	0.8	0.95	13.84	Susceptible

Tabla 67 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°01 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, N_1 , 60, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).
Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 01 -SPT 01												
Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	Vs (pie/s)	Vs (m/s)	$\sigma' v$ (kg/cm ²)	Pa/ $\sigma' v$	Vs1 (m/s)	Susceptibilidad
												Criterio 2
1	1.64	11	Holoceno	1	Arena	1.085	323.862	98.713	0.083	12.110	184.144	Susceptible
2	3.28	4	Holoceno	1	Limo	1	286.831	87.426	0.145	6.883	141.606	Susceptible
3	4.92	2	Holoceno	1	Arena	1.085	298.755	91.061	0.173	5.791	141.260	Susceptible
4	6.56	19	Holoceno	1	Arena	1.085	466.471	142.180	0.211	4.740	209.786	Susceptible
5	8.20	11	Holoceno	1	Arena	1.085	443.261	135.106	0.248	4.033	191.466	Susceptible
6	9.84	10	Holoceno	1	Arena	1.085	451.792	137.706	0.279	3.587	189.510	Susceptible

Tabla 68: Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°01 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003). Fuente: Elaboración Propia.

NF (m) 2.2		Calicata 02																
Estrato	Prof. (m)	Espesor(m)	Agua (m)	γ (t/m ³)	u (t/m ³)	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	σ_v (kg/cm ²)	σ'_v (atm)	C_N	N	N_1	C_R	C_S	C_B	C_E	$N_{1,60}$	Susceptibilidad Criterio 1
1	0.5	0.5	0	1.804	0	0.902	0.902	0.090	0.087	1.6	-	-	-	-	-	-	-	No Susceptible
2	1	0.5	0	2.06	0	1.932	1.932	0.193	0.187	1.6	-	-	-	-	-	-	-	No Susceptible
3	1.5	0.5	0	1.96	0	2.912	2.912	0.291	0.282	1.6	-	-	-	-	-	-	-	No Susceptible
4	2	0.5	0	2.169	0	3.996	3.996	0.400	0.387	1.6	-	-	-	-	-	-	-	No Susceptible
5	2.5	0.5	0.3	1.672	0.3	4.832	4.532	0.453	0.439	1.51	-	-	-	-	-	-	-	No Susceptible

Tabla 69 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°02 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).
Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 02												
Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	Vs (pie/s)	Vs (m/s)	$\sigma' v$ (kg/cm ²)	Pa/ $\sigma' v$	Vs1 (m/s)	Susceptibilidad
												Criterio 2
1	1.64	-	Holoceno	1	Arena	1.085	-	-	0.090	11.086	-	No Susceptible
2	3.28	-	Holoceno	1	Grava	1.189	-	-	0.193	5.176	-	No Susceptible
3	4.92	-	Holoceno	1	Grava	1.189	-	-	0.291	3.434	-	No Susceptible
4	6.56	-	Holoceno	1	Grava	1.189	-	-	0.400	2.502	-	No Susceptible
5	8.20	-	Holoceno	1	Grava	1.189	-	-	0.453	2.206	-	No Susceptible

Tabla 70 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°02 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003). Fuente: Elaboración Propia.

NF (m) 1.8		Calicata 03- SPT 03																
Estrato	Prof. (m)	Espesor (m)	Agua (m)	γ (t/m ³)	u (t/m ³)	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	σ'_v (kg/cm ²)	σ'_v (atm)	C_N	N	$N_{1,60}$	C_R	C_S	C_B	C_E	$N_{1,60}$	Susceptibilidad
																		Criterio 1
1	0.5	0.5	0	1.674	0	0.837	0.837	0.084	0.081	1.6	4	6.4	1	1.1	0.8	0.95	5.35	Susceptible
2	1	0.5	0	1.573	0	1.624	1.624	0.162	0.157	1.6	6	9.6	1	1.1	0.8	0.95	8.03	Susceptible
3	1.5	0.5	0	1.767	0	2.507	2.507	0.251	0.243	1.6	9	14.4	1	1.123	0.8	0.95	12.29	Susceptible
4	2	0.5	0.2	1.766	0.2	3.390	3.190	0.319	0.309	1.6	16	25.6	1	1.242	0.8	0.95	24.16	Susceptible
5	2.5	0.5	0.5	1.571	0.7	4.176	3.476	0.348	0.336	1.6	9	14.4	1	1.123	0.8	0.95	12.29	Susceptible
6	3	0.5	0.5	1.938	1.2	5.145	3.945	0.394	0.382	1.6	22	35.2	1	1.3	0.8	0.95	34.78	No Susceptible

Tabla 71 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°03 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).
Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 03 – SPT 03

Susceptibilidad

Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	V_s (pie/s)	V_s (m/s)	σ' v (kg/cm²)	Pa/σ' v	V_{s1} (m/s)	Criterio 2
1	1.64	4	Holoceno	1	Limo	1	250.568	76.373	0.084	11.944	141.981	Susceptible
2	3.28	6	Holoceno	1	Limo	1	307.674	93.779	0.162	6.159	147.735	Susceptible
3	4.92	9	Holoceno	1	Arena	1.085	387.545	118.124	0.251	3.989	166.934	Susceptible
4	6.56	16	Holoceno	1	Arena	1.085	452.807	138.016	0.319	3.134	183.641	Susceptible
5	8.20	9	Holoceno	1	Arena	1.085	428.136	130.496	0.348	2.877	169.953	Susceptible
6	9.84	22	Holoceno	1	Arena	1.085	517.819	157.831	0.394	2.535	199.151	Susceptible

Tabla 72 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°03 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1}, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003). Fuente: Elaboración Propia.

NF (m)		Calicata 04 - SPT 2																
Estrato	Prof. (m)	Espesor (m)	Agua (m)	γ (t/m ³)	u (t/m ³)	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	σ'_v (kg/cm ²)	σ'_v (atm)	C_N	N	N_1	C_R	C_S	C_B	C_E	$N_{1,60}$	Susceptibilidad
																		Criterio 1
1	0.5	0.5	0	1.745	0	0.872	0.872	0.087	0.084	1.6	9	14.4	1	1.123	0.8	0.95	12.29	Susceptible
2	1	0.5	0	1.624	0	1.685	1.685	0.168	0.163	1.6	7	11.2	1	1.1	0.8	0.95	9.36	Susceptible
3	1.5	0.5	0	1.518	0	2.444	2.444	0.244	0.237	1.6	9	14.4	1	1.123	0.8	0.95	12.29	Susceptible
4	2	0.5	0	1.368	0	3.128	3.128	0.313	0.303	1.6	2	3.2	1	1.1	0.8	0.95	2.68	Susceptible
5	2.5	0.5	0.1	1.561	0.1	3.908	3.808	0.381	0.369	1.6	6	9.6	1	1.1	0.8	0.95	8.03	Susceptible
6	3	0.5	0.5	1.601	0.6	4.709	4.109	0.411	0.398	1.586	20	31.7	1	1.3	0.8	0.95	31.34	No Susceptible

Tabla 73 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°04 en función del valor corregido del número de golpes del ensayo SPT, $N_{1,60}$, siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003).
Fuente: Elaboración Propia.

Calicata 04 – SPT 02

Susceptibilidad

Estrato	Prof. (pies)	N	Edad Geológica	G	Tipo de Suelo	S	Vs (pie/s)	Vs (m/s)	σ'_v (kg/cm²)	Pa / σ'_v	Vs1 (m/s)	Criterio 2
1	1.64	9	Holoceno	1	Arena	1.085	312.812	95.345	0.087	11.461	175.431	Susceptible
2	3.28	7	Holoceno	1	Arena	1.085	342.848	104.500	0.168	5.936	163.115	Susceptible
3	4.92	9	Holoceno	1	Limo	1.000	357.184	108.870	0.244	4.092	154.846	Susceptible
4	6.56	2	Holoceno	1	Arena	1.085	315.994	96.315	0.313	3.197	128.793	Susceptible
5	8.20	6	Holoceno	1	Arena	1.085	399.134	121.656	0.381	2.626	154.866	Susceptible
6	9.84	20	Holoceno	1	Arena	1.085	509.350	155.250	0.411	2.434	193.915	Susceptible

Tabla 74 Evaluación de la susceptibilidad en la calicata N°04 en función de la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} , siguiendo el criterio de Chen & Scawthorn (2003). Fuente: Elaboración Propia.

Determinación de la Probabilidad de Licuefacción en el C.P El Pasto

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=7.8$										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	$P_L(\%)$	Evaluación
SPT Nº 01	0.5 m				SM	11.81	0.9917	0.116	0.02	Suelo No Licuable
	1 m	N.F 0.78 m			ML	4.22	0.9823	0.132	87.11	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				SM	2.11	0.9716	0.161	99.96	Efectos Severos por Licuación
	2 m				SM	22.31	0.9596	0.177	0.00	Suelo No Licuable
	2.5 m				SM	11.81	0.9461	0.187	64.85	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	10.62	0.9313	0.196	89.79	Efectos Severos por Licuación

Tabla 75: Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.8$ del ensayo Nº1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica Mw= 7.9										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación
SPT N°01	0.5 m				SM	11.81	0.9917	0.144	1.08	No hay efectos de licuación
	1 m	N.F 0.78 m			ML	4.22	0.9822	0.164	99.00	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				SM	2.11	0.9715	0.200	100.00	Suelo Altamente Licuable
	2 m				SM	22.31	0.9594	0.219	0.13	No hay efectos de licuación
	2.5 m				SM	11.81	0.9459	0.232	94.25	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	10.62	0.9310	0.242	99.31	Efectos Severos por Licuación

Tabla 76 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica Mw=7.9 del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=8.3$										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	$P_L(\%)$	Evaluación
SPT N°01	0.5 m				SM	11.81	0.9917	0.238	77.08	Efectos Severos por Licuación
	1 m	N.F 0.78 m			ML	4.22	0.9821	0.272	100.00	Suelo Altamente Licuable
	1.5 m				SM	2.11	0.9714	0.331	100.00	Suelo Altamente Licuable
	2 m				SM	22.31	0.9592	0.364	50.75	Efectos Severos por Licuación
	2.5 m				SM	11.81	0.9457	0.385	100.00	Suelo Altamente Licuable
	3 m				SM	10.62	0.9307	0.402	100.00	Suelo Altamente Licuable

Tabla 77 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.3$ del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica Mw= 8.4										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación
SPT N° 01	0.5 m				SM	11.81	0.9915	0.290	96.69	Efectos Severos por Licuación
	1 m	N.F 0.78 m			ML	4.22	0.9818	0.331	100.00	Suelo Altamente Licuable
	1.5 m				SM	2.11	0.9708	0.402	100.00	Suelo Altamente Licuable
	2 m				SM	22.31	0.9585	0.442	86.69	Efectos Severos por Licuación
	2.5 m				SM	11.81	0.9447	0.468	100.00	Suelo Altamente Licuable
	3 m				SM	10.62	0.9295	0.488	100.00	Suelo Altamente Licuable

Tabla 78 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica Mw=8.4 del ensayo N°1 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=7.8$										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación
SPT N° 02	0.5 m				SM	9.50	0.9917	0.116	0.96	No hay efectos de licuación
	1 m				SM	7.39	0.9823	0.115	24.23	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				ML	9.50	0.9716	0.114	12.82	Podrían darse efectos severos por licuación
	2 m				SM	2.11	0.9596	0.112	98.82	Efectos Severos por Licuación
	2.5 m	N.F 2.40 m			SM	6.34	0.9461	0.114	79.70	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	23.50	0.9313	0.125	0.00	Suelo No Licuable

Tabla 79 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.8$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=7.9$										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación
SPT N° 02	0.5 m				SM	9.50	0.9917	0.144	12.57	Podrían darse efectos severos por licuación
	1 m				SM	7.39	0.9822	0.142	69.04	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				ML	9.50	0.9715	0.141	52.42	Efectos Severos por Licuación
	2 m				SM	2.11	0.9594	0.139	99.97	Efectos Severos por Licuación
	2.5 m	N.F 2.40 m			SM	6.34	0.9459	0.141	97.86	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	23.50	0.9310	0.155	0.00	Suelo No Licuable

Tabla 80 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.9$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=8.3$										
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)										
Perforación					Descripción	Resultados				
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación
SPT N° 02	0.5 m				SM	9.50	0.9917	0.238	97.07	Efectos Severos por Licuación
	1 m				SM	7.39	0.9821	0.236	99.98	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				ML	9.50	0.9714	0.234	99.90	Efectos Severos por Licuación
	2 m				SM	2.11	0.9592	0.231	100.00	Suelo Altamente Licuable
	2.5 m	N.F 2.40 m			SM	6.34	0.9457	0.233	100.00	Suelo Altamente Licuable
	3 m				SM	23.50	0.9307	0.257	5.08	Suelo No Licuable

Tabla 81 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.3$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=8.4$											
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)											
Perforación					Descripción	Resultados					
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación	
SPT N° 02	0.5 m				SM	9.50	0.9915	0.290	99.86	Efectos Severos por Licuación	
	1 m				SM	7.39	0.9818	0.287	100.00	Suelo Altamente Licuable	
	1.5 m				ML	9.50	0.9708	0.284	100.00	Suelo Altamente Licuable	
	2 m				SM	2.11	0.9585	0.280	100.00	Suelo Altamente Licuable	
	2.5 m	N.F 2.40 m				SM	6.34	0.9447	0.284	100.00	Suelo Altamente Licuable
	3 m					SM	23.50	0.9295	0.312	29.22	Efectos Severos por Licuación

Tabla 82 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.4$ del ensayo N°2 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=7.8$											
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)											
Perforación					Descripción	Resultados					
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación	
SPT N° 03	0.5 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	4.22	0.9917	0.116	39.26	Efectos Severos por Licuación
	1 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	6.34	0.9823	0.115	38.07	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9716	0.114	14.25	Podrían darse efectos severos por licuación
	2 m	N.F 1.80 m			SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	18.15	0.9596	0.119	0.00	Suelo No Licuable
	2.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9461	0.133	54.86	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	26.77	0.9313	0.142	0.00	Suelo No Licuable

Tabla 83 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=7.8$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica Mw= 7.9											
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)											
Perforación					Descripción	Resultados					
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación	
SPT N° 03	0.5 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	4.22	0.9917	0.144	82.21	Efectos Severos por Licuación
	1 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	6.34	0.9822	0.142	81.39	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9715	0.141	55.03	Efectos Severos por Licuación
	2 m	N.F 1.80 m			SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	18.15	0.9594	0.148	0.14	Podrían darse efectos severos por licuación
	2.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9459	0.165	90.61	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	26.77	0.9310	0.176	0.00	Suelo No Licuable

Tabla 84 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica Mw=7.9 del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=8.3$											
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)											
Perforación					Descripción	Resultados					
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación	
SPT N° 03	0.5 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	4.22	0.9917	0.238	100.00	Efectos Severos por Licuación
	1 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	6.34	0.9821	0.236	100.00	Efectos Severos por Licuación
	1.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9714	0.234	99.92	Efectos Severos por Licuación
	2 m	N.F 1.80 m			SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	18.15	0.9592	0.245	52.08	Efectos Severos por Licuación
	2.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9457	0.273	100.00	Efectos Severos por Licuación
	3 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	26.77	0.9307	0.292	0.74	No hay efectos de Licuación

Tabla 85 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.3$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Análisis del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto, para una magnitud sísmica $M_w=8.4$											
Método Probabilístico-Determinístico basado en el Nro de golpes del ensayo SPT (Cetin y otros, 2004)											
Perforación					Descripción	Resultados					
Nro	Prof.	N.F	Estrato	SUCS		$N_{1,60}$	r_d	CSR_{eq}	P_L (%)	Evaluación	
SPT N° 03	0.5 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	4.22	0.9915	0.290	100.00	Suelo Altamente Licuable
	1 m				ML	Limo de baja plasticidad, con muy alto contenido de finos. Color gris claro y de consistencia blanda.	6.34	0.9818	0.287	100.00	Suelo Altamente Licuable
	1.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9708	0.284	100.00	Suelo Altamente Licuable
	2 m	N.F 1.80 m			SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	18.15	0.9585	0.298	87.39	Efectos Severos por Licuación
	2.5 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	9.50	0.9447	0.332	100.00	Suelo Altamente Licuable
	3 m				SM	Arena Limosa, con alto contenido de finos. De color gris claro y de consistencia blanda	26.77	0.9295	0.355	8.88	Podrían darse efectos severos por licuación

Tabla 86 Evaluación del Potencial de Licuefacción para una magnitud sísmica $M_w=8.4$ del ensayo N°3 de SPT, aplicando la metodología de Cetin y otros (2004). Fuente: Elaboración Propia

Mapeo del Potencial de Licuefacción

Elaborar mapas de riesgos de desastres naturales es de gran ayuda para la prevención y mitigación de daños ocasionados por los mismos.

Con los resultados obtenidos del análisis del potencial de licuefacción, desarrollado en este capítulo, se elabora un mapa de zonificación del área de estudio de acuerdo a la susceptibilidad que presentan los suelos ante dicho fenómeno.

Un mapa de licuefacción en términos generales se obtiene al combinar información sobre la sismicidad y las características geotécnicas del suelo, donde este último parámetro representa la principal dificultad, y la disponibilidad de esta información determinará el grado de complejidad y el nivel de detalle del estudio. (Hashash, 1988)

La metodología propuesta por Cetin y otros, en el año 2004 incluye variables de estas dos áreas para calcular la probabilidad de licuefacción, por lo que para elaborar el mapa de susceptibilidad se tomaron en cuenta los resultados obtenidos por este método, obteniéndose así 3 zonas de susceptibilidad en el área de estudio:

- Zona 1: Suelo altamente licuable, señalizada por el color rojo.
- Zona 2: Suelo no licuable, señalizada por el color azul.
- Zona 3: Zona a ampliar estudios, señalizada por el color amarillo.

Zona 1: Suelo altamente licuable

El suelo encontrado en las perforaciones realizadas en esta zona corresponde al de una arena limosa, con alto contenido de finos, de baja plasticidad y que se encuentra en gran parte en estado suelto.

La probabilidad de licuefacción en esta zona es mayor al 15% por lo que presentaría efectos severos por licuación en caso de experimentar un evento sísmico de alta magnitud.

Zona 2: Suelo no licuable

Esta zona exhibe características totalmente distintas a las de la zona 1, ya que presenta un porcentaje considerable de bolonería de gran tamaño, hecho que pudiera justificarse por su cercanía al río Socabaya. El suelo de esta zona se describe como una grava con bajo contenido de finos y de una compacidad muy densa. Dadas estas características y que el nivel freático se encontró por debajo de los 2 metros, no se considera efectos de licuación en el área.

Zona 3: Zona a ampliar estudios

Dadas las características geotécnicas tan diferenciadas encontradas en las dos zonas anteriores, se considera que es necesario llevar a cabo más estudios exploratorios para definir con precisión las características del suelo de la zona media del área de estudio, ya que podría aún presentar bolonería de gran tamaño como la zona 2 o ser una arena limosa, sin presencia de grandes partículas como la zona 1.

El mapa de licuefacción del área de estudio se aprecia en la Ilustración 84 así como en el plano U-04 que se adjunta en el anexo A al final de este trabajo.

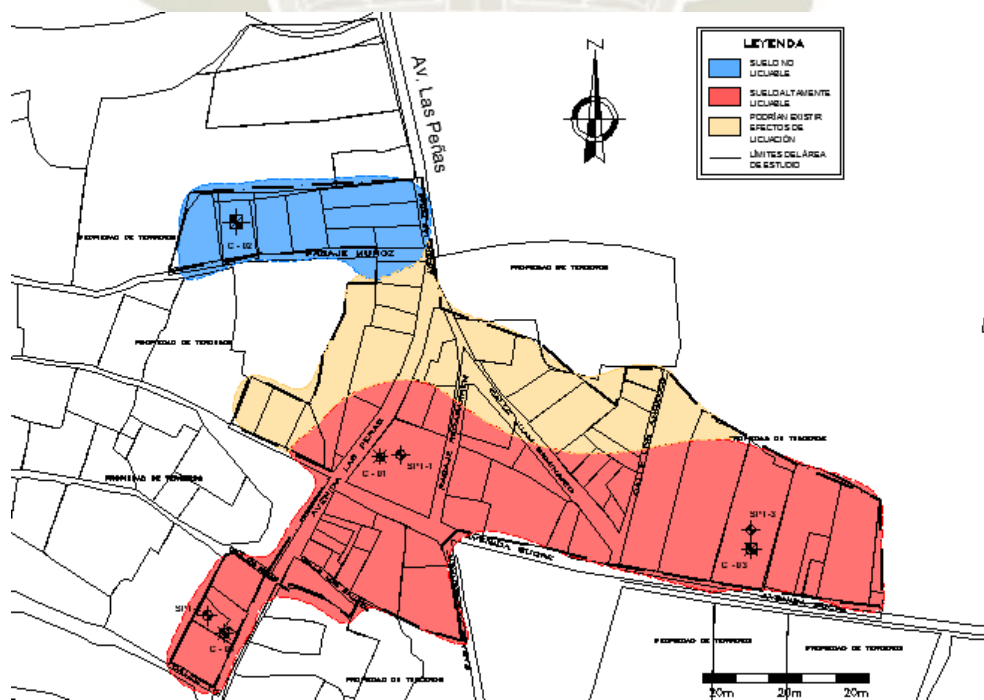


Ilustración 84: Mapa de licuefacción del área de estudio. Fuente Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Se evaluó el potencial de licuefacción del C.P El Pasto siguiendo diversos criterios de susceptibilidad y aplicando la metodología probabilística propuesta por Cetin y otros en el año 2004, obteniendo como resultado que la probabilidad de licuefacción es alta en la zona a excepción del área que se encuentra más cercana al río Socabaya.
2. Se determinó que las características y propiedades de los suelos estudiados en el C.P El Pasto, corresponden en su mayoría (65% del total) a arenas limosas (SM), encontrándose también limos de baja plasticidad (LM) y gravas limosas (GM) en menor porcentaje. Los depósitos de suelo presentan baja plasticidad, del orden de 1.59 %, un contenido de finos alto, 35 %, en promedio, y un contenido de humedad natural promedio de 45.28%.
3. Se encontró que el 57.9 % de los suelos tienen un contenido de finos significativo, es decir las características de estos controlan el comportamiento general del suelo ante la licuefacción. De este porcentaje el 63.6 % presentan una baja plasticidad ($I_p \leq 12\%$, $LL \leq 37\%$) y poseen un elevado contenido de agua en relación a su límite líquido ($w\% > 0.85 LL$) lo que los hace suelos potencialmente licuables.
4. Se determinó, de acuerdo al criterio de que suelos sin cohesión, con densidades relativas bajas son más susceptibles a licuarse, que el 66% de los estratos analizados presentan densidades relativas sueltas y muy sueltas, por lo tanto, son bastante susceptibles a experimentar licuefacción.
5. Se estableció el nivel freático promedio del área de estudio en 1.80 m, encontrándose el nivel más superficial de aguas a 0.80 m. Teniendo en consideración que para que se produzca el fenómeno de licuefacción, el suelo debe encontrarse totalmente saturado, o casi saturado, este hecho hace de la zona un área

susceptible y más aun teniendo en cuenta que las condiciones freáticas son variables tanto con las fluctuaciones estacionales como con el riego.

6. Se estimó que los suelos del C.P El Pasto son altamente licuables especialmente frente a sismos de magnitudes 8.3 y 8.4 Mw donde los suelos licúan a profundidades muy superficiales y aunque hay estratos no licuables dado que son bastante densos y presentan resistencias altas a la penetración, no pueden tomarse como referencia para establecer de manera generalizada una profundidad de cimentación recomendada en al área de estudio.
7. Se estableció en el mapa de licuefacción, la zona de transición entre la zona licuable y la zona no licuable del área de estudio como un área que podría presentar efectos de licuefacción, siendo necesario efectuar una calicata en el punto que se desee examinar para así poder determinar según las características geotécnicas cómo se comportará el suelo ante un evento sísmico.
8. Se realizó una estimación de los límites de los depósitos y su susceptibilidad a la licuefacción, en base a la información que se obtuvo de los puntos explorados, es necesario recalcar que los límites de las zonas en el mapa de licuefacción no son precisos, ya que no se dispone de una descripción completa de todos los depósitos de la zona.
9. Se encontró que el punto más crítico del área de estudio corresponde a la zona central, presentándose aún efectos severos de licuefacción a una profundidad de 3 metros a diferencia de los extremos de la zona de estudio donde a la misma profundidad dadas las características del suelo este no licúa, excepto para el análisis correspondiente a un sismo de magnitud $M_w=8.4$ donde todos los depósitos analizados presentarían efectos severos por licuefacción.

10. Se utilizó en el presente trabajo un método basado en un ensayo in-situ, como es el ensayo de penetración estándar (SPT), dadas las ventajas que estos presentan en comparación a los métodos basados en pruebas de laboratorio, cuya principal limitación es la obtención de una muestra inalterada.
11. Se escogió la metodología propuesta por Cetin y otros en el 2004 ya que correlaciones previas, propuestas en estudios anteriores no tratan de manera consistente los efectos por tensión vertical efectiva y el cálculo del factor de reducción de tensiones r_d presentaba mucha incertidumbre y sesgo. Estos inconvenientes se ven superados con las correlaciones propuestas en esta metodología, las cuales fueron desarrolladas en base a un análisis de calidad de una gran cantidad de datos de estudios anteriores y a la inclusión de casos adicionales.
12. Se recalca que el análisis del potencial de licuefacción es un análisis complementario al momento de realizar cualquier construcción, en los casos que se sospecha la ocurrencia del fenómeno. No excluye de ninguna manera al cálculo de capacidad de carga y asentamientos. El efecto de sobrecarga de la futura edificación es tomado en cuenta en estos análisis más no en la evaluación del potencial de licuefacción que toma en cuenta únicamente los esfuerzos producidos por el peso del propio terreno.
13. Se concluye que los suelos analizados del C.P El Pasto son susceptibles y presentan altas probabilidades de experimentar el fenómeno de licuefacción, la anterior zonificación del Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa, que clasificaba esta zona como APSI (Alto Peligro por Suelos Inestables) era mucho más acertada a la actual que establece a la zona como apta para su uso residencial y que representa un peligro para los actuales y futuros pobladores.

RECOMENDACIONES

1. Todos los avances en la ingeniería estructural sismorresistente deben ir acompañados con el desarrollo de la ingeniería geotécnica sismorresistente, ya que históricamente se ha comprobado que muchas de las fallas de grandes construcciones se han dado no por fallos en el cálculo estructural sino por fallos en el suelo de fundación cuando es sometido a cargas sísmicas.
2. El ensayo de penetración estándar es un ensayo puntual, por lo que no se deberá considerar que todo el C.P El Pasto es propenso a experimentar licuefacción, para cada caso en particular se debe realizar los ensayos de campo y laboratorio correspondientes.
3. El ensayo SPT es un método de sondaje indirecto que siempre debe ir acompañado por un método de exploración directa, como es la ejecución de calicatas, que permitan observar adecuadamente las condiciones y características del terreno.
4. Las condiciones geotécnicas de la zona, que se establezcan tomando como referencia otros estudios locales, deben ser siempre corroboradas en campo mediante un mapeo geotécnico.
5. Para evaluar el potencial de licuefacción se recomienda efectuar los ensayos geofísicos correspondientes para la determinación de la velocidad de propagación de ondas, factor que fue un limitante en este estudio debido al aspecto económico.
6. De forma general en una zona donde se tenga presencia de nivel freático alto, suelos arenosos de poca cohesión, en estado suelo se recomienda realizar antes de la construcción de cualquier obra, un análisis del potencial de licuefacción.
7. Se debe tener cuidado al usar el mapa de riesgo por licuefacción presentado, si bien este constituye una buena herramienta de evaluación preliminar, debe de realizarse

siempre un programa exploratorio que defina las condiciones geotécnicas del área donde se piensa construir.

8. La licuefacción de suelos sigue siendo, especialmente en nuestro país, un tema poco estudiado, pero con muchas posibles líneas de investigación. Se invita a estudiantes y profesionales a investigar sobre el tema, a comparar los diversos métodos existentes y a aplicar siempre que sea necesario un análisis de licuefacción antes de la ejecución de cualquier proyecto.



BIBLIOGRAFÍA

- Johansson, J. (2000). *1995 Kobe earthquake, Japan*. Retrieved from Soil Liquefaction Web. Geotechnical Engineering Program at the University of Washington: <https://depts.washington.edu/liquify/html/quakes/kobe/kobe.html>
- Aguilar Bardales, Z., & Alva Hurtado, J. (Noviembre, 2002). *Microzonificación Sísmica de Arequipa*. CISMID. Lima: III Curso Internacional Microzonificación y su Aplicación en la Mitigación de Desastres. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/conf11.pdf>
- Aguilar, Z. (1991). *"Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Arequipa" Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.*
- Alva Hurtado, J. (2011). *Breve Historia del Fenómeno de Licuación de Suelos en el Perú* (Primera ed.). (V. López Guzmán, Ed.) Lima, Perú. Retrieved from https://guzlop-editoras.com/web_des/ing01/civil/pld0013.pdf
- Alva Hurtado, J. E. (2017). *Red Acelerográfica CIP CN / UPG-FIC-UNI*. Retrieved from <http://www.red-acelerografica-peru.com/>
- Ambraseys, N. (1988). Engineering Seismology. In N. N. Ambraseys, *Engineering and Structural Dynamics* (pp. 1-105).
- Andrews, D., & Martin, G. (2000). 12th World Conference on Earthquake Engineering. *Criteria for Liquefaction of Silty Soils*. Auckland.
- Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. (1997). Liquefaction resistance based on Shear Wave Velocity. In T. L. Youd, & I. M. Idriss, *National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) Workshop, Proceedings, Salt Lake* (pp. 89-128).
- Armijo Palacios, G. (1995). *Influencia de los metodos de mejora de terro en la resistencia de suelos flojos frente a licuefacion*. Madrid: Tesis Doctoram Universidad Politecnica de Madrid.

- Audemard, F., Gómez , J., & Quijano , J. (2002). Efectos Geológicos Asociados al Sismo de Arequipa del 23 de Junio del 2001, Departamento de Arequipa, Perú Meridional. *Terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001. CNDG (2002)*, p. 175-204.
- Ayala, R. (2010). *Evaluacion del Potencial de Llicuacion de Suelos en la ciudad de Tambo de Mora*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Barriga, F. (1951). *Los Terremotos de Arequipa*. Ed. La Colmena, Arequipa.
- Bhattacharya, S., Tokimatsu, K., Goda, K., Sarkar, R., Shadlou, M., & Rouholamin, M. (2014). Collapse of Showa Bridge during 1964 Niigata earthquake: A quantitative reappraisal on the failure mechanisms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*, 65, 55-71.
- Bolaños Luna, A. M., & Monroy Concha, O. M. (2004). *Espectros de peligro sismico uniforme*. Lima: Pontificia Universidad Catolica del Perú.
- Braja, M. (1993). Liquefaction of Soils. In M. D. Braja, *Principles of Soil Dynamics* (pp. 397-458). Boston: PWS-KENT Publishing Company.
- Carmona Álvarez, J. E. (2014). Estudio de resultados ensayo de penetración estándar (SPT) para el factor de corrección (Cn) y el ángulo de fricción del suelo usando diferentes tipos de correlaciones. Tesis de grado. *Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería*.
- Castillo Aedo, J. L., & Alva Hurtado, J. E. (1993). *Peligro sísmico en el Perú*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Castro, G. (1987). One the behavior of soils during earthquakes - liquefaction. In G. Castro, *Soil dynamics and liquefaction* (pp. 169-204). Amsterdam: A. S. Calmak.
- Cetin, K., & Seed, R. (2001). *Nonlinear Shear Mass Participation Factor (Rd) For Ciclic Shear Stress Ratio Evaluation*. Berkeley: University of California.

- Cetin, K., Seed, R., Tokimatsu, K., Harder, L., Kayen, R., & Moss, R. (2004). *Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential*.
- Chavez Obregon, J. A. (2006). *Leyes de atenuacion para aceleraciones espectrales en el Perú*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Chen, W., & Scawthorn, C. (2003). *Earthquake Engineering Handbook*. Hawaii: CRC Press.
- Chozo Aldana, J., & Peñalosa Villegas, J. (2016). *Licuefacción de Suelos*. Lima: Universidad Peruana de los Andes.
- Coronado, C., Villafañe, G., & Ríos, L. (1999). *Resistencia de los Suelos a la Licuación: Comentarios a la Norma NSR-98*. Bogotá: X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Day, R. (2012). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. Washington : McGraw Hill.
- Dikmen, U. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6, 61-72. doi:10.1088/1742-2132/6/1/007
- Division of Mines and Geology. (1997). *Guidelines for Evaluating and Mitigating Seismic Hazards in California*. Los Angeles: Department of Conservation, Division of Mines and Geology,.
- Ericksen, G. E., Plafker, G., & Fernández-Concha, J. (1970). *Preliminary Report on the Geologic Events Associated with the May 31, 1970 Peru Earthquake*. U.S Geological Survey. Circular 639. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/circ/1970/0639/report.pdf>
- Fauzi, A, Irsyam, M., & Fauzi, U. J. (2014). Empirical Correlation of Shear Wave Velocity and N-SPT Value for Jakarta. *GEOMATE*, 7(13), 980-984. Retrieved from <http://www.geomatejournal.com/sites/default/files/articles/980-984-3263-Fauzi-Sept-2014.pdf>

- Gautam, D. (2017). Empirical correlation between uncorrected standard penetration resistance (N) and shear wave velocity (VS) for Kathmandu Valley, Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 496-508. doi:10.1080/19475705.2016.1243588
- Ghazi, A., Hafezi Moghadas, N., Sadegui, H., Ghafoori, M., & Reza Lashkaripur, G. (2015). Empirical relationships of shear wave velocity, SPT-N value and vertical effective stress for different soils in Mashhad, Iran. *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 53(3). doi:10.4401/ag-6635
- Gómez, J. C., Audemard, F., & Quijano, J. (2002). Efectos Geológicos Asociados al Sismos del 23 de Junio del 2001 en el Sur del Perú. *Terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001. CNDG (2002)*, p. 159-174.
- González de Vallejo, L. (2002). Suelos Licuables. In L. I. González de Vallejo, *Ingeniería Geológica* (p. 114). Madrid: Pearson Education.
- Grantz, A., Plafker, G., & Kachadoorian, R. (1964). Alaska's Good Friday earthquake, March 27, 1964, a preliminary geologic evaluation. *U.S Geological Survey Circ. 491*, 35 p. Retrieved from <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir491>
- H. Núñez de Prado, E Farfán, H. Díaz, R. Kosaka. (2001). *Geología y Estratigrafía del Cuaternario y Zonificación Geotécnica-Sísmica del Área Urbana de Arequipa*. Convenio UNSA-CEREN. Retrieved from http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Arequipa/arequipa/arequipa_IIIgeologia.pdf
- Hashash, Y. M. (1988). Liquefaction Probability Mapping in greater Boston. *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*.
- Henríquez Pantaleón, C. (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyección de compactación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid*. Madrid.

- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Laboratorio de Tecnologías Mineras.
- IMPLA, Instituto Municipal de Planeamiento. (2016). *Plan de Desarrollo Metropolitana de Arequipa 2016-2025*.
- INEI. (2007). Censos Nacionales 2007 : XI de Población y VI de Vivienda. Retrieved from <http://censos.inei.gob.pe/cpv2007/tabulados/#>
- Ishihara, K. (1985). Stability of Natural Deposits During Earthquakes. In K. Ishihara, *Proceedings of the Eleventh* (pp. 321-376). San Francisco.
- Ishihara, K., & Koga, Y. (1981). Case Studies of Liquefaction in the 1964 Niigata Earthquake. *SOILS AND FOUNDATIONS*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 21(No 3), 36-52. Retrieved from https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1972/21/3/21_3_35/_pdf/-char/en
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982). 3rd International Conference on Microzonation. *Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods*, (pp. 1319-1330). Seattle.
- Jhinkwan, H., & Jain, P. K. (2016). Prediction of shear wave velocity using SPT-N Value. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*, 3(7), 28-36. Retrieved from <http://troindia.in/journal/ijcesr/vol3iss7/28-36.pdf>
- Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Der Kiureguian, A., . . . Tokimatsu, K. (2013). Shear-Wave Velocity–Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 407-419. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000743
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington: Prentice Hall.

- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2004). Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. In Y. Bozorgnia , & V. Vertero, *Earthquake Engineering : from engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press LLC.
- Kuribayashi, E., & Tatsuoka, F. (1975). Brief Review of Soil Liquefaction During Earthquakes in Japan. In E. Kuribayashi, & F. Tatsuoka, *Soil and Foundations* (pp. 81-92).
- La Barbinais, L. (1728). Tremblement de terre arrive a Pisco le 10 Fevrier 1716. In L. G. La Barbinais, *Voyage au tour du monde* (Vol. 1, pp. 167-175). Paris. Retrieved from http://data.bnf.fr/13007019/de_la_barbinais_le_gentil/
- Lara, N. (2013). *Suceptibilidad de licuefaccion en la comuna de Doñihue*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Liao, S., & Whitman, R. (1986). Overburden COrrrection Factor for SPT in Sand. In S. S. Liao, & R. V. Whitman, *Journal of Geotechnical Engineering* (pp. 373-377).
- Liu, Y., & Xie, J. (1984). *Seismic Liquefaction of Sand*. Pekin: Earthquake Press.
- Marcuson, W. (1978). *Definition of terms related to liquefaction* . Austin: National Science Foundation by University of Texas.
- McCulloch, D. S., & Bonilla, M. G. (1970). Effects of the Earthquake of March 27, 1964, on The Alaska Railroad. *U.S. Geological Survey Professional Paper 545-D*, 161 p. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/pp/0545d/>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima, Perú: Viceministerio de Transportes. Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.
- Municipalidad Distrital de Socabaya. (2017). *Plan Estratégico Institucional 2017-2019 de la Municipalidad Distrital de Socabaya*. Retrieved from <http://www.munisocabaya.gob.pe/wp-content/uploads/2015/06/Plan-Estrat%C3%A9gico-Institucional-2017-2019-MUNICIPALIDAD-DE-SOCABAYA.pdf>

- Municipalidad Distrital de Socabaya en convenio con el Colegio de Arquitectos del Perú-Junta Regional Arequipa. (n.d.). *Plan Urbano Distrital de Socabaya 2009-2019*. Arequipa.
- Municipalidad Provincial de Arequipa, MPA. Of. de Planificación y Gestión Urbano-Ambiental. (2002). *Plan Director de Arequipa Metropolitana 2002-2015*.
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978a). Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6, 167-187.
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978b). Physical Background of the Statistically Obtained S-Wave Velocity Equation in Terms of Soil Indexes. *Butsuri-Tanko (Geophysical Exploration) (en japonés) trad. Y. Yamamoto*, 31(1), 8-17.
- Orihuela, P. (1981). *Sismo Arequipa 16.02.79. Influencia de las condiciones locales (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Retrieved from http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3891/1/orihuela_ap.pdf
- Papathanassiou, G., Pavlides, S., & Ganas, A. (2005). The 2003 Lefkada earthquake: Field observations and preliminary microzonation map based on liquefaction potential index for the town of Lefkada. *Engineering Geology*, 82, 12-31. doi:10.1016/j.enggeo.2005.08.006
- Park, C., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64(3), 800-808. doi:10.1190/1.1444590
- Parra, D. (2008). *Licuefacción de suelos y resistencia Cíclica*. Perú: FIC-UNI. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/2567670/licuacion-de-suelos-y-resistencia-ciclica-ing>
- R.B. Seed, K.O. Cetin, R. E. S. Moss, A. M. Kammerer, J. Wu, J. M. Pestana, & M.F. Riemer. (2003). *Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework*. Berkely: Earthquake Engineering Research Center.

- Rauch, A. (1997). *EPOLLS: An Empirical Method for Predicting Surface Displacements Duue to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes*. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University at Backsburg.
- Robertson, P., Campanella, R., & Wightman, A. (1983). *SPT-CPT correlations*. ASCE-JGED.
- Robertson, P., Woeller, D., & Finn, W. (1992). Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. *Canadian Geotech Journal*, 686-695.
- Rodas, E. J. (2011). *Susceptibilidad a la licuefacción por medio del sondeo de penetración estándar: Las lisas, Chiquimulilla, Santa Rosa, Guatemala*. (Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Rodríguez-Marek, A., Alva Hurtado, J., Cox, B., Meneses, J., Montalva, G., Moreno, V., . . . Wartman, J. (2007). Aspectos Geotécnicos del Sismo de Pisco, Perú del 15 de Agosto del 2007. *Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7(2-3), 239-258
- SDS, Sísmica de Suelos. (2018). *Sondeo de Penetración Estándar (SPT)*. Retrieved from <http://sismica.com.mx/procedimientos/sondeo-penetracion-estandar.php>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97, 1249-1273.
- Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L., & Chung, R. (1985). *Influence of SPT procedures in soil liquefaction evaluations*. Journal Geotechnical Engineering Division ASCE.
- SENCICO. (2006). *Norma Técnica de Edificación E.050 Suelos y Cimentaciones*. Reglamento Nacional de Construcción.
- SENCICO. (2018, julio 29). *Servicio web de consultas para la determinación del peligro sísmico en el territorio nacional*. Retrieved from Servicio nacional de capacitación para la industria de la construcción: <http://www.sencico.gob.pe/investigacion/publicaciones.php?id=492>

- Silgado, E. (1946). El Temblor Destructivo de Moyobamba del 6 de Agosto de 1945. *Datos Sismológicos del Perú, Boletín 3*, pp. 29-38.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). *Instituto de Geología y Minería, Boletín No. 3 Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica*.
- Silgado, E., Fernández-Concha, J., & Ericksen, G. E. (1952). *El Terremoto del Cusco del 21 de Mayo de 1950* (Vol. Boletín No. 4). Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros, Ministerio de Fomento y Obras Públicas.
- Skempton, A. W. (1986). Standard Penetration Test Procedure and Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation. *Geotechnique 36*(3).
- Sladen, J., D'Hollander, R., & Krahn, J. (1985). *The liquefaction of sands, a collapse surface approach*. Toronto: Canadian Geotechnica Journal.
- Sykora, D. W. (1987). *Examination of Existing Shear Wave Velocity and Shear Modulus Correlations in Soils*. US Army Engineer Waterways Experiment Station. Geotechnical Laboratory, Washington, DC.
- Sykora, D. W., & Stokoe, K. H. (1983). Correlations of In Situ Measurements in Sands with Shear Wave Velocity. *Geotechnical Engineering Report GR83-33, The University of Texas*.
- Taipong, Q., Chenchun, W., Lunian, W., & Hoishan, L. (1984). *Liquefaction Risk Evaluation DURING Earthquakes*. St. Louis: International Conference on Cases Histories in Geotechnical Engineering.
- Tavera, H. (2013). *Zonificación Sísmica-Geotécnica del Distrito de Sachaca-Arequipa*. Convenio Interinstitucional IGP-Municipalidad Distrital de Sachaca. Lima, Perú: Ediciones Nova Print S.A.C. Retrieved from

http://portal.igp.gob.pe/images/documents/sismos/PPR2013_INFORMES/sachaca_2013.pdf

- Tavera, H. (2014). *Zonificación sísmica-geotécnica Ciudad de Arequipa-Cercado*. Lima: Instituto Geofísico del Perú.
- Tavera, H., Bernal, I., & Salas, H. (2007). *El Sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9Mw) Departamento de Ica - Perú*. Boletín de la Sociedad Geológica, Instituto Geofísico del Perú, Lima. Retrieved from <https://www.eeri.org/wp-content/uploads/Pisco150807.pdf>
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). *Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú*. Lima: Instituto Geofísico del Perú.
- Tavera, H., Salas, H., Jimenez, C., Antayhua, Y., Fernandez, E., Vilcapoma, L., . . . Aleman, H. (2002). *El terremoto de la región sur Perú del 23 de junio de 2001: Aspectos sísmicos*. Lima: Instituto geofísico del Perú.
- Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. (1999). *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society.
- Teparaksa, W. (1991). 1991 - Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics. *Utilization of Cone Penetration Test to Evaluate Liquefaction Potential of Soils* (pp. 565-570). Bangkok: Missouri S&T.
- Terzagui, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley and Sons.
- Tinsley, J. C., Youd, T. L., Perkins, D. M., & Chen, A. F. (1985). Evaluation liquefaction potential. Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region. (J. Ziony, Ed.) *An Earth Science Perspective. US Geological Survey*, 1360.

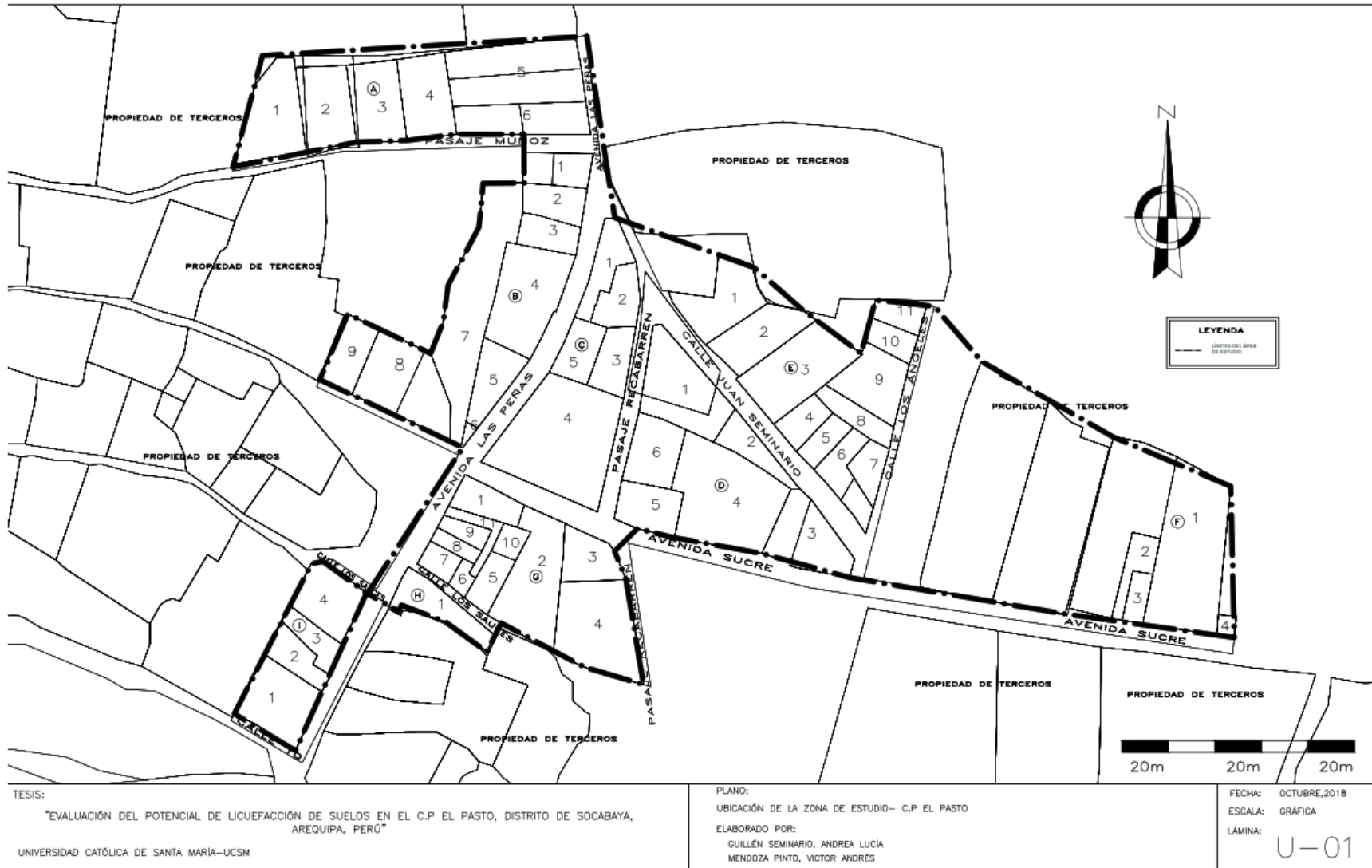
- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). *En mirical correlation of soil liquefacion baased on SPT N-value and fines content*. Soils and Foundations.
- Troncoso, J. H. (1992). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Antisísmica* (Primera ed.). Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Tupak, E. (2009). *Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos*. Universidad Internacional de Andalucía. Informe Final de Doctorado. Retrieved from <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/proceso-ciclico-licuefaccion-suelos-sismicas/proceso-ciclico-licuefaccion-suelos-sismicas.pdf>
- Vargas, L. (1970). *Geología del cuadrángulo de Arequipa*. INGEMMET. Boletín N° 24 Servicio de Geología y Minería, Lima. Retrieved from http://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/ingemmet/142/2/A-024-Boletin_Arequipa-33s.PDF
- Wakamatsu, K. (1991). Maps for Historic Liquefaction Sites in Japan. In K. Wakamatsu, *Tokai University Press* (p. 341). Japan.
- Wakamatsu, K. (1993). *History of Soil Liquefaction in Japan and Assessment of Liquefaction Potential Based of Geomorphology*. Tokyo: Waseda University.
- Wang, W. (1979). Some Findings in Soil Liquefaction. *Research Report, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing*.
- Wieczorek, G., & Youd, T. (1984). Liquefation during the 1981 and previous eartquakees. Near Westmorland: Unite State Departmen of the Interior Geological Survey.
- Workshop Participants, ed. (s) Youd, T. L.; Idriss, I. M. (1997). *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. National Center for Earthquake Engineering Research.

- Yanqui, C. (1988). *Características del Subsuelo y Efectos Sísmicos en Arequipa*. Ponencia presentada en el Seminario de Microzonificación Sísmica-1988 CISMID, FIC. UNI Lima.
- Yanqui, C. (1990). *Geología Preliminar de la Ciudad de Arequipa*. Informe técnico presentado al CISMID, FIC. UNI. Lima.
- Yanqui, C. (2001). *Licuaación sísmica de suelos en la ciudad de Arequipa causada por el terremoto del 23 de Junio del 2001*. Ponencia presentada en el XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Puno. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/359784873/Licuaacion-Arequipa-Sismo-2001-Ing-Calixto-Yanqui-Murillo>
- Youd, T., & Idriss, I. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 818-833.
- Youd, T., & Perkins, D. (1978). *Mapping of Liquefaction Induced Ground Failure Potential*. San Francisco: ASCE.
- Young, R., Chiou, S., Silva, W., & Humphrey, J. (1997). *Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes*. Seismological Research Letter.
- ZER Geosystem Peru S.A.C. (2014). *Determinacion del peligro sísmico en el territorio nacional*. Lima: SENCICO.

ANEXOS



ANEXO A
PLANOS DEL ÁREA DE ESTUDIO



TESIS:

"EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ"

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA-UCSM

PLANO:

UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO- C.P EL PASTO

ELABORADO POR:

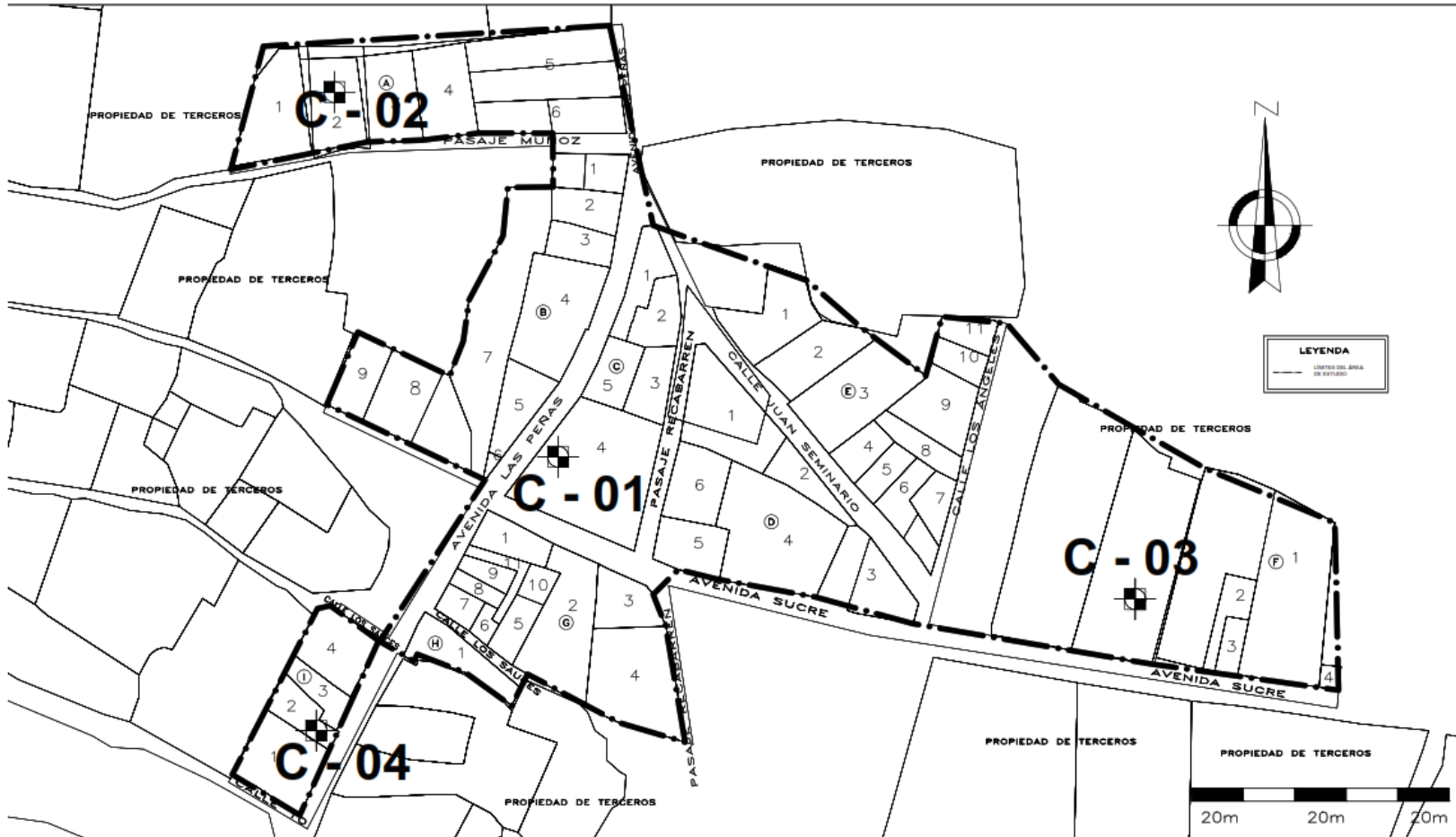
GULLÉN SEMINARIO, ANDREA LUCÍA
MENDOZA PINTO, VÍCTOR ANDRÉS

FECHA: OCTUBRE, 2018

ESCALA: GRÁFICA

LÁMINA:

U-01



TESIS:

"EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LIQUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ"

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA—UCSM

PLANO:

UBICACIÓN DE CALICATAS DE EXPLORACIÓN

ELABORADO POR:

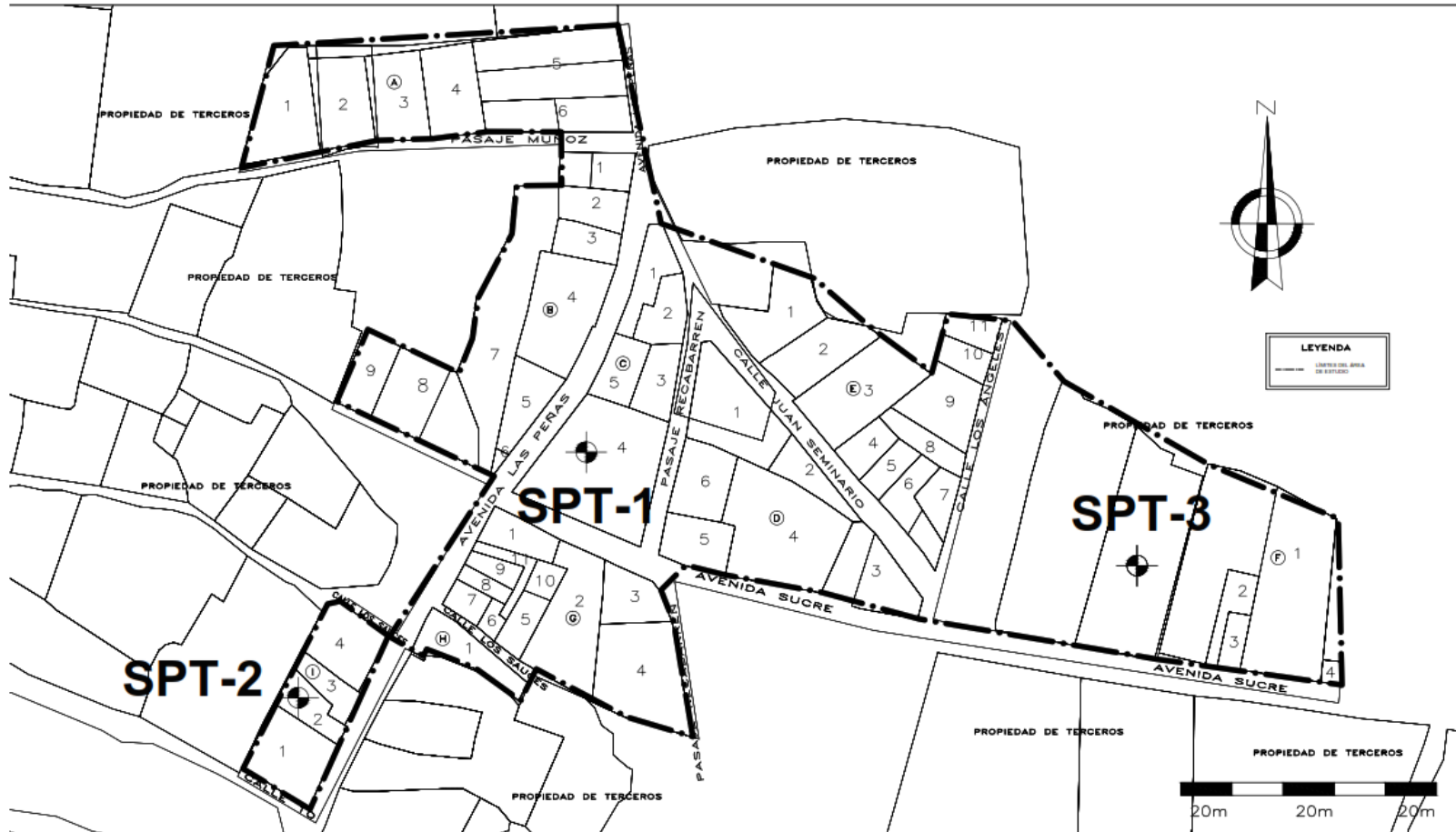
GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES

FECHA: OCTUBRE, 2018

ESCALA: GRÁFICA

LÁMINA:

U-02



TESIS:

"EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ"

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA-UCSM

PLANO:

UBICACIÓN DE ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT

ELABORADO POR:

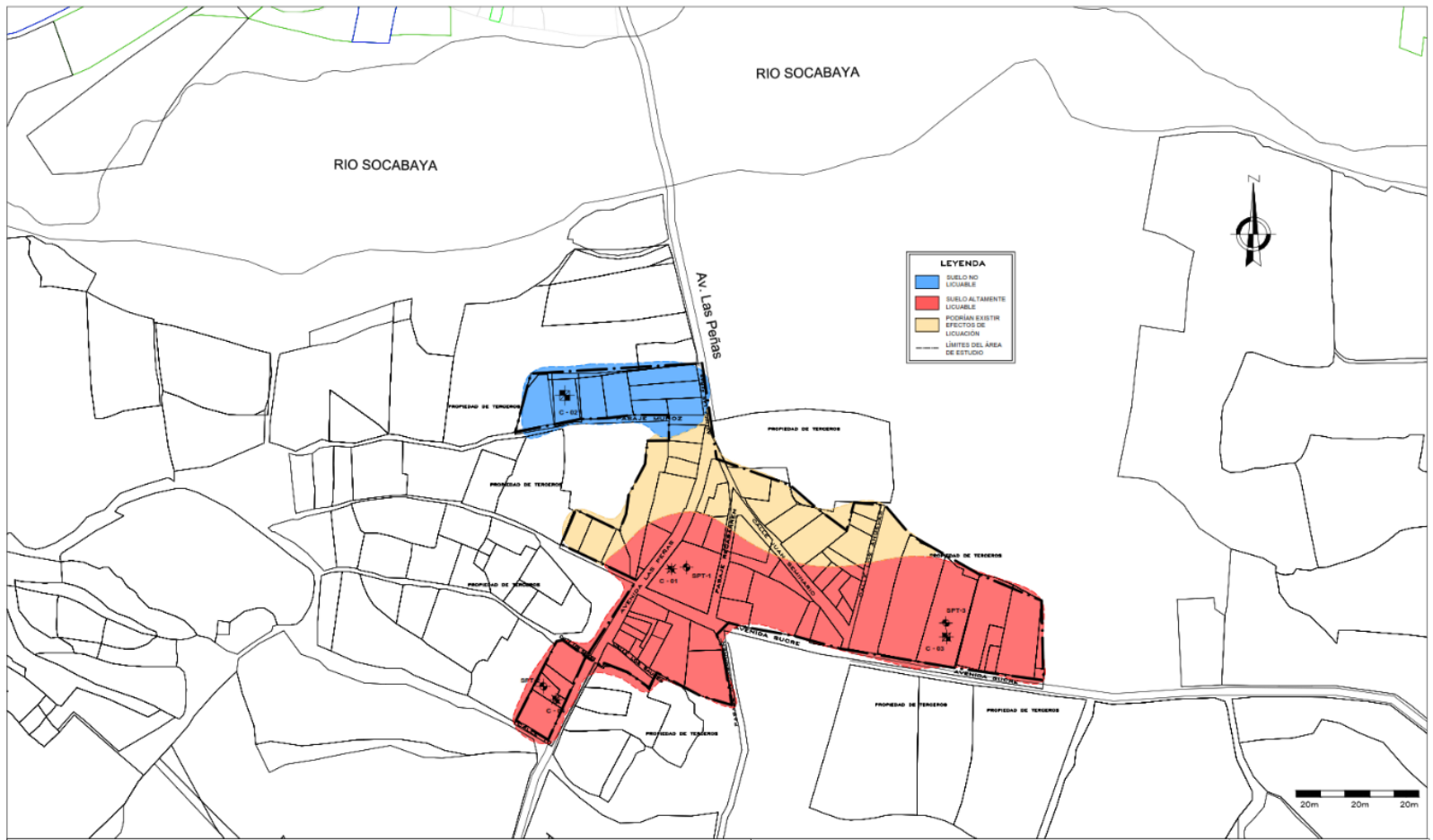
GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCÍA
MENDOZA PINTO, VÍCTOR ANDRÉS

FECHA: OCTUBRE, 2018

ESCALA: GRÁFICA

LÁMINA:

U-03



TESIS:
 "EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA,
 AREQUIPA, PERÚ"
 UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA-UCSM

PLANO:
 MAPA DE LICUEFACCIÓN DEL C.P EL PASTO
 ELABORADO POR:
 GUILLÉN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
 MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRÉS

FECHA: NOVIEMBRE, 2018
 ESCALA: GRÁFICA
 LÁMINA: U-04

ANEXO B
MAPAS DE AREQUIPA

ANEXO B
MAPAS DE AREQUIPA

















LEYENDA

	GM-cL	Cordillera de Laderas		GM-pA-sS	Superficie de Socabaya
	GM-cB	Cadena del Barroso		GM-pA-sP	Superficie de Pachacútec
	GM-pA-vCh	Valle del Chili		GM-pA-sA	Superficie del Aeropuerto
	GM-pA-sC	Superficie del Cercado			

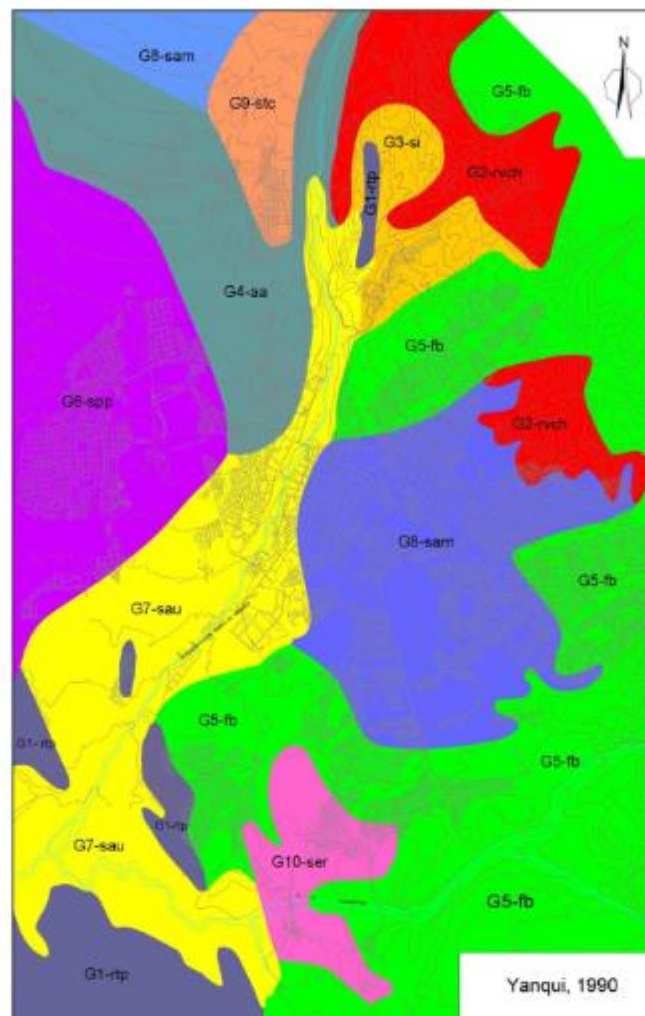
Mapa 1 Geomorfología de la ciudad de Arequipa. Fuente Yanqui, 1990



LEYENDA

 Qr-e Eluvial Reciente	 Q-fb1 Flujo de Barro Brechoso	 Tp-vs2 Volcánico Sencsa 2
 Qr-a Aluvial Reciente	 Q-fb2 Flujo de Barro Rosáceo	 Tp-vs1 Volcánico Sencsa 1
 Qr-am Aluvial Miraflores	 Q-aaa Aluvial Acequia Alta	 KTI-gd Granodiorita Tiabaya
 Qr-au Aluvial Umacollo	 Q-vchi Volcánico Chila	 KTI-gb Gabrodiorita
 Qr-pi Depósitos Piroclásticos	 Q-ca Formación Capillune	

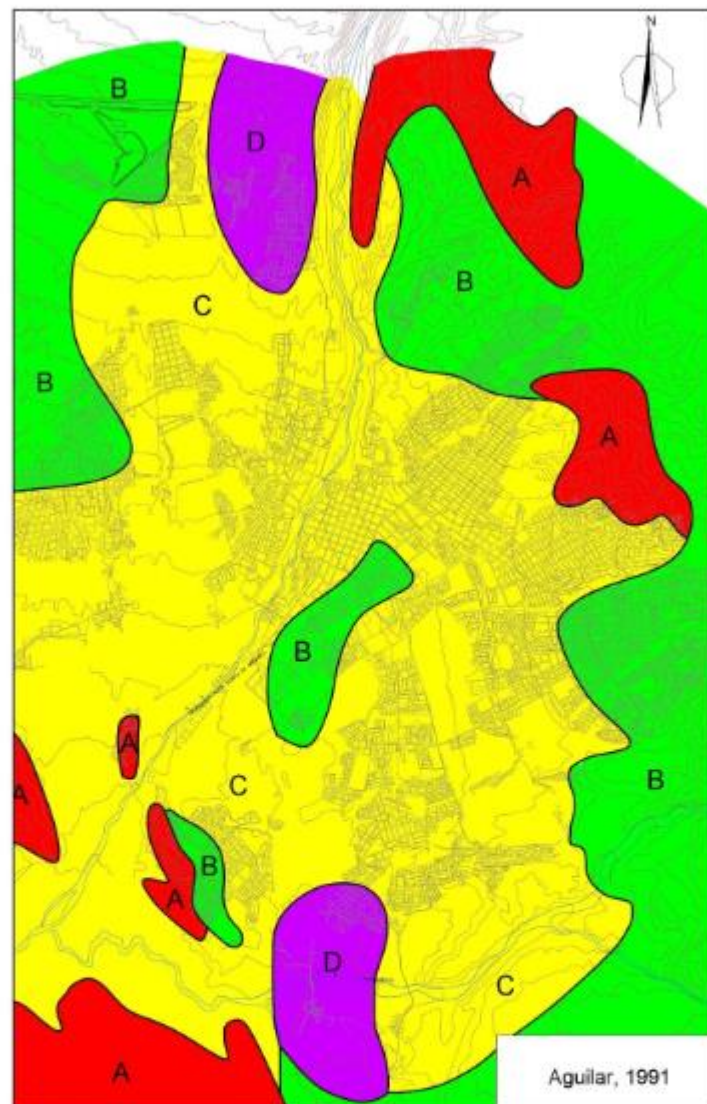
Mapa 2 Geología de la ciudad de Arequipa. Fuente Yanqui, 1990



LEYENDA

		q_c (Kg/m ²)		q_c (Kg/m ²)
	G1-rpt Rocas Preterciarias	30.0		G6-spp Suelo Puzolánico de Pachacútec 2.0
	G2-rvch Rocas Volcánicas de Chila	15.0		G7-sau Suelo Aluvial de Umacollo 1.5
	G3-si Sillar	5.0		G8-sam Suelo Aluvial de Miraflores 1.0
	G4-saa Suelo de Acequia Alta	3.5		G9-stc Suelo Tobáceo Compresible 0.5
	G5-fb Flujos del Barro	3.0		G10-ser Suelo Aluvial Reciente 0.5

Mapa 3 Mapa Geotécnico de la ciudad de Arequipa. Fuente Yanqui,1990



LEYENDA

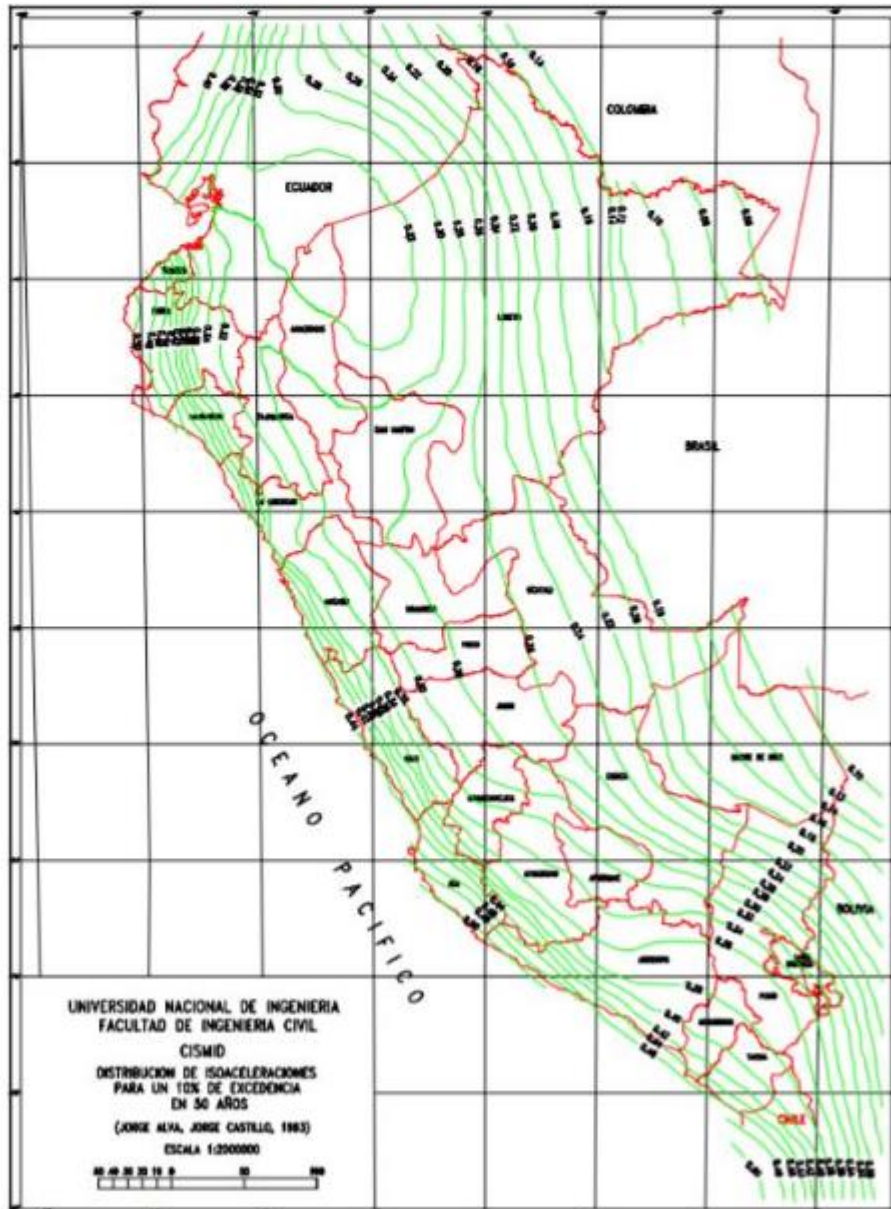
ZONA A		ZONA C	
ZONA B		ZONA D	

Mapa 4 Microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa. Fuente Aguilar, 1991

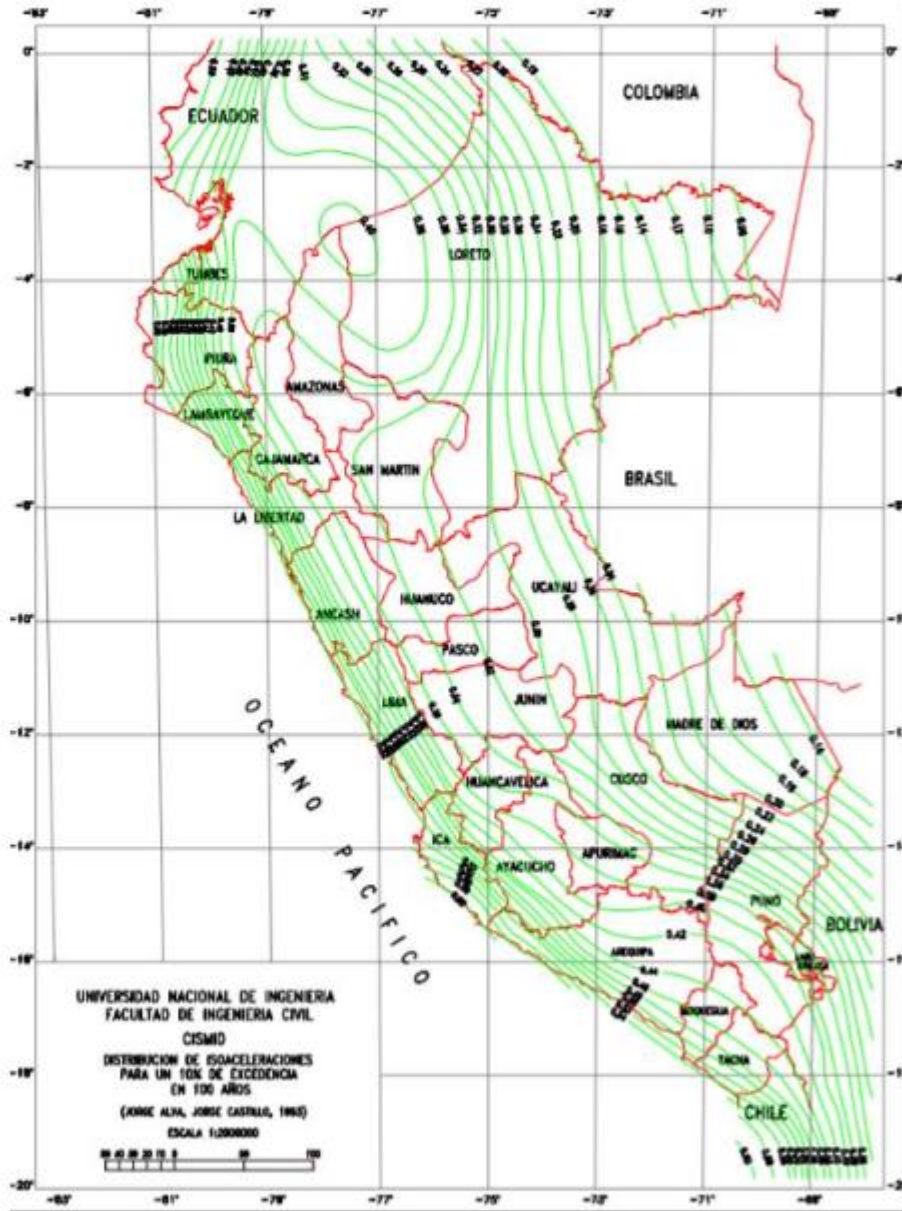
ANEXO C
MAPAS DE ISOACELERACIONES

ANEXO C

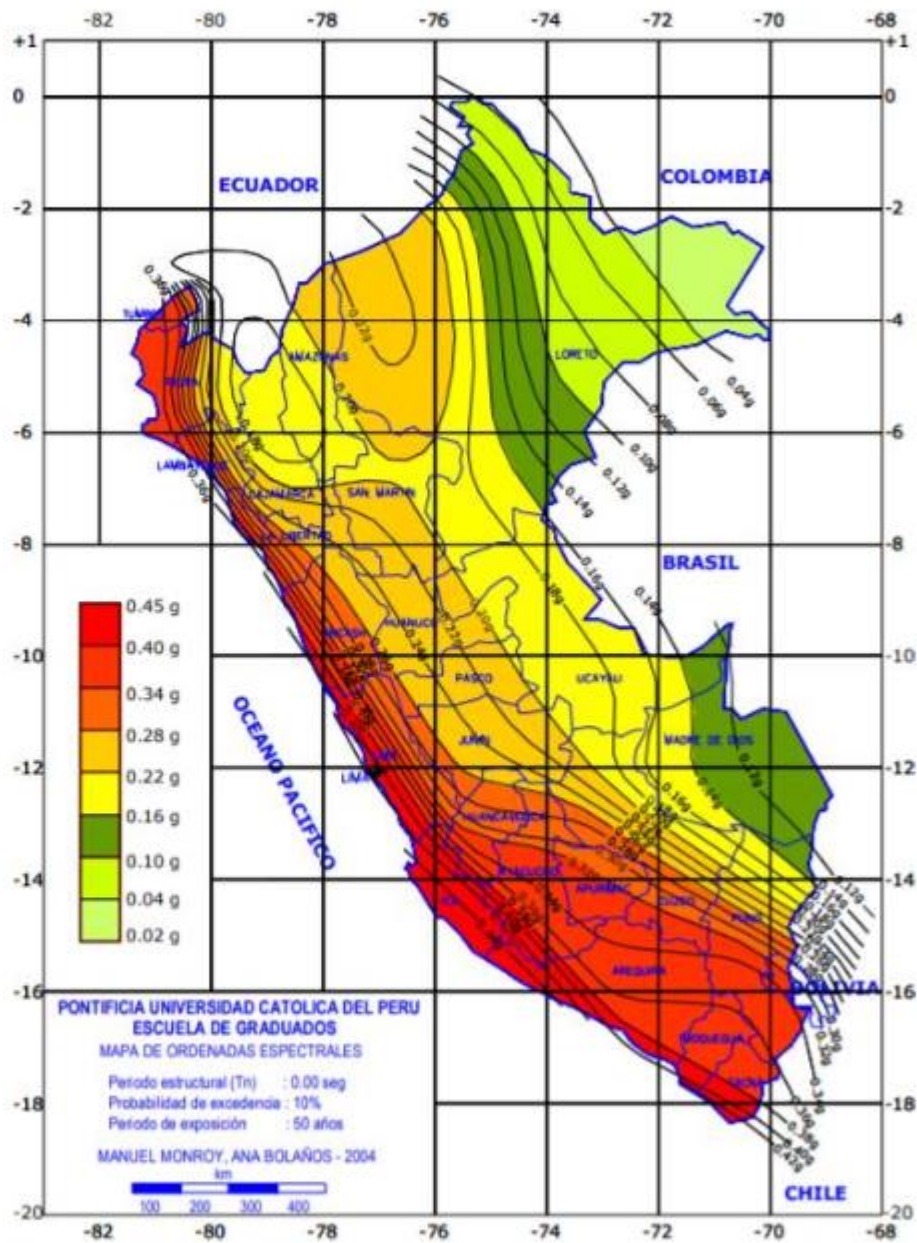
MAPAS DE ISOACELERACIONES

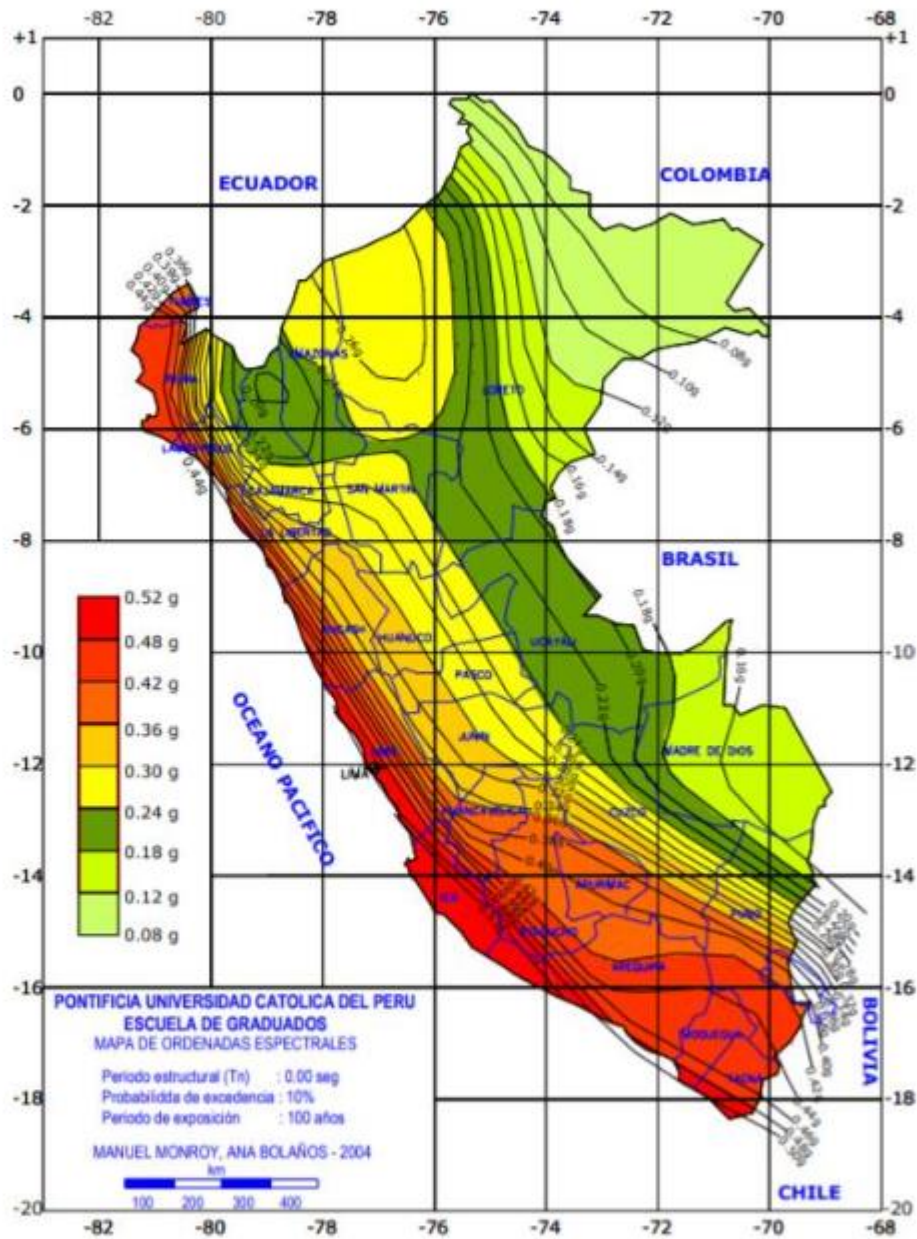


Mapa 1 Distribución de isoaceleraciones para un 10% de excedencia en 50 años (Castillo Aedo & Alva Hurtado, 1993).

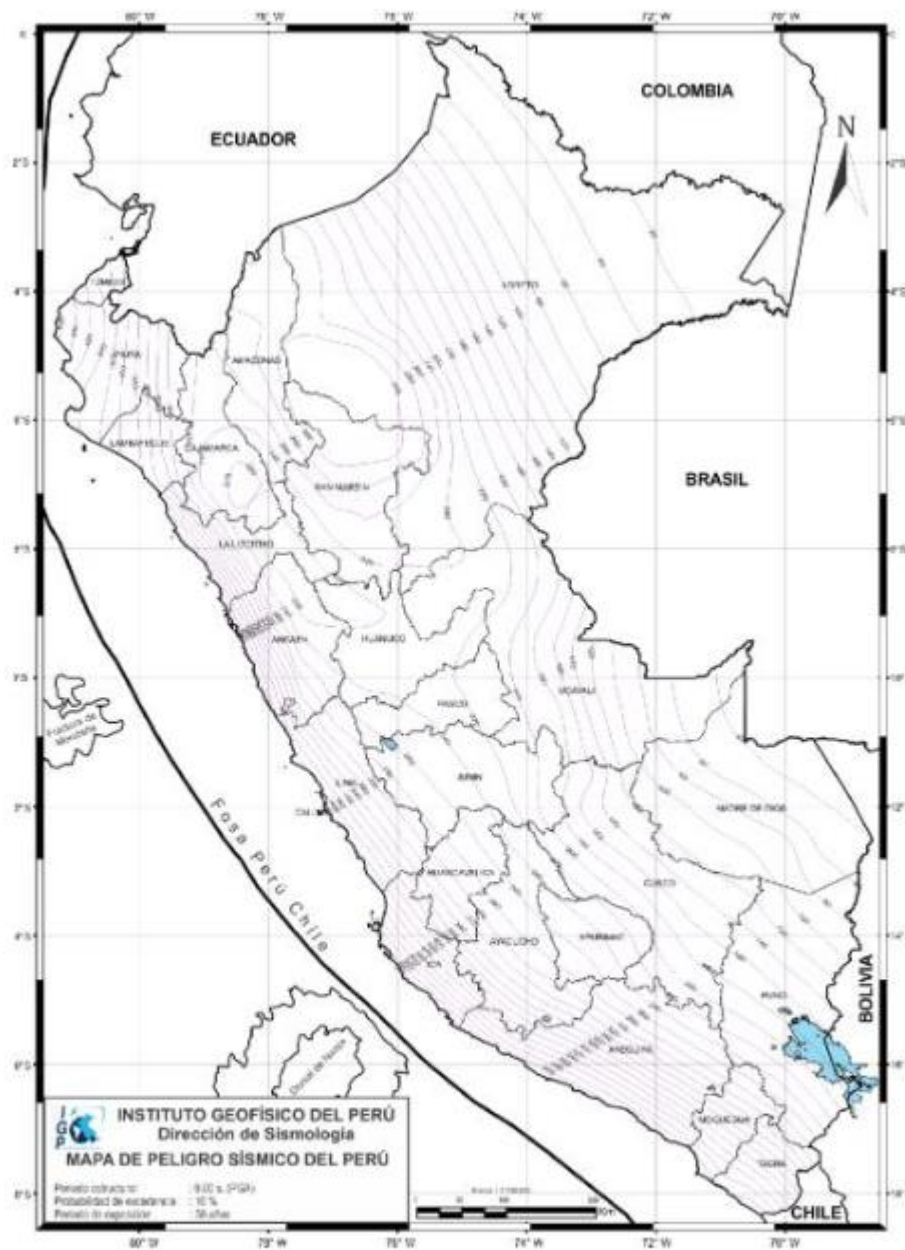


Mapa 2 Distribución de isoaceleraciones para 10% de excedencia en 100 años (Castillo Aedo & Alva Hurtado, 1993).

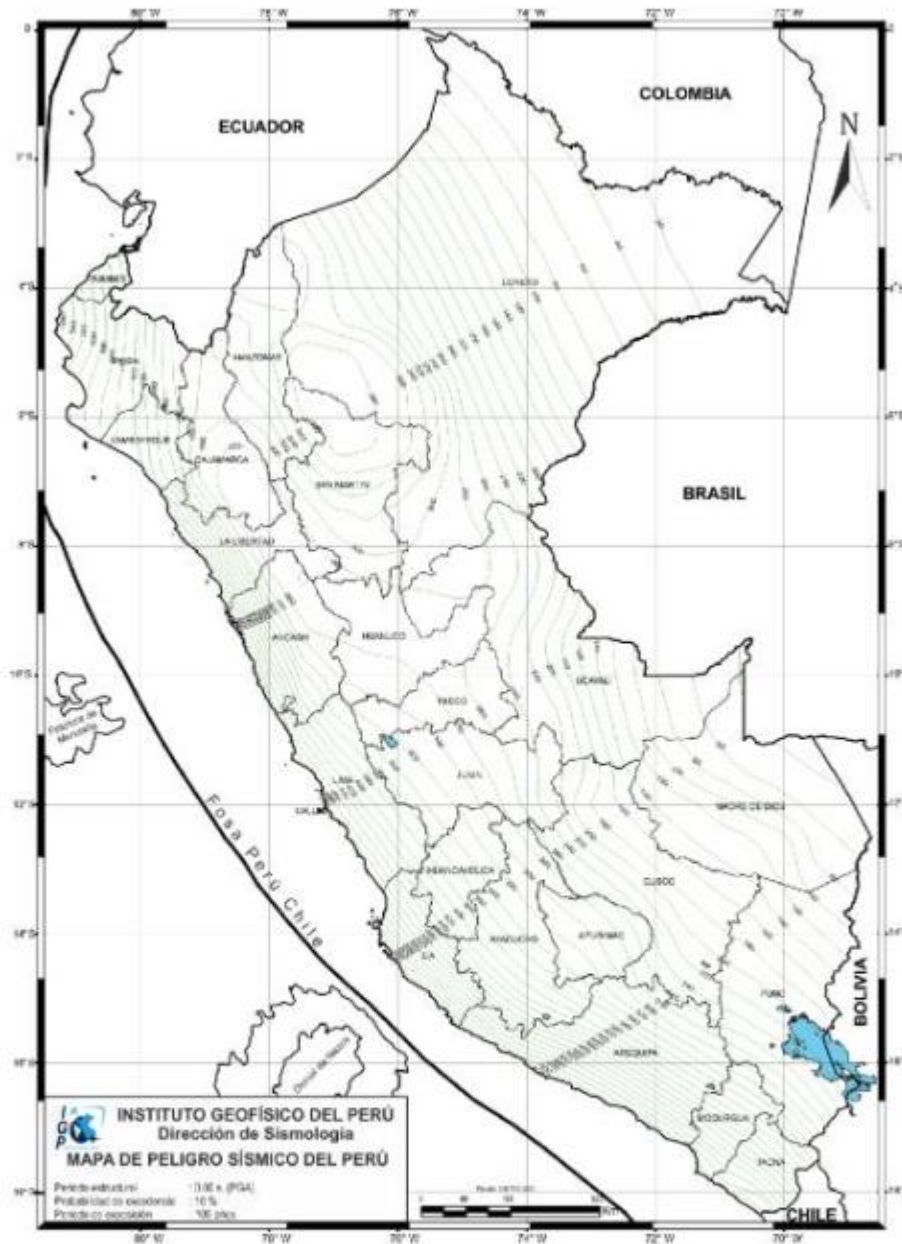




Mapa 4 Distribución de aceleraciones en el Perú para un periodo de exposición de 100 años y 10% de probabilidad de excedencia. Fuente (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004).



Mapa 5 Mapa de peligro sísmico para el Perú considerando un periodo de exposición de 50 años con el 10% de excedencia (en gals). Fuente (Tavera, 2014).



Mapa 6 Mapa de peligro sísmico para el Perú considerando un periodo de exposición de 100 años con el 10% de excedencia (en gals) Fuente (Tavera, 2014).

ANEXO D
PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO D
PANEL FOTOGRAFICO



Foto 1 Calicata 1 en el C. P. El Pasto. Fuente: Toma propia.



Foto 2 Calicata 2 en el C. P. El Pasto. Fuente: Toma propia.



Foto 3 Calicata 3 en el C. P. El Pasto. Fuente: Toma propia.



Foto 4 Calicata 4 en el C. P. El Pasto. Fuente: Toma propia



Foto 5 Etiquetado de muestras. Fuente: Toma propia



Foto 6 Conservación de muestras inalteradas. Fuente: Toma propia



Foto 7 Extracción de muestras. Fuente: Toma propia



Foto 8 Cuarteo del suelo. Fuente: Toma propia



Foto 9 Granulometría calicata 02-Muestras del estrato 1 y 2. Fuente: Toma propia



Foto 10 Granulometría calicata 02-Muestras del estrato 3 y 4. Fuente: Toma propia



Foto 11 Granulometría calicata 03-Muestras del estrato 3 y 4. Fuente: Toma propia



Foto 12 Granulometría calicata 03-Muestras del estrato 5 y 6. Fuente: Toma propia



Foto 13 Ensayo de limite líquido. Fuente: Toma propia



Foto 14 Ensayo de limite plástico Fuente: Toma propia



Foto 15 Muestras de suelo con parafina Fuente: Toma propia



Foto 16 Ensayo de peso específico. Fuente: Toma propia



Foto 17 Granulometría por hidrómetro Fuente: Toma propia



Foto 18 Ensayo de humedad en estado natural Fuente: Toma propia



Foto 19 Ensayo de gravedad específica de solidos Fuente: Toma propia



Foto 20: Ensayo de Penetración Estándar N°03 Fuente: Toma propia



Foto 21: Armado del tripode del equipo de penetración estándar SPT. Fuente: Toma propia



Foto 22: Ensayo de Penetración Estándar N°02 Fuente: Toma propia



Foto 23: Realización del ensayo SPT. Fuente: Toma propia

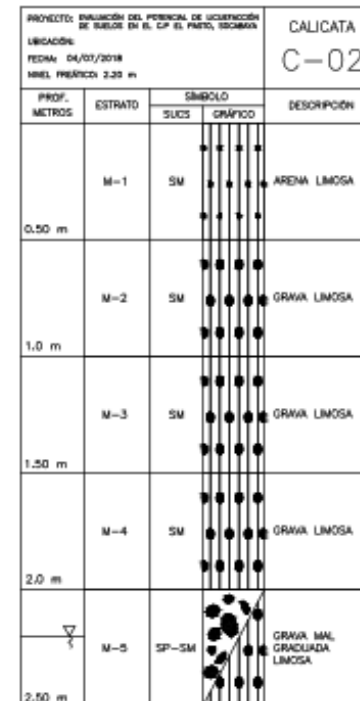


Foto 24: Muestras inalteradas obtenidas con el ensayo SPT Fuente: Toma propia



Foto 25: Ensayo de Penetración Estándar N°01 Fuente: Toma propia

ANEXO E
PERFILES ESTRATIGRÁFICOS



TESIS:
"EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ"
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA-UCSM

CROQUIS:
COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE CALICATAS DE EXPLORACIÓN
ELABORADO POR:
GULLÉN SEMINARIO, ANDREA LUCÍA
MENDOZA PINTO, VÍCTOR ANDRÉS

FECHA: OCTUBRE, 2018
ESCALA: S/E
LÁMINA: P-01

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P. EL PASTO, SOCABAYA				CALICATA C-03	
UBICACIÓN: FECHA: 04/07/2018 NIVEL: PRÁCTICO: 1.80 m					
PROF. METROS	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN	
		SUCS	GRÁFICO		
0.50 m	M-1	ML		LIMO INORGANICO DE BAJA PLASTICIDAD	
1.0 m	M-2	ML		LIMO INORGANICO DE BAJA PLASTICIDAD	
1.50 m	M-3	SM		ARENA LIMOSA	
2.0 m	M-4	SM		ARENA LIMOSA	
2.50 m	M-5	SM		ARENA LIMOSA	
3.0 m	M-6	SM		ARENA LIMOSA	

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P. EL PASTO, SOCABAYA				CALICATA C-04	
UBICACIÓN: FECHA: 04/07/2018 NIVEL: PRÁCTICO: 2.48 m					
PROF. METROS	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN	
		SUCS	GRÁFICO		
0.50 m	M-1	SM		ARENA LIMOSA	
1.0 m	M-2	SM		ARENA LIMOSA	
1.50 m	M-3	ML		LIMO INORGANICO DE BAJA PLASTICIDAD	
2.0 m	M-4	SM		ARENA LIMOSA	
2.50 m	M-5	SM		ARENA LIMOSA	
3.0 m	M-6	SM		ARENA LIMOSA	

TESIS:

"EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL C.P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ"

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA—UCSM

CROQUIS:

COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE CALICATAS DE EXPLORACIÓN

ELABORADO POR:

QUILLÉN SEMINARIO, ANDREA LUCÍA
MENDOZA PINTO, VÍCTOR ANDRÉS

FECHA: OCTUBRE, 2018

ESCALA: S/E

LÁMINA:

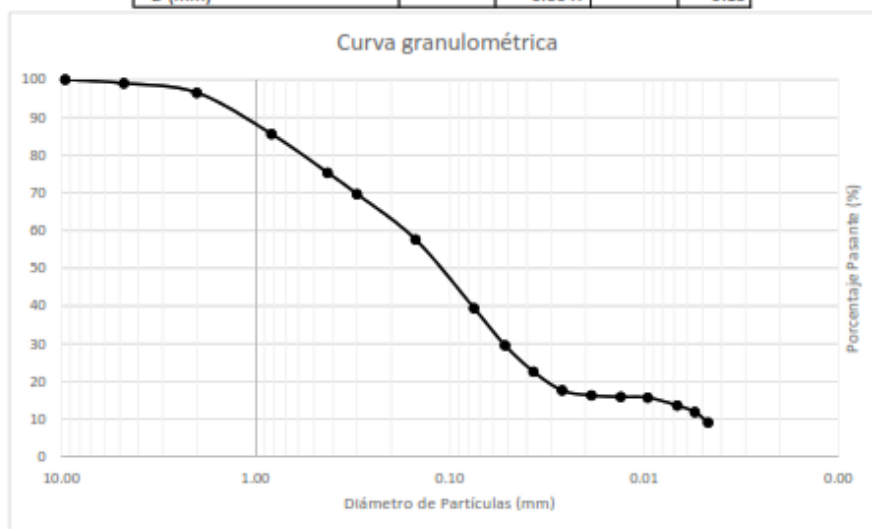
P-02

ANEXO F
ENSAYOS DE LABORATORIO

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/03/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-1 E-1
PROFUNDIDAD	: 0.00 - 0.30m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.9%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	59.6%	N4	4.7500	7.81	99.06
% Fino	39.4%	N10	2.0000	20.98	96.53
D10: 0.005	D50: 0.175	N20	0.8250	91.05	85.57
D30: 0.052	D60: 0.160	N40	0.4250	84.95	75.34
		N50	0.3000	46.89	69.69
Cu: 32.00	Cc: 3.38	N100	0.1500	100.08	57.64
		N200	0.0750	151.14	39.43
			0.0519	327.43	29.56
			0.0371		22.62
			0.0264		17.63
			0.0187		16.30
			0.0132		15.89
			0.0096		15.71
			0.0067		13.63
			0.0055		11.88
			0.0047		9.13

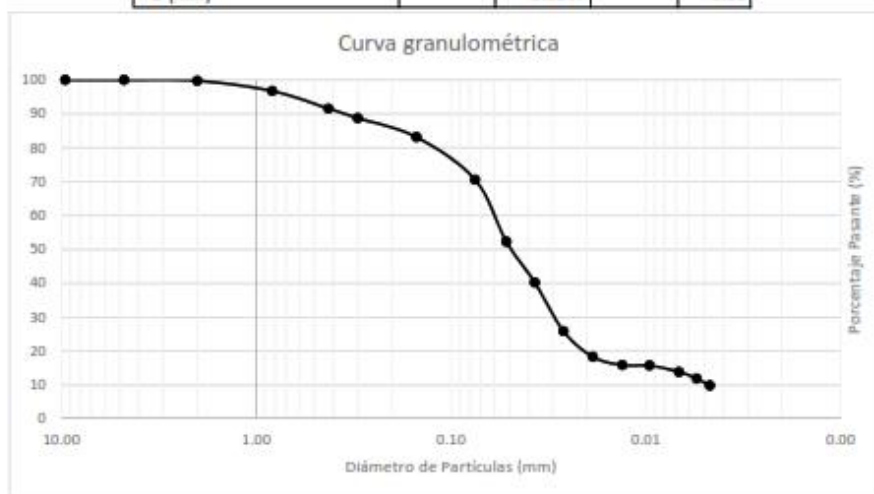
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMA NTP 339.128

REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-PERU	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA			
CALICATA	: C-1 E-2		
PROFUNDIDAD	: 0.50 - 1.00m		

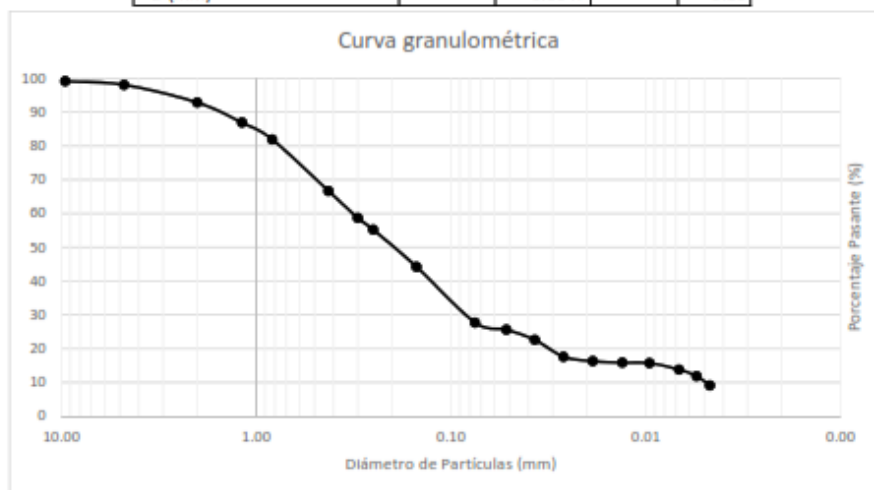
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.0%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	29.4%	N4	4.7500	0.18	99.98
% Fino	70.5%	N10	2.0000	2.25	99.75
D10: 0.005	D50: 0.045	N20	0.8250	30.07	96.71
D30: 0.030	D60: 0.063	N40	0.4250	51.12	91.54
		N50	0.3000	27.80	88.72
Cu: 13.21	Cc: 2.95741	N100	0.1500	55.48	83.11
		N200	0.0750	124.25	70.53
			0.0519	696.97	52.32
			0.0371		40.23
			0.0264		25.86
			0.0187		18.32
			0.0132		15.87
			0.0096		15.74
			0.0067		13.86
			0.0055		11.90
			0.0047		9.86



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-1 E-3
PROFUNDIDAD	: 1.00 - 1.50m

		MACA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
		3/4"	19.050	0	100
% Grava	1.9%	3/8"	9.5250	7.73	99.17
% Arena	70.3%	N4	4.7500	10.17	98.08
% Fino	27.7%	N10	2.0000	48.74	92.84
		N16	1.1800	55.25	86.90
D10: 0.005	D50: 0.200	N20	0.8250	46.36	81.91
D30: 0.080	D60: 0.320	N40	0.4250	141.39	66.71
		N50	0.3000	74.62	58.69
		N60	0.2500	32.23	55.22
Cu: 64.00	Cc: 4.000	N100	0.1500	102.27	44.23
		N200	0.0750	153.41	27.73
			0.0519	257.95	25.64
			0.0371		22.63
			0.0264		17.65
			0.0187		16.32
			0.0132		15.88
			0.0096		15.75
			0.0067		13.83
			0.0055		11.89
			0.0047		9.16

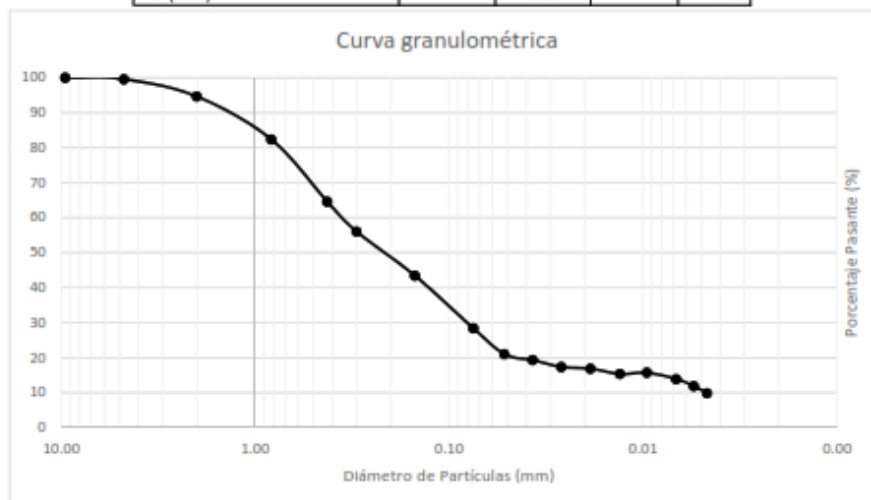
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-1 E-4
PROFUNDIDAD	: 1.50 - 2.00m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.4%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	71.2%	N4	4.7500	3.96	99.60
% Fino	28.4%	N10	2.0000	49.11	94.67
D10: 0.005	D50: 0.270	N20	0.8250	122.48	82.38
D30: 0.077	D60: 0.370	N40	0.4250	177.04	64.62
		N50	0.3000	85.30	56.06
Cu: 74.00	Cc: 3.205	N100	0.1500	125.85	43.43
		N200	0.0750	149.54	28.42
		Hidrómetro	0.0519	283.18	21.02
			0.0371		19.30
			0.0264		17.34
			0.0187		16.87
			0.0132		15.33
			0.0096		15.70
			0.0067		13.88
			0.0055		11.87
		0.0047		9.82	

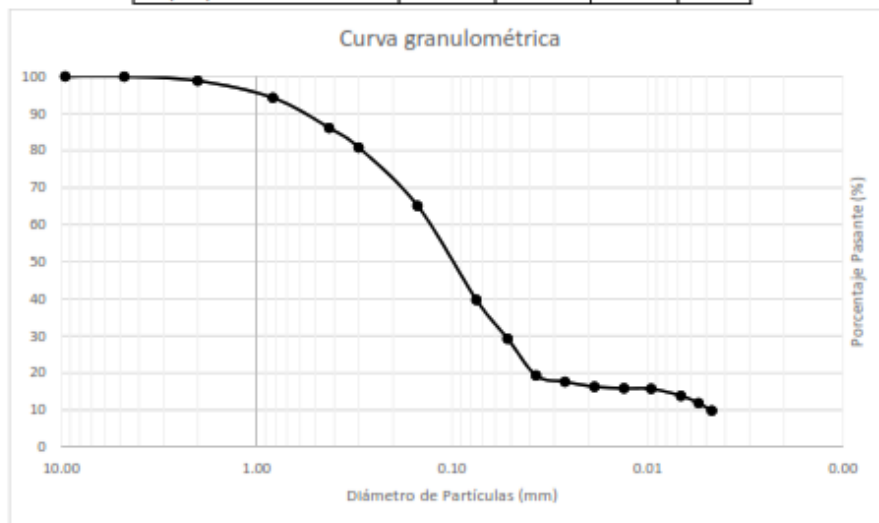
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-1 E-5
PROFUNDIDAD	: 2.00 - 2.50m

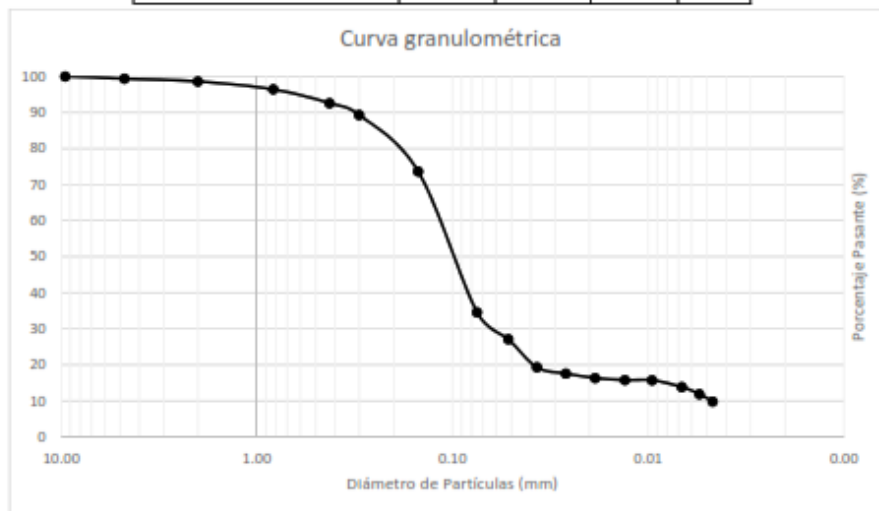
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.0%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	60.2%	N4	4.7500	0.40	99.96
% Fino	39.8%	N10	2.0000	11.46	98.81
D10: 0.005	D50: 0.113	N20	0.8250	45.53	94.24
D30: 0.052	D60: 0.125	N40	0.4250	80.72	86.14
		N50	0.3000	52.92	80.82
Cu: 25.00	Cc: 4.326	N100	0.1500	156.61	65.10
		N200	0.0750	252.52	39.75
			0.0519	396.00	29.26
			0.0371		19.34
			0.0264		17.65
			0.0187		16.32
			0.0132		15.87
			0.0096		15.74
			0.0067		13.86
			0.0055		11.90
			0.0047		9.85

* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCÍA BACH. MENDOZA PINTO, VÍCTOR ANDRÉS
PROYECTO	: TESIS, EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-1 E-6
PROFUNDIDAD	: 2.50 - 3.00m

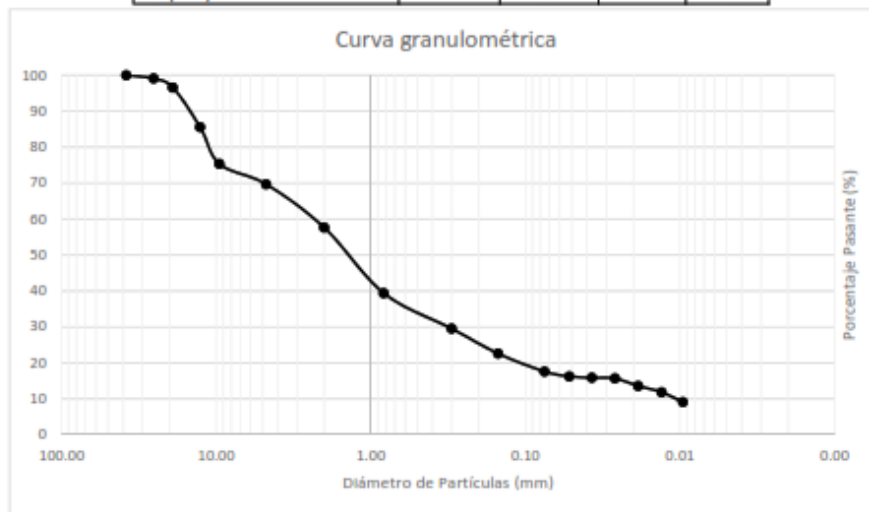
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.6%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	64.8%	N4	4.7500	6.43	99.36
% Fino	34.6%	N10	2.0000	7.70	98.58
D10: 0.005	D50: 0.113	N20	0.8250	21.89	96.39
D30: 0.053	D60: 0.130	N40	0.4250	38.12	92.57
		N50	0.3000	32.89	89.28
Cu: 26.00	Cc: 4.322	N100	0.1500	156.00	73.66
		N200	0.0750	390.06	34.59
			0.0519	345.37	27.12
			0.0371		19.35
			0.0264		17.62
			0.0187		16.38
			0.0132		15.81
			0.0096		15.75
			0.0067		13.88
			0.0055		11.91
			0.0047		9.87



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-2 E-1
PROFUNDIDAD	: 0.00 - 0.30m

		MACA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %	
% Grava	8.7%	1 1/2"	38.10	0	100	
% Arena	64.1%	1"	25.40	13.2	99.17	
% Fino	27.2%	3/4"	19.05	37.8	96.81	
D10: 0.005	D50: 0.175	1/2"	12.70	35.40	94.59	
D30: 0.010	D60: 0.30	3/8"	9.53	12.10	93.84	
		N4	4.75	40.70	91.29	
Cu: 60.00	Cc: 0.07	N10	2.00	63.90	87.29	
		N20	0.83	108.70	80.49	
		N50	0.30	294.00	60.09	
		N100	0.15	279.80	44.58	
		N200	0.08	277.60	27.21	
				0.0519	434.80	21.02
				0.0371		19.35
				0.0264		17.66
				0.0187		16.33
				0.0132		15.88
				0.0096		15.75
				0.0067		13.90
				0.0055		11.91
				0.0047		9.16

* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMA NTP 339.128

REALIZADO POR : BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES

PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA

UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/05/2018

DATOS DE LA MUESTRA

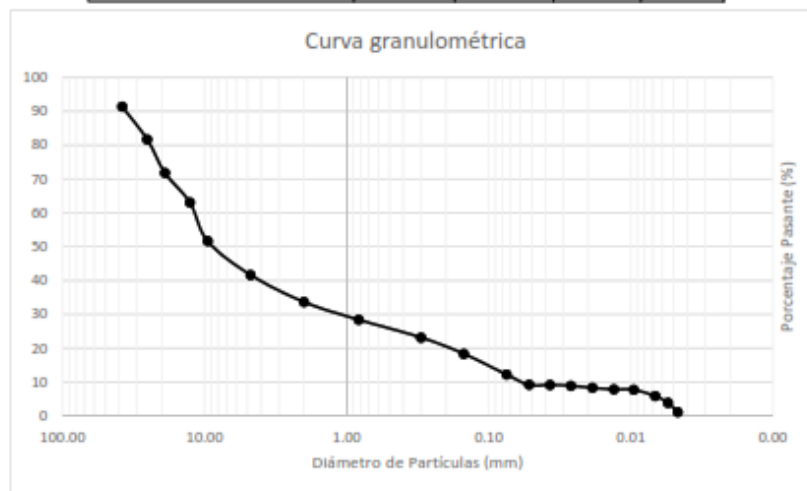
MUESTRA

CALICATA : C-2 E-2

PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

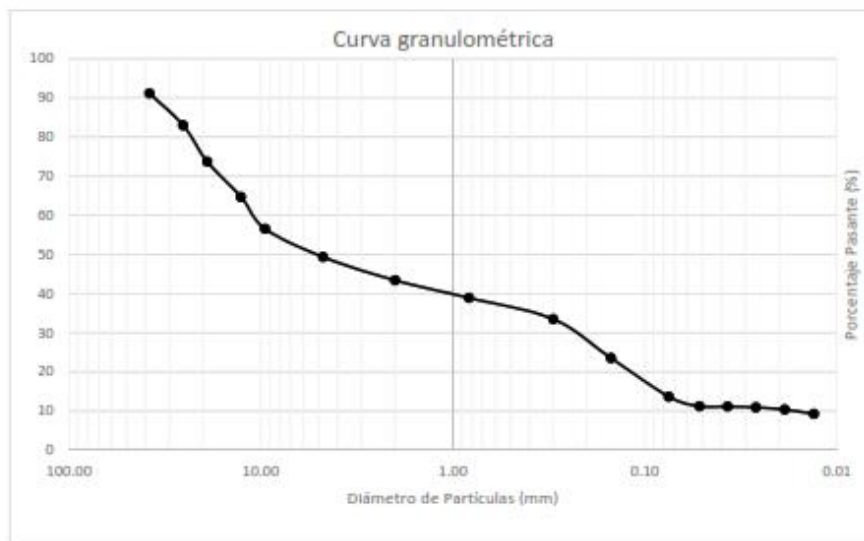
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
		2"	50	0	100.00
% Grava	58.3%	1 1/2"	38.10	115.3	91.43
% Arena	29.4%	1"	25.40	130.8	81.71
% Fino	12.2%	3/4"	19.05	132.6	71.85
D10: 0.090	D50: 5.2	1/2"	12.70	118.10	63.07
D30: 0.350	D60: 11.94	3/8"	9.53	153.50	51.66
		N4	4.75	134.50	41.66
Cu: 132.07	Cc: 0.28	N10	2.00	107.40	33.68
		N20	0.83	70.40	28.44
		N50	0.30	70.80	23.18
		N100	0.15	64.80	18.36
		N200	0.08	82.50	12.23
		Hidrómetro	0.0519	164.50	9.18
			0.0371		9.16
			0.0264		8.91
			0.0187		8.30
			0.0132		7.85
			0.0096		7.72
			0.0067		5.84
			0.0055		3.87
		0.0047		1.12	

* D (mm)



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-2 E-3
PROFUNDIDAD	: 1.00 - 1.50m

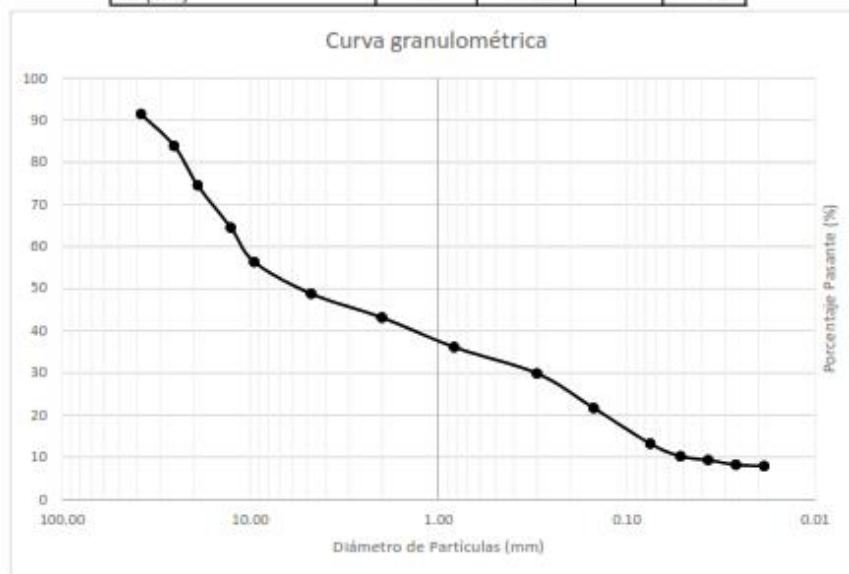
		MAPA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
		2"	50	0	100.00
% Grava	50.6%	1 1/2"	38.10	202.5	91.21
% Arena	35.7%	1"	25.40	189.1	83.01
% Fino	13.7%	3/4"	19.05	213.4	73.75
D10: 0.005	D50: 0.9	1/2"	12.70	208.20	64.72
D30: 0.250	D60: 3.00	3/8"	9.53	186.80	56.61
		N4	4.75	166.70	49.38
Cu: 600.00	Cc: 4.17	N10	2.00	137.70	43.40
		N20	0.83	103.60	38.91
		N50	0.30	124.90	33.49
		N100	0.15	229.70	23.52
		N200	0.08	226.90	13.68
		Hidrómetro	0.0519	315.20	11.23
			0.0371		11.15
			0.0264		10.92
			0.0187		10.36
			0.0132		9.25



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-2 E-4
PROFUNDIDAD	: 1.50 - 2.00m

			MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %	
			2"	50	0	100.00	
% Grava		51.2%	1 1/2"	38.10	200.3	91.45	
% Arena		35.6%	1"	25.40	176.5	83.91	
% Fino		13.2%	3/4"	19.05	219.4	74.55	
D10: 0.050	D50:	1	1/2"	12.70	235.60	64.49	
D30: 0.250	D60:	3.50	3/8"	9.53	190.40	56.36	
			N4	4.75	176.80	48.81	
Cu: 70.00	Cc: 0.30		N10	2.00	132.80	43.14	
			N20	0.83	164.20	36.13	
			N50	0.30	146.30	29.89	
			N100	0.15	192.60	21.66	
			N200	0.08	198.20	13.20	
			Hidrómetr		0.0519	309.20	10.21
					0.0371		9.33
					0.0264		8.23
					0.0187		7.88

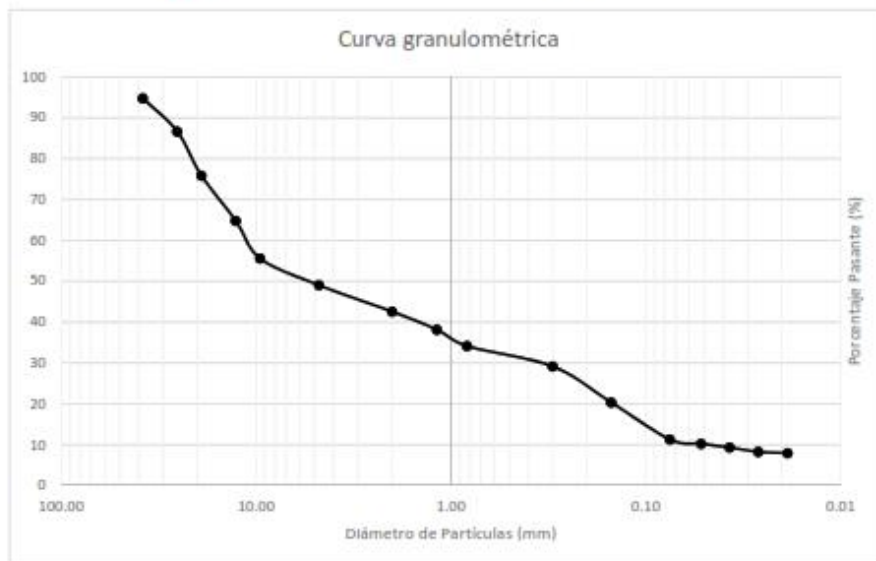
* D (mm)



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-2 E-5
PROFUNDIDAD	: 2.00 - 2.50m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %	
		2"	50.00	0	100.00	
% Grava	51.0%	1 1/2"	38.10	102.4	94.77	
% Arena	37.7%	1"	25.40	158.9	86.64	
% Fino	11.3%	3/4"	19.05	211.4	75.84	
D10: 0.080	D50: 2.02	1/2"	12.70	216.60	64.76	
D30: 0.220	D60: 5.52	3/8"	9.53	179.80	55.57	
		N4	4.75	128.30	49.01	
Cu: 09.00	Cc: 0.11	N10	2.00	126.40	42.55	
		N16	1.18	86.20	38.15	
		N20	0.83	78.60	34.13	
		N50	0.30	97.50	29.14	
		N100	0.15	172.80	20.31	
		N200	0.08	176.90	11.27	
		Hidrómetr		0.0519	220.40	10.23
				0.0371		9.30
				0.0264		8.25
				0.0187		7.92

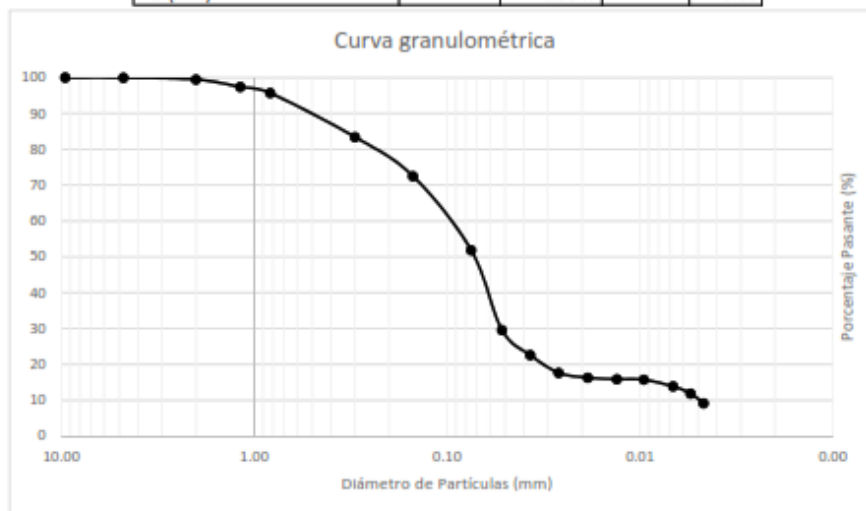
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-3 E-1
PROFUNDIDAD	: 0.00 - 0.30m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.0%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	48.1%	N4	4.7500	0.30	99.97
% Fino	51.9%	N10	2.0000	4.60	99.48
D10: 0.005	D50: 0.075	N16	1.1800	19.40	97.42
D30: 0.052	D60: 0.120	N20	0.8250	16.20	95.70
		N50	0.3000	115.50	83.44
Cu: 24.00	Cc: 4.50667	N100	0.1500	103.10	72.50
		N200	0.0750	194.10	51.89
			0.0519	488.90	29.55
			0.0371		22.62
			0.0264		17.66
			0.0187		16.31
			0.0132		15.88
			0.0096		15.73
			0.0067		13.87
			0.0055		11.89
			0.0047		9.16

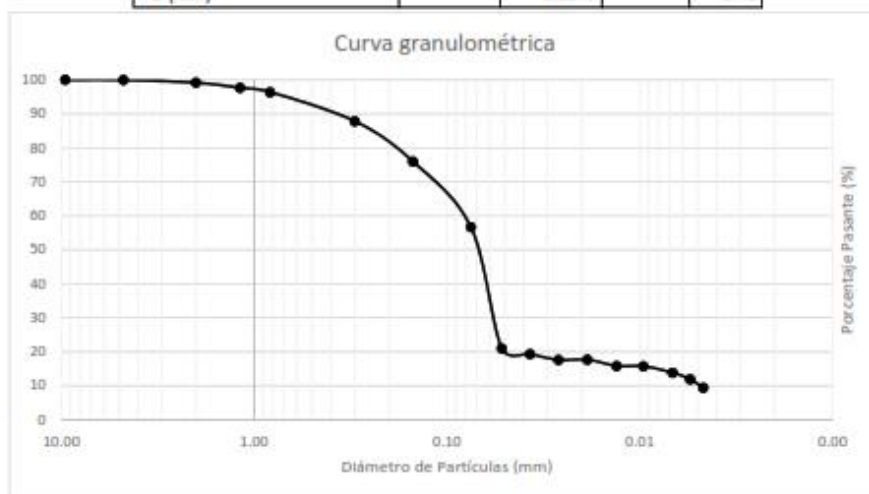
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMA NTP 339.128

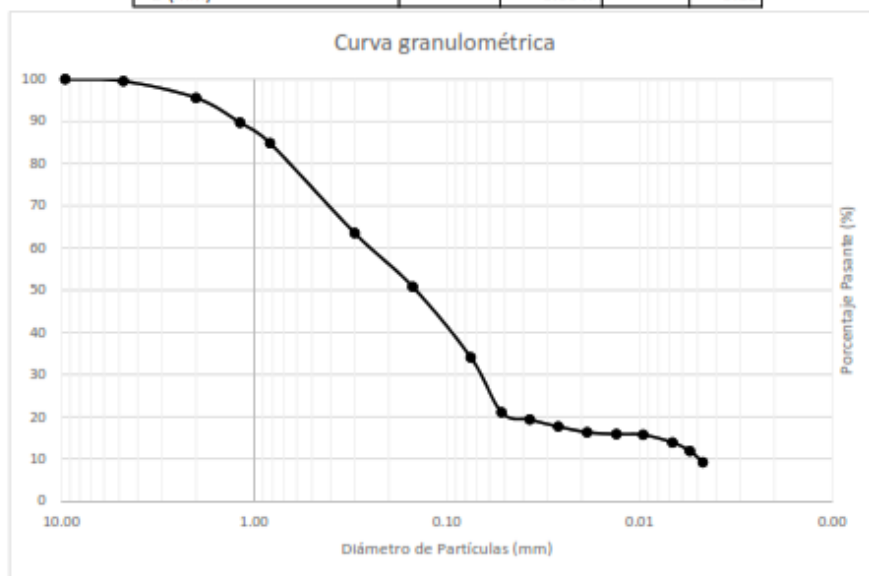
REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-PERU	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA			
CALICATA	: C-3 E-2		
PROFUNDIDAD	: 0.50 - 1.00m		

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.1%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	43.3%	N4	4.7500	0.90	99.94
% Fino	56.7%	N10	2.0000	11.50	99.17
D10: 0.005	D50: 0.071	N16	1.1800	22.40	97.67
D30: 0.058	D60: 0.085	N20	0.8250	18.80	96.41
		N50	0.3000	128.20	87.84
Cu: 17.71	Cc: 8.16002	N100	0.1500	176.90	76.01
		N200	0.0750	289.30	56.65
			0.0519	846.90	21.00
			0.0371		19.35
			0.0264		17.63
			0.0187		17.68
			0.0132		15.85
			0.0096		15.76
			0.0067		13.84
			0.0055		11.91
			0.0047		9.45



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-3 E-3
PROFUNDIDAD	: 1.00 - 1.50m

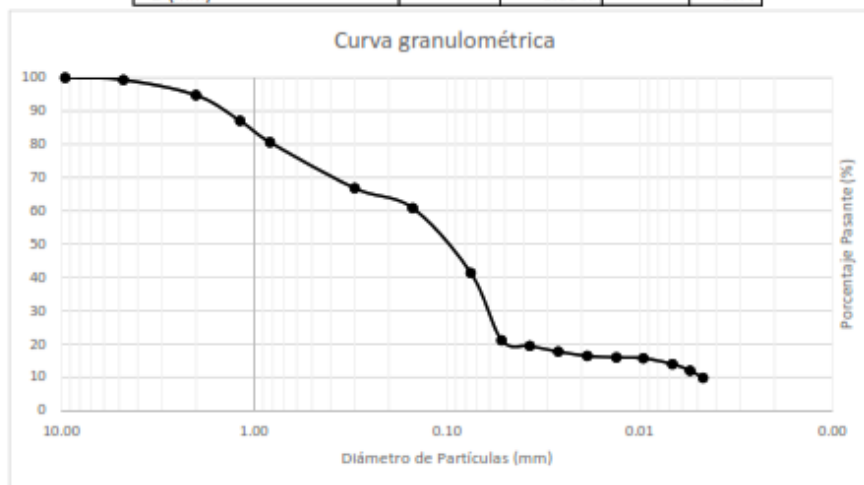
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %	
% Grava	0.5%	3/8"	9.5250	0.00	100.00	
% Arena	65.5%	N4	4.7500	7.20	99.53	
% Fino	34.1%	N10	2.0000	61.10	95.59	
D10: 0.005	D50: 0.150	N16	1.1800	90.80	89.72	
D30: 0.072	D60: 0.280	N20	0.8250	75.60	84.83	
		N50	0.3000	329.60	63.53	
Cu: 56.00	Cc: 3.703	N100	0.1500	197.20	50.79	
		N200	0.0750	258.80	34.06	
				0.0519	527.10	21.04
				0.0371		19.32
				0.0264		17.68
				0.0187		16.31
				0.0132		15.89
				0.0096		15.72
				0.0067		13.89
				0.0055		11.85
				0.0047		9.18



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	
NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-3 E-4
PROFUNDIDAD	: 1.50 - 2.00m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.6%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	58.1%	N4	4.7500	8.60	99.37
% Fino	41.3%	N10	2.0000	62.80	94.76
D10: 0.005	D50: 0.113	N16	1.1800	105.10	87.05
D30: 0.063	D60: 0.150	N20	0.8250	88.00	80.59
		N50	0.3000	187.90	66.80
Cu: 30.00	Cc: 5.368	N100	0.1500	81.80	60.80
		N200	0.0750	265.60	41.31
		Hidrómetro	0.0519	563.00	21.07
			0.0371		19.38
			0.0264		17.69
			0.0187		16.37
			0.0132		15.94
			0.0096		15.69
			0.0067		13.91
			0.0055		11.97
			0.0047		9.77

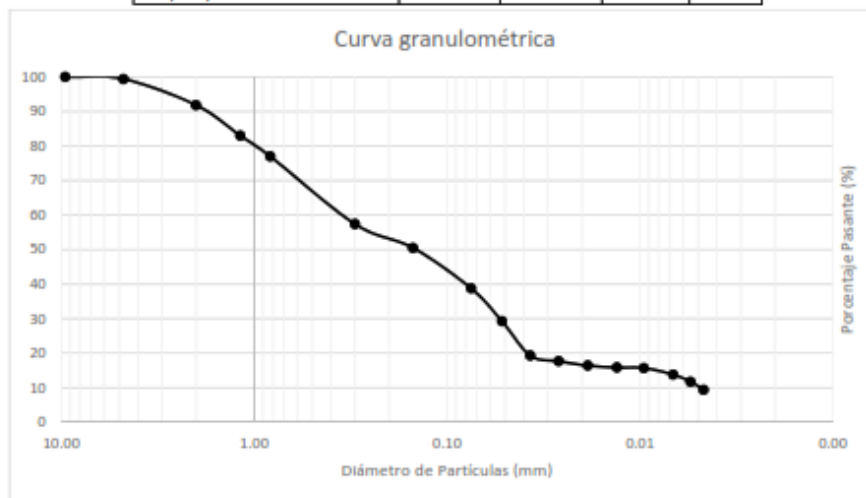
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-3 E-3
PROFUNDIDAD	: 2.00 - 2.50m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.6%	3/8*	9.5250	0.00	100.00
% Arena	60.6%	N4	4.7500	10.00	99.38
% Fino	38.7%	N10	2.0000	122.80	91.83
D10: 0.005	D50: 0.150	N16	1.1800	143.70	82.99
D30: 0.052	D60: 0.318	N20	0.8250	97.70	76.98
		N50	0.3000	318.70	57.38
Cu: 63.60	Cc: 1.701	N100	0.1500	112.00	50.49
		N200	0.0750	190.80	38.75
			0.0519	629.90	29.25
			0.0371		19.33
			0.0264		17.69
			0.0187		16.42
			0.0132		15.86
			0.0096		15.71
			0.0067		13.82
			0.0055		11.75
			0.0047		9.42

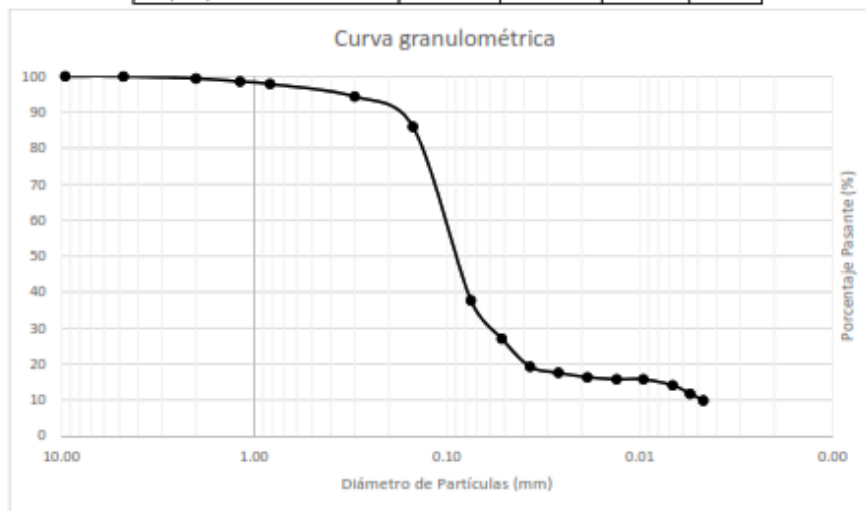
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-3 E-6
PROFUNDIDAD	: 2.50 - 3.00m

		MAJILLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.0%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	62.2%	N4	4.7500	0.80	99.96
% Fino	37.7%	N10	2.0000	10.60	99.40
D10: 0.005	D50: 0.094	N16	1.1800	15.90	98.56
D30: 0.053	D60: 0.110	N20	0.8250	12.90	97.88
		N50	0.3000	66.70	94.36
Cu: 21.92	Cc: 5.126	N100	0.1500	159.10	85.98
		N200	0.0750	914.70	37.75
				0.0519	27.11
				0.0371	19.32
				0.0264	17.61
				0.0187	16.37
				0.0132	15.80
				0.0096	15.77
				0.0067	14.10
				0.0055	11.78
				0.0047	9.88

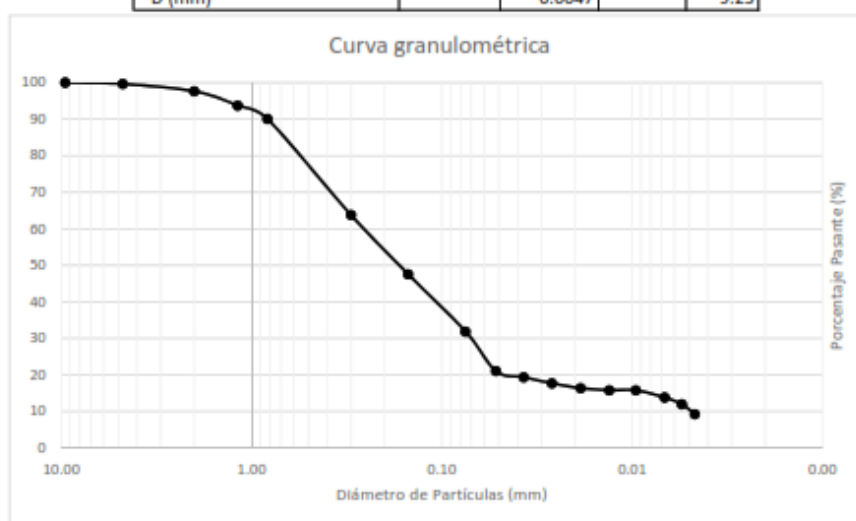
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-4 E-1
PROFUNDIDAD	: 0.00 - 0.30m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.4%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	67.8%	N4	4.7500	4.90	99.64
% Fino	31.9%	N10	2.0000	26.90	97.65
D10: 0.005	D50: 0.173	N16	1.1800	52.90	93.74
D30: 0.074	D60: 0.265	N20	0.8250	49.60	90.08
		N50	0.3000	356.00	63.77
Cu: 53.00	Cc: 4.133	N100	0.1500	219.50	47.55
		N200	0.0750	212.20	31.87
			0.0519	431.20	21.05
			0.0371		19.37
			0.0264		17.69
			0.0187		16.38
			0.0132		15.81
			0.0096		15.77
			0.0067		13.80
			0.0055		11.95
			0.0047		9.25

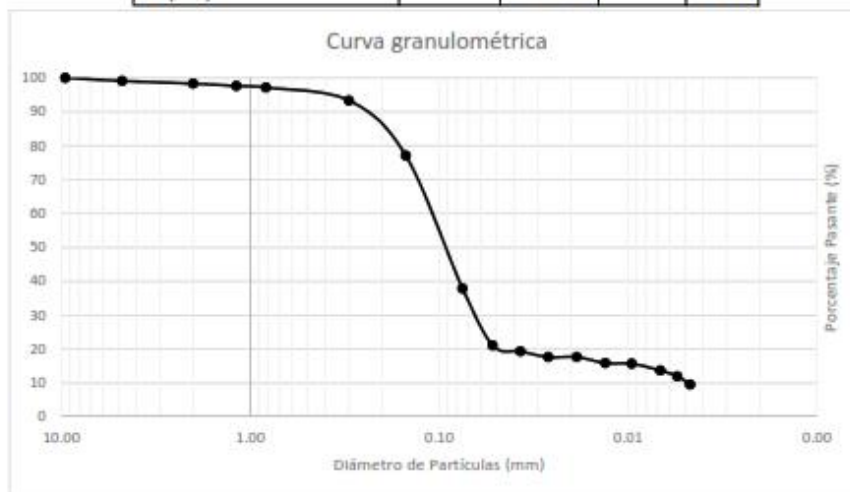
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMA NTP 339.128

REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA			
CALICATA	: C-4 E-2		
PROFUNDIDAD	: 0.50 - 1.00m		

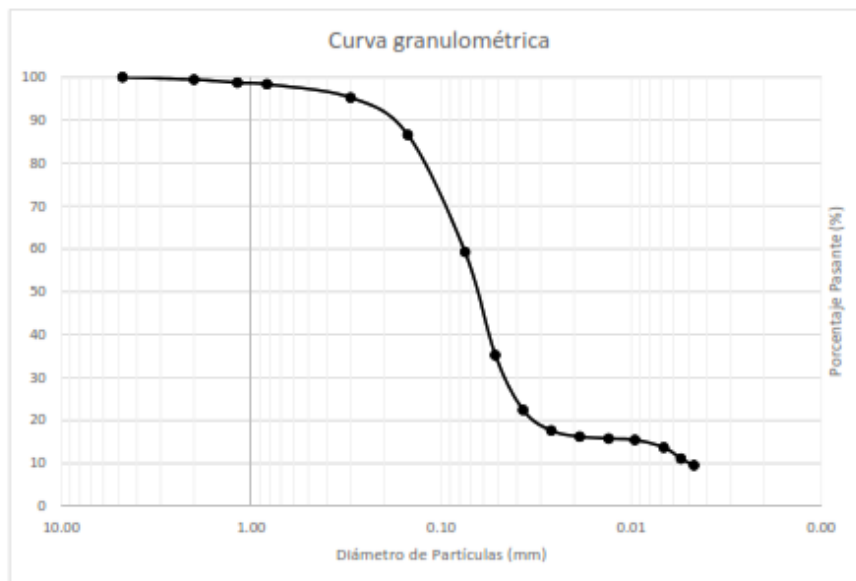
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %	
% Grava	0.9%	3/8"	9.5250	0.00	100.00	
% Arena	61.2%	N4	4.7500	12.90	99.10	
% Fino	37.9%	N10	2.0000	11.40	98.30	
D10: 0.005	D50: 0.098	N16	1.1800	9.60	97.63	
D30: 0.064	D60: 0.117	N20	0.8250	7.10	97.14	
		N50	0.3000	54.30	93.34	
Cu: 24.44	Cc: 7.30893	N100	0.1500	232.30	77.11	
		N200	0.0750	562.00	37.86	
				0.0519	541.90	21.09
				0.0371		19.35
				0.0264		17.67
				0.0187		17.66
				0.0132		15.88
				0.0096		15.71
				0.0067		13.68
				0.0055		11.98
				0.0047		9.54



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-4 E-3
PROFUNDIDAD	: 1.00 - 1.50m

		MACA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.0%	N4	4.7500	0.00	100.00
% Arena	40.7%	N10	2.0000	6.90	99.44
% Fino	59.3%	N16	1.1800	8.60	98.74
D10: 0.005	D50: 0.066	N20	0.8250	4.70	98.36
D30: 0.049	D60: 0.076	N50	0.3000	38.20	95.25
		N100	0.1500	106.70	86.58
Cu: 15.20	Cc: 6.318	N200	0.0750	335.70	59.28
			0.0519	729.20	35.21
			0.0371		22.43
			0.0264		17.65
			0.0187		16.23
			0.0132		15.78
			0.0096		15.47
			0.0067		13.68
			0.0055		11.09
			0.0047		9.51

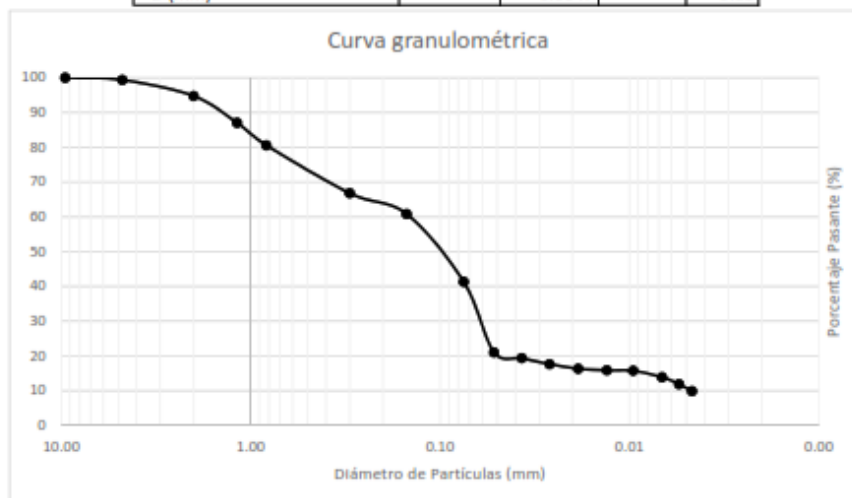
* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-4 E-4
PROFUNDIDAD	: 1.50 - 2.00m

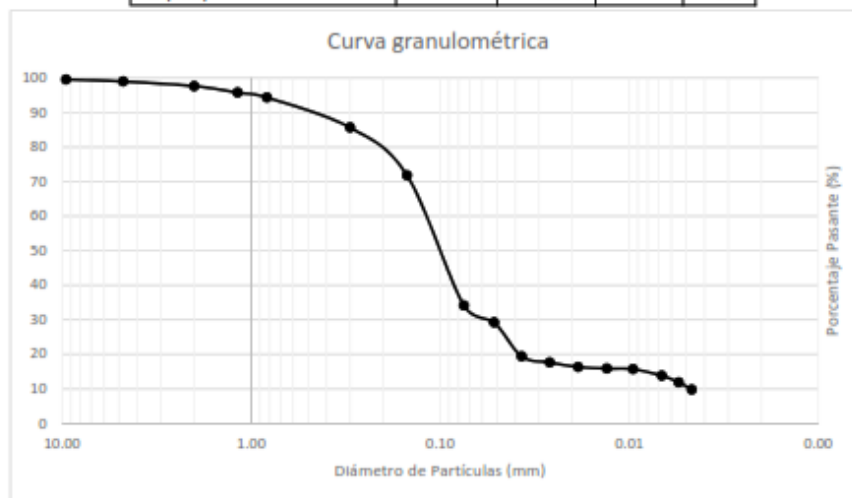
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.6%	3/8"	9.5250	0.00	100.00
% Arena	58.1%	N4	4.7500	8.60	99.37
% Fino	41.3%	N10	2.0000	62.80	94.76
D10: 0.005	D50: 0.113	N16	1.1800	105.10	87.05
D30: 0.063	D60: 0.150	N20	0.8250	88.00	80.59
		N50	0.3000	187.90	66.80
Cu: 30.00	Cc: 5.368	N100	0.1500	81.80	60.80
		N200	0.0750	265.60	41.31
			0.0519	563.00	21.02
			0.0371		19.34
			0.0264		17.65
			0.0187		16.32
			0.0132		15.87
			0.0096		15.74
			0.0067		13.86
			0.0055		11.90
			0.0047		9.85

* D (mm)



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-4 E-5
PROFUNDIDAD	: 2.00 - 2.50m

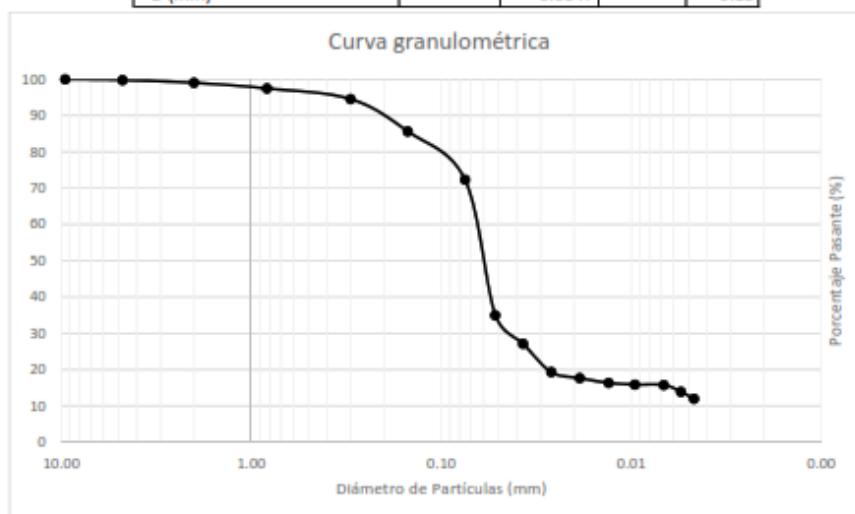
		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
		1/2"	12.7	0	100
% Grava	1.0%	3/8"	9.5250	8.00	99.55
% Arena	64.8%	N4	4.7500	10.60	98.96
% Fino	34.2%	N10	2.0000	23.90	97.62
D10: 0.005	D50: 0.107	N16	1.1800	33.50	95.75
D30: 0.052	D60: 0.126	N20	0.8250	25.40	94.33
		N50	0.3000	155.60	85.62
Cu: 25.29	Cc: 4.260	N100	0.1500	246.50	71.82
		N200	0.0750	673.00	34.16
				0.0519	29.26
				0.0371	19.43
				0.0264	17.68
				0.0187	16.33
				0.0132	15.89
				0.0096	15.71
				0.0067	13.83
				0.0055	11.86
				0.0047	9.84



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NORMA NTP 339.128	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO	: TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	
CALICATA	: C-4 E-6
PROFUNDIDAD	: 2.50 - 3.00m

		MALLA	DIAM(mm)	W ret (g)	PASA %
% Grava	0.2%	1/2"	12.7	0.00	100.00
% Arena	64.8%	3/8"	9.5250	3.00	99.80
% Fino	35.0%	N4	4.7500	11.40	99.04
D10: 0.005	D50: 0.105	N10	2.0000	23.10	97.50
D30: 0.060	D60: 0.125	N20	0.8250	44.00	94.57
		N50	0.3000	133.70	85.65
Cu: 25.04	Cc:	N100	0.1500	199.50	72.35
		N200	0.0750	560.70	34.97
			0.0519	524.50	27.12
			0.0371		19.35
			0.0264		17.67
			0.0187		16.35
			0.0132		15.89
			0.0096		15.76
			0.0067		13.88
			0.0055		11.96
			0.0047		9.89

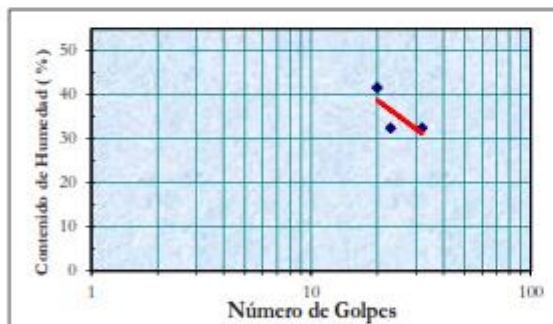
* D (mm)



LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-1
PROF.	: 0.00 - 0.50m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	139.63	137.61	127.87
Peso Tara + Muestra Seca	g	132.38	131.94	124.88
Peso de la Tara	g	114.97	114.47	115.67
Peso de la Muestra Seca	g	17.41	17.47	9.21
Peso del Agua	g	7.25	5.670	2.99
Contenido de Humedad	%	41.64	32.46	32.46
Número de Golpes		20	32	23



Límite Líquido (LL)	35.20%
Límite Plástico (LP)	33.39%
Índice de Plasticidad (Ip)	1.81%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	11.10%

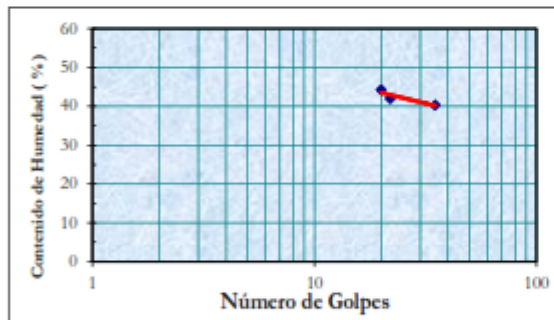
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	177.71	122.58	125.42
Peso Tara + Muestra Seca	g	175.82	121.05	123.72
Peso de la Tara	g	170	116.30	118.93
Peso de la Muestra Seca	g	5.82	4.75	4.79
Peso del Agua	g	1.89	1.530	1.7
Contenido de Humedad	%	32.47	32.21	35.49

LIMITES DE ATTERBERG	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ
FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	: Alterada
CALICATA	: C-01
ESTRATO	: M-2
PROF.	: 1.00 - 1.50m

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	184.27	181.57	191.83
Peso Tara + Muestra Seca	g	179.09	177.78	187.35
Peso de la Tara	g	166.76	169.22	176.24
Peso de la Muestra Seca	g	12.33	8.56	11.11
Peso del Agua	g	5.18	3.790	4.48
Contenido de Humedad	%	42.01	44.28	40.32
Número de Golpes		22	20	35



Limite Líquido (LL)	42.17%
Limite Plástico (LP)	41.61%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.57%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	16.19%

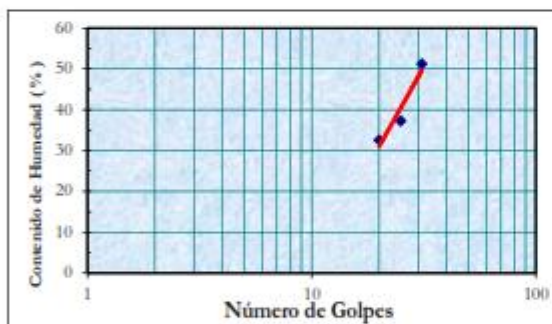
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	123.31	32.24	27.2
Peso Tara + Muestra Seca	g	121.34	30.57	25.62
Peso de la Tara	g	116.7	26.60	21.7
Peso de la Muestra Seca	g	4.64	3.97	3.92
Peso del Agua	g	1.97	1.670	1.58
Contenido de Humedad	%	42.46	42.07	40.31

LIMITE DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-3
PROF.	: 1.50 - 2.0m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	125.39	124.7	125.19
Peso Tara + Muestra Seca	g	122.45	122.63	122.55
Peso de la Tara	g	114.57	118.59	114.45
Peso de la Muestra Seca	g	7.88	4.04	8.1
Peso del Agua	g	2.94	2.070	2.64
Contenido de Humedad	%	37.31	51.24	32.59
Número de Golpes		25	31	20



Límite Líquido (LL)	40.49%
Límite Plástico (LP)	39.94%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.55%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	14.96%

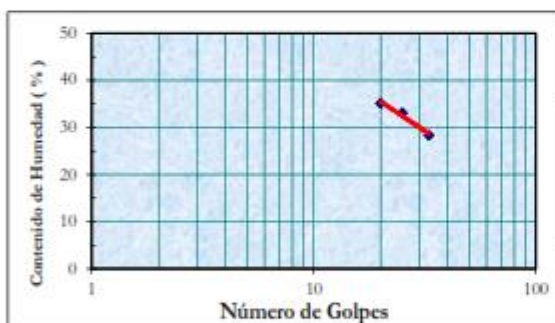
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	130.62	122.22	123.82
Peso Tara + Muestra Seca	g	128.44	120.70	122.11
Peso de la Tara	g	124.18	116.38	117
Peso de la Muestra Seca	g	4.26	4.32	5.11
Peso del Agua	g	2.18	1.520	1.71
Contenido de Humedad	%	51.17	35.19	33.46

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-4
PROF.	: 1.50 - 2.0 m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	130.31	136.12	141.19
Peso Tara + Muestra Seca	g	126.03	131.43	136.58
Peso de la Tara	g	113.85	117.25	120.33
Peso de la Muestra Seca	g	12.18	14.18	16.25
Peso del Agua	g	4.28	4.690	4.61
Contenido de Humedad	%	35.14	33.07	28.37
Número de Golpes		20	25	33



Límite Líquido (LL)	32.44%
Límite Plástico (LP)	29.62%
Índice de Plasticidad (Ip)	2.83%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	9.08%

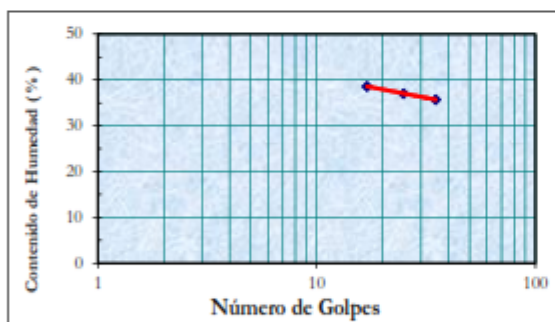
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	125.96	124.38	122.77
Peso Tara + Muestra Seca	g	124.54	122.98	121.17
Peso de la Tara	g	119.64	118.35	115.77
Peso de la Muestra Seca	g	4.9	4.63	5.4
Peso del Agua	g	1.42	1.400	1.6
Contenido de Humedad	%	28.98	30.24	29.63

LIMITES DE ATTERBERG	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ FECHA : 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	: Alterada
CALICATA	: C-01 ESTRATO : M-3
PROF.	: 2.00 - 2.50m

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	126.24	133.5	130.51
Peso Tara + Muestra Seca	g	123.03	129.39	126.8
Peso de la Tara	g	114.04	118.74	116.78
Peso de la Muestra Seca	g	8.99	10.65	10.02
Peso del Agua	g	3.21	4.110	3.71
Contenido de Humedad	%	35.71	38.59	37.03
Número de Golpes		35	17	25



Limite Líquido (LL)	37.04%
Limite Plástico (LP)	32.67%
Índice de Plasticidad (Ip)	4.38%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	12.44%

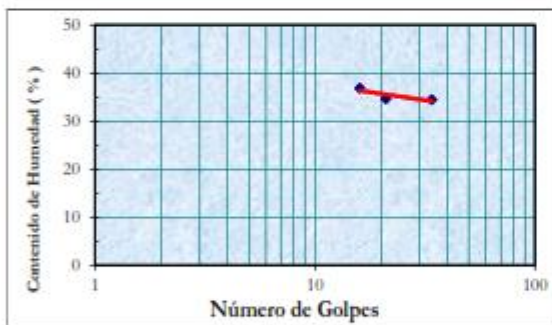
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	122.05	121.11	127.14
Peso Tara + Muestra Seca	g	120.58	119.67	125.69
Peso de la Tara	g	116.19	115.24	121.16
Peso de la Muestra Seca	g	4.39	4.43	4.53
Peso del Agua	g	1.47	1.440	1.45
Contenido de Humedad	%	33.49	32.51	32.01

LIMITE DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 21/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-6
PROF.	: 2.50 - 3.0m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	133.97	131.13	128.35
Peso Tara + Muestra Seca	g	128.91	126.86	125.18
Peso de la Tara	g	115.18	114.54	115.97
Peso de la Muestra Seca	g	13.73	12.32	9.21
Peso del Agua	g	5.06	4.270	3.17
Contenido de Humedad	%	36.85	34.66	34.42
Número de Golpes		16	21	34



Límite Líquido (LL)	35.01%
Límite Plástico (LP)	33.47%
Índice de Plasticidad (Ip)	1.53%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	10.95%

ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

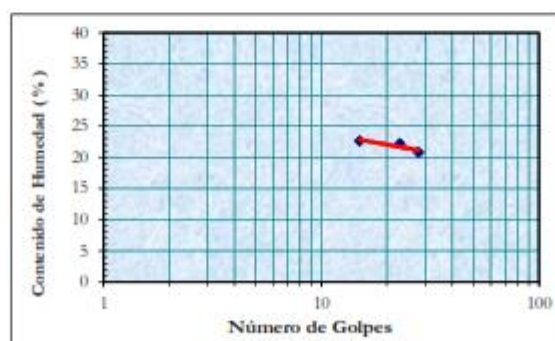
		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	121.66	125.83	28.72
Peso Tara + Muestra Seca	g	120.4	123.78	27.09
Peso de la Tara	g	116.46	118.39	21.73
Peso de la Muestra Seca	g	3.94	5.39	5.36
Peso del Agua	g	1.26	2.050	1.63
Contenido de Humedad	%	31.98	38.03	30.41

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 12/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: M-1
PROF.	: 0.00 - 0.50m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	27.16	27.87	25.76
Peso Tara + Muestra Seca	g	24.38	24.72	23.06
Peso de la Tara	g	11.01	10.82	10.91
Peso de la Muestra Seca	g	13.37	13.9	12.15
Peso del Agua	g	2.78	3.150	2.7
Contenido de Humedad	%	20.79	22.66	22.22
Número de Golpes		28	15	23

Límite Líquido (LL)	21.46%
Límite Plástico (LP)	-
Índice de Plasticidad (Ip)	NP
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	1.07%

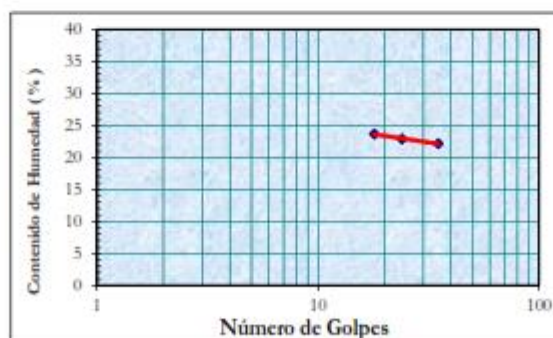


LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 12/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: M-2
PROF.	: 1.0 - 1.30m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	25.61	26.46	30.88
Peso Tara + Muestra Seca	g	22.83	23.60	27.28
Peso de la Tara	g	11.09	11.09	11.05
Peso de la Muestra Seca	g	11.74	12.51	16.23
Peso del Agua	g	2.78	2.860	3.6
Contenido de Humedad	%	23.68	22.86	22.18
Número de Golpes		18	24	35

Límite Líquido (LL)	22.88%
Límite Plástico (LP)	-
Índice de Plasticidad (Ip)	NP
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	2.11%

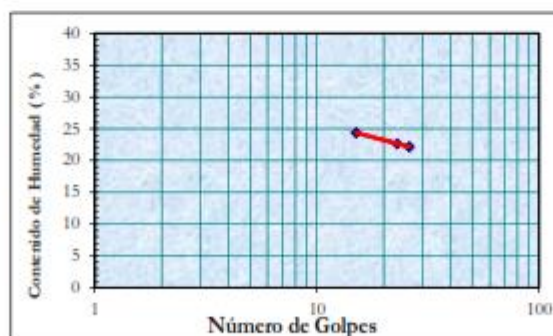


LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 12/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: M-3
PROF.	: 1.5 - 2.00m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	27.48	27.11	25.67
Peso Tara + Muestra Seca	g	24.49	23.99	22.97
Peso de la Tara	g	11.01	11.19	11.04
Peso de la Muestra Seca	g	13.48	12.8	11.93
Peso del Agua	g	2.99	3.120	2.7
Contenido de Humedad	%	22.18	24.38	22.63
Número de Golpes		26	15	23

Límite Líquido (LL)	22.32%
Límite Plástico (LP)	-
Índice de Plasticidad (Ip)	NP
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	1.69%

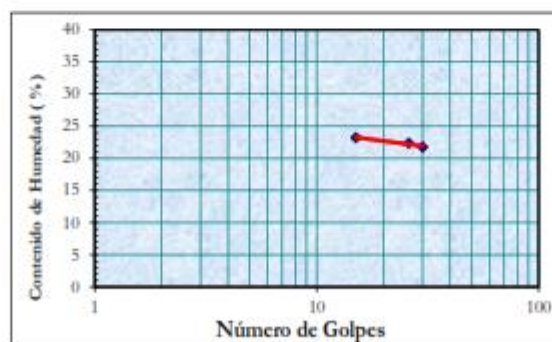


LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 12/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: M-4
PROF.	: 1.50 - 2.0 m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	29.05	29.41	25.89
Peso Tara + Muestra Seca	g	25.84	25.97	23.18
Peso de la Tara	g	11.1	11.17	11.07
Peso de la Muestra Seca	g	14.74	14.8	12.11
Peso del Agua	g	3.21	3.440	2.71
Contenido de Humedad	%	21.78	23.24	22.38
Número de Golpes		30	15	26

Límite Líquido (LL)	22.28%
Límite Plástico (LP)	-
Índice de Plasticidad (Ip)	NP
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	1.66%

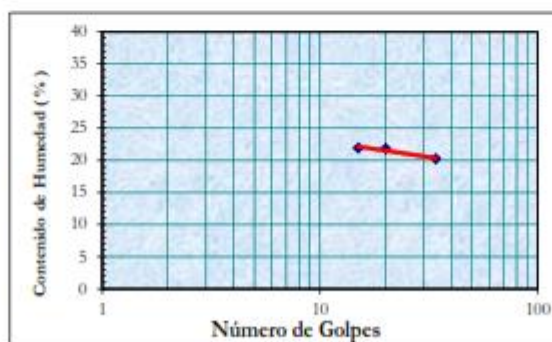


LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 12/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: M-3
PROF.	: 2.0 - 2.30m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	22.42	24.22	29.07
Peso Tara + Muestra Seca	g	20.38	21.84	26.04
Peso de la Tara	g	11.04	10.99	11.07
Peso de la Muestra Seca	g	9.34	10.85	14.97
Peso del Agua	g	2.04	2.380	3.03
Contenido de Humedad	%	21.84	21.94	20.24
Número de Golpes		20	15	34

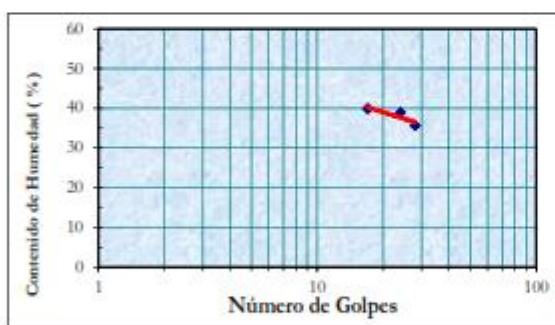
Límite Líquido (LL)	21.03%
Límite Plástico (LP)	-
Índice de Plasticidad (Ip)	NP
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	0.75%



LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 13/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-03	ESTRATO	: M-1
PROF.	: 0.00 - 0.50m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	22.18	23.52	22.05
Peso Tara + Muestra Seca	g	19.27	19.90	18.98
Peso de la Tara	g	11.1	10.82	11.08
Peso de la Muestra Seca	g	8.17	9.08	7.9
Peso del Agua	g	2.91	3.620	3.07
Contenido de Humedad	%	35.62	39.87	38.86
Número de Golpes		28	17	24



Límite Líquido (LL)	37.32%
Límite Plástico (LP)	35.42%
Índice de Plasticidad (Ip)	1.90%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	12.65%

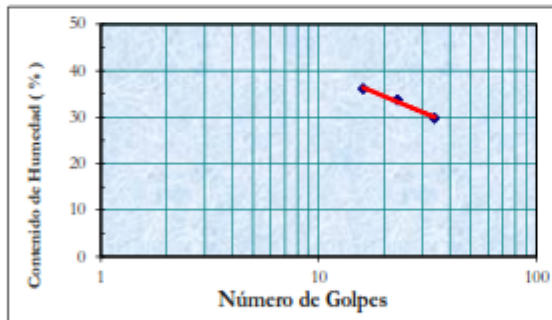
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	17.59	18.26	14.5
Peso Tara + Muestra Seca	g	15.81	16.30	13.7
Peso de la Tara	g	11	11.04	11.2
Peso de la Muestra Seca	g	4.81	5.26	2.5
Peso del Agua	g	1.78	1.960	0.8
Contenido de Humedad	%	37.01	37.26	32.00

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 13/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-03	ESTRATO	: M-2
PROF.	: 1.00 - 1.50m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	26.02	26.87	22.97
Peso Tara + Muestra Seca	g	22.06	22.89	20.27
Peso de la Tara	g	11.1	11.10	11.21
Peso de la Muestra Seca	g	10.96	11.79	9.06
Peso del Agua	g	3.96	3.980	2.7
Contenido de Humedad	%	36.13	33.76	29.80
Número de Golpes		16	23	34



Limite Líquido (LL)	32.61%
Limite Plástico (LP)	32.10%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.51%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	9.20%

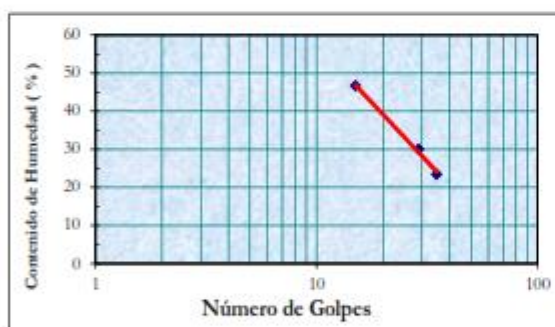
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	16.56	16.11	16.01
Peso Tara + Muestra Seca	g	15.18	14.88	14.79
Peso de la Tara	g	10.97	10.91	11.04
Peso de la Muestra Seca	g	4.21	3.97	3.75
Peso del Agua	g	1.38	1.230	1.22
Contenido de Humedad	%	32.78	30.98	32.53

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 13/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-3
PROF.	: 1.50 - 2.0m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	25.26	26.64	23.21
Peso Tara + Muestra Seca	g	22.57	23.05	19.34
Peso de la Tara	g	11.09	11.11	11.05
Peso de la Muestra Seca	g	11.48	11.94	8.29
Peso del Agua	g	2.69	3.590	3.87
Contenido de Humedad	%	23.43	30.07	46.68
Número de Golpes		35	29	15



Límite Líquido (LL)	33.16%
Límite Plástico (LP)	31.87%
Índice de Plasticidad (Ip)	1.29%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	9.61%

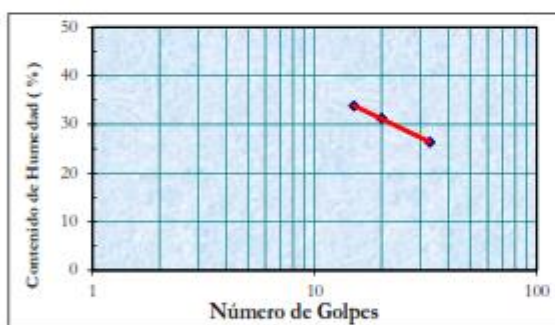
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	15.73	15.94	15.86
Peso Tara + Muestra Seca	g	14.53	14.76	14.74
Peso de la Tara	g	11.15	11.00	10.84
Peso de la Muestra Seca	g	3.38	3.76	3.9
Peso del Agua	g	1.2	1.180	1.12
Contenido de Humedad	%	35.50	31.38	28.72

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 13/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-4
PROF.	: 1.50 - 2.0 m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	23.56	26.08	28.32
Peso Tara + Muestra Seca	g	20.59	22.29	24.68
Peso de la Tara	g	11.09	11.08	10.86
Peso de la Muestra Seca	g	9.5	11.21	13.82
Peso del Agua	g	2.97	3.790	3.64
Contenido de Humedad	%	31.26	33.81	26.34
Número de Golpes		20	15	33



Límite Líquido (LL)	29.02%
Límite Plástico (LP)	28.12%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.90%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	6.59%

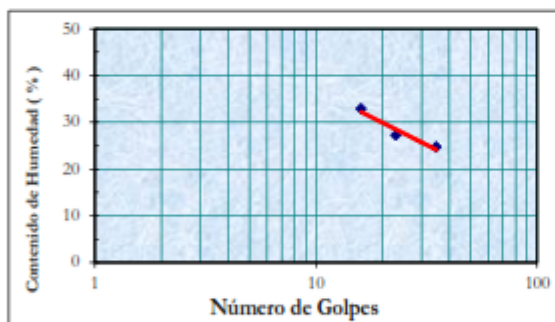
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	16.18	15.02	16
Peso Tara + Muestra Seca	g	15.07	14.10	14.94
Peso de la Tara	g	11.07	10.92	11.11
Peso de la Muestra Seca	g	4	3.18	3.83
Peso del Agua	g	1.11	0.920	1.06
Contenido de Humedad	%	27.75	28.93	27.68

LIMITES DE ATTERBERG	
REALIZADO POR	: BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ FECHA : 13/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	: Alterada
CALICATA	: C-01 ESTRATO : M-3
PROF.	: 2.00 - 2.50m

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	27.82	23.15	25.18
Peso Tara + Muestra Seca	g	23.63	20.54	22.41
Peso de la Tara	g	10.88	10.95	11.2
Peso de la Muestra Seca	g	12.75	9.59	11.21
Peso del Agua	g	4.19	2.610	2.77
Contenido de Humedad	%	32.86	27.22	24.71
Número de Golpes		16	23	35



Limite Líquido (LL)	27.60%
Limite Plástico (LP)	26.90%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.70%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	5.55%

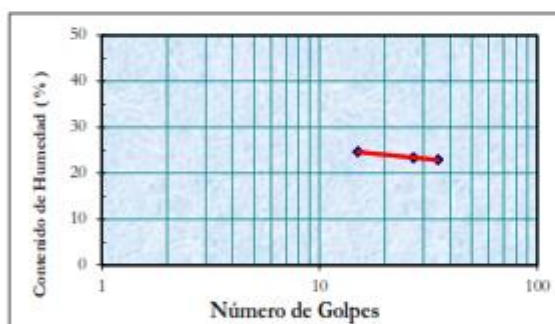
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	16.14	16.76	17.09
Peso Tara + Muestra Seca	g	15.06	15.52	15.82
Peso de la Tara	g	11.13	10.97	10.93
Peso de la Muestra Seca	g	3.93	4.55	4.89
Peso del Agua	g	1.08	1.240	1.27
Contenido de Humedad	%	27.48	27.25	25.97

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 13/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: M-6
PROF.	: 2.50 - 3.0m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	31.67	26.4	31.39
Peso Tara + Muestra Seca	g	28.15	24.06	28.11
Peso de la Tara	g	13.87	13.85	14.08
Peso de la Muestra Seca	g	14.28	10.21	14.03
Peso del Agua	g	3.52	2.340	3.28
Contenido de Humedad	%	24.65	22.92	23.38
Número de Golpes		15	35	27



Límite Líquido (LL)	23.58%
Límite Plástico (LP)	22.63%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.96%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	2.61%

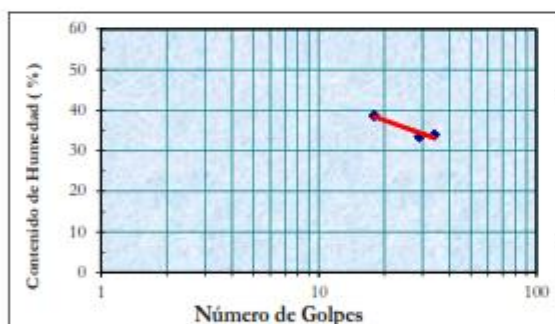
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	17.17	20.48	16.29
Peso Tara + Muestra Seca	g	16.02	19.31	15.34
Peso de la Tara	g	11.12	14.03	11.07
Peso de la Muestra Seca	g	4.9	5.28	4.27
Peso del Agua	g	1.15	1.170	0.95
Contenido de Humedad	%	23.47	22.16	22.25

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 14/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-04	ESTRATO	: M-1
PROF.	: 0.00 - 0.50m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	22.22	22.81	21.27
Peso Tara + Muestra Seca	g	19.14	19.85	18.72
Peso de la Tara	g	11.17	11.12	11.1
Peso de la Muestra Seca	g	7.97	8.73	7.62
Peso del Agua	g	3.08	2.960	2.55
Contenido de Humedad	%	38.64	33.91	33.46
Número de Golpes		18	34	29



Límite Líquido (LL)	35.69%
Límite Plástico (LP)	33.17%
Índice de Plasticidad (Ip)	2.52%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	11.45%

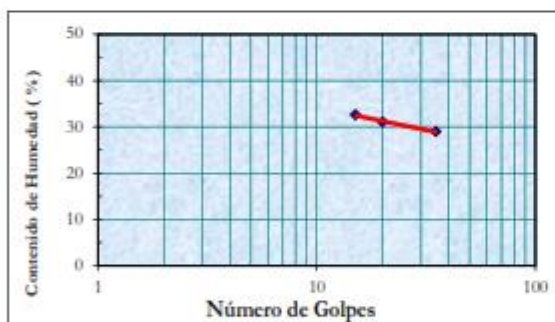
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	20.02	16.22	16.28
Peso Tara + Muestra Seca	g	18.54	14.94	14.98
Peso de la Tara	g	14.09	10.99	11.14
Peso de la Muestra Seca	g	4.45	3.95	3.84
Peso del Agua	g	1.48	1.280	1.3
Contenido de Humedad	%	33.26	32.41	33.85

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 14/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-04	ESTRATO	: M-2
PROF.	: 1.00 - 1.50m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	23.02	23.93	24.01
Peso Tara + Muestra Seca	g	20.06	20.83	21.11
Peso de la Tara	g	10.98	10.85	11.1
Peso de la Muestra Seca	g	9.08	9.98	10.01
Peso del Agua	g	2.96	3.100	2.9
Contenido de Humedad	%	32.60	31.06	28.97
Número de Golpes		15	20	35



Límite Líquido (LL)	30.32%
Límite Plástico (LP)	28.58%
Índice de Plasticidad (Ip)	1.74%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	7.53%

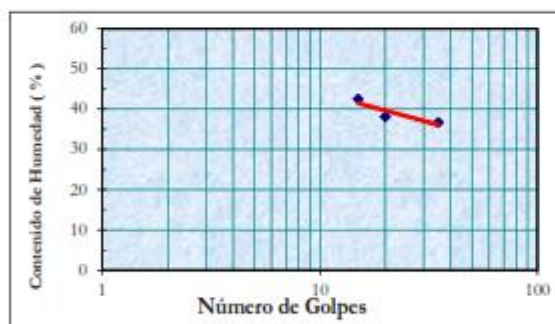
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	15.77	16.18	16.49
Peso Tara + Muestra Seca	g	14.68	15.09	15.28
Peso de la Tara	g	10.98	11.10	11.1
Peso de la Muestra Seca	g	3.7	3.99	4.18
Peso del Agua	g	1.09	1.090	1.21
Contenido de Humedad	%	29.46	27.32	28.95

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 14/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-04	ESTRATO	: M-3
PROF.	: 1.50 - 2.0m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	22.75	25.33	22.59
Peso Tara + Muestra Seca	g	19.25	21.43	19.47
Peso de la Tara	g	11.02	11.20	10.96
Peso de la Muestra Seca	g	8.23	10.23	8.51
Peso del Agua	g	3.5	3.900	3.12
Contenido de Humedad	%	42.53	38.12	36.66
Número de Golpes		15	20	35



Límite Líquido (LL)	38.27%
Límite Plástico (LP)	36.96%
Índice de Plasticidad (Ip)	1.31%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	13.33%

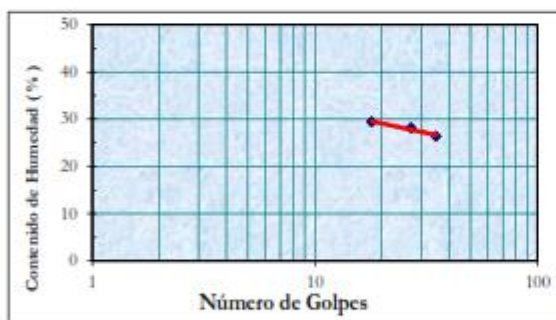
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	18.68	18.01	19.69
Peso Tara + Muestra Seca	g	17.37	16.92	18.17
Peso de la Tara	g	13.87	13.90	14.1
Peso de la Muestra Seca	g	3.5	3.02	4.07
Peso del Agua	g	1.31	1.090	1.52
Contenido de Humedad	%	37.43	36.09	37.35

LIMITES DE ATTERBERG			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 14/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Alterada		
CALICATA	: C-04	ESTRATO	: M-4
PROF.	: 1.50 - 2.0 m		

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	25.42	22.56	24.42
Peso Tara + Muestra Seca	g	22.19	20.19	21.47
Peso de la Tara	g	11.21	11.21	11
Peso de la Muestra Seca	g	10.98	8.98	10.47
Peso del Agua	g	3.23	2.370	2.95
Contenido de Humedad	%	29.42	26.39	28.18
Número de Golpes		18	35	27



Límite Líquido (LL)	28.12%
Límite Plástico (LP)	25.40%
Índice de Plasticidad (Ip)	2.72%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	5.93%

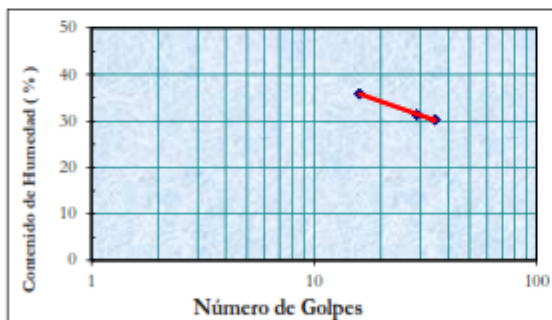
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	15.54	15.99	16.27
Peso Tara + Muestra Seca	g	14.57	15.00	15.25
Peso de la Tara	g	10.87	11.11	11.09
Peso de la Muestra Seca	g	3.7	3.89	4.16
Peso del Agua	g	0.97	0.990	1.02
Contenido de Humedad	%	26.22	25.45	24.52

LIMITES DE ATTERBERG	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ FECHA : 14/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	: Alterada
CALICATA	: C-04 ESTRATO : M-3
PROF.	: 2.00 - 2.50m

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	23.98	23.92	21.17
Peso Tara + Muestra Seca	g	20.51	20.82	18.82
Peso de la Tara	g	10.83	10.93	11.05
Peso de la Muestra Seca	g	9.68	9.89	7.77
Peso del Agua	g	3.47	3.100	2.35
Contenido de Humedad	%	35.85	31.34	30.24
Número de Golpes		16	29	35



Limite Líquido (LL)	32.57%
Limite Plástico (LP)	32.27%
Índice de Plasticidad (Ip)	0.31%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	9.18%

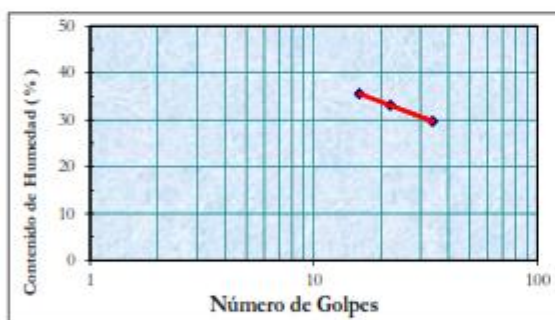
ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	15.18	15.85	15.72
Peso Tara + Muestra Seca	g	14.14	14.72	14.57
Peso de la Tara	g	10.91	11.16	11.07
Peso de la Muestra Seca	g	3.23	3.56	3.5
Peso del Agua	g	1.04	1.130	1.15
Contenido de Humedad	%	32.20	31.74	32.86

LIMITES DE ATTERBERG	
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ
FECHA	: 14/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA	
MUESTRA	: Alterada
CALICATA	: C-04
ESTRATO	: M-6
PROF.	: 2.50 - 3.0m

ENSAYO DE LIMITE LÍQUIDO
NORMA NTP 339.129

		a	b	c
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	30.79	28.05	25.48
Peso Tara + Muestra Seca	g	25.58	23.80	22.19
Peso de la Tara	g	10.93	10.96	11.11
Peso de la Muestra Seca	g	14.65	12.84	11.08
Peso del Agua	g	5.21	4.250	3.29
Contenido de Humedad	%	35.56	33.10	29.69
Número de Golpes		16	22	34



Límite Líquido (LL)	32.09%
Límite Plástico (LP)	30.05%
Índice de Plasticidad (Ip)	2.05%
Índice de Plasticidad Crítico (Ipc)	8.83%

ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO
NORMA NTP 339.129

		x	y	z
Peso Tara + Muestra Húmeda	g	16.51	16.17	16.03
Peso Tara + Muestra Seca	g	15.25	14.99	14.9
Peso de la Tara	g	11.07	11.08	11.11
Peso de la Muestra Seca	g	4.18	3.91	3.79
Peso del Agua	g	1.26	1.180	1.13
Contenido de Humedad	%	30.14	30.18	29.82

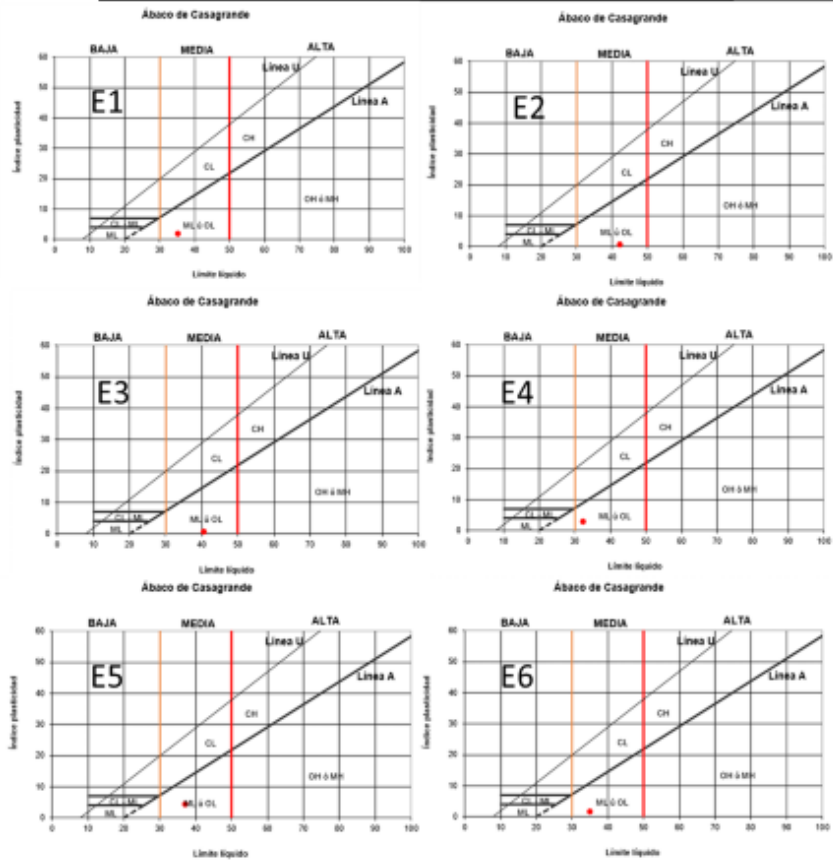
**CLASIFICACION SUCS DE SUELOS
NORMA NTP 339.134**

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA :** 21/05/2018

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 3.00m

CODIGO	Prof (m)	% finos	LL	LP	IP	SUCS	Descripción
CD1-E1	0.5	39.4%	35.2%	33.4%	1.8%	SM	Arena Limosa
CD1-E2	1	70.5%	42.2%	41.6%	0.6%	ML	Limo de Baja Plasticidad
CD1-E3	1.5	27.7%	40.5%	39.9%	0.6%	SM	Arena Limosa
CD1-E4	2	28.4%	32.4%	29.6%	2.8%	SM	Arena Limosa
CD1-E5	2.5	39.8%	37.0%	32.7%	4.4%	SM	Arena Limosa
CD1-E6	3	34.6%	35.0%	33.5%	1.5%	SM	Arena Limosa



CLASIFICACION SUCS DE SUELOS
NORMA NTP 339.134

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/05/2018

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-2
PROFUNDIDAD : 0.00 - 2.50m

CODIGO	Prof (m)	% finos	LL	LP	IP	SUCS	Descripción
CD2-E1	0.5	27.2%	21.5%			SM	Arena Limosa
CD2-E2	1	24.0%	22.9%			GM	Grava Limosa
CD2-E3	1.5	17.0%	22.3%			GM	Grava Limosa
CD2-E4	2	13.0%	22.3%			GM	Grava Limosa
CD2-E5	2.5	10.0%	21.0%			GM	Grava Limosa

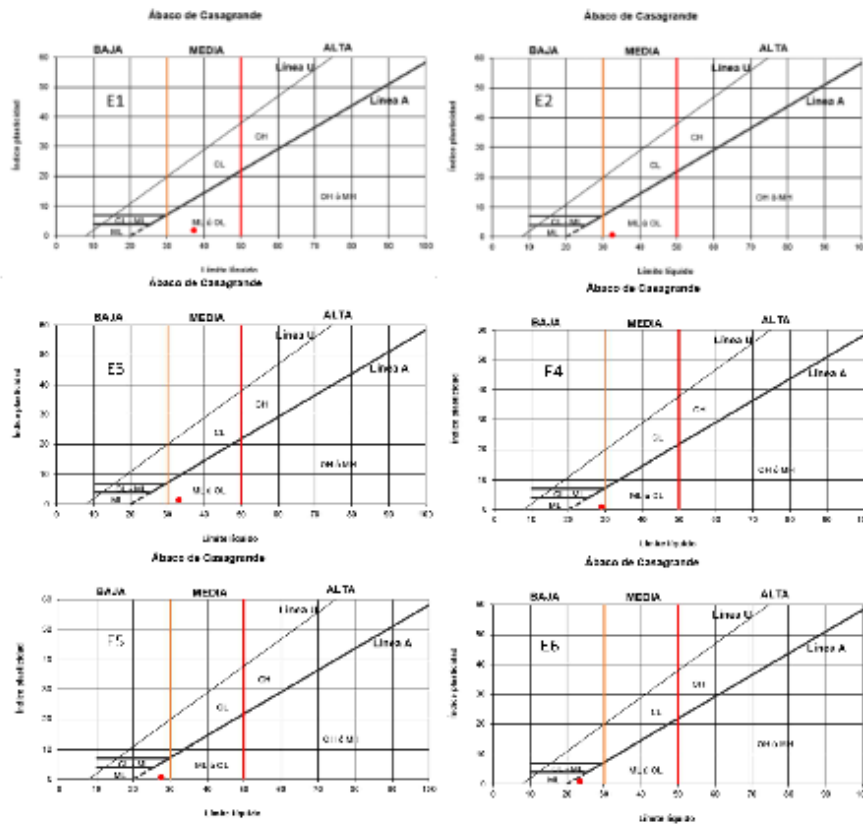
CLASIFICACION SUCS DE SUELOS
NORMA NTP 339.134

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACION : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA :** 21/05/2018

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-3
PROFUNDIDAD : 0.00 - 3.0m

CODIGO	Prof (m)	% finos	LL	LP	IP	SUCS	Descripción
CD3-E1	0.5	51.9%	37.3%	35.4%	1.9%	ML	Limo de Baja Plasticidad
CD3-E2	1	56.7%	32.0%	32.1%	0.5%	ML	Limo de Baja Plasticidad
CD3-E3	1.5	34.1%	33.2%	31.9%	1.3%	SM	Arena Limosa
CD3-E4	2	41.3%	29.0%	28.1%	0.9%	SM	Arena Limosa
CD3-E5	2.5	38.7%	27.0%	26.9%	0.7%	SM	Arena Limosa
CD3-E6	3	37.7%	23.0%	22.0%	1.0%	SM	Arena Limosa



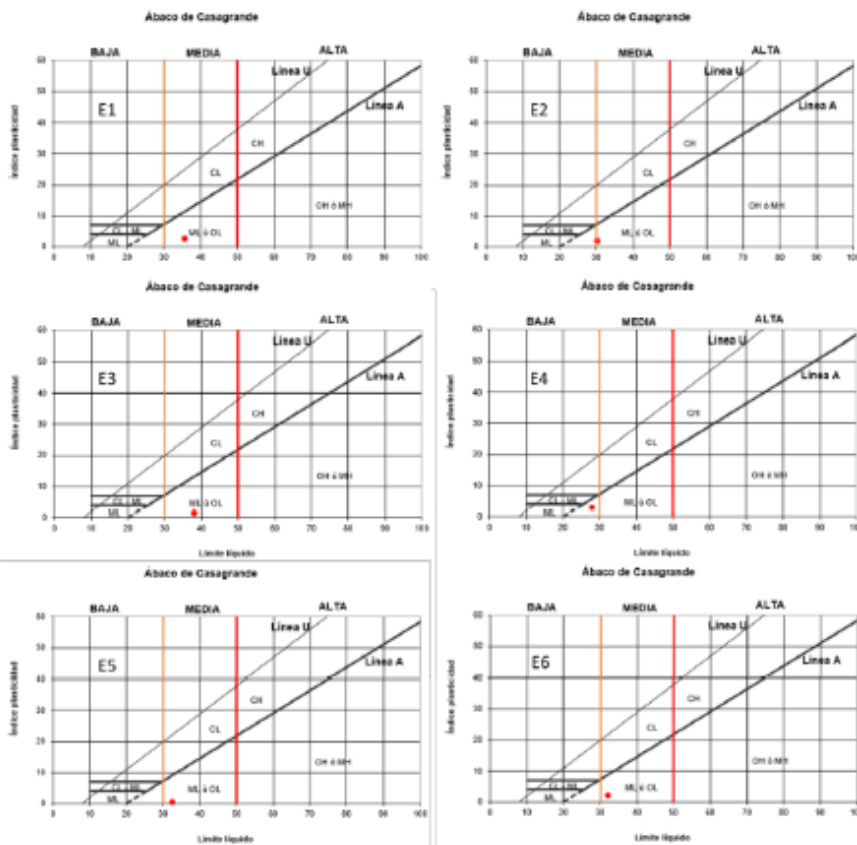
**CLASIFICACION SUCS DE SUELOS
NORMA NTP 339.134**

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
 BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/05/2018

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-4
PROFUNDIDAD : 0.00 - 3.0m

CODIGO	Prof (m)	% finos	LL	LP	IP	SUCS	Descripción
CD4-E1	0.5	31.9%	35.7%	33.2%	2.5%	SM	Arena Limosa
CD4-E2	1	37.9%	30.3%	28.0%	1.7%	SM	Arena Limosa
CD4-E3	1.5	59.3%	38.3%	37.0%	1.3%	ML	Limo de Baja Plasticidad
CD4-E4	2	35.2%	28.1%	25.4%	2.7%	SM	Arena Limosa
CD4-E5	2.5	34.2%	32.0%	32.3%	0.3%	SM	Arena Limosa
CD4-E6	3	35.0%	32.1%	30.0%	2.0%	SM	Arena Limosa



CONTENIDO DE HUMEDAD ESTADO NATURAL
NORMA NTP 339.127

REALIZADO POR : BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/03/2018

$$\%W = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} \times 100\%$$

Donde:

- M_{CWS} : Peso del contenedor + suelo humedo
- M_{CS} : Peso del contenedor + suelo secado al horno
- M_C : Peso del contenedor
- $\%W$: Contenido de humedad en porcentaje
- $\%W \text{ prom}$: Contenido de humedad promedio en porcentaje

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-1 E-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C01-M1a	280.9	224.9	119.0	53.18	52.54
C01-M1b	297	232.5	113.9	54.38	
C01-M1c	230	193.5	120.6	50.07	

CALICATA : C-1 E-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C01-M2a	301.9	260.8	117.5	70.55	65.17
C01-M2b	441.9	316.3	117.9	63.31	
C01-M2c	359.1	265.8	114.5	61.67	

CALICATA : C-1 E-3
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C01-M3a	349	268.0	110.7	52.93	53.90
C01-M3b	356.0	270.0	117.3	56.10	
C01-M3c	377.4	287.8	118.3	52.86	

CALICATA : C-1 E-4
PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C01-M4a	297.3	253.0	123.1	33.49	36.98
C01-M4b	314.8	260.1	115.7	37.88	
C01-M4c	303.4	252.0	124.2	39.56	

CALICATA : C-1 E-5
PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C01-M5a	218.3	182.0	118.0	55.78	54.09
C01-M5b	276.9	222.1	120.2	53.78	
C01-M5c	264.0	214	118	52.71	

CALICATA : C-1 E-6
PROFUNDIDAD : 2.50 - 3.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C01-M6a	331.1	248.5	115.5	62.11	63.03
C01-M6b	351.3	263.8	114.8	58.72	
C01-M6c	300.2	262.1	118.4	68.27	

CONTENIDO DE HUMEDAD ESTADO NATURAL
NORMA NTP 339.127

REALIZADO POR : BACH. GUILLÉN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/05/2018

Donde:
$$\%W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \times 100\%$$

M_{cws} : Peso del contenedor + suelo humedo
 M_{cs} : Peso del contenedor + suelo secado al horno
 M_c : Peso del contenedor
 $\%W$: Contenido de humedad en porcentaje
 $\%W \text{ prom}$: Contenido de humedad promedio en porcentaje

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-2 E-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	M _{cws} (g)	M _{cs} (g)	M _c (g)	%W	%W prom
C02-M1a	233.6	207.15	119.33	30.12	30.21
C02-M1b	296.91	256.63	120.05	29.49	
C02-M1c	454.52	401.87	232.19	31.03	

CALICATA : C-2 E-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	M _{cws} (g)	M _{cs} (g)	M _c (g)	%W	%W prom
C02-M2a	201.32	180.66	117.77	21.28	20.51
C02-M2b	240.5	218.72	117.23	21.46	
C02-M2c	241.97	222.51	118.98	18.80	

CALICATA : C-2 E-3
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	M _{cws} (g)	M _{cs} (g)	M _c (g)	%W	%W prom
C02-M3a	281.64	254.49	113.78	19.30	20.06
C02-M3b	370.84	338.14	169.83	19.43	
C02-M3c	295.91	264.37	117.42	21.46	

CALICATA : C-2 E-4
PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	M _{cws} (g)	M _{cs} (g)	M _c (g)	%W	%W prom
C02-M4a	383.43	338.62	115.59	20.09	20.07
C02-M4b	412.7	377.79	166.49	16.52	
C02-M4c	304.46	278.58	168.89	23.59	

CALICATA : C-2 E-5
PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	M _{cws} (g)	M _{cs} (g)	M _c (g)	%W	%W prom
C02-M5a	529.88	483.37	261.11	20.93	21.03
C02-M5b	422.09	390.7	242.04	21.12	
C02-M5c	490.36	445.73	233.74	21.05	

CONTENIDO DE HUMEDAD ESTADO NATURAL
NORMA NTP 339.127

REALIZADO POR : BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/05/2018

$$\%W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \times 100\%$$

Donde:

- M_{cws} : Peso del contenedor + suelo humedo
- M_{cs} : Peso del contenedor + suelo secado al horno
- M_c : Peso del contenedor
- $\%W$: Contenido de humedad en porcentaje
- $\%W \text{ prom}$: Contenido de humedad promedio en porcentaje

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-3 E-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C03-M1a	203.07	208.98	119.35	61.02	59.31
C03-M1b	212.91	179.04	120.07	57.44	
C03-M1c	390.86	331.7	232.21	59.40	

CALICATA : C-3 E-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C03-M2a	280.12	227.20	117.78	53.70	43.50
C03-M2b	237.53	204.44	117.23	37.94	
C03-M2c	289.59	241.74	119	38.98	

CALICATA : C-3 E-3
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C03-M3a	242.9	209.90	113.81	34.20	34.89
C03-M3b	385.63	328.68	109.88	35.80	
C03-M3c	259.81	223.15	117.01	34.54	

CALICATA : C-3 E-4
PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C03-M4a	439.5	377.84	261.20	52.89	52.10
C03-M4b	453.68	377.85	233.79	52.04	
C03-M4c	522.14	427.80	242.18	50.78	

CALICATA : C-3 E-5
PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C03-M5a	273.48	216.19	115.63	50.97	50.17
C03-M5b	290	244.92	106.53	57.51	
C03-M5c	369.38	299.07	168.92	54.02	

CALICATA : C-3 E-6
PROFUNDIDAD : 2.50 - 3.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C03-M6a	225.86	194.82	118.92	40.90	34.61
C03-M6b	329.89	277.27	117.55	32.95	
C03-M6c	382.71	320.92	114.91	29.99	

CONTENIDO DE HUMEDAD ESTADO NATURAL
NORMA NTP 339.127

REALIZADO POR : BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 21/05/2018

Donde:

$$\%W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \times 100\%$$

M_{cws} : Peso del contenedor + suelo humedo
 M_{cs} : Peso del contenedor + suelo secado al horno
 M_c : Peso del contenedor
 $\%W$: Contenido de humedad en porcentaje
 $\%W \text{ prom}$: Contenido de humedad promedio en porcentaje

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-3 E-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C04-M1a	230.49	203.74	119.34	31.09	31.68
C04-M1b	281.65	243.68	120.04	30.71	
C04-M1c	420.93	374.51	232.24	32.63	

CALICATA : C-3 E-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C04-M2a	255.81	214.79	117.78	42.28	41.91
C04-M2b	233.42	199.58	117.25	41.10	
C04-M2c	267.83	223.50	119.01	42.34	

CALICATA : C-3 E-3
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C04-M3a	207.02	175.80	113.8	50.21	47.53
C04-M3b	349.71	291.89	109.88	47.39	
C04-M3c	221.33	188.90	117	44.98	

CALICATA : C-3 E-4
PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C04-M4a	408.81	357	261.55	54.28	57.20
C04-M4b	339.08	297.21	234.11	66.35	
C04-M4c	420.67	300.47	242.33	50.96	

CALICATA : C-3 E-5
PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C04-M5a	258.14	194.55	115.65	80.00	74.81
C04-M5b	281.28	235.91	106.88	65.73	
C04-M5c	292.85	238.71	109.39	78.10	

CALICATA : C-3 E-6
PROFUNDIDAD : 2.50 - 3.00m

CODIGO	Mcws (g)	Mcs (g)	Mc (g)	%W	%W prom
C04-M6a	230.18	194.03	118.48	47.85	70.00
C04-M6b	267.94	220.58	117.59	45.99	
C04-M6c	277.38	190.08	114.93	116.17	

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
NORMA NTP 339.131**

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA

BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES

PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA

UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU

FECHA : 18/09/2018

Donde:
$$G_s = \frac{W_s}{W_{m1w} + W_s - W_{m1wc}}$$

W_s : Peso del suelo seco

W_{m1w} : Peso del picnometro + agua

W_{m1ws} : Peso del picnometro + agua + suelo

G_s : Gravedad especifica de solidos

$G_s \text{ prom}$: Gravedad especifica de solidos promedio

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-1 E-1

PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.30m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C01-M1a	100	648.81	703.51	2.21	2.18
C01-M1b	100	649.67	704.15	2.20	
C01-M1c	100	649.02	702.33	2.14	

CALICATA : C-1 E-2

PROFUNDIDAD : 0.30 - 1.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C01-M2a	100	648.3	701.08	2.12	2.18
C01-M2b	100	646.85	701.38	2.20	
C01-M2c	100	650.63	705.57	2.22	

CALICATA : C-1 E-3

PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C01-M3a	100	648.11	704.89	2.31	2.25
C01-M3b	100	650.76	705.93	2.23	
C01-M3c	100	646.83	701.35	2.20	

CALICATA : C-1 E-4

PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C01-M4a	100	648.44	701.11	2.11	2.12
C01-M4b	100	648.39	701.91	2.15	
C01-M4c	100	649.57	702.12	2.11	

CALICATA : C-1 E-5

PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C01-M5a	100	648.44	709.15	2.55	2.52
C01-M5b	100	648.39	709.07	2.54	
C01-M5c	100	649.57	709.22	2.48	

CALICATA : C-1 E-6

PROFUNDIDAD : 2.50 - 3.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C01-M6a	100	648.11	709.12	2.50	2.54
C01-M6b	100	649.76	709.19	2.46	
C01-M6c	100	647.83	709.02	2.58	

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
NORMA NTP 339.131**

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 18/09/2018

Donde:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{mwc}}$$

W_s : Peso del suelo seco
 W_{mw} : Peso del picnometro + agua
 W_{mws} : Peso del picnometro + agua + suelo
 G_s : Gravedad especifica de solidos
 $G_s \text{ prom}$: Gravedad especifica de solidos promedio

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-2 E-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C02-M1a	100	648.81	703.51	2.21	2.18
C02-M1b	100	649.67	704.15	2.20	
C02-M1c	100	649.02	702.33	2.14	

CALICATA : C-2 E-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C02-M2a	100	648.44	702.11	2.16	2.14
C02-M2b	100	648.39	701.91	2.15	
C02-M2c	100	649.57	702.12	2.11	

CALICATA : C-2 E-3
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C02-M3a	100	648.44	701.11	2.11	2.12
C02-M3b	100	648.39	701.91	2.15	
C02-M3c	100	649.57	701.72	2.09	

CALICATA : C-2 E-4
PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C02-M4a	100	648.44	701.74	2.14	2.13
C02-M4b	100	648.39	700.91	2.11	
C02-M4c	100	649.57	702.87	2.14	

CALICATA : C-2 E-5
PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C02-M5a	100	648.44	701.14	2.11	2.12
C02-M5b	100	648.39	701.71	2.14	
C02-M5c	100	649.57	702.18	2.11	

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
NORMA NTP 339.131**

REALIZADO POR : BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA
BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES
PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA
UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU **FECHA** : 18/09/2018

Donde:
$$G_s = \frac{W_s}{W_{pw} + W_s - W_{mwc}}$$

W_s : Peso del suelo seco
 W_{pw} : Peso del picnometro + agua
 W_{mws} : Peso del picnometro + agua + suelo
 G_s : Gravedad especifica de solidos
 G_s prom : Gravedad especifica de solidos promedio

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-3 E-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C03-M1a	100	648.81	703.46	2.21	2.19
C03-M1b	100	649.67	704.2	2.20	
C03-M1c	100	649.02	702.53	2.15	

CALICATA : C-3 E-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C03-M2a	100	648.3	701.48	2.14	2.18
C03-M2b	100	646.85	701.38	2.20	
C03-M2c	100	650.63	705.57	2.22	

CALICATA : C-3 E-3
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C03-M3a	100	648.11	702.81	2.21	2.21
C03-M3b	100	650.76	705.91	2.23	
C03-M3c	100	646.83	701.37	2.20	

CALICATA : C-3 E-4
PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C03-M4a	100	648.44	701.11	2.11	2.11
C03-M4b	100	648.39	701.31	2.12	
C03-M4c	100	649.57	702.12	2.11	

CALICATA : C-3 E-5
PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C03-M5a	100	648.44	709.15	2.55	2.54
C03-M5b	100	648.39	709.07	2.54	
C03-M5c	100	649.57	710.22	2.54	

CALICATA : C-3 E-6
PROFUNDIDAD : 2.50 - 3.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C03-M6a	100	648.11	709.12	2.56	2.54
C03-M6b	100	649.76	709.19	2.46	
C03-M6c	100	647.83	709.02	2.58	

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
NORMA NTP 339.131**

REALIZADO POR : BACH . GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA

BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES

PROYECTO : TESIS, EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - SOCABAYA

UBICACIÓN : C. P. EL PASTO SOCABAYA-AREQUIPA-AREQUIPA-PERU

FECHA : 18/09/2018

Donde:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{mwc}}$$

W_s : Peso del suelo seco

W_{mw} : Peso del picnometro + agua

W_{mws} : Peso del picnometro + agua + suelo

G_s : Gravedad especifica de solidos

G_s prom : Gravedad especifica de solidos promedio

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA : C-4 E-1

PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C04-M1a	100	648.81	703.46	2.21	2.20
C04-M1b	100	649.67	704.2	2.20	
C04-M1c	100	649.02	703.53	2.20	

CALICATA : C-4 E-2

PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C04-M2a	100	648.3	702.48	2.18	2.19
C04-M2b	100	646.85	701.08	2.18	
C04-M2c	100	650.63	705.17	2.20	

CALICATA : C-4 E-3

PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C04-M3a	100	648.11	702.81	2.21	2.22
C04-M3b	100	650.76	705.91	2.23	
C04-M3c	100	646.83	701.57	2.21	

CALICATA : C-4 E-4

PROFUNDIDAD : 1.50 - 2.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C04-M4a	100	648.44	701.11	2.11	2.10
C04-M4b	100	648.39	700.31	2.08	
C04-M4c	100	649.57	702.12	2.11	

CALICATA : C-4 E-5

PROFUNDIDAD : 2.00 - 2.50m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C04-M5a	100	648.44	709.15	2.55	2.52
C04-M5b	100	648.39	708.07	2.48	
C04-M5c	100	649.57	710.22	2.54	

CALICATA : C-4 E-6

PROFUNDIDAD : 2.50 - 3.00m

CODIGO	Ws (g)	Wmw (g)	Wmws (g)	Gs	Gs prom
C04-M6a	100	648.11	709.12	2.56	2.56
C04-M6b	100	649.76	710.19	2.53	
C04-M6c	100	647.83	709.02	2.58	

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 29/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: 1-1
PROF.	: 0.00 - 0.30m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	31.40	47.90	50.60
W suelo + parafina (g)	35.70	51.70	54.00
W parafina (g)	4.30	3.80	3.40
V parafina (cm ³)	5.38	4.75	4.25
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	523	532	540
V suelo + parafina (cm ³)	23	32	40
V suelo (cm ³)	17.63	27.25	35.75
Y suelo (g/cm ³)	1.782	1.758	1.415
Y promedio (g/cm ³)	1.652		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 29/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: 1-2
PROF.	: 0.50 - 1.0m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	29.70	48.00	29.70
W suelo + parafina (g)	33.50	50.90	30.90
W parafina (g)	3.80	2.90	1.20
V parafina (cm ³)	4.75	3.63	1.50
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	520	535	520
V suelo + parafina (cm ³)	20	35	20
V suelo (cm ³)	15.25	31.38	18.50
Y suelo (g/cm ³)	1.948	1.530	1.605
Y promedio (g/cm ³)	1.694		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 29/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: 1-3
PROF.	: 1.0 - 1.50m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	35	41.7	26.4
W suelo + parafina (g)	36.8	44.8	28.4
W parafina (g)	1.8	3.1	2
V parafina (cm ³)	2.25	3.875	2.5
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	525	530	520
V suelo + parafina (cm ³)	25	30	20
V suelo (cm ³)	22.75	26.13	17.50
Y suelo (g/cm ³)	1.538	1.596	1.509
Y promedio (g/cm ³)	1.548		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 29/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-01	ESTRATO : 1-4
PROF.	: 1.50 - 2.0m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	28.80	27.80	32.70
W suelo + parafina (g)	31.60	30.00	34.50
W parafina (g)	2.80	2.20	1.80
V parafina (cm3)	3.50	2.75	2.25
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	520	519	520
V suelo + parafina (cm3)	20	19	20
V suelo (cm3)	16.50	16.25	17.75
Y suelo (g/cm3)	1.745	1.711	1.842
Y promedio (g/cm3)	1.766		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 29/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-01	ESTRATO : 1-5
PROF.	: 2.0 - 2.50m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	64.0	53.8	56.4
W suelo + parafina (g)	67.6	56.9	58.8
W parafina (g)	3.6	3.1	2.4
V parafina (cm ³)	4.5	3.875	3
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	540	533	539
V suelo + parafina (cm ³)	40	33	39
V suelo (cm ³)	35.50	29.13	36.00
Y suelo (g/cm ³)	1.803	1.847	1.567
Y promedio (g/cm ³)	1.739		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 29/05/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-01	ESTRATO	: 1-6
PROF.	: 2.50 - 3.0m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	51.0	62.4	69.5
W suelo + parafina (g)	53.6	65.2	72.5
W parafina (g)	2.6	2.8	3.0
V parafina (cm3)	3.25	3.5	3.75
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	535	540	549
V suelo + parafina (cm3)	35	40	49
V suelo (cm3)	31.75	36.50	45.25
Y suelo (g/cm3)	1.606	1.710	1.536
Y promedio (g/cm3)	1.617		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	05/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: 1-1
PROF.	: 0.00 - 0.30m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso específico del suelo (g/cm ³)	$Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm ³)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm ³)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm ³)

	1	2	3
W suelo (g)	130.43	127.72	110.47
W suelo + parafina (g)	134.82	130.11	112.14
W parafina (g)	4.39	2.39	1.67
V parafina (cm ³)	5.49	2.99	2.09
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	580	570	565
V suelo + parafina (cm ³)	80	70	65
V suelo (cm ³)	74.51	67.01	62.91
Y suelo (g/cm ³)	1.750	1.906	1.756
Y promedio (g/cm ³)	1.804		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 05/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-02	ESTRATO : 1-2
PROF.	: 0.50 - 1.0m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	113.02	118.14	125.78
W suelo + parafina (g)	117.91	123.07	130.19
W parafina (g)	4.89	4.93	4.41
V parafina (cm ³)	6.11	6.16	5.51
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	557	565	570
V suelo + parafina (cm ³)	57	65	70
V suelo (cm ³)	50.89	58.84	64.49
Y suelo (g/cm ³)	2.221	2.008	1.950
Y promedio (g/cm ³)	2.060		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 05/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-02	ESTRATO : 1-3
PROF.	: 1.0 - 1.30m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	103.34	99.87	105.47
W suelo + parafina (g)	105.17	103.56	112.83
W parafina (g)	1.83	3.69	7.36
V parafina (cm3)	2.29	4.61	9.20
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	560	550	565
V suelo + parafina (cm3)	60	50	65
V suelo (cm3)	57.71	45.39	55.80
Y suelo (g/cm3)	1.791	2.200	1.890
Y promedio (g/cm3)	1.960		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	05/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-02	ESTRATO	: 1-4
PROF.	: 1.50 - 2.0m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso específico del suelo (g/cm ³)	$Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm ³)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm ³)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm ³)

	1	2	3
W suelo (g)	30.45	32.99	34.15
W suelo + parafina (g)	31.51	34.45	37.95
W parafina (g)	1.06	1.46	3.8
V parafina (cm ³)	1.33	1.83	4.75
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	515	518	520
V suelo + parafina (cm ³)	15	18	20
V suelo (cm ³)	13.68	16.18	15.25
Y suelo (g/cm ³)	2.227	2.040	2.239
Y promedio (g/cm ³)	2.169		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 05/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-02	ESTRATO : 1-5
PROF.	: 2.0 - 2.50m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	16.85	15.16	30.32
W suelo + parafina (g)	18.12	16.52	34.87
W parafina (g)	1.27	1.36	4.55
V parafina (cm ³)	1.59	1.70	5.69
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	512	510	525
V suelo + parafina (cm ³)	12	10	25
V suelo (cm ³)	10.41	8.30	19.31
Y suelo (g/cm ³)	1.618	1.827	1.570
Y promedio (g/cm ³)	1.672		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	06/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-03	ESTRATO	: 1-1
PROF.	: 0.00 - 0.30m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	81.97	98.97	110.55
W suelo + parafina (g)	83.25	100.47	113.14
W parafina (g)	1.28	1.5	2.59
V parafina (cm3)	1.60	1.88	3.24
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	550	561	570
V suelo + parafina (cm3)	50	61	70
V suelo (cm3)	48.40	59.13	66.76
Y suelo (g/cm3)	1.694	1.674	1.656
Y promedio (g/cm3)	1.674		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	06/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-03	ESTRATO	: 1-2
PROF.	: 0.50 - 1.0m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso específico del suelo (g/cm ³)	$Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm ³)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm ³)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm ³)

	1	2	3
W suelo (g)	46.64	66.17	56.28
W suelo + parafina (g)	51.47	70.05	60.87
W parafina (g)	4.83	3.88	4.59
V parafina (cm ³)	6.04	4.85	5.74
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	535	550	540
V suelo + parafina (cm ³)	35	50	40
V suelo (cm ³)	28.96	45.15	34.26
Y suelo (g/cm ³)	1.610	1.466	1.643
Y promedio (g/cm ³)	1.573		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	06/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-03	ESTRATO	: 1-3
PROF.	: 1.0 - 1.30m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso específico del suelo (g/cm ³)	$Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm ³)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm ³)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm ³)

	1	2	3
W suelo (g)	39.41	50.47	59.78
W suelo + parafina (g)	45.29	55.02	63.15
W parafina (g)	5.88	4.55	3.37
V parafina (cm ³)	7.35	5.688	4.213
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	528	535	540
V suelo + parafina (cm ³)	28	35	40
V suelo (cm ³)	20.65	29.31	35.79
Y suelo (g/cm ³)	1.908	1.722	1.670
Y promedio (g/cm ³)	1.767		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	06/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-03	ESTRATO	: 1-4
PROF.	: 1.50 - 2.0m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	75.23	69.51	80.22
W suelo + parafina (g)	84.47	77.16	88.27
W parafina (g)	9.24	7.65	8.05
V parafina (cm ³)	11.55	9.56	10.06
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	555	545	560
V suelo + parafina (cm ³)	55	45	60
V suelo (cm ³)	43.45	35.4375	49.938
Y suelo (g/cm ³)	1.731	1.961	1.606
Y promedio (g/cm ³)	1.766		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 06/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-03	ESTRATO : 1-5
PROF.	: 2.00 - 2.50m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	54.66	50.76	67.23
W suelo + parafina (g)	55.82	52.31	72.68
W parafina (g)	1.16	1.55	5.45
V parafina (cm3)	1.45	1.94	6.81
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	540	535	545
V suelo + parafina (cm3)	40	35	45
V suelo (cm3)	38.55	33.0625	38.188
Y suelo (g/cm3)	1.418	1.535	1.761
Y promedio (g/cm3)	1.571		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 06/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-03	ESTRATO : 1-6
PROF.	: 0.00 - 0.30m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	68.42	40.44	48.62
W suelo + parafina (g)	77.47	44.64	50.21
W parafina (g)	9.05	4.2	1.59
V parafina (cm3)	11.31	5.25	1.99
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	545	525	530
V suelo + parafina (cm3)	45	25	30
V suelo (cm3)	33.69	19.75	28.01
Y suelo (g/cm3)	2.031	2.048	1.736
Y promedio (g/cm3)	1.938		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 07/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-04	ESTRATO : 1-1
PROF.	: 0.00 - 0.30m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	66.11	55.82	78.71
W suelo + parafina (g)	75.13	62.11	79.9
W parafina (g)	9.02	6.29	1.19
V parafina (cm3)	11.28	7.86	1.49
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	550	535	555
V suelo + parafina (cm3)	50	35	55
V suelo (cm3)	38.73	27.14	53.51
Y suelo (g/cm3)	1.707	2.057	1.471
Y promedio (g/cm3)	1.745		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 07/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-04	ESTRATO	: 1-2
PROF.	: 0.50 - 1.0m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso especifico del suelo (g/cm3)	$Y_{parafina}$: Peso especifico parafina (g/cm3)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm3)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm3)

	1	2	3
W suelo (g)	52.27	62.17	45.7
W suelo + parafina (g)	59.14	68.27	50.04
W parafina (g)	6.87	6.1	4.34
V parafina (cm3)	8.59	7.62	5.43
V inicial (cm3)	500	500	500
V final (cm3)	540	545	535
V suelo + parafina (cm3)	40	45	35
V suelo (cm3)	31.41	37.38	29.58
Y suelo (g/cm3)	1.664	1.663	1.545
Y promedio (g/cm3)	1.624		

PESO ESPECÍFICO			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	: 07/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA			
MUESTRA	: Inalterada		
CALICATA	: C-04	ESTRATO	: 1-3
PROF.	: 1.0 - 1.30m		

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad Y_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{V_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	43.93	60.18	71.87
W suelo + parafina (g)	50.92	64.85	77.11
W parafina (g)	6.99	4.67	5.24
V parafina (cm ³)	8.74	5.84	6.55
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	535	545	560
V suelo + parafina (cm ³)	35	45	60
V suelo (cm ³)	26.26	39.16	53.45
Y suelo (g/cm ³)	1.673	1.537	1.345
Y promedio (g/cm ³)	1.518		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 07/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-04	ESTRATO : 1-4
PROF.	: 1.5 - 2.0m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad Y_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{V_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	35.33	26.78	41.78
W suelo + parafina (g)	39.94	30.14	45.18
W parafina (g)	4.61	3.36	3.4
V parafina (cm ³)	5.76	4.20	4.25
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	530	525	535
V suelo + parafina (cm ³)	30	25	35
V suelo (cm ³)	24.24	20.80	30.75
Y suelo (g/cm ³)	1.458	1.288	1.359
Y promedio (g/cm ³)	1.368		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 07/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-04	ESTRATO : 1-5
PROF.	: 2.0 - 2.50m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

Dónde:

Y_{suelo}	: Peso específico del suelo (g/cm ³)	$Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm ³)
W_{suelo}	: Peso del suelo (g)	$W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
V_{suelo}	: Volumen del suelo (cm ³)	$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm ³)

	1	2	3
W suelo (g)	45.73	43.91	78.24
W suelo + parafina (g)	50.13	55.05	87.04
W parafina (g)	4.4	11.14	8.8
V parafina (cm ³)	5.50	13.93	11.00
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	535	540	565
V suelo + parafina (cm ³)	35	40	65
V suelo (cm ³)	29.50	26.08	54.00
Y suelo (g/cm ³)	1.55	1.684	1.449
Y promedio (g/cm ³)	1.561		

PESO ESPECÍFICO		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA : 07/09/2018
DATOS DE LA MUESTRA		
MUESTRA	: Inalterada	
CALICATA	: C-04	ESTRATO : 1-6
PROF.	: 2.5 - 3.0m	

$$Y_{suelo} = \frac{W_{suelo}}{V_{suelo}} \quad V_{parafina} = \frac{W_{parafina}}{Y_{parafina}} \quad Y_{parafina} = 0.8 \text{ g/cm}^3$$

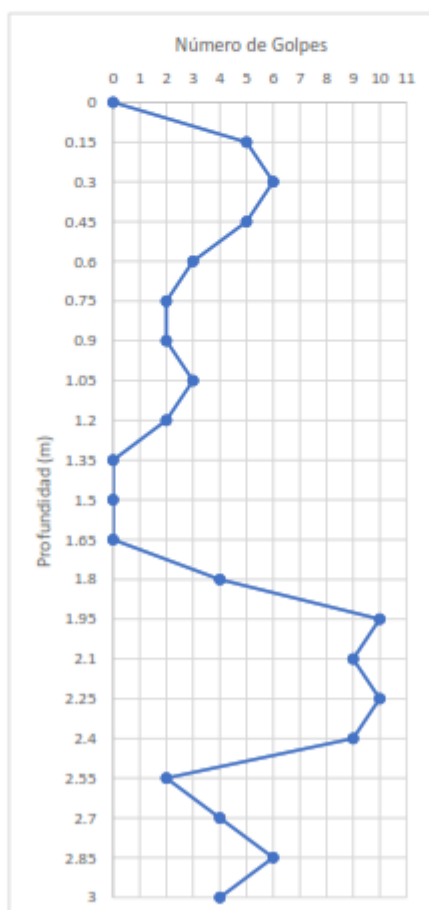
Dónde:

Y_{suelo} : Peso específico del suelo (g/cm³) $Y_{parafina}$: Peso específico parafina (g/cm³)
 W_{suelo} : Peso del suelo (g) $W_{parafina}$: Peso de la parafina (g)
 V_{suelo} : Volumen del suelo (cm³) $V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³)

	1	2	3
W suelo (g)	38.13	46.2	56.34
W suelo + parafina (g)	44.44	50.87	58.17
W parafina (g)	6.31	4.67	1.83
V parafina (cm ³)	7.89	5.84	2.29
V inicial (cm ³)	500	500	500
V final (cm ³)	530	535	540
V suelo + parafina (cm ³)	30	35	40
V suelo (cm ³)	22.11	29.16	37.71
Y suelo (g/cm ³)	1.724	1.584	1.494
Y promedio (g/cm ³)	1.601		

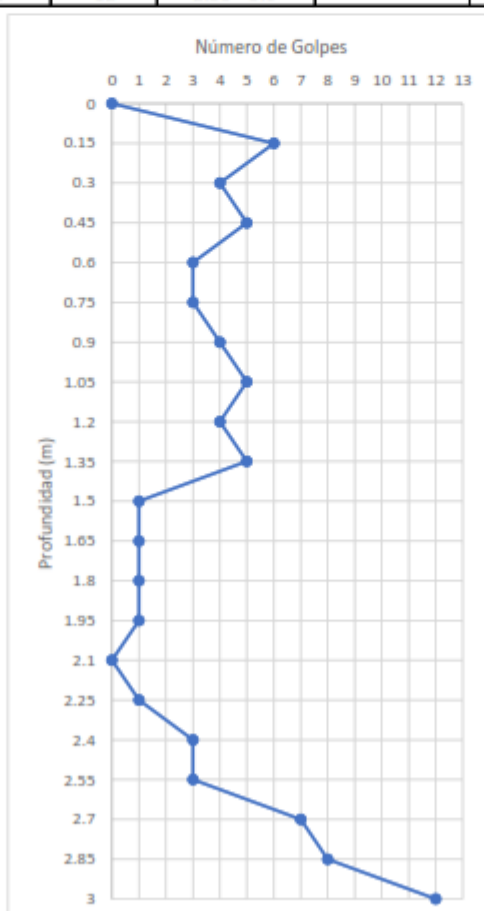
ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR			
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA		
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES		
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C. P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA		
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA	12/10/2018

	Nro de Golpes			Prof. (m)	Coordenadas UTM		N
	0-15 cm	15- 30 cm	30-45 cm		Norte	Este	
SPT-01	5	6	5	0.0 - 0.45	8177954.821	228750.884	11
	3	2	2	0.45 - 0.90			4
	3	2	0	0.90 - 1.35			2
	4	10	9	1.65 - 2.10			19
	10	9	2	2.10 - 2.55			11
	4	6	4	2.55 - 3.0			10



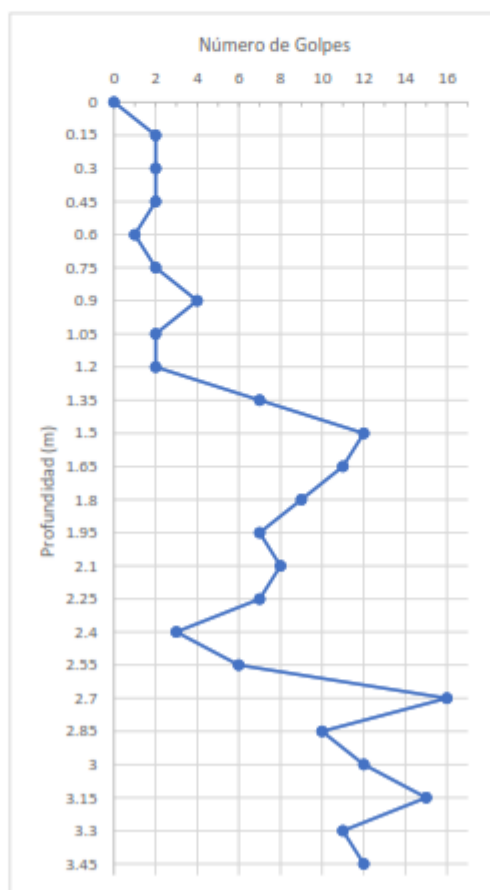
ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA : BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA 12/10/2018

	Nro de Golpes			Prof. (m)	Coordenadas UTM		N
	0-15 cm	15- 30 cm	30-45 cm		Norte	Este	
SPT-02	6	4	5	0.0 - 0.45	8177858.754	228638.19	9
	3	3	4	0.45 - 0.90			7
	5	4	5	0.90 - 1.35			9
	1	1	1	1.50 - 1.95			2
	1	3	3	2.10 - 2.55			6
	7	8	12	2.55 - 3.0			20



ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR		
REALIZADO POR	: BACH. GUILLEN SEMINARIO, ANDREA LUCIA	
	: BACH. MENDOZA PINTO, VICTOR ANDRES	
TESIS	: EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION EN EL C.P. EL PASTO - DISTRITO DE SOCABAYA	
UBICACIÓN	: C. P. EL PASTO, SOCABAYA-AREQUIPA-PERÚ	FECHA 12/10/2018

	Nro de Golpes			Prof. (m)	Coordenadas UTM		N
	0-15 cm	15- 30 cm	30-45 cm		Norte	Este	
SPT-03	2	2	2	0.0 - 0.45	8177910.401	228966.427	4
	1	2	4	0.45 - 0.90			6
	2	2	7	0.90 - 1.35			9
	11	9	7	1.50 - 1.95			16
	7	3	6	2.10 - 2.55			9
	16	10	12	2.55 - 3.0			22



ANEXO G
RESUMEN DE RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE
LICUEFACCIÓN

SISMO 7.8 Mw

		a máx.(g)	$V_{0.125m}$ (m/s)	Mw	g (g)	d (m)	NF	Y (g/cm3)	σ_v (atm)	σ'_v (atm)	FC (%)	5<FC<35	DWF	N	CN	CB	CS	CR	CE	N_{L60}	C finos	$N_{L60,CS}$	f	$K_{\sigma'}$	r_d	$\sigma_{v_{cs}}$	$r_d + \sigma_{v_{cs}}$	$r_d - \sigma_{v_{cs}}$	CSR_{eq}	CSR_{cs}	PL(%)
SPT 1	EST 1	0.18	150.0	7.8	1	0.5	0.78	1.652	0.08	0.08	39.43	35	0.797	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9917	0.0110	1.0027	0.9807	0.116	0.097	0.02
	EST 2	0.18	150.0	7.8	1	1	0.78	1.694	0.16	0.14	70.53	35	0.797	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.48	0.9823	0.0198	1.0021	0.9625	0.132	0.112	87.11
	EST 3	0.18	150.0	7.8	1	1.5	0.78	1.548	0.24	0.17	27.73	27.73	0.797	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.77	3.73	0.80	1.43	0.9716	0.0279	0.9995	0.9436	0.161	0.141	99.96
	EST 4	0.18	150.0	7.8	1	2	0.78	1.766	0.32	0.20	28.42	28.42	0.797	19	1.6	1	1.22	0.8	0.75	22.31	1.18	26.27	0.70	1.50	0.9596	0.0357	0.9952	0.9239	0.177	0.148	0.00
	EST 5	0.18	150.0	7.8	1	2.5	0.78	1.739	0.41	0.24	39.75	35	0.797	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9461	0.0431	0.9893	0.9030	0.187	0.157	64.85
	EST 6	0.18	150.0	7.8	1	3	0.78	1.617	0.48	0.27	34.59	34.59	0.797	10	1.6	1	1.11	0.8	0.75	10.62	1.30	13.82	0.70	1.48	0.9313	0.0504	0.9817	0.8809	0.196	0.166	89.79
SPT 2	EST 1	0.18	150.0	7.8	1	0.5	2.4	1.745	0.08	0.08	31.87	31.87	0.797	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.30	12.31	0.70	1.50	0.9917	0.0110	1.0027	0.9807	0.116	0.097	0.96
	EST 2	0.18	150.0	7.8	1	1	2.4	1.624	0.16	0.16	37.86	35	0.797	7	1.6	1	1.10	0.8	0.75	7.39	1.38	10.18	0.70	1.50	0.9823	0.0198	1.0021	0.9625	0.115	0.096	24.23
	EST 3	0.18	150.0	7.8	1	1.5	2.4	1.518	0.24	0.24	59.28	35	0.797	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.50	0.9716	0.0279	0.9995	0.9436	0.114	0.095	12.82
	EST 4	0.18	150.0	7.8	1	2	2.4	1.368	0.30	0.30	35.17	35	0.797	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.97	4.16	0.80	1.27	0.9596	0.0357	0.9952	0.9239	0.112	0.111	98.82
	EST 5	0.18	150.0	7.8	1	2.5	2.4	1.561	0.38	0.37	34.16	34.16	0.797	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.41	8.91	0.80	1.22	0.9461	0.0431	0.9893	0.9030	0.114	0.117	79.70
	EST 6	0.18	150.0	7.8	1	3	2.4	1.601	0.46	0.40	34.97	34.97	0.797	20	1.6	1	1.24	0.8	0.75	23.50	1.21	28.54	0.70	1.32	0.9313	0.0504	0.9817	0.8809	0.125	0.119	0.00
SPT 3	EST 1	0.18	150.0	7.8	1	0.5	1.8	1.674	0.08	0.08	51.89	35	0.797	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.50	0.9917	0.0110	1.0027	0.9807	0.116	0.097	39.26
	EST 2	0.18	150.0	7.8	1	1	1.8	1.573	0.16	0.16	56.65	35	0.797	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.42	8.97	0.80	1.45	0.9823	0.0198	1.0021	0.9625	0.115	0.100	38.07
	EST 3	0.18	150.0	7.8	1	1.5	1.8	1.767	0.24	0.24	34.06	34.06	0.797	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.50	0.70	1.50	0.9716	0.0279	0.9995	0.9436	0.114	0.095	14.25
	EST 4	0.18	150.0	7.8	1	2	1.8	1.766	0.33	0.31	41.31	35	0.797	16	1.6	1	1.18	0.8	0.75	18.15	1.24	22.44	0.70	1.42	0.9596	0.0357	0.9952	0.9239	0.119	0.105	0.00
	EST 5	0.18	150.0	7.8	1	2.5	1.8	1.571	0.40	0.34	38.75	35	0.797	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.39	0.9461	0.0431	0.9893	0.9030	0.133	0.120	54.86
	EST 6	0.18	150.0	7.8	1	3	1.8	1.938	0.50	0.38	37.75	35	0.797	22	1.6	1	1.27	0.8	0.75	26.77	1.21	32.27	0.70	1.33	0.9313	0.0504	0.9817	0.8809	0.142	0.134	0.00

SISMO 7.9 Mw

		a máx.(g)	$V_{0.125m}$ (m/s)	Mw	g (g)	d (m)	NF	Y (g/cm3)	σ_v (atm)	σ'_v (atm)	FC (%)	5<FC<35	DWF	N	CN	CB	CS	CR	CE	N_{L60}	C finos	$N_{L60,CS}$	f	$K_{\sigma'}$	r_d	$\sigma_{v_{cs}}$	$r_d + \sigma_{v_{cs}}$	$r_d - \sigma_{v_{cs}}$	CSR_{eq}	CSR_{cs}	PL(%)
SPT 1	EST 1	0.223	150.0	7.9	1	0.5	0.78	1.652	0.08	0.08	39.43	35	0.781	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9917	0.0110	1.0027	0.9807	0.144	0.123	1.08
	EST 2	0.223	150.0	7.9	1	1	0.78	1.694	0.16	0.14	70.53	35	0.781	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.48	0.9822	0.0198	1.0020	0.9624	0.164	0.142	99.00
	EST 3	0.223	150.0	7.9	1	1.5	0.78	1.548	0.24	0.17	27.73	27.73	0.781	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.77	3.73	0.80	1.43	0.9715	0.0279	0.9994	0.9435	0.200	0.179	100.00
	EST 4	0.223	150.0	7.9	1	2	0.78	1.766	0.32	0.20	28.42	28.42	0.781	19	1.6	1	1.22	0.8	0.75	22.31	1.18	26.27	0.70	1.50	0.9594	0.0357	0.9951	0.9237	0.219	0.187	0.13
	EST 5	0.223	150.0	7.9	1	2.5	0.78	1.739	0.41	0.24	39.75	35	0.781	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9459	0.0431	0.9891	0.9028	0.232	0.198	94.25
	EST 6	0.223	150.0	7.9	1	3	0.78	1.617	0.48	0.27	34.59	34.59	0.781	10	1.6	1	1.11	0.8	0.75	10.62	1.30	13.82	0.70	1.48	0.9310	0.0504	0.9814	0.8807	0.242	0.210	99.31
SPT 2	EST 1	0.223	150.0	7.9	1	0.5	2.4	1.745	0.08	0.08	31.87	31.87	0.781	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.30	12.31	0.70	1.50	0.9917	0.0110	1.0027	0.9807	0.144	0.123	12.57
	EST 2	0.223	150.0	7.9	1	1	2.4	1.624	0.16	0.16	37.86	35	0.781	7	1.6	1	1.10	0.8	0.75	7.39	1.38	10.18	0.70	1.50	0.9822	0.0198	1.0020	0.9624	0.142	0.122	69.04
	EST 3	0.223	150.0	7.9	1	1.5	2.4	1.518	0.24	0.24	59.28	35	0.781	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.50	0.9715	0.0279	0.9994	0.9435	0.141	0.120	52.42
	EST 4	0.223	150.0	7.9	1	2	2.4	1.368	0.30	0.30	35.17	35	0.781	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.97	4.16	0.80	1.27	0.9594	0.0357	0.9951	0.9237	0.139	0.140	99.97
	EST 5	0.223	150.0	7.9	1	2.5	2.4	1.561	0.38	0.37	34.16	34.16	0.781	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.41	8.91	0.80	1.22	0.9459	0.0431	0.9891	0.9028	0.141	0.148	97.86
	EST 6	0.223	150.0	7.9	1	3	2.4	1.601	0.46	0.40	34.97	34.97	0.781	20	1.6	1	1.24	0.8	0.75	23.50	1.21	28.54	0.70	1.32	0.9310	0.0504	0.9814	0.8807	0.155	0.150	0.00
SPT 3	EST 1	0.223	150.0	7.9	1	0.5	1.8	1.674	0.08	0.08	51.89	35	0.781	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.50	0.9917	0.0110	1.0027	0.9807	0.144	0.123	82.21
	EST 2	0.223	150.0	7.9	1	1	1.8	1.573	0.16	0.16	56.65	35	0.781	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.42	8.97	0.80	1.45	0.9822	0.0198	1.0020	0.9624	0.142	0.126	81.39
	EST 3	0.223	150.0	7.9	1	1.5	1.8	1.767	0.24	0.24	34.06	34.06	0.781	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.50	0.70	1.50	0.9715	0.0279	0.9994	0.9435	0.141	0.120	55.03
	EST 4	0.223	150.0	7.9	1	2	1.8	1.766	0.33	0.31	41.31	35	0.781	16	1.6	1	1.18	0.8	0.75	18.15	1.24	22.44	0.70	1.42	0.9594	0.0357	0.9951	0.9237	0.148	0.133	0.14
	EST 5	0.223	150.0	7.9	1	2.5	1.8	1.571	0.40	0.34	38.75	35	0.781	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.39	0.9459	0.0431	0.9891	0.9028	0.165	0.152	90.61
	EST 6	0.223	150.0	7.9	1	3	1.8	1.938	0.50	0.38	37.75	35	0.781	22	1.6	1	1.27	0.8	0.75	26.77	1.21	32.27	0.70	1.33	0.9310	0.0504	0.9814	0.8807	0.176	0.169	0.00

SISMO 8.3 Mw

		a máx.(g)	V _{6,12m} (m/s)	Mw	g (g)	d (m)	NF	Y (g/cm ³)	σ _v (atm)	σ' _v (atm)	FC (%)	5<FC<35	DWF	N	CN	CB	CS	CR	CE	N _{1,60}	C finos	N _{1,60,CS}	f	K _{σ'}	r _d	σ _{v_v}	r _d + σ _{v_v}	r _d - σ _{v_v}	CSR _{eq}	CSR _{eq} '	PL(%)
SPT 1	EST 1	0.37	150.0	8.3	1	0.5	0.78	1.652	0.08	0.08	39.43	35	0.748	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9917	0.0110	1.0026	0.9807	0.238	0.213	77.08
	EST 2	0.37	150.0	8.3	1	1	0.78	1.694	0.16	0.14	70.53	35	0.748	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.48	0.9821	0.0198	1.0019	0.9623	0.272	0.246	100.00
	EST 3	0.37	150.0	8.3	1	1.5	0.78	1.548	0.24	0.17	27.73	27.73	0.748	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.77	3.73	0.80	1.43	0.9714	0.0279	0.9993	0.9434	0.331	0.309	100.00
	EST 4	0.37	150.0	8.3	1	2	0.78	1.766	0.32	0.20	28.42	28.42	0.748	19	1.6	1	1.22	0.8	0.75	22.31	1.18	26.27	0.70	1.50	0.9592	0.0357	0.9949	0.9235	0.364	0.324	50.75
	EST 5	0.37	150.0	8.3	1	2.5	0.78	1.739	0.41	0.24	39.75	35	0.748	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9457	0.0431	0.9888	0.9026	0.385	0.343	100.00
	EST 6	0.37	150.0	8.3	1	3	0.78	1.617	0.48	0.27	34.59	34.59	0.748	10	1.6	1	1.11	0.8	0.75	10.62	1.30	13.82	0.70	1.48	0.9307	0.0504	0.9811	0.8804	0.402	0.363	100.00
SPT 2	EST 1	0.37	150.0	8.3	1	0.5	2.4	1.745	0.08	0.08	31.87	31.87	0.748	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.30	12.31	0.70	1.50	0.9917	0.0110	1.0026	0.9807	0.238	0.213	97.07
	EST 2	0.37	150.0	8.3	1	1	2.4	1.624	0.16	0.16	37.86	35	0.748	7	1.6	1	1.10	0.8	0.75	7.39	1.38	10.18	0.70	1.50	0.9821	0.0198	1.0019	0.9623	0.236	0.210	99.98
	EST 3	0.37	150.0	8.3	1	1.5	2.4	1.518	0.24	0.24	59.28	35	0.748	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.50	0.9714	0.0279	0.9993	0.9434	0.234	0.208	99.90
	EST 4	0.37	150.0	8.3	1	2	2.4	1.368	0.30	0.30	35.17	35	0.748	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.97	4.16	0.80	1.27	0.9592	0.0357	0.9949	0.9235	0.331	0.243	100.00
	EST 5	0.37	150.0	8.3	1	2.5	2.4	1.561	0.38	0.37	34.16	34.16	0.748	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.41	8.91	0.80	1.22	0.9457	0.0431	0.9888	0.9026	0.233	0.256	100.00
	EST 6	0.37	150.0	8.3	1	3	2.4	1.601	0.46	0.40	34.97	34.97	0.748	20	1.6	1	1.24	0.8	0.75	23.50	1.21	28.54	0.70	1.32	0.9307	0.0504	0.9811	0.8804	0.257	0.260	5.08
SPT 3	EST 1	0.37	150.0	8.3	1	0.5	1.8	1.674	0.08	0.08	51.89	35	0.748	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.50	0.9917	0.0110	1.0026	0.9807	0.238	0.213	100.00
	EST 2	0.37	150.0	8.3	1	1	1.8	1.573	0.16	0.16	56.65	35	0.748	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.42	8.97	0.80	1.45	0.9821	0.0198	1.0019	0.9623	0.236	0.218	100.00
	EST 3	0.37	150.0	8.3	1	1.5	1.8	1.767	0.24	0.24	34.06	34.06	0.748	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.50	0.70	1.50	0.9714	0.0279	0.9993	0.9434	0.234	0.208	99.92
	EST 4	0.37	150.0	8.3	1	2	1.8	1.766	0.33	0.31	41.31	35	0.748	16	1.6	1	1.18	0.8	0.75	18.15	1.24	22.44	0.70	1.42	0.9592	0.0357	0.9949	0.9235	0.245	0.230	52.08
	EST 5	0.37	150.0	8.3	1	2.5	1.8	1.571	0.40	0.34	38.75	35	0.748	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.39	0.9457	0.0431	0.9888	0.9026	0.273	0.263	100.00
	EST 6	0.37	150.0	8.3	1	3	1.8	1.938	0.50	0.38	37.75	35	0.748	22	1.6	1	1.27	0.8	0.75	26.77	1.21	32.27	0.70	1.33	0.9307	0.0504	0.9811	0.8804	0.292	0.292	0.74

SISMO 8.4 Mw

		a máx.(g)	V _{6,12m} (m/s)	Mw	g (g)	d (m)	NF	Y (g/cm ³)	σ _v (atm)	σ' _v (atm)	FC (%)	5<FC<35	DWF	N	CN	CB	CS	CR	CE	N _{1,60}	C finos	N _{1,60,CS}	f	K _{σ'}	r _d	σ _{v_v}	r _d + σ _{v_v}	r _d - σ _{v_v}	CSR _{eq}	CSR _{eq} '	PL(%)
SPT 1	EST 1	0.45	150.0	8.4	1	0.5	0.78	1.652	0.08	0.08	39.43	35	0.735	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9915	0.0110	1.0025	0.9805	0.290	0.263	96.69
	EST 2	0.45	150.0	8.4	1	1	0.78	1.694	0.16	0.14	70.53	35	0.735	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.48	0.9818	0.0198	1.0016	0.9620	0.331	0.304	100.00
	EST 3	0.45	150.0	8.4	1	1.5	0.78	1.548	0.24	0.17	27.73	27.73	0.735	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.77	3.73	0.80	1.43	0.9708	0.0279	0.9988	0.9429	0.402	0.383	100.00
	EST 4	0.45	150.0	8.4	1	2	0.78	1.766	0.32	0.20	28.42	28.42	0.735	19	1.6	1	1.22	0.8	0.75	22.31	1.18	26.27	0.70	1.50	0.9585	0.0357	0.9942	0.9228	0.442	0.401	86.69
	EST 5	0.45	150.0	8.4	1	2.5	0.78	1.739	0.41	0.24	39.75	35	0.735	11	1.6	1	1.12	0.8	0.75	11.81	1.29	15.21	0.70	1.50	0.9447	0.0431	0.9879	0.9016	0.468	0.424	100.00
	EST 6	0.45	150.0	8.4	1	3	0.78	1.617	0.48	0.27	34.59	34.59	0.735	10	1.6	1	1.11	0.8	0.75	10.62	1.30	13.82	0.70	1.48	0.9295	0.0504	0.9799	0.8791	0.488	0.448	100.00
SPT 2	EST 1	0.45	150.0	8.4	1	0.5	2.4	1.745	0.08	0.08	31.87	31.87	0.735	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.30	12.31	0.70	1.50	0.9915	0.0110	1.0025	0.9805	0.290	0.263	99.86
	EST 2	0.45	150.0	8.4	1	1	2.4	1.624	0.16	0.16	37.86	35	0.735	7	1.6	1	1.10	0.8	0.75	7.39	1.38	10.18	0.70	1.50	0.9818	0.0198	1.0016	0.9620	0.287	0.260	100.00
	EST 3	0.45	150.0	8.4	1	1.5	2.4	1.518	0.24	0.24	59.28	35	0.735	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.50	0.9708	0.0279	0.9988	0.9429	0.284	0.258	100.00
	EST 4	0.45	150.0	8.4	1	2	2.4	1.368	0.30	0.30	35.17	35	0.735	2	1.6	1	1.10	0.8	0.75	2.11	1.97	4.16	0.80	1.27	0.9585	0.0357	0.9942	0.9228	0.280	0.300	100.00
	EST 5	0.45	150.0	8.4	1	2.5	2.4	1.561	0.38	0.37	34.16	34.16	0.735	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.41	8.91	0.80	1.22	0.9447	0.0431	0.9879	0.9016	0.284	0.316	100.00
	EST 6	0.45	150.0	8.4	1	3	2.4	1.601	0.46	0.40	34.97	34.97	0.735	20	1.6	1	1.24	0.8	0.75	23.50	1.21	28.54	0.70	1.32	0.9295	0.0504	0.9799	0.8791	0.312	0.321	29.22
SPT 3	EST 1	0.45	150.0	8.4	1	0.5	1.8	1.674	0.08	0.08	51.89	35	0.735	4	1.6	1	1.10	0.8	0.75	4.22	1.55	6.57	0.80	1.50	0.9915	0.0110	1.0025	0.9805	0.290	0.263	100.00
	EST 2	0.45	150.0	8.4	1	1	1.8	1.573	0.16	0.16	56.65	35	0.735	6	1.6	1	1.10	0.8	0.75	6.34	1.42	8.97	0.80	1.45	0.9818	0.0198	1.0016	0.9620	0.287	0.270	100.00
	EST 3	0.45	150.0	8.4	1	1.5	1.8	1.767	0.24	0.24	34.06	34.06	0.735	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.50	0.70	1.50	0.9708	0.0279	0.9988	0.9429	0.284	0.258	100.00
	EST 4	0.45	150.0	8.4	1	2	1.8	1.766	0.33	0.31	41.31	35	0.735	16	1.6	1	1.18	0.8	0.75	18.15	1.24	22.44	0.70	1.42	0.9585	0.0357	0.9942	0.9228	0.298	0.285	87.39
	EST 5	0.45	150.0	8.4	1	2.5	1.8	1.571	0.40	0.34	38.75	35	0.735	9	1.6	1	1.10	0.8	0.75	9.50	1.32	12.58	0.70	1.39	0.9447	0.0431	0.9879	0.9016	0.332	0.326	100.00
	EST 6	0.45	150.0	8.4	1	3	1.8	1.938	0.50	0.38	37.75	35	0.735	22	1.6	1	1.27	0.8	0.75	26.77	1.21	32.27	0.70	1.33	0.9295	0.0504	0.9799				