

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TRUJILLO**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**BASES TEÓRICAS PARA LA DETERMINACIÓN  
DE LAS ZONAS DE RIESGO DE LICUEFACCIÓN DE  
SUELOS DURANTE UN SISMO EN LA  
CIUDAD DE TRUJILLO**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
PARA OPTAR EL GRADO DE**

**BACHILLER**

**AUTOR:**

**Pepe Walter Heras Flores**

**TRUJILLO – PERÚ**

**2018**



## HOJA DE FIRMAS

---

PRESIDENTE

---

SECRETARIO



## INDICE DE CONTENIDOS

Carátula	
Índice contenidos	03
Resumen / palabras clave	04
Abstrac / key words	05
I. Introducción	06
1.1 Delimitación del problema que motiva las bases teóricas	07
1.2 Justificación del tema	07
1.3 Objetivo	09
1.4 Procedimientos metodológicos seguidos	09
II. Resultados respecto a los antecedentes	09
III. Conclusión	40
IV. Referencias bibliográficas	41
V. Anexo:	
Guía de observación	44



## RESUMEN

La dinámica de suelos es mucho menos estudiada y más impredecible, causando muchos problemas en los diferentes tipos, en particular, cuando el suelo está compuesto mayormente de arena y está saturado, se produce un fenómeno llamado Licuación de suelos, que se puede explicar cómo la pérdida de resistencia al corte del suelo que, al transformarse en una especie de líquido viscoso, es incapaz de resistir cargas. En ningún distrito de Trujillo se ha realizado un estudio de zonas de riesgo de licuación de suelos. El distrito de Víctor Larco Herrera está ubicado a 4 km de la ciudad de Trujillo, en la parte Sur Oeste. Su topografía es plana con pendiente uniforme de 0 y 1% hasta una altura de 3 a 10 msnm, a orillas del Océano Pacífico. El recurso Suelo del distrito se caracteriza por el elevado nivel de la napa freática y su salinidad; sin embargo, no existen estudios de posible licuefacción de suelos durante un sismo ya que la mayor preocupación aparente es la erosión costera. En el presente trabajo de investigación se resalta lo que indica la NTP. El Profesional Responsable efectuará el estudio correspondiente para descartar o verificar la ocurrencia del fenómeno de licuefacción en los suelos ubicados bajo la napa freática. Esto se hará usando el método de Seed e Ydris; este método fue desarrollado en base a observaciones in-situ del comportamiento de depósitos de arenas durante sismos pasados. El proceso involucra el uso de la resistencia a la penetración estándar. (Norma Técnica E 050)

### **Palabras claves:**

Bases teóricas, napa freática, salinidad, licuefacción.



## ABSTRAC

Soil dynamics are much less studied and more unpredictable, causing many problems in different types, in particular, when the soil is mostly made up of sand and saturated, a phenomenon called Soil Liquefaction occurs, which can explain how loss of resistance to the cutting of the soil that, when transformed into a kind of viscous liquid, is incapable of resisting loads. In no district of Trujillo has a study of risk zones of soil liquefaction been carried out. The district of Víctor Larco Herrera is located 4 km from the city of Trujillo, in the South West part. Its topography is flat with uniform slope of 0 and 1% up to a height of 3 to 10 meters above sea level, on the shores of the Pacific Ocean. The ground resource of the district is characterized by the high level of the water table and its salinity; however, there are no studies on the possible liquefaction of soils during an earthquake since the greatest apparent concern is coastal erosion. In the present research work it is highlighted what the NTP indicates. The Responsible Professional will carry out the corresponding study to rule out or verify the occurrence of the phenomenon of liquefaction in the soils located under the water table. This will be done using the method of Seed and Ydris; This method was developed based on in-situ observations of the behavior of sand deposits during past earthquakes. The process involves the use of standard penetration resistance. (Technical Standard E 050)

### **Key words:**

Theoretical bases, water table, salinity, liquefaction.



## I. INTRODUCCIÓN.

En la dinámica de suelos se estudia su movimiento por fuerzas externas (sismos) y por lo tanto una nueva fuerza aparece, la fuerza de inercia, la cual crece significativamente cuando el intervalo de tiempo donde ocurre la deformación cíclica se acorta. Por lo que; aun cuando el nivel de la fuerza es infinitesimal, la fuerza de inercia puede ser considerable **(Ishihara, 1996)**. Además es un hecho experimental que el mismo movimiento sísmico produce resultados diferentes en estructuras asentadas en suelos distintos **(Alarcón, 1989)**.

En general la dinámica de suelos es mucho menos estudiada y más impredecible, causando muchos problemas en los diferentes tipos, en particular, cuando el suelo está compuesto mayormente de arena y está saturado, se produce un fenómeno llamado Licuación de suelos, que se puede explicar cómo la pérdida de resistencia al corte del suelo que, al transformarse en una especie de líquido viscoso, es incapaz de resistir cargas.

Se han recopilado de diferentes investigadores información histórica de los eventos sísmicos más importantes que ocurrieron en el Perú desde el siglo XVI hasta el presente, de manera que se tiene una base de datos de las zonas donde hubo y podría ocurrir licuación de suelos. **(Hurtado J. A., 1994)** Presentó un mapa de máximas intensidades sísmicas observadas en el Perú. Este mapa se basó en treinta mapas de isosistas de terremotos recientes en intensidades puntuales de terremotos históricos. Este mapa representa el nivel de daño: vibración del suelo, licuación, deslizamientos, etc. Éste indica una alta actividad

sísmica en la costa peruana debido a la subducción de la placa Nazca bajo la Placa Sudamericana.

### **1.1 Delimitación del problema que motiva las bases teóricas.**

En **Trujillo** no se ha realizado ningún estudio de posibles zonas de licuación publicada por alguna entidad de alto rango. Hace cerca de 400 años se produjo un terremoto en el norte del Perú que arruinó los edificios de Trujillo de la época. Según algunas crónicas indican que se agrietó la tierra en varias partes, de las cuales surgió un lodo negruzco. Además se decía que “el material viscoso y pestilente expelido envuelto en agua gredosa de que se formaron los ríos que corrieron por las campiñas de la Villa del Santa, el de Barranco u otros, tiñeron sus corrientes con tal maligna inundación”. De estos relatos se deduce que hubo otros efectos en las vertientes. Se estima que la intensidad de este sismo fue de IX en la escala de Mercalli.

### **1.2 Justificación del Tema**

El fenómeno de licuación ha causado grandes pérdidas humanas y económicas a nivel nacional y mundial. La licuación de los suelos ha sido causa de destrucción de estructuras como puentes, edificios, muelles y viviendas. Las obras viales como oleoductos, alcantarillados, entre otros, son altamente susceptibles a grandes deformaciones del suelo, porque su trazado se realiza a lo largo de grandes distancias y, por lo tanto, al favorecer las bajas pendientes existe altas posibilidades de localizarse en

depósitos aluviales o marinos constituidos por suelos no cohesivos, que son altamente vulnerables al fenómeno de licuación.

La licuación de los suelos no es un tema muy estudiado en el mundo, ya que la dinámica de suelos no es predecible y no es exacta. Por lo tanto, investigaciones como ésta ayudan a complementar la información general sobre este fenómeno de manera que en un futuro se cuente con distintos mapas de susceptibilidad alrededor del mundo.

Para la correcta construcción de cualquier edificación, ya sea una casa, una residencial, o la infraestructura de una empresa es necesaria una cimentación muy bien estudiada. Además, en un ambiente de costa o playa es muy común que el suelo sea arena y la napa freática sea alta. Y, estando nuestro país en riesgo de sismo, es necesario tener un mapa de zonas de riesgo de manera que se tomen las medidas necesarias en cada caso.

Cada suelo en diferentes partes del mundo está compuesto de manera diferente. En caso del distrito Víctor Larco Herrera en Trujillo tenemos una napa freática muy alta y arena salinosa, lo que nos indica una posible licuación en caso de sismo en ciertas partes. Por lo tanto, es necesario tener un mapa propio ya que no es posible usar mapas generales del Perú o mapas parecidos en el mundo.

Esta investigación, además de ser parte de un conjunto de mapas alrededor del mundo de posibles lugares susceptibles a la licuación de suelos, será la base de futuras investigaciones donde otros tesisistas evaluarán por ejemplo como poder minimizar los daños durante la licuación de suelos, o



como mejorar el suelo propenso a licuar o succión de agua para la reducción de zonas de licuefacción, etc.

### 1.3 Objetivo

El objetivo principal de la presente investigación es establecer las bases teóricas para determinar las zonas de riesgo de licuación de suelos en la ciudad de Trujillo. Para ello, se tendrá que realizar el ensayo SPT para cada muestra y calcular el número de golpes, realizar la caracterización del suelo, así como el ensayo triaxial y otros que se requieran y, determinar la susceptibilidad de los suelos a la licuación durante un sismo mediante el método de Seed e Idriss.

### 1.4 Procedimientos metodológicos seguidos

La técnica de recolección de datos es la revisión y el análisis de contenido de información basada en diversas bibliografías de libros difundidos por diversos autores para determinar las zonas de riesgo de licuación de suelos. El instrumento de recolección de datos es la *matriz de datos*, donde se consigna la información obtenida de la revisión de las diferentes publicaciones referidas al tema. Se considera también como fuentes de información, las publicaciones de las Tesis referidas al tema d zonas de riesgo de licuación de suelos.

## II. RESULTADOS RESPECTO A LOS ANTECEDENTES.

Desarrollar un nuevo método de diseño que permita mitigar el potencial de licuefacción, tanto en terrenos sin edificar así como en los ya edificados.

**Henriquez Pantaleón, 2007** realizó una base de datos con todos los casos

documentados existentes sobre el comportamiento observado de los suelos arenosos en sismos pasados y sus propiedades, mediante ensayos in situ (CTP y SPT) y de laboratorio (granulometría y límites de Atterberg). Se pudo observar, en algunas de ellas, una gran dispersión en las curvas propuestas para la determinación de las variables que intervienen en el análisis de licuación, así como los factores de corrección y/o normalización de la resistencia a la penetración del SPT, la resistencia por punta del CPT y los factores de escala asociados a las magnitudes de los sismos, lo cual introduce incertidumbres a la hora de llevar a cabo este tipo de análisis. El nuevo método de predicción propuesto se sustenta con una base de datos con más de 500 CPTs documentados, en distintos lugares del mundo donde, bajo la acción de diferentes sismos, se ha producido o no licuación.

Este estudio adiciona una nueva herramienta para poder confirmar la posibilidad de licuación en el distrito de Víctor Larco Herrera en Trujillo, de manera que además de los métodos tradicionales se use este método. Además de brindar una posible solución para este problema como es la inyección de compactación.

Según **Brenes Quesada, 2008** manifiesta que desarrollar una herramienta programada será capaz de evaluar licuación con sólo introducirle ciertos datos obtenidos del SPT respectivamente. Para realizar este proyecto se procedió a investigar los métodos para la evaluación de la susceptibilidad a la Licuación, para automatizarlos en un programa computacional como lo es el "Brenes Evaluation System". De los métodos estudiados para evaluar

licuación, se escogieron dos cuyos datos son obtenidos de un Ensayo de Penetración Estándar (SPT), uno de los métodos es el desarrollado por Seed e Idriss y el otro, el desarrollado por Ambraseys. Una vez que el usuario ingresa al programa este decide por cuál método quisiera evaluar la susceptibilidad a la licuación, dando un clic en el botón correspondiente a Seed e Idriss o a Ambraseys. El programa se acopló bien a los datos ingresados y brindó una serie de resultados coherentes y consistentes, comparándolos con los datos obtenidos de manera manual. El software desarrollado permite evaluar la susceptibilidad a la licuación en cualquier suelo. Dicho proceso de evaluación se basa en los métodos implementados por investigadores Seed e Idriss y Ambraseys. Estas consideraciones permiten predecir el comportamiento de los suelos ante la acción de un sismo. Este estudio permitirá que los cálculos manuales en el método designado en nuestro caso, el de Seed e Ydriss puedan ser comprobados de manera computacional, que sería un método más seguro. Además, muestra que los métodos ya mencionados son usados actualmente y con resultados favorables.

**Rosado, 2010** realizó un mapa de peligro por licuación de suelos inducido por sismos en algunas zonas de la República Mexicana. La estimación del peligro se lleva a cabo mediante la obtención de mapas de características geológicas, topográficas y de aceleración pico del terreno. Se muestran los resultados de un análisis especial de la zona de Manzanillo, afectada por los sismos de Manzanillo (1995) y Tecomán (2003). Se muestran, mapas finales

de zonas de diferentes estados de la República Mexicana donde se ha presentado licuación (Chiapas, Baja California, Tlaxcala y Michoacán) y donde se conjugan ciertos factores que permiten esto. Los mapas finales muestran que el área más afectada se encuentra en el puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán, esto principalmente para un sismo con magnitudes iguales o superiores a 7. En ese mismo sitio ya se había presentado licuación. Este proyecto nos muestra que con mapas también es posible determinar la licuación de los suelos; sin embargo, este método es menos certero ya que no se toman en cuenta las propiedades y esfuerzos de cada estrato.

Para determinar si en el terremoto de pisco hubo licuefacción y sus daños **A. Carrillo Gil, 2008** comenta una serie de soluciones diseñadas después de ocurrido el terremoto en base a estudios de campo y aplicación de experiencias y tecnología que evalúa el potencial de licuación de los suelos subyacentes al área crítica más afectada. De las investigaciones efectuadas se detectó una substancial disminución de la capacidad de carga del suelo licuado que llegó a superar el 50%. Para preservar a las estructuras de daños graves en caso de un sismo severo futuro se adoptaron procedimientos de mejoramiento convenientes para lograr una mejor performance en las cimentaciones reparadas para soportar cargas después del sismo. Se ha establecido fehacientemente que los mayores daños originados por el sismo de Pisco-Perú-2007, ocurrido el 15 de Agosto del 2007, se han originado por el desarrollo de altas presiones intersticiales que produjeron licuación en los estratos superficiales del suelo arenoso saturado subyacente a obras de

ingeniería de todo tipo que soportaron un terremoto de magnitud 8.0 Mw y aceleración que llegó hasta 0.48 g, según datos de las agencias oficiales peruanas.

Este estudio nos permite darnos cuenta que el fenómeno de licuación no es ajeno a nuestra realidad, ya que en una ciudad costera como la nuestra como lo es Pisco ha ocurrido licuación de suelos y es la causa de la mayor destrucción.

**Antón Aliaga Vopilovsky, 2015** nos dice que para evaluar el potencial de licuación para el recrecimiento de una presa de relaves construida aguas arriba, ubicada en el departamento de Ancash, aplicando el Método de Olson. Se aplicará el Método de Olson, el cual se basa en índices de resistencia para realizar el análisis de licuación. Asimismo, se realizó un análisis de licuación utilizando el Método Simplificado propuesto originalmente por Seed e Idriss, para comparar y validar los resultados obtenidos con el Método de Olson. A través de la evaluación de la licuación utilizando el método propuesto por Olson se pretende demostrar que dicho análisis se puede llevar a cabo para evaluar el potencial de licuación en terrenos inclinados, ya que la fórmula original del Método Simplificado no estaba destinada para la evaluación de la licuación en dichos escenarios. El método simplificado resultó más conservador en el cálculo del potencial de licuación, mostrando más detalladamente la variabilidad entre los puntos donde se realizaron sondajes, aunque valiéndose de algunos coeficientes y factores de corrección que indujeron mayor incertidumbre en el análisis. El método de Olson es más

conciso en ese aspecto, y se centra en la evaluación de una superficie crítica, lo cual brindó resultados más homogéneos pero menos conservadores. En el proyecto evaluado, la aplicación del método simplificado de Idriss en el análisis del potencial de licuación produjo resultados más conservadores, indicando la ocurrencia de licuación en varios puntos (con valores de FSL entre 0.4 y 1), incluso para la aceleración más baja analizada (0.23 g). El método de Olson 2001, en cambio, sólo predice la licuación para los casos con aceleraciones de 0.30 g y 0.37 g con valores FSL en un rango de 0.75 a 0.93.

Este método nos permite darnos cuenta que existen muchos más métodos modernos con una visión diferente, por ejemplo, en este caso el método de Olson que también se tratará de aplicar a nuestro caso, el distrito Victor Larco Herrera en la ciudad de Trujillo.

También, **Lucas, 2011** nos dice que estudiar la presencia de gravas especiales en el Perú en las cuales se han registrado problemas de colapso, licuación, cementación y otros, es una evidencia de la influencia que tiene la matriz que las engloba y que condiciona su comportamiento. A la grava se le adicionó porcentajes variables de matriz para llenar progresivamente los vacíos y analizar la influencia en sus parámetros de resistencia al corte como consecuencia de la presencia de la matriz. Para estos fines se desarrolló una serie de ensayos de corte directo en la mezcla de grava y matriz, para obtener los parámetros  $C$  y  $\phi$  en condiciones drenadas, las matrices utilizadas fueron arenas y suelos finos. A medida que se incrementa la matriz en la grava, se

produce una reducción en la relación de vacíos y consecuentemente el aumento del peso unitario seco. En la investigación se establece que el efecto es una reducción paulatina del ángulo de fricción interna relacionada al porcentaje de matriz empleado y un aumento de la cohesión, infiriéndole propiedades de los suelos finos.

Esta investigación nos muestra que la licuefacción no solo se presenta en arenas sino también en gravas, pero en casos especiales. Esto nos permite tener un mayor cuidado al seleccionar nuestras áreas de estudio.

A fin de establecer un conocimiento amplio sobre la determinación de las zonas de riesgo de licuefacción de suelos durante un sismo, se ha revisado varias bibliografías obteniendo diferentes conceptos sobre el tema, de manera que, a partir de las presente bases teóricas, podemos definir algunos términos referidos al tema. BASES TEORICAS.

### **SISMICIDAD.**

Los sismos son provocados por el movimiento entre placas tectónicas que forman la corteza terrestre. Referente a Perú y el resto de Latinoamérica, las placas que interactúan en la región son las de Nazca, Sudamericana, Norteamérica, Rivera, Cocos, del Caribe, Scotia y Antártica.

Cada placa tiene actividad diferente con las otras placas colindantes. Un tipo de actividad entre placas es aquella en el que chocan dos placas con desplazamiento contrario, provocando fuerzas de fricción y deformaciones. Al deformarse las placas se acumula energía, sin embargo, llega el momento en que la fricción no soporta la fuerza de deformación, rompiéndose el equilibrio

y liberándose energía en forma de ondas, lo que comúnmente llamamos sismo. Estos son los llamados sismos de subducción. Las zonas de subducción en el planeta abarcan cerca de 55 000 km y generalmente implican actividad volcánica, consecuencia de las altas presiones y temperaturas alcanzadas por la litosfera (placa) que subduce. Debido a su ubicación tectónica, los sismos de subducción son quizá los más comunes en la parte del litoral del Pacífico de Perú.

Sin embargo, en el planeta no todos los sismos son de subducción. Si hay algún desplazamiento relativo horizontal de las fallas se produce un sismo intraplaca, que como su nombre lo dice, se produce en el interior de una placa. La sismicidad de un lugar depende de la cercanía a la fuente tectónica. En algunos casos, las instituciones gubernamentales o de investigación de los países ponen a disposición mapas de riesgo y/o peligro sísmico, en donde queda registrada la sismicidad del lugar. Éste tipo de mapas generalmente se publican en códigos de diseño sismoresistente de estructuras. (Seed, Mori, & Chan, 1975)

#### **Parámetros sísmicos.**

Momento sísmico. Propuesto por Aki en 1966, el momento sísmico tiene que ver con el tamaño de la fuente, haciéndolo un parámetro útil para medir el tamaño del evento. Éste parámetro es el producto del coeficiente de rigidez del medio donde se produce el terremoto, el área de la dislocación, y el desplazamiento medio de la misma. En la mayoría de los casos es difícil



estimar las dimensiones de la falla, y el momento sísmico se determina a partir del espectro de las ondas sísmicas registradas, (Muñoz, 1989)

**Magnitud.** Se tienen diferentes tipos de magnitud, dependiendo de la aplicación se pueden calcular:

Magnitud local ( $M_L$ )

Magnitud de ondas de volumen ( $M_O$ )

Magnitud duración ( $M_D$ )

Magnitud tsunami ( $M_T$ )

Magnitud energía ( $M_E$ )

Magnitud de ondas superficiales ( $M_s$ )

Magnitud momento ( $M_M$ ) (Kanamori, 1977)

**Intensidad.** Es el único parámetro no instrumentado. Se mide en base a las afectaciones sufridas por la población y las estructuras de un área. La escala de medición de intensidad más utilizada en América es la de Mercalli Modificada, mientras en Europa es más común la propuesta por Medvedev, Karnik y Sponheuer.

ESCALA DE MERCALLI MODIFICADA		
Grado	Intensidad	Efectos
I	Instrumental	Registrado solo por sismógrafos.
II	Muy débil	Percibido por algunas personas en pisos altos.
III	Ligero	Perceptible en interiores, los objetos suspendidos se balancean, similar al paso de un camión.
IV	Moderado	Percibido por la mayoría de las personas en la calle y en interiores, oscilación de objetos colgantes, ventanas y cristalería crujen.
V	Algo fuerte	Despiertan las personas dormidas, algunos objetos caen, cuadros, puertas y contraventanas se balancean.
VI	Fuerte	Los muebles se mueven, los cuadros se caen, los platos y la cristalería se rompen. Las campanas suenan solas y algunas chimeneas se derrumban, los tabiques se resquebrajan.

VII	Muy fuerte	Es difícil mantenerse en pie, se caen los aleros de los tejados, tejas chimeneas y comisas de edificios, se forman olas en los estanques. Suenan todas las campanas.
VIII	Destruccion	Caen algunas estatuas y muros, torres y edificios son deteriorados. Aparecen grietas en el suelo húmedo y en taludes abruptos. Cambian los niveles los acuíferos.
IX	Ruinoso	Pánico general, las casas comienzan a caer, gritas en el suelo, raíles de tren deformados, puentes y conducciones subterráneas rotas.
X	Desastroso	Pánico general. Muchos edificios destruidos, graves daños en presas. Desprendimientos de tierras, desbordamientos de ríos, canales, lagos, etc.
XI	Muy desastroso	Pánico general. Pocos edificios en pie, calles muy deformadas, conducciones subterráneas inservibles. Aparecen fallas en el terreno de salto apreciable.
XII	Catastrófico	Destrucción total, los objetos lanzados al aire, desplazamiento de grandes masas rocosas. La topografía queda cambiada.

*Tabla 3, Escala de Mercalli Modificada (Bravo, 2015)*

**Aceleración máxima o aceleración pico.** Es la aceleración máxima registrada en los acelerogramas obtenidos en un lugar. La aceleración varía de acuerdo al tipo de suelo.

**Velocidad máxima.** Como su nombre lo dice es la velocidad máxima a la que se desplazan las ondas en un medio. (Kanamori, 1977)

### **Peligrosidad Sísmica.**

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un movimiento sísmico con duración fija y en un lugar determinado. La peligrosidad sísmica generalmente depende de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del suelo, por lo cual es muy frecuente encontrarla en función de estos términos, aunque también lo puede estar en función de la intensidad macro sísmica, que se relaciona con la destructividad del evento.

Para realizar un buen estudio de peligrosidad sísmica es necesario conocer dos aspectos importantes: la sismicidad regional y las características de atenuación del lugar. Si se combinan estos dos elementos se puede tener una caracterización del movimiento debido a sismos en la zona de estudio, aunque para hacerla más completa se debe tomar en cuenta el tipo de fuente y la forma de propagación de energía. En caso de hacer microzonificación, también se considera la amplificación de las ondas en el lugar.

Los análisis de evaluación del peligro sísmico en las últimas décadas han sido mejorados con la utilización de los datos geológicos que permiten obtener la historia sísmica de las fallas activas. Los registros históricos e instrumentales son sumamente importantes para reflejar precisión en los valores de sismicidad a largo plazo y efectuar correctas evaluaciones del peligro por eventos sísmicos. (Rosado, 2010)

### **FENOMENOS INDUCIDOS POR LOS SISMOS EN LOS SUELOS GRANULARES FINOS.**

Dos de los principales fenómenos que los sismos pueden inducir en los suelos granulares finos son los cambios de volumen y la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante.

Dichos fenómenos se analizan a continuación:

#### **Cambios de volumen** (densificación-asientos).

La aplicación de carga cíclica a una muestra de arena trae como resultado el cambio progresivo de volumen, aún en el caso de arenas densas, las

cuales se comportan como dilatantes bajo carga unidireccional o monotónica; en el caso de medios granulares sueltos el comportamiento es contractivo.

Varias técnicas, tanto de laboratorio como de campo, se han desarrollado para estudiar este fenómeno. Estudios basados en ensayos de corte simple y mesas vibratoras, con niveles de aceleración y amplitudes de deformación semejantes a los esperados en temblores intensos, han mostrado que la amplitud de deformación, la compacidad relativa y el número de ciclos de carga son los principales factores que gobiernan la densificación de suelos granulares secos o saturados bajo condiciones drenadas.

A partir de los resultados de los ensayos citados, se puede concluir que los aspectos más importantes relacionados con los cambios de volumen de suelos granulares son los siguientes:

- a.** Los esfuerzos cortantes cíclicos constituyen el medio más efectivo de densificación.
- b.** Para una densidad dada, la intensidad de la aceleración es un parámetro significativo que afecta la velocidad y magnitud de la densificación.
- c.** A mayores esfuerzos verticales, la magnitud de la densificación resulta menor.
- d.** A igualdad de desplazamientos cortantes, la reducción de volumen aumenta con el número de ciclos de carga aplicados.

- e. La densificación sería, aparentemente, independiente de la frecuencia del movimiento.
- f. Con base en los resultados obtenidos a partir de pruebas en mesa vibratoria, Figura 1, se infiere que en la medida que se incrementa la aceleración vertical, se incrementa el peso volumétrico hasta un valor máximo, después del cual el peso volumétrico tiende a disminuir en la medida que se incrementa la aceleración.

**Reducción de la resistencia al esfuerzo cortante (aumento de la presión de poro-licuación).**

Cuando la tendencia a la reducción de volumen de un suelo granular saturado, citada en el punto anterior, ocurre en condiciones tales que la expulsión rápida del agua de los poros está fuertemente restringida, se desarrollan presiones de poro positivas.

La magnitud del incremento de presión de poro depende de la magnitud del cambio de volumen que el suelo tiende a sufrir y del grado de restricción al flujo de agua que ocurre en la masa del suelo, y puede prácticamente igualar a la presión efectiva de confinamiento actuante sobre la misma. De cualquier modo, por el principio de los esfuerzos efectivos, la resistencia del suelo se reduce proporcionalmente al incremento de presión de poro y, en el caso extremo, se anula dando lugar al fenómeno de licuación.

Una fuerte restricción al flujo de agua puede deberse a la baja permeabilidad del suelo mismo, o a su confinamiento parcial o total por otros materiales menos permeables. Estas dos últimas causas,

determinadas exclusivamente por las restricciones de frontera, son las que hacen tan difícil dilucidar si, en el campo, una masa de suelo es susceptible de licuarse en ciertas condiciones de excitación. En consecuencia, el desarrollo de licuación en el laboratorio, en muestras no drenadas, es requisito necesario pero no suficiente para la ocurrencia de licuación del mismo suelo en el campo. (Henriquez Pantaleón, 2007)

### **LICUACION DE SUELOS.**

La licuación es el fenómeno en el cual la resistencia y la rigidez de ciertos suelos, son reducidas por la acción sísmica u otro tipo de carga rápida.

La licuación y fenómenos relacionados a ella, han sido responsables de grandes daños en sismos históricos en todo el mundo. Esta ocurre en suelos teóricamente saturados, es decir, suelos cuyos espacios entre las partículas individuales que lo componen, están completamente llenos de agua. (Henriquez Pantaleón, 2007)

Para entender el proceso de licuación del suelo, es necesario definir dicho fenómeno. Se entiende por licuación la pérdida de esfuerzo en un suelo no cohesivo saturado debido a la acumulación de presiones de agua de poro durante una carga cíclica. Una definición más precisa es la dada por Terzaghi en 1950:

“El arreglo de las partículas de una arena fina o de un limo grueso puede ser tan inestable que una ligera perturbación del equilibrio de los granos ocasiona un rearrreglo de las partículas; en consecuencia las partículas se asientan en posiciones más estables y la porosidad del sedimento decrece.

Quando ocurre este proceso arriba del nivel freático, no tiene más efecto notable que el generar asentamientos en la superficie del terreno. Opuestamente, de ocurrir bajo el nivel freático sus consecuencias pueden ser catastróficas, ya que la viscosidad del agua que ocupa los vacíos de la arena impide un decremento rápido de la porosidad.” (Terzaghi, 1950)

La licuación es el resultado de la tendencia de los suelos a disminuir su volumen cuando han sido sometidos a una carga cíclica. En suelos no cohesivos, la transformación de un estado sólido a líquido es consecuencia del aumento de la presión de poro que disminuye el coeficiente de fricción durante un terremoto.

De manera más general, diversos autores han definido la licuación como la transformación de “un estado sólido a un estado líquido como consecuencia del aumento en la presión de poro y la reducción de la presión efectiva de la masa del suelo”. Por lo tanto, la carga soportada inicialmente en dirección vertical por los puntos de contacto, es ahora soportada por el agua que ocupa los vacíos en el suelo. De esta manera, el suelo pierde su resistencia y se comporta como un fluido. (Rosado, 2010)

Los primeros estudios cuantitativos de este fenómeno pertenecieron, originalmente, al análisis estático de taludes naturales en las márgenes del río Mississippi. Estos habían presentado un comportamiento inestable, provocado por la subida gradual del nivel freático y en algunos casos fluctuaciones en el nivel de marea, modificando las redes de filtración del terreno. A causa de estas variaciones se producían deslizamientos, y el

mismo se detenía cuando el ángulo del talud había alcanzado unos escasos grados. Para explicar este fenómeno Casagrande (1916) propuso el concepto de “Relación de vacío crítica”. Posteriormente, se realizó un estudio extensivo de numerosos deslizamientos a lo largo de la ribera del río Mississippi.

El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos desarrolló métodos empíricos con el objetivo de evaluar la ocurrencia de estos deslizamientos. Durante los últimos 40 años, el estudio de este fenómeno se ha extendido incluyendo el comportamiento del suelo bajo acciones cíclicas ocasionada por vibraciones sísmicas. Aún cuando el resultado final (pérdida de la resistencia del suelo) es el mismo (si éste es causado por una acción dinámica o estática), la tensión de corte que provoca la disminución de la resistencia del suelo bajo condiciones de carga cíclica es mucho menor que la necesaria para causar el mismo efecto bajo condición de carga estática. Las evidencias superficiales más comunes de la ocurrencia del fenómeno de licuación son:

- Los "volcanes de arena".
- Las grietas en el terreno.
- Las pérdidas de capacidad portante.
- Los movimientos laterales.
- Las oscilaciones horizontales del terreno.
- Las fallas de taludes por flujo del terreno. (Henriquez Pantaleón, 2007)



**Factores que directamente influyen en la ocurrencia del fenómeno de la licuación.**

Los factores más importantes, basados principalmente en evidencia experimental de laboratorio, pueden agruparse en las tres categorías que se presentan a continuación:

- Propiedades índice y de estado de los suelos.
- Condiciones iniciales de esfuerzo y de deformación.
- Características de la sollicitación.

Algunos de estos factores, son difíciles de controlar, de manera precisa, en los ensayos de laboratorio e imposible de evaluar fidedignamente en el campo.

**Propiedades índice y de estado de los suelos.**

En esta categoría se ubican características geotécnicas tales como:

**Tipo de suelo.**

En general los suelos uniformemente graduados son más susceptibles de licuarse que los bien graduados. Dentro de los primeros, las arenas finas se licuan más fácilmente que las gravas o suelos arcillosos aluviales.

En suelos bien graduados, al reacomodarse las partículas más pequeñas (llenando los huecos dejados por las partículas más grandes) bajo condiciones drenadas, se produce un menor cambio de volumen, y por ende, un menor incremento en la presión intersticial bajo condiciones no drenadas.

Evidencias en sismos recientes revelan que en la mayoría de casos de licuación han estado involucrados suelos uniformemente graduados.

La forma de las partículas del suelo también puede ser un factor de influencia.

Suelos con partículas de forma redondeadas tienden a densificarse más fácil que los con partículas de forma angulosa. Las partículas de forma redondeadas frecuentemente tienen origen fluvial o aluvial, en donde es común encontrar depósitos de suelos flojos saturados, siendo usualmente la susceptibilidad a la licuación alta.

Se pueden establecer límites en las curvas granulométricas definiendo fronteras que separan los suelos licuables de los no licuables (Figura 1).

La frontera inferior, condicionada por el tamaño de las partículas, muestra la influencia del contenido de finos en la disminución de la tendencia del suelo a densificar. Los finos plásticos hacen más difícil la liberación de las partículas de arena para moverse unas con respecto a otras, buscando un arreglo más denso. Por lo tanto, el contenido de finos es un elemento importante en la ocurrencia o no de licuación y éste ha sido tomado en cuenta en los métodos de predicción "In Situ". La frontera superior es significativa, porque está asociada a la permeabilidad de materiales más gruesos. De esa manera, incrementando la permeabilidad, se incrementa la capacidad de drenaje, por ende, la velocidad con que se pueden disipar las presiones intersticiales. (National Research Council, 1985)

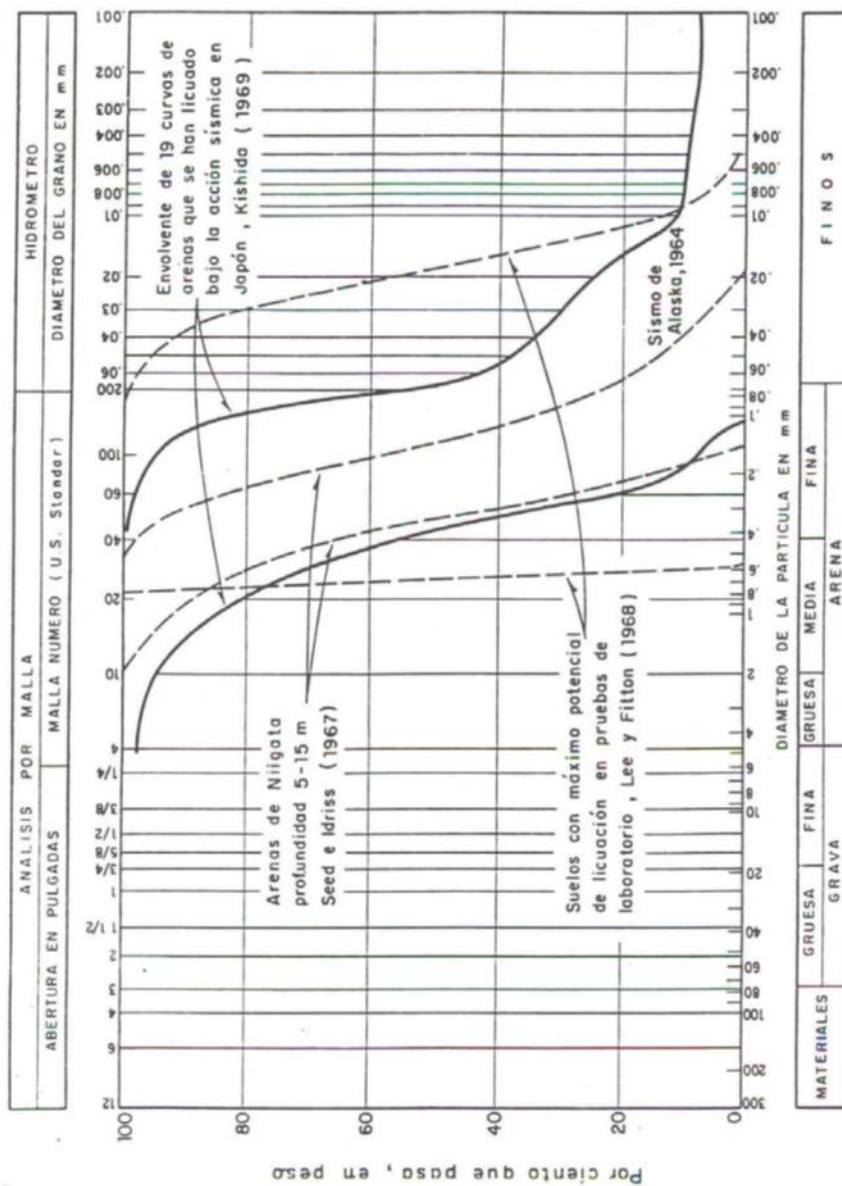


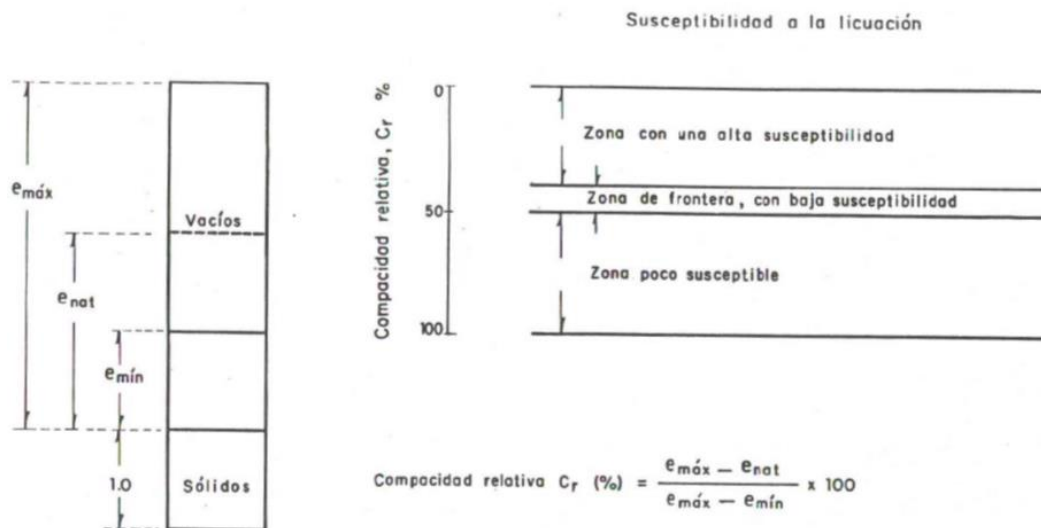
Figura 1, granulometría de algunos suelos que han licuado.

### Compacidad relativa (Cr) - relación de vacíos (e).

Una arena suelta es más susceptible de licuarse que una arena densa. En sismos previos, se han licuado suelos cuya compacidad relativa o densidad relativa (Cr) era del orden del 50 por ciento o menor (indicativa de alta susceptibilidad a cambios de volumen). Por el contrario, en arenas con una

Cr del orden del 70 por ciento o mayor, no se produjo este fenómeno. En la Figura 2 se ilustra el concepto de compacidad relativa.

La densidad relativa puede ser reproducida aproximadamente en laboratorio usando muestras reconstruidas, sin embargo, en situaciones típicas de campo, donde el suelo tiene estratificaciones complejas, ésta aproximación pierde su significado.



**Figura 2,** concepto de compacidad relativa

### Condiciones iniciales de esfuerzo y de deformación.

Corresponden a las características de la historia previa de esfuerzos o de deformaciones que ha soportado el suelo, como por ejemplo:

#### Esfuerzo confinante inicial.

La susceptibilidad a la licuación disminuye al aumentar el esfuerzo confinante.

Los ensayos de laboratorio han permitido comprobar que para una misma relación de vacíos inicial, el esfuerzo cortante requerido para comenzar la licuación bajo condiciones de carga repetida, se incrementa con el aumento de la presión de confinamiento (Figuras 2 y 3).

Debido a lo anterior, y a las evidencias de campo con que se cuenta, se puede decir que difícilmente se presenta el fenómeno de licuación a profundidades superiores a los 20 metros.

Dada la dificultad de estimar el confinamiento lateral en campo, la tensión efectiva vertical es usada para definir el nivel de confinamiento. (Kanamori, 1977)

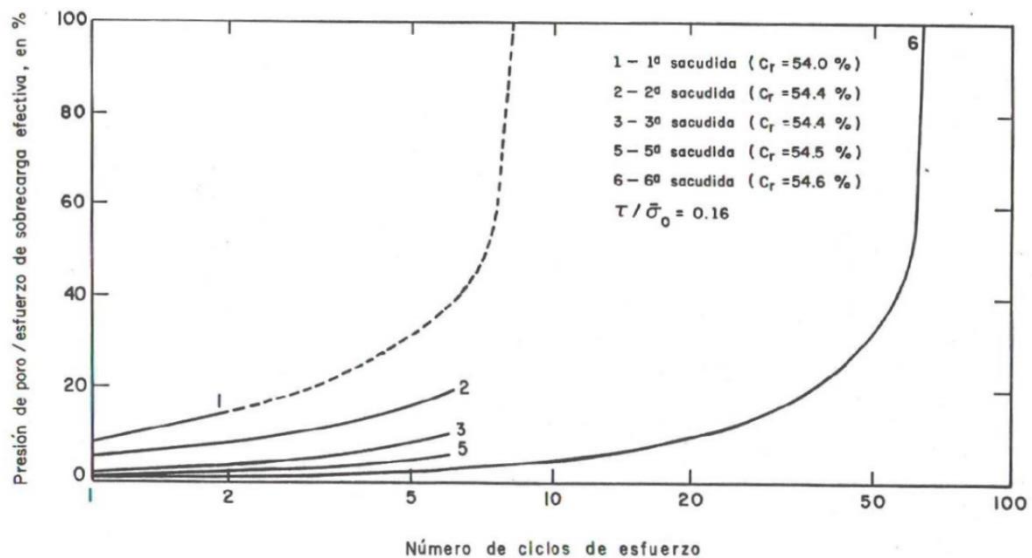
#### **Lapso de esfuerzo sostenido.**

Experiencias de laboratorio indican que muestras idénticas sometidas a cargas sostenidas por períodos que variaron de 0,1 a 100 días antes del ensayo, sufrieron en función del tiempo, aumentos de hasta un 25 por ciento en el valor de la relación de esfuerzos cíclicos que produce licuación. Lo anterior se debe a que aparentemente, para un mismo volumen, con el tiempo se hace más fuerte el contacto entre las partículas.

#### **Historia previa de deformaciones.**

Este importante factor fue señalado por primera vez por (Finn & Bransby, 1970), quienes comprobaron por medio de experiencias en laboratorio, que las características del fenómeno de licuación es influido por la historia previa de deformaciones. Por otro lado, los resultados de experimentos en los cuales muestras de arena se sometieron previamente a una serie de

vibraciones de pequeña amplitud, permitieron a (Seed, Mori, & Chan, 1975) verificar que por efecto de la historia sísmica se incrementa considerablemente la resistencia a la licuación (Figura 3). En otras palabras, de acuerdo con la evidencia experimental con que se cuenta, se puede afirmar que para un número de ciclos dados, las muestras de arena sometidas a perturbaciones previas que inducen esfuerzos o deformaciones de bajo nivel, requieren una relación de esfuerzos cíclicos mayor para licuarse.



**Figura 3,** Efecto de la historia sísmica sobre las características de licuación de una arena

### Características de la sollicitación.

#### Magnitud del esfuerzo repetido.

Cualquier suelo granular con una relación de vacíos mayor que la mínima es susceptible de sufrir pérdida parcial o total de resistencia, si la excitación es de intensidad suficiente.

Los terremotos generan componentes de la aceleración y por ende tensiones en las tres direcciones principales. La tensión más crítica, desde el punto de vista de la licuación, surge de la propagación vertical de las ondas tangenciales horizontales. La componente vertical no se considera de importancia, porque son de naturaleza dilatante y serán completamente absorbidas por la presión intersticial.

#### **Número de ciclos de esfuerzo.**

A través de estudios de laboratorio, se ha podido observar que en una muestra sujeta a carga repetida, con un nivel de esfuerzo o de deformación definido, el inicio de la licuación dependerá de la aplicación de un número de ciclos de esfuerzo adecuado a cada caso (Figura 3). Esto tuvo su confirmación “in-situ”, durante el terremoto de Alaska de 1964, ya que allí los deslizamientos ocurrieron después de 90 segundos de comenzado el sismo. (Henriquez Pantaleón, 2007)

#### **Proceso de licuación.**

Es un fenómeno complejo, aún no es muy claro y bien comprendido cómo ocurre, por lo que se tienen diferentes interpretaciones. Sin embargo, una manera simple de describirlo es la siguiente:

Un depósito de suelo consiste en un grupo de partículas individuales, cada una de ellas se encuentra en contacto con otras circundantes. Las partículas apoyadas entres sí producen fuerzas de contacto que las mantienen juntas y en su lugar, derivando en la estabilidad del suelo y proporcionándole resistencia.

Si se tiene un grupo de partículas de suelo no cohesivo, suelto y saturado, y se le aplica una carga violenta se genera la ruptura de su estructura. Al deteriorarse la estructura, las partículas se mueven libremente buscando la manera de formar una estructura más densa.

Durante un sismo la aplicación de la carga es rápida y espontánea, no se da tiempo a que la estructura se reacomode lentamente y se expulse el agua contenida en los poros. Esto se ve acompañado de un incremento en la presión del agua (provocando la reducción de fricción entre partículas), al grado en que el suelo comienza a ablandarse y perder resistencia.

Las fuerzas de contacto entre partículas se vuelven mínimas debido sobre todo a la alta presión del agua. En casos extremos, la presión de agua es tan grande que las partículas se ven separadas y comienzan a moverse libremente en ésta, comportándose como un líquido viscoso más que como sólido.

Antes de un terremoto, la presión del agua es relativamente baja. Al ocurrir un sismo, la presión del agua puede ser tan grande, que como se mencionó previamente, las partículas tengan la libertad de moverse, para posteriormente reacomodarse de manera estable (figura 1.2). Actividades como voladuras o aquellas relacionadas con vibraciones del suelo también pueden generar un aumento en la presión del agua y por lo tanto fallamiento de éste. (Ambraseys, 1969)



**Métodos existentes para evaluar el peligro por licuación del suelo por sismo.** Dependiendo del caso de estudio, la mayoría de los autores se inclinan por calcular la susceptibilidad de un área a presentar licuación haciendo modificaciones a tres métodos preexistentes, aclarando que no son los únicos, el cálculo del Índice Máximo de Licuación, el método propuesto por Youd y Perkins (1978) o el método propuesto por Seed e Idriss (1971), recientemente, también se ha expandido el uso del cálculo de la velocidad de ondas  $s$  como indicador de posible licuación. Cabe aclarar que cada autor adapta el método de cálculo acorde al área y los datos con los que cuenta. A continuación se dará una breve explicación de estos métodos.

#### **Índice máximo de licuación.**

El Índice Máximo de Licuación, llamado LSI por sus siglas en inglés (Liquefaction Severity Index), es un método de grado 1, de manera general es una medida del desplazamiento del suelo medido en pulgadas. Está basado en el desplazamiento

lateral de depósitos deltaicos y fluviales del Holoceno (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering TC4, 1993)

Para seleccionar el ambiente geológico, el LSI se normaliza con respecto a las condiciones propias de cada sitio, principalmente el movimiento del terreno. El movimiento del terreno puede quedar en función de la aceleración pico del suelo o la velocidad pico del suelo y la duración del movimiento.

(Youd T. L., 1987) propone los factores de deformación del suelo por licuación, que deberían tomarse en cuenta al calcular el LSI.

**Método propuesto por Youd y Perkins.**

Se trata de un método cualitativo en el que se requiere la compilación de dos mapas que arrojaran un tercero. El primer mapa consiste en áreas de posible fallamiento del suelo. El fallamiento del suelo es una función de la sismicidad del área y el radio de ocurrencia de un sismo de intensidad suficiente como para causarlo, esto en un área con materiales susceptibles a la licuación. Si se toma en cuenta un periodo de recurrencia de este tipo de fenómenos, se puede tener un mapa en términos de probabilidades. La información mínima requerida para hacer un mapa de posible fallamiento del suelo es la localización y frecuencia de la ocurrencia de sismos que igualmente tengan una magnitud y distancia desde su epicentro hasta las zonas en donde puede inducir licuación del suelo.

**Tabla 4,** *Influencia de varios factores en la susceptibilidad de licuación, L, y la*

Factor	Influencia	Valor por LSI
<b>Factores sismológicos</b>		
<b>Intensidad del movimiento</b>	L y X incrementan con la intensidad	-
<b>Duración del movimiento del suelo</b>	L y X incrementan con la duración del movimiento	-
<b>Factores sedimentológicos</b>		
<b>Espesor del estrato licuable</b>	L y X generalmente incrementan con el espesor	Mayor de 3 m
<b>Área de la zona susceptible a la licuación</b>	X generalmente incrementa con la extensión del área	Capa continua bajo un área mayor
<b>Confinamiento del estrato por sedimentos impermeables</b>	L y X incrementan con el drenaje lento	No especificado

<b>Edad de los sedimentos</b>	L decrece con la edad del sedimento	Holoceno tardío
<b>Litificación y sedimentación</b>	L y X decrecen con la litificación y cementación	No cementado
<b>Modo de emplazamiento</b>	L y X decrecen con altas energías en el emplazamiento	Depósitos fluviales o de otro tipo por o en agua
<b>Factores topográficos</b>		
<b>Pendiente del terreno</b>	L y X decrecen o incrementan dependiendo de si el sedimento es contractivo o dilatativo	Pendientes de entre 0.5 y 5%
<b>Cercanía de la superficie libre</b>	X generalmente incrementa con la cercanía de la superficie libre	No especificado
<b>Factores Hidrológicos</b>		
<b>Nivel freático</b>	L y X decrecen con la profundidad del nivel freático	Profundidad menor o en 3 m aproximadamente
<b>Presión artesiana</b>	L y X incrementan con la presión artesiana	Menor que 0
<b>Factores ingenieriles</b>		
<b>Tamaño de grano de sedimento</b>	L es mayor en arenas limpias que en arenas sucias	Suelos granulares no cohesivos
<b>Densidad relativa del sedimento</b>	L y X decrecen con el incremento de la densidad o la resistencia a la penetración	$2 < N_1 < 10$
<b>Fábrica o empaque de arreglo</b>	L se ve influenciada por el empaquetamiento o la fábrica	No especificado

*Fuente:* El autor (2018).

El segundo mapa es un mapa de susceptibilidad a fallamiento del suelo, éste se basa en la geología del lugar y la susceptibilidad de estos a presentar licuación. Es importante marcar las zonas más susceptibles a fallar como serían sedimentos mal graduados, de origen fluvial y perteneciente al Holoceno.

### **Mapa de Fallamiento del suelo.**

El mapa de fallamiento del suelo se hace de manera similar a uno de riesgo sísmico. Las fuentes sísmicas son divididas en áreas fuente y fallas, la actividad sísmica en ambos casos se considera constante. Se estima que la energía liberada durante un sismo en un área fuente se distribuye de manera uniforme sobre el área afectada. Para las fallas, cualquier sismo tiene una posición definida, pero en este caso se asume que su posición es toda la falla. Hay que puntualizar, que los autores suponen que la energía liberada durante un sismo dado no pasará más allá de la frontera del área o falla fuente donde ocurre.

Para un punto dado, la posibilidad de que falle el suelo debido a una fuente dada es calculada de la siguiente manera. Se calcula la distancia entre el punto a evaluar y el centro del área fuente, el cual representa el punto de energía liberada. Para cada rango de magnitudes dadas de la sismicidad de las áreas fuente se considera el valor medio de dicho rango.

### **Mapa de susceptibilidad a presentar agrietamientos y/o asentamientos.**

Este resulta más fácil de realizar que el mapa de fallamiento del suelo, Youd y Perkins (1978) proponen tomar en cuenta principalmente las características geológicas de la región de acuerdo a la tabla 3.2. En ella se presentan los factores a considerar acorde a la edad del depósito, ésta se divide en cuatro periodos. Se observa que los depósitos de menos de 500 años y aquellos correspondientes al Holoceno presentan una mayor

susceptibilidad que aquellos del pleistoceno o prepleistoceno, quizá debido a un mayor asentamiento. Además, las zonas de playa o relacionadas con depósitos de ríos de baja energía son las que presentan mayor posibilidad de licuación.

La combinación de un mapa con el reconocimiento de zonas geológicas susceptibles a licuación del suelo y el mapa de fallamiento darán como resultado un tercer mapa. Este último es el mapa de susceptibilidad de licuación, que era la relación que se quería encontrar. (Youd T. L., 1978)

**Tabla 5,** Susceptibilidad *de suelos a sufrir licuación de arenas acorde a Youd y Perkins (1978).*

	DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS NO COHESIVOS	SUSCEPTIBILIDAD DE ACUERDO A LA EDAD DEL DEPÓSITO			
		Menos de 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre pleistoceno
<b>DEPÓSITOS CONTINETALES</b>					
<b>Canal de río</b>	Localmente variable	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
<b>Llanura de inundación</b>	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Abanicos y planos aluviales</b>	Dispersos	Moderada	Baja	Baja	Muy baja
<b>Terrazas y planos marinos</b>	Dispersos	-	Baja	Muy baja	Muy baja
<b>Delta y abanico delta</b>	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Lacustre y playa</b>	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Bases de laderas</b>	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Talud</b>	Dispersos	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
<b>Dunas</b>	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Loess (deposito eólico)</b>	Variable	Alta	Alta	Alta	Muy baja
<b>Depósitos glaciares</b>	Variable	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
<b>Tuff (roca compuesta de cenizas y polvo volcánico endurecido)</b>	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
<b>Tefra (material volcánico de precipitación)</b>	Dispersos	Alta	Alta	?	?
<b>Residuos sólidos</b>	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
<b>Sebka</b>	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>AMBIENTES COSTEROS</b>					
<b>Delta</b>	Dispersos	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
<b>Estuario</b>	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja

<b>Playa alta energía</b>	Dispersos	Moderada	Baja	Muy baja	Muy baja
<b>Playa baja energía</b>	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Laguna</b>	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>Orilla de costa</b>	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<b>AMIBENTES ARTIFICIALES</b>					
<b>sedimentos no compactados</b>	Variable	Muy alta	-	-	-
<b>Sedimentos compactados</b>	Variable	Baja	-	-	-

*Fuente:* El autor (2018).

### **Método simplificado de Seed e Idriss.**

Tomando en cuenta el tipo de suelo, la densidad relativa, la presión de confinamiento inicial, la intensidad del movimiento sísmico y su duración, Seed e Idriss (1971) proponen un método para evaluar la susceptibilidad de un suelo a licuarse. A continuación, se explicara brevemente en qué consiste.

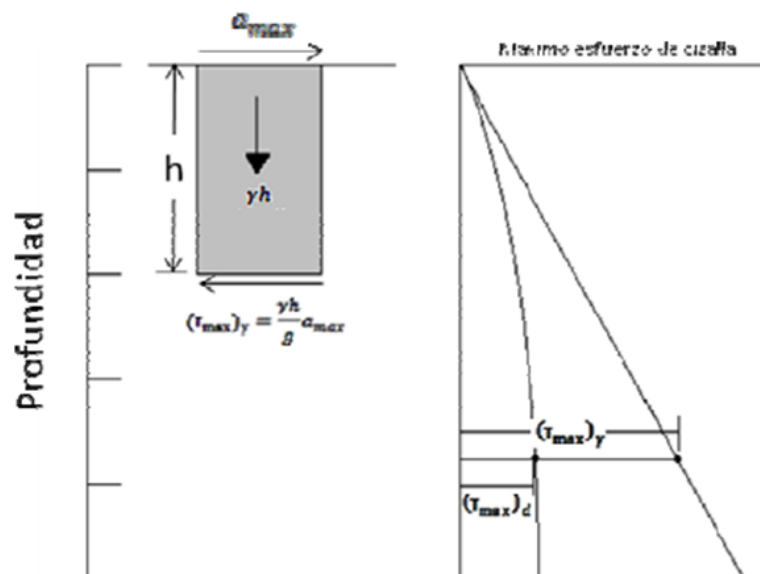
Después de establecer todas las condiciones de suelo y del supuesto evento, se determina el tiempo que duran los esfuerzos de cizalla a que este es sometido a diferentes profundidades.

Considerar los ciclos de esfuerzos provocados por el sismo como si fueran uniformes, además de graficarlos en función de la profundidad. Para ello se considera la intensidad del movimiento del suelo, la duración temporal del evento y la variación de los esfuerzos de cizalla con la profundidad de interés.

Tomar muestras de estratos a diferentes profundidades en el área de interés. Someter estas muestras a pruebas de compresión tomando en cuenta las presiones de confinamiento iniciales en campo. Tomando en

cuenta los ciclos de esfuerzos provocados por el sismo, calcular en laboratorio un número de ciclos similar o aproximado a este que provoquen la licuación de la muestra. Para ello deben considerarse factores como el tipo de suelo, condiciones de emplazamiento y condiciones iniciales de esfuerzo efectivo.

Para comparar los esfuerzos de cizalla del sismo con los requeridos para causar licuación, determinar los depósitos en que se espera que pueda ocurrir licuación. Si se tratan esfuerzos diferentes a varias profundidades, se puede hacer un análisis de la respuesta del suelo. (Seed H. e idriss, 1971)



**Figura 4,** Variación de los esfuerzos de cizalla con la profundidad

### Términos Básicos.

**Licuefacción.** La licuefacción describe el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas

circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado. Es uno de los fenómenos más dramáticos y destructivos y, además, más polémicos y peor explicados que pueden ser inducidos en depósitos por acciones sísmicas.

**Sismo.** El sismo es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producida por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. Los más comunes se producen por la actividad de fallas geológicas.

**Suelo.** Suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas. Desde el punto de vista ingenieril se diferencia del término roca al considerarse específicamente bajo este término un sustrato formado por elementos que pueden ser separados sin un aporte significativamente alto de energía.

**Zonas de riesgo.** Son los lugares más propensos a sufrir el fenómeno de licuefacción en una zona determinada.

### III. CONCLUSIÓN

En la presente investigación se establecen las bases teóricas para determinar las zonas de riesgo de licuación de suelos en la ciudad de Trujillo. Para ello, se han analizado los contenidos tomados como referencia de las diversas publicaciones y de Tesis referidas al tema de zonas de riesgo de licuación de suelos.



#### IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Carrillo Gil, L. A. (2008). LICUACIÓN DE SUELOS DURANTE EL SISMO PISCO-PERU-2007. Lima: Sixth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.
- Alarcón. (1989). Física de la Tierra. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Ambraseys, N. y. (1969). Liquefaction of soils induced by earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America,.
- ANTÓN ALIAGA VOPILOVSKY, L. D. (2015). "ANÁLISIS DE LICUACIÓN DINÁMICA DE UNA. Lima: UPC.
- Bravo, C. Y. (02 de 12 de 2015). GEOLOGIA. Obtenido de Semana 14: "Movimientos Sísmicos":  
<http://geologiabravo.blogspot.pe/2015/12/semana-14-movimientos-sismicos.html>
- Brenes Quesada, F. (2008). Evaluación del Potencial de Licuefacción en Suelos. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Finn, W., & Bransby, P. a. (1970). Effect of Strain History on Liquefaction of Sands. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE.
- Henriquez Pantaleón, C. I. (2007). Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hurtado, J. A. (1994). Licuación de suelos en el Perú. Lima: UNI.

- Hurtado, J. E. (1983). Breve Historia del fenómeno de licuación de suelos en el Perú. Lima.
- Ishihara. (1996). soil behaviour in earthquake geotechnics. New York: Oxford University.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes: Journal of Geophysical Research,. Japón.
- Kuribayashi, E., & Tatsuoka, F. (1975). Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- LUCAS, L. E. (2011). INVESTIGACIÓN DE LA MATRÍZ EN LAS GRAVAS DEL PERÚ. Lima: UNI.
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. Física de la tierra, No. 1, Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Mussio Arias, V. (2012). Potencial de Licuación mediante el método de microtemores en la colonia solidaria social Mexicali. México.
- National Reseach Council. (1985). "Liquefaction of soils during earthquake". Washington USA, 1985: Committee on Earthquake Engineering, commission on engineering and technical system.
- Rosado, D. (2010). Metodología para la evaluación del peligro por licuación del suelo, inducido por sismo, usando un sistema de información geográfica. Mexico.
- S.S., T. M. (1997). Northringe California earthquake of 1994. California.



- Seed H. e idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE.
- Seed, H., Mori, K., & Chan, C. (1975). Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands. Berkeley, California: University of California.
- T. L. Youd, M. A. (2001). RESISTENCIA DE SUELOS CONTRA LA LICUACION. ASCE.
- Technical Comitte for Earthquake Geotechnical Engineering TC4. (1993). Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. Japón: The Japanese Society of Mechanics and Foundation Engineering.
- Terzaghi. (1950). Mecánica de Suelos.
- Youd, T. L. (1978). Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential. Journal of Geotechnical Engineering Division.
- Youd, T. L. (1987). Mapping of Liquefaction Severity Index. Journal of Geotechnical Engineering.

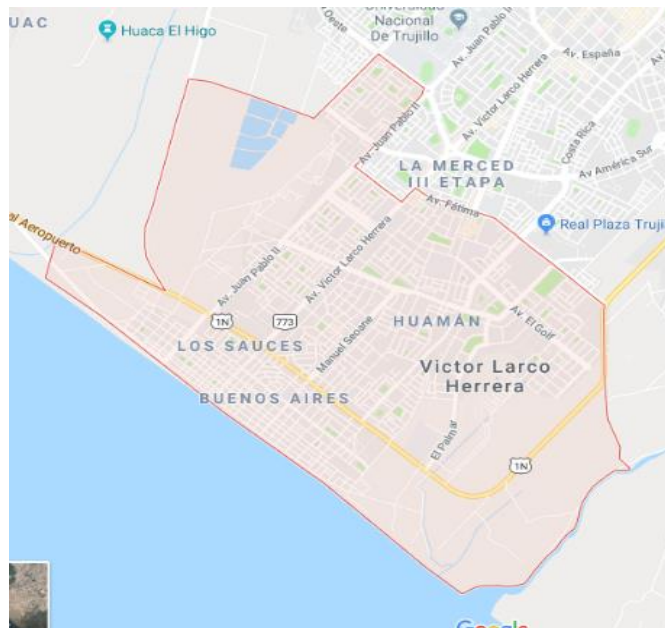
V. ANEXO




Guía de observación de licuación de suelos en la Ciudad de Trujillo.

**Guía de Observación**

Punto N° \_\_\_\_\_

Profundidad	CSR	CRR
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA
		LICÚA



-  NO LICÚA
-  LICÚA HASTA 5 METROS
-  LICÚA