

Evaluación de la validez de los indicadores que condicionan la licuefacción de suelos

Assessment of indicators validity conditioning soils liquefaction

Roxana Sanamé-Almira^{1*}, Daniel Núñez-Elías²

¹Centro de Investigaciones del Níquel, Holguín, Cuba.

²Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Ciudad de México, México.

*Autor para la correspondencia: rsaname@cil.moa.minem.cu

Resumen

La validación matemática constituye una herramienta óptima para estudiar los hechos científicos. Uno de los fenómenos naturales más catastróficos inducidos por un sismo, que permite ser evaluado desde el campo matemático, es la licuefacción de suelos. La presente investigación surge por la necesidad de validar matemáticamente el sistema de indicadores utilizado en la evaluación del potencial licuable de suelos, propuesto por Fernández (2015), para su utilización efectiva y eficaz en la delimitación de escenarios susceptibles a este fenómeno natural. Se planteó como objetivo evaluar la validez del sistema de indicadores como primer paso en el proceso de validación matemática. Se contó, como material de estudio, con la tesis de maestría de Fernández (2015) titulada Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio: Caimanera y Santiago de Cuba. El método utilizado en la comprobación de la validez fue el coeficiente de concordancia de Kendall. Se empleó, además, el software SPSS Statistics Viewer (versión 25). Se concluyó que el sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) no cuenta con un proceso matemático de validación para consolidar su utilidad según el fin con que fue diseñado. La aplicación del coeficiente de Kendall demostró la no concordancia entre los criterios asignados a los autores por parte de Fernández (2015) para un valor=0,189. Para la validación efectiva del sistema de indicadores se sugiere tener en cuenta el método Delphi, la redefinición de las características de los indicadores, la correspondencia entre el área de estudio y la representatividad de la muestra.

Palabras clave: validez; sistema de indicadores; licuefacción de suelos; coeficiente de Kendall

Abstract

Mathematical validation is an ideal tool for studying scientific facts. The liquefaction of soils is one of the most catastrophic natural phenomena caused by an earthquake, which can be evaluated from the mathematical field. This research comes up from the need of validating numerically the system of indicators used in evaluating the potential for liquefaction soils, proposed by Fernández (2015), for its effective and efficient use in defining sensitive scenarios to this natural phenomenon. The purpose of this research is to evaluate the validity of indicator system as a first step for the mathematical validation process. The study material included the master thesis of Fernández (2015) entitled *Liquefaction of soils generated by large-scale earthquakes. Case study: Caimanera and Santiago de Cuba*. The method used for validating check was Kendall concordance coefficient. In addition, SPSS Statistics Viewer (version 25) was used. It was concluded that the system of indicators proposed by Fernández (2015) lacks a mathematical validation process to consolidate its usefulness according to the purpose for which it was designed. Applying of Kendall's coefficient showed that there is no agreement between the assigned criteria to the authors by Fernández (2015) for a value of 0.189. It is suggested to consider the Delphi method for validating indicator system effectively, that account should be taken of the Delphi method, to redefine characteristics of indicators, the correspondence between the area of study and the representativeness of the sample.

Keywords: validity; indicator system; soil liquefaction; Kendall coefficient

1. INTRODUCCIÓN

Los saberes adquiridos sobre un fenómeno natural determinado evolucionan desde un conocimiento empírico de sus características hasta la elaboración de una teoría científica sólida que los convierta en ley. Esta evolución debe ser mediada por un conjunto de métodos objetivos y rigurosos que validen cuantitativamente los resultados de la experimentación de forma que se ofrezca un acercamiento crítico de la realidad sin dejar de cuestionarla permanentemente y sin detenerse en lo aparente ni en lo sensorial. De aquí que la primera característica que debe tener el conocimiento científico es su objetividad, dada por el hecho de que sea válido para todos.

A lo largo de la historia de la ciencia ha surgido la necesidad imperante de validar los conocimientos. Cuantiosas han sido las vías para lograr este fin, pero se impone la veracidad de un proceso que demuestra con datos exactos el fundamento de los planteamientos científicos: la validación matemática.

La validez es un criterio de evaluación utilizado para determinar cuán importantes son la evidencia empírica y los fundamentos teóricos que respaldan un instrumento, examen o acción realizada. También, es entendida como el grado en que un instrumento, encuesta o sistema mide lo que pretende medir (evaluar) o que cumple con el objetivo para el cual fue construido, este criterio es fundamental para considerar válida una prueba (Urrutia *et al.*, 2014).

La validación de un método o procedimiento es el proceso para confirmar que el procedimiento analítico utilizado para una prueba en concreto es adecuado para su uso previsto. Los resultados de la validación del método pueden utilizarse para juzgar la calidad, la fiabilidad y la constancia de los resultados analíticos, se trata de una parte integrante de cualquier buena práctica analítica (Huber, 2007).

Dentro de la ciencia geológica, uno de los fenómenos naturales más catastróficos inducidos por un sismo, que permite ser evaluado desde el campo de la matemática, es la licuefacción de suelos. Su efecto consiste en la pérdida de resistencia de suelos poco cohesivos que cambian de estado sólido a líquido, esto se debe a la saturación de agua entre los poros por el aumento de la presión resultante de fuertes vibraciones sísmicas (Figura 1).

Cuando ocurre un terremoto, las ondas sísmicas se propagan desde el foco o hipocentro en todas las direcciones a través de lo que se denomina el medio de propagación. Este medio está formado por todos los estratos e irregularidades que existen bajo la superficie de la tierra y cuyo efecto sobre la señal se manifiesta en una modificación de su contenido frecuencia y de su amplitud. La señal pierde energía conforme avanza hacia la superficie. Sin embargo, es precisamente cerca de la superficie cuando esta situación se invierte, pues la amplitud tiende a aumentar como resultado de la baja impedancia característica de cuencas sedimentarias, zonas de relleno y valles aluviales.

Los sitios en roca, tales como afloramientos de intrusivos, calizas y lavas no producen una amplificación tan importante como es el caso de materiales menos consolidados, pero cierto nivel de amplificación ha sido detectado en tales ambientes (Steidl *et al.*, 1996). Este fenómeno es conocido como efecto de sitio y modifica el registro sísmico en su contenido frecuencial, amplitud y duración (Moya-Fernández, 2009). A ello se suma la licuefacción de suelos pobremente consolidados cuando el nivel freático se encuentra cercano a la superficie, pues la amplificación de las ondas sísmicas, bajo estas condiciones, acelera el movimiento de partículas comprimidas por el agua y provoca la inestabilidad del terreno (Figura 2).

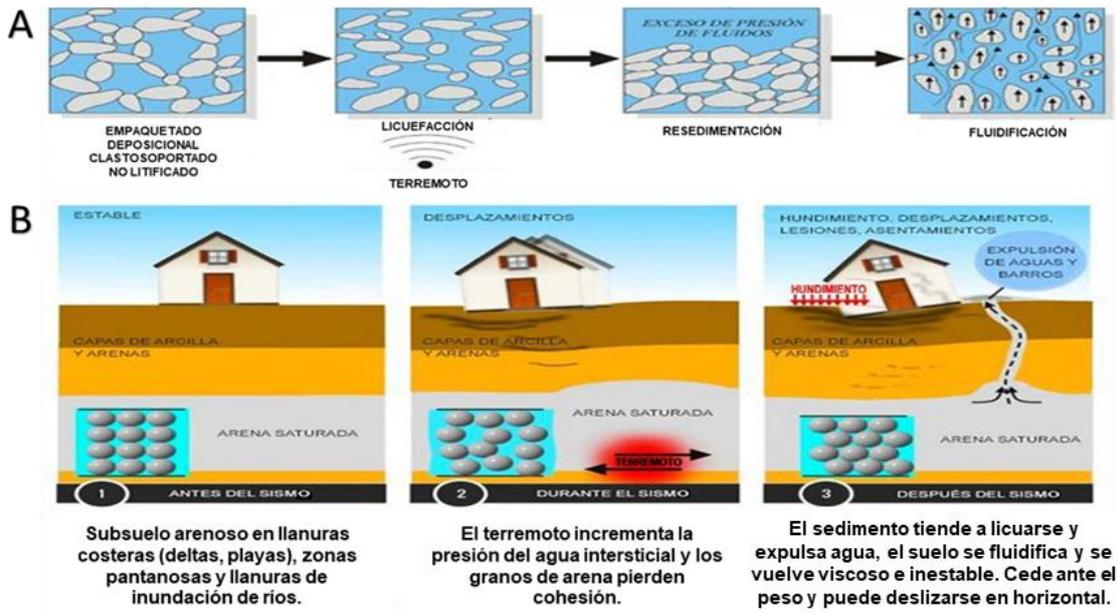


Figura 1. A: Esquema de la secuencia de procesos de licuefacción y fluidificación de un sedimento poco compactado, saturado de agua, a consecuencia de una sacudida sísmica (Masana *et al.*, 2011). B: Efectos de la licuefacción y fluidificación de terrenos producidas por un movimiento sísmico (<https://www.geosec.es>).

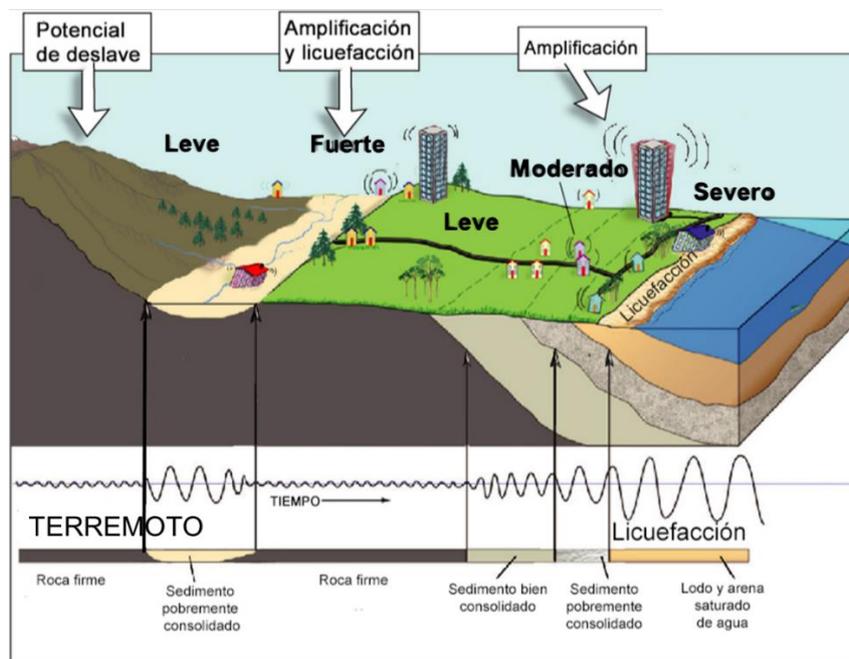


Figura 2. Influencia del efecto de sitio en la licuefacción del suelo (<http://reportesolar.com>).

Los estragos que acarrea este fenómeno son alarmantes, puesto que eleva el grado de vulnerabilidad con sus efectos. El impacto de ello se traduce en problemas como: inclinación, arrastre o colapso de estructuras, ruptura de tuberías de distribución de agua y gas, desprendimiento de cables eléctricos

subterráneos de servicio público y desplazamiento lateral del terreno en depósitos deltaicos y de playa; sin dejar de aludir a la irreparable pérdida de vidas humanas como consecuencia del gran volumen de material licuado que las ha sepultado súbitamente (Figura 3). Dadas estas circunstancias, se hace apremiante el estudio minucioso de la licuefacción de suelos para tener en cuenta la percepción del riesgo de desastres.



Figura 3. Efectos de la licuefacción de los suelos para el hombre. (<https://concienciaradio.com>).

Desde 1969 a nivel mundial han sido numerosas las metodologías propuestas por autores (Kishida, 1969; Seed & Idriss, 1971; Yegian & Whitman, 1978; Iwasaki, 1978; Wang, 1979; Tokimatsu & Yoshimi, 1981, 1983; Iwasaki *et al.*, 1982; Seed, 1982; Seed *et al.*, 1983; Youd & Idriss, 2001; Seed *et al.*, 2003) para cuantificar la licuefacción. Su empeño se ha orientado a la evaluación de la composición, el estado y la capacidad de resistencia de los suelos; se recurre a diferentes pruebas como: penetración estándar (SPT), penetración con cono (CPT), velocidad de ondas de corte (V_s) y penetración Becker (BPT).

En el ámbito nacional es de destacar que Fernández (2015) en su trabajo *Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba*, apoyada en el fundamento de investigaciones anteriores, presentó una metodología más global como aporte a este cuadro investigativo, la cual consistió en la propuesta de un sistema de indicadores para la evaluación del potencial de licuefacción de los suelos, donde se atiende de forma específica la influencia de indicadores determinantes en el alto grado de susceptibilidad de suelos al fenómeno.

En este estudio la autora selecciona, según su criterio, los indicadores más importantes de los analizados por algunos autores de las metodologías mencionadas y otros que han tributado a esta línea de investigación; el problema radica en la ausencia de un proceso de validación que convierta el sistema de indicadores propuesto en una herramienta con peso cuantitativo sólido para consolidarse como herramienta eficaz para la cuantificación del

potencial de licuefacción para los escenarios que se consideran susceptibles al fenómeno.

Sobre la base de esta metodología, a fin de contribuir con la optimización de los estudios de la licuefacción de suelos, la presente investigación encuentra necesaria la propuesta de un mecanismo de validación de dicho sistema de indicadores desde la perspectiva matemática, con lo cual se asegura el análisis del fenómeno con mayor exactitud mediante la jerarquización de los indicadores.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Para la elaboración de este trabajo se utilizó como material la tesis de maestría de Fernández (2015) titulada *Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba*. En su investigación, la autora propone un sistema de indicadores para evaluar el potencial licuable de los suelos sobre la base de cuatro indicadores que, en su consideración, son los más representativos de la realidad del fenómeno en estudio, a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva de las consideraciones metodológicas que sobre el tema han realizado varios autores en la arena internacional. Esta metodología no ha sido sometida a un proceso de validación que consolide su utilidad para el fin con que fue diseñada. A pesar de esto ha sido puesta en práctica en 11 tesis de grado encaminadas a evaluar el potencial licuable de los suelos en diferentes partes del oriente cubano.

2.2. Método de validación aplicado (Coeficiente de Kendall)

El coeficiente de Kendall es una de las técnicas no paramétricas para medir el grado de correlación entre las variables de una muestra, a partir de la asociación entre varios conjuntos de rangos (k) de N entidades.

En la prueba estadística, el coeficiente de concordancia de Kendall (W) ofrece el valor que posibilita decidir el nivel de concordancia entre los expertos. El valor de W oscila entre 0 y 1, donde 1 significa una concordancia de acuerdos total y el valor 0 un desacuerdo total. La tendencia al valor 1 es lo deseado, ello permite realizar nuevas rondas si en la primera no se alcanza significación en la concordancia.

Para la determinación del coeficiente de Kendall se empleó el software *SPSS Statistics Viewer* (versión 25), que es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y aplicadas, así como en las empresas de investigación de mercado. Constituye uno de los programas estadísticos más

conocidos por su capacidad para trabajar con bases de datos y una sencilla interfaz para la mayoría de los análisis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Origen de los datos

El sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) fue el resultado de una revisión bibliográfica tradicional exhaustiva de las publicaciones realizadas sobre la temática de la licuefacción de los suelos. La autora propone cuatro indicadores que, a consideración suya, son comunes en los criterios de todos los autores consultados y le asigna valores en una escala de 0-3, donde se considera: 0-No lo tiene en cuenta, 1-Bajo, 2-Medio, 3-Alto (Tabla 1).

La principal limitación de las revisiones tradicionales viene dada por la subjetividad del revisor para determinar tanto los estudios seleccionados como la importancia relativa con la que se valoran sus resultados. Tras una búsqueda más o menos exhaustiva de los trabajos sobre el tema de interés, cada investigador suele aportar su particular visión global o síntesis de la cuestión, muy probablemente influenciado por aquellos autores o trabajos que le parezcan más relevantes o cercanos a su propia posición teórica. En consecuencia, el resultado de una revisión tradicional va a estar sesgado por la experiencia y perspicacia del investigador, sus opiniones personales, preferencias, creencias previas y el estilo personal con el que aborde la revisión.

Los indicadores (que a la vez son factores que favorecen la licuefacción) establecidos luego, son cuantitativos y representan características medibles (variables) del fenómeno en estudio. Son ellos:

- Condiciones geológicas
- Profundidad del nivel freático
- Sismicidad
- Condiciones ingeniero-geológicas.

Tabla 1. Análisis de los criterios de los autores consultados y valores asignados

Autores	Indicadores	Valoraciones	Puntuaciones
Bodenbender (1894)	CG	Tipo de suelo	2 (Media)
	PNF	Proximidad del agua subterránea a la	3 (Alta)

	S	Epicentro, intensidad y magnitud del sismo	2 (Media)
	CIG	Forma de las partículas	1 (Baja)
Seed & Idriss (1971)	CG	Tipo de suelo	2 (Media)
	PNF	Presión del agua en los poros	3 (Alta)
	S	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas	3 (Alta)
	CIG	Composición del suelo, % de finos, LL y	3 (Alta)
Wang (1979)	CG	Tipo de suelo	1 (Baja)
	PNF	...	0
	S	...	0
	CIG	% finos, LL, IL, forma de las partículas	3 (Alta)
Tokimatsu & Yoshimi (1981, 1983)	CG	Tipo de suelo y espesor de los estratos	3 (Alta)
	PNF	Presión del agua en los poros	3 (Alta)
	S	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas	3 (Alta)
	CIG	Cálculo de CRR	2 (Media)
Iwasaki et al. (1982)	CG	Edad del depósito y tipo de suelo	3 (Alta)
	PNF	Proximidad del agua subterránea a la	3 (Alta)
	S	Estado del suelo después del sismo	1 (Baja)
	CIG	Composición del suelo	1 (Baja)
Ishihara (1990)	CG	Edad del depósito y origen del suelo	3 (Alta)
	PNF	Incremento de la presión intersticial	3 (Alta)
	S	Amplitud y duración de la vibración del terreno	3 (Alta)
	CIG	Distribución del tamaño de los granos, densidad y	2 (Media)
	CG	Edad del depósito y tipo de suelo	3 (Alta)

Youd & Idriss (2001)	PNF	Presión del agua en los poros	3 (Alta)
	S	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas	3 (Alta)
	CIG	Composición del suelo, LL, % finos y tamaño de	3 (Alta)
González de Vallejo et al. (2002)	CG	Tipo de suelo	2 (Media)
	PNF	Presiones intersticiales	3 (Alta)
	S	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas	3 (Alta)
Stewart & Krammer (2004)	CIG	Composición y compactación del suelo,	2 (Media)
	CG	Edad del depósito y tipo de suelo	3 (Alta)
	PNF	Saturación de agua en los suelos	3 (Alta)
	S	...	0
	CIG	% de finos, composición del suelo y estado del	2 (Media)

CG-Condiciones geológicas, PNF-Profundidad del nivel freático, S-Sismicidad, CIG-Condiciones ingeniero-geológicas

3.2. Limitaciones del sistema de indicadores

Una de las principales limitaciones del sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) es la subjetividad al seleccionar y dar valor a los criterios de los autores consultados. Estos procesos de valoración que deben caracterizarse por la autenticidad y la confrontación de criterios podrían realizarse al utilizar elementos del metaanálisis o la consulta de expertos mediante el método Delphi. El nivel de concordancia entre los indicadores seleccionados será valorado posteriormente al aplicar el método de concordancia de Kendall.

Otro elemento a tener en consideración es que los indicadores dependen de variables medibles que deben cumplir con ciertas características para ser medidas (Tabla 2) y en cuyo proceso interviene un aspecto importante de toda experimentación denominado representatividad de la muestra, el cual puede ser una limitante en la delimitación de los suelos susceptibles a la licuefacción si el investigador no delimita correctamente el área de los trabajos. Por su importancia se dedica un epígrafe a este particular.

Tabla 2. Descripción del sistema de indicadores

Variabes	Parámetros	Observaciones
Edad	$\leq 10\ 000$ años	
Razón entre el estrato licuable (a) y el no licuable (b)	$a/b \leq 1$	Formaciones del Cuaternario (Holoceno)
Espesor del estrato licuable	< 8 m	
Tipo de suelo		Suelos arenosos y areno-limosos principalmente
Magnitud en la Escala de Richter	$\geq 5,5$ grados	Cálculos de la Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR) y del Factor de Escala (MSF) según la magnitud del sismo,
Aceleración de las ondas sísmicas	$\geq 2,2$ g/cm	zonas sismogeneratoras y microzonación sísmica
Profundidad	≤ 3 m	Permeabilidad y saturación del suelo. Depósitos aluviales, lacustres y palustres
Porcentaje de partículas finas	≤ 15 %	
Límite Líquido (LL)	≤ 35 %	
Contenido Natural de agua	$> 0,9$ LL	
Índice de liquidez	$< 0,75$	Perforaciones, técnicas para medición de la resistividad del terreno y cálculo de la Relación de Resistencia Cíclica (CRR)
N de SPT	< 20 golpes	
Compacidad relativa (Cr)	$< 75\%$	
Coefficiente de uniformidad de la arena (Cu)	< 5	
Forma de las partículas		Principalmente redondeadas
Composición del suelo		Arena fina, media, limosa, con partículas y con bajo % de materia orgánica. Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar

Lo cierto es que el sistema de indicadores sirvió de punto de partida para la realización de investigaciones posteriores que asumieron su autenticidad en la evaluación del potencial de licuefacción de los suelos; por lo que se asume que cada indicador permite estudiar minuciosamente en el área de estudio las características esenciales del suelo que dan paso a la susceptibilidad de este ante los efectos que desencadena el evento catastrófico.

En el desarrollo de las investigaciones mencionadas se han tenido en cuenta los estudios ingeniero-geológicos originados de la ejecución de obras

ingenieriles por parte de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en los diferentes territorios. Algunos trabajos se apoyan en análisis geofísicos mediante la técnica de resistividad del terreno, para lo cual han empleado: telurómetros Chauvin-Anaux, teracontrol V', ecuación de Vaumer-Holt, los esquemas de mediciones de Vaumer y Cager y las Normas Cubanas y el reglamento electrónico de baja tensión.

Es necesario destacar que, a pesar de la eficiencia de los trabajos de perforación y el correcto procesamiento de las muestras, muchos de los informes analizados presentan imprecisiones, dado que son netamente geotécnicos; entre estas dificultades se pueden señalar las siguientes:

- En algunas obras no se realizaron ensayos de importancia, tales como: ensayo de humedad, peso específico, límite líquido y límite plástico.
- Existe bajo grado de estudio en cuanto a la sismicidad del área, pues solo se menciona de forma regional.

3.3. Representatividad de la muestra en la aplicación del sistema de indicadores

La característica más trascendente de una muestra es la representatividad. Una muestra representativa es una pequeña porción de un conjunto de individuos o elementos que cumplen ciertas propiedades comunes denominado población o universo. Es significativo resaltar que la representatividad de la muestra no depende de su tamaño, es decir, de la cantidad de elementos que la forman (aunque sí influye), sino de la forma en que fue seleccionada; en el ámbito de la Estadística, el proceso de selección de la muestra se conoce como muestreo y consiste en determinar –mediante parámetros científicos- cuál es la parte precisa de una población que debe escogerse para su estudio. Esto tiene como finalidad inferir, sobre la base de los comportamientos o rasgos de dicho grupo, las tendencias generales del total de esa población.

Existen diferentes tipos de muestreos que se agrupan en: probabilísticos y no probabilísticos. Los muestreos no probabilísticos son aquellos en que los elementos de la población no tienen la misma posibilidad de estar incluida en la muestra, tienen gran aplicación en estudios sociales, psicológicos, económicos y estudios de mercados. En este tipo de muestreo el investigador debe tener conocimientos sobre la población, conoce donde se encuentran los individuos o elementos que son de su interés y, por tanto, va directamente a tomar su muestra directamente de estos individuos; mientras que en los probabilísticos todos los elementos de la población tienen la misma posibilidad de estar incluidos en la muestra, el investigador no

necesariamente tiene acceso a toda la población, estos muestreos son más complejos que los no probabilísticos.

El muestreo cobra todo su sentido en tanto que garantiza que las características que se quieren observar en la población quedan expresadas apropiadamente en la muestra. De manera que generalizar a la población desde la muestra solamente está justificado si esta representa realmente a la población. Preservar la representatividad es el atributo más importante que debe reunir el muestreo.

Otra perspectiva sobre el tema es de Fox (1990), quien señala que para lograr la representatividad se requiere conocer qué características (variables) están relacionadas con el problema que se estudia y la capacidad para medir esas variables, así como poseer datos de la población sobre estas características o variables para usarlos como variable de comparación. El mismo autor señala que si no se cumple alguna de estas condiciones, para algunas de las características, se pierde la capacidad de buscar deliberadamente la representatividad en cuanto a ella.

El tamaño de la muestra va estrechamente unido con la representatividad. Determinar el tamaño de la muestra es un tema complejo. Por tanto, se debe tener en cuenta: la amplitud del universo (infinito o no), las variables (tipo de datos, valores de estas, homogeneidad/variabilidad de los datos), el tipo de muestreo, el proceso y medios de recogida de datos, los análisis estadísticos que se planifiquen, el error muestral, el error de estimación y el nivel de confianza con el que desee trabajar. Con esta base se tendrán los referentes necesarios para determinar el tamaño de la muestra.

En una investigación no existe un tamaño ideal de la muestra, pero es importante destacar que cuanto más homogénea es una población en las características objeto de estudio, más fácil resulta conseguir muestras representativas sin necesidad de que sean grandes. Es decir, el tamaño de la muestra está en relación directa con la desviación típica de las puntuaciones en las características de la variable a estudiar.

Según Jiménez (1983) el tipo de datos que se desea recoger y el medio que para ello se va a emplear son condicionantes que influyen en la menor o mayor reducción de la muestra seleccionada.

En lo referente a la finalidad del nivel de confianza que se quiera alcanzar con los resultados también influye el tamaño que se deba dar a la muestra. En este marco, otro dato determinante es el error de estimación. Es lógico pensar que no haya una coincidencia total entre los datos de la población y los de la muestra, pero si se quiere rebajar ese error es necesario aumentar el volumen de la muestra.

En el caso del sistema de indicadores en análisis la representatividad de la muestra se ve afectada por el hecho de que la ENIA no hace estudios en la totalidad del territorio que se evalúa, por lo que el indicador **Condiciones ingeniero-geológicas** se vería afectado al estar ausentes las tan importantes pruebas. Al mismo tiempo impediría la posibilidad de acceder a investigaciones de toda la población en estudio, es decir, toda el área, pues solo se tendrían muestras de los lugares con obras ejecutadas y no sus alrededores. Se tendría entonces que definir el tipo de muestreo a aplicar, su objetivo y su representatividad.

El muestreo para el estudio de la licuefacción debe ser declarado como un muestro no probabilístico intencional, resultado de la discriminación realizada en el primer indicador denominado **Condiciones geológicas** de donde se seleccionaron previamente lo terrenos cuaternarios que cumplieran con el tipo de suelo definido. De igual forma debe delimitarse exhaustivamente el área de los estudios a partir de los sectores de esta, donde se cuenta con muestras de ensayos de las condiciones ingeniero-geológicas realizados por la ENIA. De no tenerse en cuenta estas cuestiones, se contemplaría una serie de errores en el proceso de generalizar los resultados al resto del área.

3.4. Comprobación de la validez de los indicadores

La comprobación de la validez de los juicios emitidos por expertos es un paso esencial para la confiabilidad en el establecimiento de un indicador o de un sistema de indicadores. Los niveles de concordancia entre expertos se miden a través del coeficiente de Kendall y, aunque el establecimiento del criterio de los expertos en este sistema de indicadores fue realizado por la valoración de su autora y no por un sistema de encuestas, consideramos procedente aplicar dicho método en la determinación de efectividad de la elección con el empleo del software *SPSS Statistics Viewer* (versión 25).

Primeramente, se confeccionó una tabla $k \times N$ donde k ($=4$) representa número de indicadores pertenecientes al sistema y N ($=9$) el número de autores que fueron consultados y donde, además, se le asignó a cada indicador un rango de puntuaciones sobre la escala explicada anteriormente (Tabla 3). Esta tabla fue introducida al software para su procesamiento estadístico.

Tabla 3. Tabla de puntuaciones

Autores	Indicadores			
	Condiciones geológicas	Profundidad del nivel freático	Sismicidad	Condiciones ingeniero-geológicas
Bodenbender (1894)	2	3	0	1
Seed & Idriss (1971)	2	3	3	3

Wang (1979)	1	0	0	3
Tokimatsu & Yoshimi (1981, 1983)	3	3	3	2
Iwasaki et al. (1982)	3	3	0	1
Ishihara (1990)	3	3	3	2
Youd & Idriss (2001)	3	3	3	3
González de Vallejo et al. (2002)	2	3	3	2
Stewart & Krammer (2004)	3	3	0	2
Totales	20	21	15	18

Una vez introducidos los datos en el software, se aplicó el procedimiento para el coeficiente de concordancia de Kendall. Se obtuvo un orden de rangos para el establecimiento de la jerarquización de los parámetros que señala como indicador más importante al de **Profundidad del nivel freático** con un rango medio de 3.06, seguido de las **Condiciones geológicas** con 2.6, la **Sismicidad** con 2.39 y las **Condiciones ingeniero-geológicas** con 1.94. De igual forma, se obtuvo el coeficiente de correlación de Kendall con un valor de 0.189, el cual, al estar por debajo de 0.5, se considera bajo y, por tanto, no hay concordancia en las puntuaciones asignadas a los criterios de los expertos respecto a cada indicador (Figura 4).

Kendall's W Test

Ranks	
	Mean Rank
Qué valor le da a la Geología?	2.61
Qué valor le da a la profundidad del nivel freático?	3.06
Qué valor le da a la sismicidad?	2.39
Qué valor le da a las condiciones ingeniero geológicas?	1.94

Test Statistics	
N	9
Kendall's W ^a	.189
Chi-Square	5.115
df	3
Asymp. Sig.	.164

a. Kendall's
Coefficient of
Concordance

Figura 4. Resultados del cálculo del coeficiente de concordancia de Kendall en el software *SPSS Statistics Viewer*. Versión 25.

Para comprobar la veracidad del coeficiente encontrado se realizó la prueba de hipótesis siguiente:

1) Hipótesis planteada:

H_0 : Los criterios de los jueces según las puntuaciones asignadas no son concordantes.

H_1 : Los criterios de los jueces según las puntuaciones asignadas sí son concordantes.

2) Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

3) Punto crítico

$$\chi^2_{(\alpha; k-1)} = \chi^2_{(0.05; 4-1)} = \chi^2_{(0.05; 3)} = 7.8147$$

4) Valor observado

$$\chi^2_{obs} = 5.115$$

5) Criterio de decisión

$$\chi^2_{obs} > \chi^2_{tabulado} \rightarrow 5.115 < 7.8147$$

6) Conclusiones

Como no se cumple el criterio de rechazo de H_0 se toma H_0 como válida y se rechaza H_1 . Por lo tanto, con una confiabilidad del 95 % se puede afirmar que no existe concordancia entre las puntuaciones asignadas al criterio de los autores para un nivel de significación de 0.05.

3.5. Sugerencias para mejorar la validación

El bajo valor de W (0.189) puede interpretarse como la falta de concordancia entre los criterios o pesos que la autora designa según su valoración propia a los criterios de los autores consultados. Esto no debe verse como la falta de correlación entre los indicadores, sino como la necesidad de la valoración de los indicadores por parte de expertos "vivos" con elevado conocimiento y experiencia sobre la temática tratada a través de una encuesta validada que se analice mediante el método Delphi.

Redefinir las características de los indicadores sería útil para el logro de una mejor escala de medición, al tener en cuenta los atributos que deben tener los indicadores expuestos en epígrafe anterior. Una vez hecho esto, se puede validar cada indicador antes de ser integrado al sistema a partir de los pasos siguientes:

1. Definir sus objetivos.
2. Identificar los factores de la licuefacción.
3. Definir los indicadores en función de los factores claves de la licuefacción.
4. Analizar su rango de gestión.
5. Planificar su medición.
6. Asignar los recursos necesarios para medir.
7. Tomar sus datos.
8. Validar el indicador.
9. Mantener en uso el indicador.

En función de estas consideraciones se podría utilizar la Tabla 4.

Tabla 4. Ficha de medición de cada indicador

Nombre del indicador	Origen de los datos	Expresión matemática
Unidad de medida	Umbral	Tendencia de los datos
Frecuencia de recolección de los datos	Responsable	Valores deseados

La última consideración radica en el hecho de la correspondencia entre el área de estudio para la que se define el potencial licuable de los suelos y la representatividad de la muestra. No deben hacerse consideraciones de un área en general si se carecen de datos para evaluar los indicadores. Se debe, además, definir el tipo de muestreo, sus objetivos y el método de estimación que permitirá extender los resultados al resto del área.

4. CONCLUSIONES

- El sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) necesita de un proceso matemático de validación para consolidar su utilidad según el fin con que fue diseñado.
- La aplicación del coeficiente de Kendall, para un valor=0.189, demuestra la no concordancia entre los criterios asignados a los autores por parte de Fernández (2015).
- Se sugiere tener en cuenta para el consecuente logro de la validación efectiva del sistema de indicadores: el método Delphi, la redefinición de las características de los indicadores apoyada en una ficha de medición de estos, así como la correspondencia entre el área de estudio y la representatividad de la muestra.

5. REFERENCIAS

- Backman, A. Reporte solar sísmico y volcánico. Página oficial.
<http://reportesolar.com>
- Bodenbender, G. (1894). El terremoto argentino. Del 27 de octubre de 1894. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba*, 14, 293-329.
- Conciencia Radio (CR). Periodismo de investigación.
<https://concienciaradio.com>
- Fernández, L. (2015). *Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud: Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba*. (Tesis de Maestría en Geología, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa).
- Fox, J. (1990). Describing univariate distributions. In: *Modern methods of data analysis*, SAGE Publications, Michigan University, 58-125.
- GeoSec Ground Engineering. Empresa de Cimentaciones y consolidación de terrenos. <https://www.geosec.es>

- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación. 9788420531045.
- Huber, L. (2007). *Validation and qualification in analytical laboratories*. Taylor & Francis. 303 p. ISBN:9780849382673, 084938267X.
- Ishihara, K. (1990). Evaluation of liquefaction potential and consequent deformations in sand fills. In *Proceedings of the Workshop on Seismic Issues*. Port of Los Angeles, CA.
- Iwasaki, T., Tokida, K. I., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982, June). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. In *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation*, Seattle (Vol. 3, No. 2, pp. 1310-1330).
- Jiménez, C. (1983). *Pedagogía Experimental II*. Tomo I: Población y Muestra, el muestreo.
- Kishida, H. (1969). Characteristics of liquefied sands during Mino-Owari, Tohankai and Fukui earthquakes. *Soils and Foundations*, 9(1), 75-92.
- Masana, E., Rodríguez, M. A. y. Martínez, J. J. (2011). Los paleoterremotos: estudiando el pasado para entender el futuro. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19(3), 305-316.
- Moya-Fernández, A. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. *Estudios Geológicos*, 65(1), 67-77. <https://doi.org/10.3989/egeol.39591.047>
- Seed, H. B. (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of geotechnical engineering*, 109(3), 458-482.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. In *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar*. Long Beach, CA.
- Steidl, J. H., Tumarkin, A. G., & Archuleta, R. J. (1996). What is a reference site?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1733-1748.
- Stewart, J. P., & Kramer, S. L. (2004). Geotechnical aspects of seismic hazards. *Earthq. Eng*, 1.
- Tokimatsu, K. & Yoshimi, Y. (1981). Field correlation of soil liquefaction with SPT and grain size. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil. Dynamics. 11. <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/01icrageesd/session02/11>

- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 23(4), 56-74.
- Urrutia, M., Barrios, S., Gutiérrez, M., & Mayorga, M. (2014). Métodos óptimos para determinar validez de contenido. *Educación Médica Superior*, 28(3), 547-558.
- Wang, W. (1979). *Some findings in soil liquefaction*. Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute. Beijing.
- Yegian, M., & Whitman, R. V. (1978). Risk analysis for earthquake-induced ground failure by liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, GT7, 921-938. <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.northeastern.edu/dist/f/1980/files/2022/10/Risk-Analysis-for-Ground-Failure-by-Liquefaction.pdf>
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (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*, 127(4), 297-313.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

Ambos autores contribuyeron por igual: Revisión bibliográfica, trabajo en la base de datos, interpretación de los resultados, redacción y revisión del documento original, aprobación de la versión final.

ORCID

RSA, <https://orcid.org/0009-0005-9132-8945>

DNE, <https://orcid.org/0000-0002-2341-6602>

Recibido: 11/08/2024

Aprobado: 26/09/2024