

Assessment of soil liquefaction potential through testing, modeling, and methodological approaches in Latin America: a systematic review.

Harold Gaspar Cano Condori¹; Roger Mijael Mansilla Huanacuni¹; Paola Carmen Tinuco Coaquira¹; Yeyson Jeampier Cuti Ligue¹; Janeth Anika Condori Hanco¹; Mirian Adelis Puma Pumachara¹; Dayana Lucia Llanos Portillo¹

¹Universidad Tecnológica de Perú, Perú, c21958@utp.edu.pe, u23260726@utp.edu.pe, u23261654@utp.edu.pe, u23271915@utp.edu.pe, u23203958@utp.edu.pe, u23221085@utp.edu.pe, u17212034@utp.edu.pe

Abstract: *The significant loss of strength and stiffness in saturated granular soils caused by lateral stresses during seismic events is one of the primary geotechnical risk phenomena in Latin America. In this context, this article presents a systematic review of the types of tests, evaluation models, and methodological approaches used to assess liquefaction potential. To achieve this, the PRISMA methodology was employed, considering 34 studies published in Scopus, ResearchGate, and Google Scholar between 2022 and 2025. The results show a predominance of in-situ tests, particularly the Standard Penetration Test (SPT) and Cone Penetration Test (CPT/CPTu/SCPTu), as well as the use of empirical models in preliminary assessments. However, there is a growing trend toward the application of computational approaches using large-scale numerical simulations aimed at improving predictive capabilities.*

Keywords: *Soil liquefaction, in situ testing, evaluation models, seismic risk, computational approaches.*

Evaluación del potencial de licuefacción de suelos mediante ensayos, modelos y enfoques metodológicos en América Latina: una revisión sistemática.

Harold Gaspar Cano Condori¹; Roger Mijael Mansilla Huanacuni¹; Paola Carmen Tinuco Coaquira¹; Yeyson Jeampier Cuti Ligue¹; Janeth Anika Condori Hanco¹; Mirian Adelís Puma Pumachara¹; Dayana Lucía Llanos Portillo¹

¹Universidad Tecnológica de Perú, Perú, c21958@utp.edu.pe, u23260726@utp.edu.pe, u23261654@utp.edu.pe, u23271915@utp.edu.pe, u23203958@utp.edu.pe, u23221085@utp.edu.pe, u17212034@utp.edu.pe

Resumen: La pérdida significativa de la resistencia y rigidez en los suelos granulares saturados ocasionada por los esfuerzos laterales concurrentes en eventos sísmicos se presenta como uno de los principales fenómenos de riesgo geotécnico en la región latinoamericana. Bajo ese contexto, este artículo presenta una revisión sistemática de los tipos de ensayos, modelos de evaluación y enfoques metodológicos empleados para la evaluación del potencial de licuefacción. Para lograr ello, se empleó la metodología PRISMA, considerando 34 investigaciones publicadas en Scopus, ResearchGate y Google Académico, durante los años 2022 y 2025. Los resultados evidencian el predominio de los ensayos in situ, en especial del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y Ensayo de Penetración de Cono (CPT/CPTu/SCPTu), así como el uso de modelos empíricos en evaluaciones preliminares. No obstante, se evidencia una tendencia creciente en la aplicación de enfoques computacionales con grandes simulaciones numéricas orientadas a mejorar la capacidad predictiva.

Palabras clave: Licuefacción de suelos, ensayos in situ, modelos de evaluación, riesgo sísmico, enfoques computacionales.

I. INTRODUCCIÓN

La licuefacción de suelos es un fenómeno que se presenta en suelos granulares saturados cuando son sometidos a cargas cíclicas, generalmente inducidas por sismos, produciendo un incremento de la presión de poros y una disminución de los esfuerzos efectivos del suelo [1]. Como consecuencia, el terreno puede experimentar una pérdida abrupta de resistencia y rigidez, generando deformaciones excesivas, asentamientos y fallas estructurales, tal como ha sido evidenciado en terremotos como: en la ciudad de Niigata (Japón) en 1964, Loma Prieta de 1989, Kobe de 1995 y Kocaeli de 1999, entre otros [2], [3] y [4].

La evaluación del potencial de licuefacción ha sido abordada mediante diversos modelos y metodologías, desarrolladas a partir de estudios empíricos y observaciones de campo [1]. Los artículos revisados muestran que estos modelos pueden basarse en diferentes tipos de información geotécnica y sísmica, como ensayos de Penetración Estándar (SPT), Penetración de Cono (CPT) y mediciones de Velocidad de Onda de Corte (Vs), su aplicación puede conducir a resultados distintos, dependiendo de los parámetros considerados y de las condiciones geológicas locales [5].

Una predicción del potencial de licuefacción resulta fundamental para la gestión del riesgo sísmico y el diseño

seguro de obras civiles. La comparación de modelos predictivos permite prevenir daños en el suelo y en las estructuras antes de que ocurra un sismo, tales como el mejoramiento de suelos o la planificación urbana basada en criterios técnicos [2], [3]. De esta manera, la predicción de la licuefacción se consolida como una herramienta preventiva clave para reducir la vulnerabilidad estructural y mejorar la resistencia de los suelos ubicados en regiones sísmicamente activas [6].

En el contexto sudamericano, este problema adquiere especial relevancia debido a la interacción entre la placa de Nazca y la Placa Sudamericana, uno de los sistemas de subducción más activos del mundo [7]. Esta interacción es responsable de la ocurrencia de sismos de gran magnitud que afectan países como Perú, Chile, Ecuador y Colombia, donde extensas zonas urbanas se encuentran asentadas sobre depósitos y suelos granulares susceptibles a la licuefacción. Diversos estudios recientes realizados en esta región han evidenciado la necesidad de adaptar y validar modelos de evaluación de licuefacción a las condiciones geotécnicas y sísmicas locales [4].

Asimismo, las investigaciones de hace 3 años han incorporado y perfeccionado metodologías ampliamente reconocidas, como las propuestas por Seed e Idriss (2014) [8], Boulanger e Idriss (2010) [6], Anfrus y Sroke (2000) [9] entre otros, los cuales han sido ajustados y complementados con nuevos enfoques experimentales, numéricos y probabilísticos, con el propósito de optimizar su capacidad predictiva.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo identificar y analizar los tipos de ensayos, modelos y enfoques metodológicos utilizados en la evaluación del potencial de licuefacción del suelo, mediante la revisión de estudios desarrollados en diferentes regiones del continente latinoamericano.

II. METODOLOGÍA

Para la búsqueda de información en esta revisión se empleó la metodología PRISMA, la cual permitió obtener un registro ordenado [10] del proceso bibliográfico seguido, como se evidencia en la Fig. 1.

Durante la etapa de identificación, se buscaron publicaciones en las bases de datos Scopus, ResearchGate y Google Académico, relacionadas a las siguientes palabras clave de búsqueda: *Soil liquefaction*, *Liquefaction*, *Liquefaction*

potentials, Soil mechanics, Soil testing, Earthquake y Deformation; con dicha combinación se obtuvieron un total de 2809 investigaciones. Posteriormente, se limitó la búsqueda considerando publicaciones entre los años 2022 y 2025; tomando en cuenta investigaciones de Colombia, Chile, Brasil, México, Argentina, Venezuela, Ecuador, Perú, Uruguay, Costa Rica, Puerto Rico, El Salvador, Panamá, Nicaragua, Guatemala y España; respecto el tipo de artículos seleccionados se tomaron en cuenta solo artículos originales; en esta etapa se filtraron en suma 76 artículos.

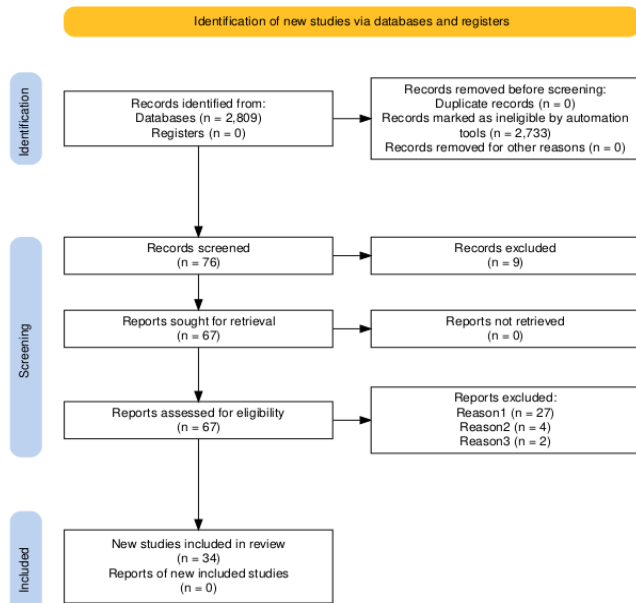


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA 2020 [10]

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSION

Criterio	Descripción
C1	El artículo está relacionado a la licuefacción de suelos en general.
C2	El artículo es un artículo original, no de revisión, ni otros similares.
C3	El artículo fue publicado entre los años 2022 y 2025.
C4	El artículo está disponible en su versión completa (Open Access).
C5	El artículo contiene entre sus palabras clave las descritas anteriormente.
C6	El artículo considera la participación de uno o más investigadores del continente americano

En la etapa de cribado, se revisaron los resúmenes de las 76 investigaciones elegidas, de las cuales se segregaron 9 publicaciones por no cumplir con los criterios establecidos en la Tabla I. Durante la elegibilidad se realizó la lectura de los textos completos de las 67 investigaciones restantes; de estas se excluyeron 33 por los siguientes motivos: 27 por no encontrarse disponibles en acceso abierto (Open Access), 4 por considerar la presencia de información insuficiente para el análisis planteado en esta revisión y 2 por no guardar relación con el enfoque detallado. En suma, se seleccionaron 34 investigaciones.

III. RESULTADOS

Los resultados de la presente revisión sistemática se encuentran en función a los 34 artículos consecuentes del proceso de selección descrito en el capítulo anterior, estos artículos y autores se encuentran señalados en la tabla II.

TABLA II
ARTICULOS ANALIZADOS

Autores	Título de investigación
Schmitz et. al. 2025 [2]	Principal results of the Portoviejo (Ecuador) seismic microzonation project and importance for seismic hazard mitigation.
Castillo et. al. 2025 [11]	A Bayesian Framework for the Calibration of Cyclic Triaxial Tests.
Mercado et. al. 2025 [12]	A system identification technique for the estimation of the bulk modulus based on pore water pressure dissipation records.
San Martin et. al. 2025[13]	Stress-Based CPTu Cyclic Liquefaction Triggering Procedures: Improvements from a State Parameter Approach.
Galindo et. al. 2024 [14]	Energy-based formulation for generation of pore pressure due to a combination of static and cyclic stresses.
Silva et. al. 2025 [15]	Undrained monotonic behavior of a dune sand stabilized with porcelain waste and lime.
Araujo 2025 [16]	Assessment of Liquefaction Potential in the Piura Region Using SPT and Shear Wave Velocity Measurements.
Santiago et. al. 2024 [17]	Assessing soil liquefaction due to large-magnitude subduction earthquakes.
Molina et. al. 2024 [18]	Exploring liquefaction resistance in saturated and gassy sands at different state parameters.
Molina et. al. 2024 [19]	Insights into the assessment and interpretation of earthquake-induced liquefaction in sands under different degrees of saturation.

Reyes et. al. 2024 [20]	Analysis of Liquefaction in Tailings Deposits by Fem Modeling of Undrained Cyclic Triaxial.
Costa et. al. 2024 [21]	Susceptibility to Liquefaction of Iron Ore Tailings in Upstream Dams Considering Drainage Conditions Based on Seismic Piezocone Tests.
Tafili et. al. 2024 [22]	A hypoplastic model for pre- and post-liquefaction analysis of sands.
Mercado et. al. 2024 [23]	Numerical modeling of LEAP-2022 dynamic centrifuge tests adopting a multi-surface plasticity model.
Ozelim et. al. 2024 [24]	NorSand4AI: A comprehensive triaxial test simulation database for NorSand constitutive model materials.
De Sousa et. al. 2024 [25]	Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures.
Saldaña et. al. 2024 [26]	Two-dimensional nonlinear dynamic analysis of a liquefaction case history considering spatial variability and long-duration megathrust earthquakes.
Núñez et. al. 2024 [27]	Spatial variability of shear wave velocity: implications for the liquefaction response of a case study from the 2010 Maule Mw 8.8 Earthquake, Chile.
Costa et. al. 2024 [28]	Numerical sensitivity analysis for stress-strain simulation and flow liquefaction assessment of tailings storage facilities using the NorSand constitutive model.
Duque et. al. 2023 [29]	On the influence of cyclic preloads on the liquefaction resistance of sands: A numerical study.
Arango et. al. 2023 [7]	New seismic monitoring center in South America to assess the liquefaction risk posed by subduction earthquakes.
Molina et. al. 2023 [9]	Improvement of cyclic liquefaction resistance induced by partial saturation: An interpretation using wave-based approaches.
Ordaz et. al. 2023 [3]	Event-based probabilistic liquefaction hazard analysis for defining soil acceptance criteria.
Macedo et. al. 2023 [30]	Geotechnical characterization of collapsible salty sands subjected to monotonic and cyclic loadings – A case study for areas with high seismicity.
Ramos et. al. 2023 [31]	Effects of initial stress anisotropy on the onset of undrained instability for Guamo sand.
Mendoza et. al. 2023 [32]	Site response analysis using true coupled constitutive models for liquefaction triggering.
Cano et. al. 2023 [4]	Analysis and experimental validation of soils liquefaction through granulometric study.
Sepúlveda et. al. 2022 [33]	Numerical analysis of soil desaturation by an air injection method.
Alarcon 2025 [8]	Analysis of Liquefaction Potential as an Indicator of Seismic Risk in Anta, Cusco.
López et. al. 2024 [1]	Evaluation of the Soil Liquefaction Potential based on Microtremor Measurements: A Case Study of The Lagunas Earthquake in 2019.
Ortiz et. al. 2025 [34]	Geotechnical exploration and analysis for the massive improvement of soils at a site with liquefaction potential for a power generation plant.
Guerrero et. al. 2022 [6]	Analysis of the variability in the assessment of the liquefaction potential due to the use of different in situ tests, versions of the simplified procedure and input parameters.
Rangel 2022 [35]	Analysis of static liquefaction at the Edenville and Sanford dams.
Molina et. al. 2023 [36]	Experimental Wave-Based Assessment of Liquefaction Resistance for Different Degrees of Saturation.

A. Análisis bibliométrico.

La evolución del número de investigaciones publicadas cada año desde el 2022 hasta el 2025, se evidencian en la Fig. 2. Encontrándose que el número de publicaciones presenta un incremento progresivo hasta el 2024, periodo en el cual se registra la mayor cantidad de estudios. Para el año 2025, se contabilizan 8 publicaciones; aunque se nota una disminución respecto el año anterior, no necesariamente implica una pérdida de interés en el tema analizado.

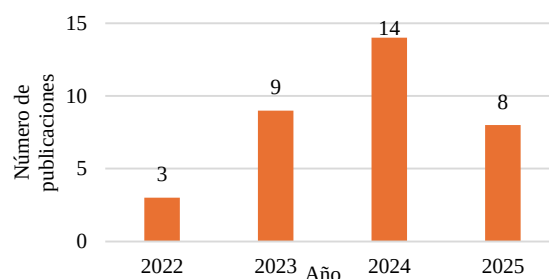
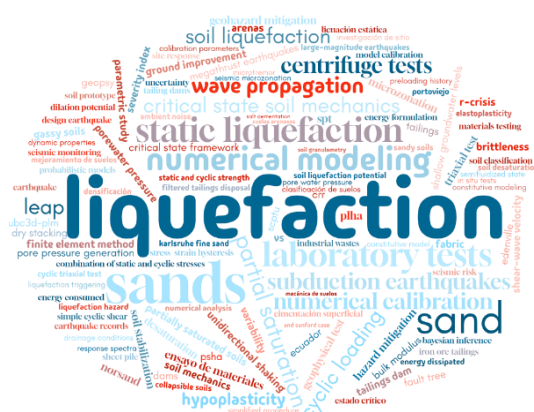


Fig. 2. Evolución del número de publicaciones a lo largo del tiempo.

A map of Latin America and the Caribbean showing the number of countries that have a specific number of languages. The legend indicates the following counts:

- 15 (dark red)
- 6 (red)
- 5 (orange)
- 2 (light orange)
- 1 (yellow)

En tanto a los temas asociados con aquellas palabras clave identificadas en el conjunto total de artículos analizados y como se muestra en la Fig. 4, las palabras mencionadas recurrentemente por los diferentes autores de las publicaciones revisadas son *liquefaction*, *sand (s)*, *laboratory tests*, *numerical modeling* y *static licuefaction*.



En la tabla III se consignan todas las revistas científicas fuente de las cuales se obtuvieron los artículos analizados en la presente revisión, en ella se verifica que la revista con más

TABLA III
REVISTAS CON MÁS PUBLICACIONES

Revista	Publicaciones
Soil Dynamics and Earthquake Engineering	7
Soils and Rocks	2
Soils and Foundations	2
Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia	2
Actas de congreso internacional*	2
Natural Hazards	1
Geotechnics	1
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	1
Engineering Geology	1
Civil Engineering and Architecture	1
Transportation Geotechnics	1
Earth-Science Reviews	1
Minerals	1
Applied Sciences	1
Computers and Geotechnics	1
Geoscientific Model Development	1
Research	1
Earthquakes and Structures	1
DYNA	1
Scientia	1
Frontiers in Earth Science	1
Unanchay	1
Obras y proyectos	1
Geotechnical Testing Journal	1

B. Resultados específicos

B.1 Tipos de ensayos

En este apartado, se describen los ensayos frecuentemente empleados para la evaluación del potencial de licuefacción del suelo, según lo reportado en la literatura revisada.

Como se muestra en la tabla IV, se precisó distinguir en cuatro categorías los tipos de ensayos empleados en los papers revisados. En ese sentido, la Prueba de Penetración Estándar (SPT) es el más recurrente dentro de los ensayos in situ, estando presente en [2], [16], [26], [7], [3], [8], [27], [1], [34], [6] y [36], esto se debe básicamente a la información directa sobre la resistencia y densidad del suelo proporcionada [16]. Sin embargo, ante la incertidumbre que presenta en suelos heterogéneos se recomienda acompañarlo con otros ensayos que permitan una caracterización geotécnica integral, razón por la cual [26], [7], [34] y [6] complementan el SPT con el Ensayo de Penetración de Cono con medición de presión de poros (CPTu); [27] y [36] hacen lo propio con la prueba de penetración de cono (CPT).

TABLA IV
TIPOS DE ENSAYOS

Categoría	Tipo de ensayo	Cantidad
Ensayos in situ	Prueba de Penetración Estándar (SPT)	11
	Ensayo de Penetración de Cono (CPT)	2
	CTP con Medición de Presión de Poros (CPTu)	5
	CPT sísmico (SCPTu)	1
Ensayos de laboratorio	Ensayo Triaxial Cíclico (CTx)	8
	Ensayos Triaxiales Drenadas y No Drenadas	7
	Ensayo Triaxial Monotónico / Estático	4
Ensayos geofísicos	Velocidad de onda de corte (Vs)	7
	Métodos sísmicos (MASW, ReMi, sísmica)	4
Ensayos especiales	Centrifuga dinámica, dilatómetro, presiometro, otros	6

Respecto los ensayos de laboratorio [11], [18], [19], [20], [22], [29], [9] y [14] emplean el Ensayo Triaxial Cíclico (CTx), su alta frecuencia es comprendida ya que simula la carga cíclica y confinamiento tridimensional que los suelos experimentan durante eventos sísmicos [11], permitiendo obtener modelos constitutivos avanzados capaces de representar la respuesta del suelo en condiciones dinámicas [20]. De forma análoga [28] [31] emplean CTx drenado en tanto [7] hace uso de CTx no drenado; por otro lado [24] y [25] usan CTx drenado y no drenado, distinguiéndose el uso de ambos ensayos con el objetivo de obtener una caracterización completa del suelo que les permita calibrar los modelos numéricos que plantean.

El ensayo de Velocidad de Onda de Corte (Vs) como ensayo geofísico que ofrece datos sobre la rigidez del suelo y su capacidad de transmitir ondas sísmicas, está presente en [16], [2], [19], [26], [9], [3] y [30]. Empero de acuerdo con [9] el ensayo de Velocidad de Onda de Compresión (Vp) permite una mejor cuantificación de la mejora de la resistencia a la licuefacción al inducir una saturación parcial que Vs no considera. En relación con los modelos sísmicos, [30] emplea también el Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) que emplea las ondas Rayleigh para evaluar las propiedades del

suelo al crear perfiles de ondas transversales. Por su parte [2] usa la prueba Refraction Microtremor (ReMi) que aprovecha el ruido ambiental como fuente de datos para evaluar las ondas de corte superficial Vs30, de acuerdo con el mismo artículo se inclinó a su uso debido a su eficiencia en campo en comparación con los métodos de fuente activa como MASW.

Acerca de los ensayos especiales, se consideró esta categoría a aquellas pruebas que no se emplean con frecuencia de acuerdo con la literatura revisada. Sin embargo, es preciso mencionar a [12] y [23], publicaciones que emplean los ensayos de Centrifuga dinámica realizadas en el Liquefaction Experiments and Analysis Project (LEAP) 2020 y 2022 respectivamente, permitiendo realizar un análisis que integró datos sintéticos obtenidos mediante modelos de elementos finitos con mediciones reales de sensores de presión de poros registradas en ensayos de centrifugado de laboratorio de alta calidad, disponibles en las bases de datos del proyecto [12].

En general, se reconoció que los ensayos empleados en conjunto permiten obtener un mejor perfilado del suelo, incrementando la capacidad predictiva. Sin embargo, esa integración metodológica también revela contrastes: el ensayo de CPTu destaca por una menor variabilidad intrínseca, que permite detectar capas licuables delgadas que el SPT suele omitir [13][14]. Así también, respecto la rigidez del suelo, la comparación entre las ondas Vs y Vp evidencian que solo estas últimas tienen la capacidad de capturar con precisión las mejoras en la resistencia inducidas por saturación parcial, superando una de las mayores limitaciones de los ensayos geofísicos estándar [27][16]. Finalmente, los ensayos de laboratorio como CTx y los empleados en LEAP permiten mantener un enfoque netamente empírico de procedimientos simplificados [23], dotando a los modelos numéricos tratados a continuación, la capacidad de simular trayectorias de esfuerzos complejos [16] que los índices tradicionales no logran cuantificar con exactitud.

B.2 Modelos y procedimientos de evaluación

En la tabla V presenta los principales modelos, métodos y procedimientos empleados para la evaluación del potencial de licuefacción identificados en los artículos analizados.

A partir de la revisión, se observa una predominancia de los métodos semiempíricos, los cuales continúan siendo ampliamente utilizados en estudios de licuefacción debido a su base en observaciones de campo y a su validación histórica frente a eventos sísmicos reales. Dentro de este espectro, se considera a [2], [8], [16] publicaciones que basan su aporte en el procedimiento simplificado original de Seed e Idris (1971) considerando suelos arenosos, arenosos limosos y depósitos de grava con arena limpias [8] y con presencia ocasional de gravas y ceniza volcánica [2]; las estandarizaciones para la resistencia cíclica de Youd e Idriss (2001) considerada en [6], [16] y los refinamientos para ensayos SPT Y CPTu de Boulanger e Idriss (2014), toman en cuenta también arena limpia. Estos métodos se complementan con el enfoque de Andrus y Stokoe (2000) basado en la velocidad de ondas de corte [1], [3] y la técnica de

Nakamura (1989) para la estimación de frecuencias fundamentales [1].

Asimismo, en distintas publicaciones incluyen el parámetro de estado de Been y Jefferies (1986) [13], la síntesis de Jefferies and Been (2015) [24], la hipoplasticidad de Von Wolffersdorff (1996) [22], [29] y sus extensiones con ISA Fuentes et al. (2020) en [29]. Otros aportes relevantes son el procedimiento de Plewes, Davies and Jefferies (1992) empleado para la evaluación de arenas y limos provenientes de relaves y el sistema de clasificación de Nierwinski, Schnaid and Odebrecht basado en la relación entre rigidez y resistencia de cono ambos empleados en [21]; y las leyes de energía para la generación de presión de poros de arenas granulares de Green et al. (2000) [14], [19].

TABLA V
MODELOS Y PROCEDIMIENTOS

Categoría	Modelo / Método / Procedimiento	Cantidad
Modelos y procedimientos semiempíricos	Seed e Idriss (1971)	3
	Youd e Idriss (2001)	2
	Boulanger e Idriss (2014)	1
	Andrus y Stokoe	2
	Nakamura (1989)	1
	Been y Jefferies (1986)	1
	Jefferies and Been (2015)	1
	Von Wolffersdorff (1996)	2
	Plewes, Davies and Jefferies (1992)	1
	Nierwinski, Schnaid and Odebrecht	1
	Fuentes et al. (2020)	1
	Gree et al. (2000)	1
Modelos constitutivos	PDMY02	3
	PDMY03	2
	PM4Sand	1
	PM4Silt	1
	NorSand	2
	Dafalias y Manzari (2004)	1
	Hardening Soil Small (HSS)	1
	UBC3D-PLM_Tsegate	1
Análisis numérico y simulación	Análisis dinámico no lineal (NDAs)	1
	Slice Sampling algorithm	1

Los modelos constitutivos presentes en los artículos revisados se basan en formulaciones de plasticidad multisuperficie dependientes de la presión, entre los cuales destaca el modelo PDMY02 aplicado específicamente en Arena Ottawa F-65 [12], [17] y [23]; mientras que el modelo PDMY03 emplea arena Monterey en [27] y [32]. Asimismo los

modelos PM4Sand y PM4Silt son reconocidos por reproducir adecuadamente el comportamiento cíclico de arenas limosas [26]. En esa misma línea destaca también NorSand, el cual vincula la mecánica del estado crítico con la respuesta cíclica del suelo [24], [28]; así como el modelo de Dafalias y Manzari (2004) orientado a capturar los efectos de cambio de fábricas de arenas [29], el modelo Hardening Soil Small (HSS) enfocado en el comportamiento a pequeñas deformaciones, y la extensión UBC3D-PLM de Tsegate para el análisis bajo carga sísmica [20].

Con análisis numérico y simulación se analizan estudios desarrollados de análisis dinámicos no lineales (NDAs) en 2D y 3D para evaluar la variabilidad espacial del suelo y los mecanismos de deformación bajo sismos de larga duración [26]. En tanto, la calibración de parámetros y la cuantificación de la incertidumbre en modelos complejos se sustenta en la aplicación del algoritmo Slice Sampling mediante inferencia bayesiana aplicada a ensayos de laboratorio [11].

En síntesis, los análisis de modelos, métodos y procedimientos identificados con anterioridad muestran una notoria complementariedad entre los modelos semiempíricos, modelos constitutivos avanzados y las técnicas de simulación numérica, lo que refuerza la confiabilidad de los estudios en cuanto a la predictibilidad del fenómeno de licuefacción.

B.3 Enfoques metodológicos

A diferencia de los modelos detallados en el apartado anterior, en esta sección se describen los enfoques los cuales podrían ser definidos como formas de abordar los objetivos planteados en cada publicación. En ese sentido, se presenta la tabla VI, en la cual se muestran seis enfoques metodológicos identificados en los estudios analizados.

TABLA VI
ENFOQUES METODOLOGICOS

Tipo de enfoque	Cantidad
Experimental	13
Probabilístico	4
Analítico	6
Empírico	2
Numérico	13
Comparativo	2

Los enfoques metodológicos empleados recurrentemente corresponden al experimental y al numérico. Con relación al enfoque experimental presente en [1], [2], [4], [7], [9], [14], [15], [18], [21], [25], [30], [31] y [36], están fundamentados principalmente en la ejecución y el análisis de datos derivados de los ensayos de laboratorio ya mencionados en la tabla IV. Mientras que [11], [12], [16], [20], [22], [23], [24], [26], [27], [28], [29], [32] y [33] mantienen como eje central el desarrollo de simulaciones por elementos finitos [28], [33], modelos

constitutivos detallados en la tabla V o análisis dinámicos no lineales [3] [3]. Es necesario comprender, además, que las investigaciones avanzadas de licuefacción como [20], [23], [26], [27] emplean un marco de Elementos Finitos para ejecutar a su vez un Análisis Dinámico no Lineal, permitiendo observar el comportamiento de los suelos paso a paso durante un evento sísmico, ampliando la información necesaria a analizar.

En ese contexto, [13] emplea Global y Canterbury, junto con una nueva base de datos de zonas de subducción; [16] en cambio y acorde al contexto planteado en su escrito, usa datos de ensayos contenidos en el Instituto Geofísico del Perú y en la Universidad de Piura, a la vez que [28] hace lo propio con información de la Universidad de Oporto y la Universidad de Toronto. En cambio [17], [32] realizaron 6320 simulaciones y 2816 análisis de respuesta de sitio respectivamente, permitiendo una base sólida para el análisis desarrollado en ambas publicaciones.

Respecto al enfoque analítico, se considera como tal a aquellas publicaciones que basan su aporte en la formulación de nuevas relaciones teóricas [12], [13], [12]; matemáticas [14], [31] o síntesis conceptuales más complejas [19], [35]. Mientras que [3], [11], [17] y [24] están sustentadas en análisis estadísticos u inferencia bayesiana. Con enfoque empírico se hace referencia a estudios que se desarrollaron sobre la aplicación de modelos simplificados aceptados [16], [30]. En tanto [6] y [13] basan su análisis en la comparación sistemática respecto la variabilidad de distintos métodos o ensayos.

IV. CONCLUSIONES

La revisión de los 34 artículos analizados permitió identificar que la evaluación del potencial de licuefacción de suelos en América Latina continúa sustentándose, predominantemente en ensayos in situ; siendo el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) el método más utilizado, debido a su fácil disponibilidad, simplicidad de ejecución y respaldo en métodos aceptados en la geotécnica. Sin embargo, se evidencio que su aplicación única presenta limitaciones en contextos heterogéneos, lo que ha motivado su ejecución en conjunto con ensayos de penetración de cono (CPT, CPTu y SCPTu) y mediciones de velocidad de onda de corte (Vs), ensayos que resultan en una caracterización más representativa del comportamiento dinámico del suelo.

En cuanto a los modelos y procedimientos de evaluación, se identificó una clara predominancia de métodos semiempíricos, los cuales continúan siendo ampliamente utilizados debido a su práctica. No obstante, la revisión evidencia una incorporación progresiva de modelos constitutivos avanzados y análisis dinámicos no lineales, orientados a representar de manera más realista el comportamiento cíclico del suelo, la generación y disipación de la presión de poros, así como las deformaciones post-licuefacción. Estos métodos se apoyan en el uso de herramientas computacionales especializadas para el procesamiento de señales sísmicas y plataformas de cálculo para la implementación de modelos basados en el estado crítico, lo que permite mejorar la interpretación del comportamiento

dinámico del suelo. Si bien requieren más información y esfuerzo computacional, su aplicación complementa las evaluaciones tradicionales del potencial de licuefacción.

Respecto a los enfoques metodológicos, se evidencia una amplia predominancia entre lo experimental y numérico, con 13 artículos respectivamente. El primero aporta información directa sobre la reacción física de los suelos, en tanto el enfoque numérico considera simulaciones detalladas que permitan mejorar la predicción del potencial de licuefacción. Los enfoques analíticos, probabilísticos, comparativos y empíricos, con seis, cuatro y dos publicaciones correspondientemente; desempeñan un rol complementario que permite mayor detalle en el análisis y buscan fortalecer la interpretación de los resultados.

En suma, los resultados de esta revisión sistemática evidencian que la incorporación de distintos ensayos, modelos de comportamiento y enfoques metodológicos permiten una representación más completa del comportamiento dinámico del suelo, incrementando la capacidad predictiva en las evaluaciones del potencial de licuefacción principalmente para reducir los efectos sísmicos. Esto permite proporcionar una visión integral del estado actual de investigación en la región, destacando su aporte como herramienta de apoyo para la gestión del riesgo sísmico y el diseño seguro de infraestructuras en zonas sísmicamente activas como las existentes en América Latina.

REFERENCIAS

- [1] M. López, J. Rengifo, and L. Vallejos, "Evaluation of the Soil Liquefaction Potential based on Microtremor Measurements: A Case Study of The Lagunas Earthquake in 2019," 2024.
- [2] M. Schmitz *et al.*, "Principal results of the Portoviejo (Ecuador) seismic microzonation project and importance for seismic hazard mitigation," *Natural Hazards*, vol. 121, no. 18, pp. 21891–21910, Nov. 2025, doi: 10.1007/s11069-025-07669-3.
- [3] M. Ordaz *et al.*, "Event-based probabilistic liquefaction hazard analysis for defining soil acceptance criteria," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 166, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.107781.
- [4] V. Cano-Franco, K. D. Medina-Mosquera, J. F. Restrepo-Escobar, F. J. Vélez-Hoyos, and V. H. Aristizabal-Tique, "Analysis and experimental validation of soils liquefaction through granulometric study," *DYNA (Colombia)*, vol. 90, no. 225, pp. 164–171, Jan. 2023, doi: 10.15446/dyna.v90n225.105204.
- [5] J. Liu, L. Feng, Y. Zhang, and G. Chen, "Assessment of liquefaction resistance of soil with fines using cyclic hollow cylinder testing," *PLoS One*, vol. 20, no. 8 August, Aug. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0329109.
- [6] N. K. F. M. C. T. Ó. Guerrero, "Analysis of the variability in the assessment of the liquefaction potential due to the use of different in situ tests, versions of the simplified procedure and input parameters," *Obras y Proyectos*, vol. 31, pp. 35–44, 2022.
- [7] S. Arango-Serna, L. Gallo, J. H. Zambrano, A. Cruz, E. Sandoval, and P. Thomson, "New seismic monitoring center in South America

- to assess the liquefaction risk posed by subduction earthquakes,” *J. Seismol.*, vol. 27, no. 3, pp. 385–407, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10950-023-10142-y.
- [8] Rocio Vanessa Alarcon Taipe, “Analysis of Liquefaction Potential as an Indicator of Seismic Risk in Anta, Cusco,” *Scientia*, vol. 28, no. 2, 2025, doi: 10.31381/scientia.
- [9] F. Molina-Gómez, A. Viana da Fonseca, C. Ferreira, and B. Caicedo, “Improvement of cyclic liquefaction resistance induced by partial saturation: An interpretation using wave-based approaches,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 167, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.107819.
- [10] N. R. Haddaway, M. J. Page, C. C. Pritchard, and L. A. McGuinness, “PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis,” *Campbell Systematic Reviews*, vol. 18, no. 2, Jun. 2022, doi: 10.1002/c12.1230.
- [11] L. Castillo-Suárez, J. Redondo-Mosquera, V. Mercado, J. Fernández-Gómez, and J. Abellán-García, “A Bayesian Framework for the Calibration of Cyclic Triaxial Tests,” *Geotechnics*, vol. 5, no. 3, Sep. 2025, doi: 10.3390/geotechnics5030063.
- [12] V. Mercado, N. Ayala, and J. Duque, “A system identification technique for the estimation of the bulk modulus based on pore water pressure dissipation records,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 194, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.soildyn.2025.109345.
- [13] V. San Martín, G. Montalva, and F. Schnaid, “Stress-Based CPTu Cyclic Liquefaction Triggering Procedures: Improvements from a State Parameter Approach,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 151, no. 4, Apr. 2025, doi: 10.1061/jggef.kgteng-12857.
- [14] R. Galindo, A. V. da Fonseca, S. Ríos, and H. Patiño, “Energy-based formulation for generation of pore pressure due to a combination of static and cyclic stresses,” *Eng. Geol.*, vol. 346, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.enggeo.2024.107887.
- [15] J. D. J. Silva, O. F. Dos Santos Júnior, O. de F. Neto, R. S. A. da Silva, M. L. A. E. Farias, and B. S. Lira, “Undrained monotonic behavior of a dune sand stabilized with porcelain waste and lime,” *Soils and Rocks*, vol. 48, no. 1, 2025, doi: 10.28927/SR.2025.011023.
- [16] W. Araujo, “Assessment of Liquefaction Potential in the Piura Region Using SPT and Shear Wave Velocity Measurements,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 13, no. 1, pp. 543–558, Jan. 2025, doi: 10.13189/cea.2025.130134.
- [17] Y. Santiago, C. Ledezma, and J. C. Tiznado, “Assessing soil liquefaction due to large-magnitude subduction earthquakes,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 188, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.soildyn.2024.109069.
- [18] F. Molina-Gómez, R. González-Olaya, and J. Camacho-Tauta, “Exploring liquefaction resistance in saturated and gassy sands at different state parameters,” *Transportation Geotechnics*, vol. 49, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.trgeo.2024.101410.
- [19] F. Molina-Gómez, A. Viana da Fonseca, C. Ferreira, and B. Caicedo, “Insights into the assessment and interpretation of earthquake-induced liquefaction in sands under different degrees of saturation,” Nov. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.earscrev.2024.104925.
- [20] A. Reyes, J. Bravo, R. Gallardo-Sepúlveda, J. E. Oviedo-Veas, and E. G. Díaz-Segura, “Analysis of Liquefaction in Tailings Deposits by Fem Modeling of Undrained Cyclic Triaxial,” *Minerals*, vol. 14, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/min14100991.
- [21] G. C. L. R. da Costa, G. J. C. Gomes, and H. P. Nierwinski, “Susceptibility to Liquefaction of Iron Ore Tailings in Upstream Dams Considering Drainage Conditions Based on Seismic Piezocone Tests,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2024, doi: 10.3390/app14146129.
- [22] M. Tafili, J. Duque, D. Mašin, and T. Wichtmann, “A hypoplastic model for pre- and post-liquefaction analysis of sands,” *Comput. Geotech.*, vol. 171, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.compgeo.2024.106314.
- [23] V. Mercado, J. Duque, and W. El-Sekelly, “Numerical modeling of LEAP-2022 dynamic centrifuge tests adopting a multi-surface plasticity model,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 181, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.soildyn.2024.108674.
- [24] L. C. D. S. M. Ozelim, M. D. T. Casagrande, and A. L. B. Cavalcante, “NorSand4AI: A comprehensive triaxial test simulation database for NorSand constitutive model materials,” *Geosci. Model Dev.*, vol. 17, no. 8, pp. 3175–3197, Apr. 2024, doi: 10.5194/gmd-17-3175-2024.
- [25] J. P. S. Silva *et al.*, “Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures,” *Soils and Foundations*, vol. 64, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.sandf.2024.101438.
- [26] H. Saldaña-Sotelo, G. Montalva, D. Escribano, S. Núñez-Jara, and J. C. Tiznado, “Two-dimensional nonlinear dynamic analysis of a liquefaction case history considering spatial variability and long-duration megathrust earthquakes,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 179, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.soildyn.2024.108511.
- [27] S. Núñez-Jara *et al.*, “Spatial variability of shear wave velocity: implications for the liquefaction response of a case study from the 2010 Maule Mw 8.8 Earthquake, Chile,” *Front. Earth Sci. (Lausanne)*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/feart.2024.1354058.
- [28] F. F. S. Costa, B. G. Delgado, and B. de M. Castilho, “Numerical sensitivity analysis for stress-strain simulation and flow liquefaction assessment of tailings storage facilities using the NorSand constitutive model,” *Soils and Rocks*, vol. 47, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.28927/SR.2024.011322.
- [29] J. Duque, M. Tafili, and D. Mašin, “On the influence of cyclic preloads on the liquefaction resistance of sands: A numerical study,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 172, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108025.
- [30] J. Macedo *et al.*, “Geotechnical characterization of collapsible salty sands subjected to monotonic and cyclic loadings – A case study for

areas with high seismicity,” *Soils and Foundations*, vol. 63, no. 1, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.sandf.2022.101252.

- [31] A. M. Ramos-Cañón, L. F. Prada-Sarmiento, and J. Camacho-Tauta, “Effects of initial stress anisotropy on the onset of undrained instability for Guamo sand,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 109, pp. 69–78, 2023, doi: 10.17533/udea.redin.20221104.
- [32] C. ; S.-M. A. ; M.-T. O. ; V.-A. A. I. Mendoza, “Site response analysis using true coupled constitutive models for liquefaction triggering,” *Earthquakes and Structures*, vol. 25, pp. 27–41, 2023, doi: <https://doi.org/10.12989/eas.2023.25.1.027>.
- [33] S. Sepúlveda-Cano, C. A. Vega-Posada, and E. F. García-Aristizábal, “Numerical analysis of soil desaturation by an air injection method,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 107, pp. 39–52, 2023, doi: 10.17533/udea.redin.20220580.
- [34] Rafael Ortiz y Oscar Luna, “Geotechnical exploration and analysis for the massive improvement of soils at a site with liquefaction potential for a power generation plant,” Nov. 2025.
- [35] R. Luis Rangel-Reyes, “Analysis of static liquefaction at the Edenville and Sanford dams,” 2022. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0001-8680-3696>
- [36] F. Molina-Gómez, A. Viana Da Fonseca, C. Ferreira, and B. Caicedo, “Experimental wave-based assessment of liquefaction resistance for different degrees of saturation,” *Geotechnical Testing Journal*, vol. 46, no. 6, pp. 968–985, 2023, doi: 10.1520/GTJ20230299.
- [37] “World Map - Simple | MapChart.” Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.mapchart.net/world.html>
- [38] “Free online word cloud generator and tag cloud creator - WordClouds.com.” Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.wordclouds.com/>