

Métodos para Identificar Suelos Colapsables

Erica Tatiana Ramírez Garzón

Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniera Civil

Director:

Livaniel Viveros Rosero - Ingeniero Civil, MIG

Universidad Santo Tomás

División de Ingenierías

Faculta de Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2021

Resumen

En este trabajo se presenta el estado del arte y los métodos para identificar los suelos colapsables. La investigación consistió en recopilar información para la identificación de este tipo de suelos, describiendo las técnicas experimentales que sirven para conocer su comportamiento y que a partir del análisis permiten delimitar su susceptibilidad a este problema.

La identificación de la colapsabilidad en los proyectos ayuda a minimizar problemas de fallas en estructuras, lo cual se traduce en prevenir pérdida de vidas humanas y económicas en ingeniería, siendo importante para futuras investigaciones que desean ampliar y comprender mejor el comportamiento de estos tipos de suelo.

Los suelos colapsables cubren un 10% de la superficie terrestre, se encuentran en regiones importantes, distribuidos en áreas áridas y semiáridas (Mansour Zaid *et al.*, 2008). Estos suelos causan problemas en las obras de ingeniería civil por los asentamientos diferenciales de gran magnitud. El fenómeno se relaciona principalmente con la estructura abierta y suelta que pueden presentar cambios repentinos en el volumen, con o sin el aumento de cargas externas.

Varias clasificaciones de colapso del suelo se basan en las propiedades físicas mecánicas y parámetros como el contenido de agua, los esfuerzos máximos que producen el colapso, el porcentaje de arcilla (material fino) y densidad. Para esta investigación se consultaron trabajos experimentales en los que se realizaron pruebas de laboratorio in situ, para ciertos tipos de suelos que mostraron indicios de colapsabilidad y se midieron directamente los cambios en las propiedades que llevaban al colapso.

Este documento proporciona una revisión de los suelos colapsables que incluyen las características mineralogía, clasificación, tipos de estructura, tipos de colapso y métodos de identificación en el laboratorio.

Palabras claves: suelos colapsables, métodos de identificación, propiedades físicas y mecánicas.

Contenido

	Página
1. Introducción.....	6
2. Objetivos.....	7
2.2 Alcance del proyecto	7
3. Marco teórico.....	8
3.1 Antecedentes	8
3.2 Desarrollo temático	11
3.3 Ubicación y distribución geográfica en Colombia.....	15
3.4 Características y condiciones del colapso	17
3.4.1 Mineralogía	18
3.4.2 Identificación y clasificación	19
3.4.3 Tipos de colapso	22
4. Métodos de identificación	24
4.1 Método del edómetro	24
4.2 Método por hidrometría	32
4.3 Método por microscopia electrónica de barrido (SEM).....	36
4.4 Método por magnitud del colapso	42
5. Criterios de colapso	44
6. Propuesta de metodología básica para identificar suelos colapsables	46
7. Conclusiones.....	49
8. Glosario	51
9. Referencias	53

Lista de figuras

	Página
Figura 1 Clasificación de suelos colapsables.....	9
Figura 2 Esquema de la deposición del loess eólico en la proximidad de grandes capas de hielo.	12
Figura 3 Distribución global de los principales depósitos de sedimentos eólicos.....	13
Figura 4 Depósitos de Loess en el mundo.	14
Figura 5 Distribución generalizada de los grupos de rocas y de sedimentos no consolidados en Colombia.....	15
Figura 6 Distribución de las condiciones húmedas en Colombia.	16
Figura 7 Características típicas de un suelo que es propenso al colapso.	17
Figura 8 Sumidero de 30 m de diámetro en Mala, Lanzhou.....	18
Figura 9 Uniones típicas de suelos colapsables.	21
Figura 10 Distribución de macroporos en depósito de suelo colapsable.	22
Figura 11 Resultado típico de las curvas de compresión obtenidas de la prueba del edómetro simple bajo un esfuerzo de 200 kPa.....	25
Figura 12 Gráfica de relación de vacíos, presión efectiva y el mecanismo típico de colapso del suelo.	26
Figura 13 Resultado típico de las curvas de compresión obtenidas de la prueba del edómetro doble.....	28
Figura 14 Resultados típicos de la prueba de doble edómetro.....	29
Figura 15 Cámara del edómetro.....	30
Figura 16 Determinación de la profundidad efectiva de la suspensión sobre el centro del hidrómetro.....	33
Figura 17 Distribución de los tamaños de las partículas de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia.	33
Figura 18 Partes del sistema PARIO.	34
Figura 19 Clasificación del suelo a partir de la granulometría por tamizado y el sistema PARIO.	35
Figura 20 Muestra de suelo en suspensión (ensayo tradicional).....	36
Figura 21 Observación de loess mediante el SEM.	37
Figura 22 Caolinita en forma de polvo.	38
Figura 23 Microscopio electrónico de transmisión.....	40
Figura 24. Clasificación de suelos colapsables.....	45

Lista de tablas

	Página
Tabla 1. <i>Asentamiento de colapso basado en el grado crítico de saturación.</i>	20
Tabla 2. <i>Criterio de clasificación de la susceptibilidad al colapso (Knight's, 1963).</i>	26
Tabla 3. <i>Ventajas y desventajas del ensayo del edómetro.</i>	30
Tabla 4. <i>Ventajas y desventajas del ensayo convencional y el sistema PARIO.</i>	36
Tabla 5. <i>Distribución de diámetro de poros (μm) y susceptibilidad al colapso.</i>	39
Tabla 6. <i>Relación de área poros (%) y clasificación del suelo.</i>	40
Tabla 7. <i>Ventajas y desventajas del equipo SEM.</i>	41
Tabla 8. <i>Clasificación del grado de colapso utilizando el índice de colapso de acuerdo con la norma ASTM D5333-03.</i>	43
Tabla 9. <i>Criterios para la identificación de suelos colapso.</i>	44
Tabla 10. <i>Severidad de los problemas de cimentación.</i>	48

1. Introducción

Los suelos colapsables están distribuidos en gran parte de la superficie terrestre cubriendo áreas importantes. Se encuentran en regiones desérticas, áridas y semiáridas o en climas húmedos como en América del norte y sur, África del sur y Asia central (Mitchell y Soga, 2005).

Estos suelos representan una amenaza potencial para las estructuras de ingeniería civil construidas sobre ellos, ya que pueden causar daños, ocasionando disminución del nivel de servicio, pérdidas financieras y en algunos casos de vidas humanas, debido a los asentamientos de gran magnitud que se presentan cuando colapsan. La importancia de reconocer los diferentes métodos para identificación de estos suelos, es que con ellos se puede determinar la magnitud del potencial de colapso.

El fenómeno es repentino al variar su contenido de agua o por los cambios del volumen con o sin cargas externas. La variación del contenido de agua genera un aumento en la presión interna del suelo que conlleva a la reducción de la resistencia al corte, pero en estado seco y natural, los suelos colapsables poseen alta rigidez y resistencia al corte (Rollins y Rogers 1994).

La investigación se basó en la revisión de la literatura y trabajos experimentales existentes sobre: los suelos colapsables, los criterios para identificarlos y los métodos para medir el colapso en el laboratorio, como el análisis de tamaño de sus partículas, la mineralogía, la resistencia en estado seco y húmedo, la evaluación del colapso mediante el criterio de la norma de la Asociación Americana de Ensayo de Materiales, ASTM (prueba edométrica bajo un esfuerzo de 200 kPa).

También se investigaron los diferentes criterios existentes que estiman el grado de colapsabilidad en los países donde se han desarrollado bases de datos sobre las propiedades de los suelos colapsables. Esto se podría utilizar como un punto de partida para su evaluación e identificación.

El comportamiento de estos suelos es complejo, debido a que son susceptibles a presentar cambios y alteración en su composición y distribución mineralógica, conduciendo al colapso. Este trabajo presenta una revisión de los suelos colapsables incluyendo características como su mineralogía, clasificación, tipos de estructura y colapso, y los métodos de identificación en el laboratorio.

2. Objetivos

General

Construir un estado del conocimiento sobre las diferentes técnicas y métodos experimentales para la caracterización geotécnica de suelos colapsables.

Específicos

- Establecer el estado del conocimiento sobre los suelos colapsables.
- Analizar los métodos y técnicas experimentales para caracterizar e identificar los suelos colapsables y medir el potencial de colapso.
- Proponer una metodología básica para clasificar los suelos colapsables.

2.2 Alcance del proyecto

El alcance general del proyecto es sintetizar las diferentes técnicas experimentales existentes en la literatura para identificar y caracterizar suelos colapsables, además de analizar las ventajas y desventajas de cada una. Adicionalmente, con base en este análisis se propondrá una metodología básica para identificar este tipo de suelos.

Se alcanzarán los objetivos mediante:

- Revisión de trabajos experimentales y empíricos existentes sobre suelos colapsables, con enfoque en técnicas y metodologías de caracterización.
- Análisis de los criterios, métodos o técnicas que estiman el grado de colapso para la identificación del suelo.
- Consulta de resultados experimentales de diferentes autores.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes

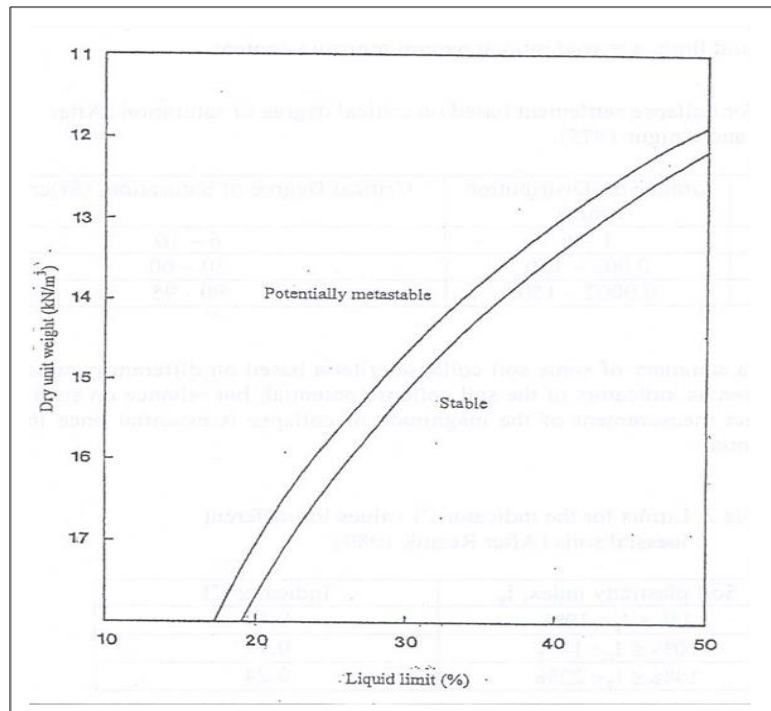
Los suelos colapsables se empezaron a estudiar e investigar en el siglo pasado alrededor de los años cincuenta, identificando las propiedades físico mecánicas que presentaban estos suelos, como la alta porosidad, el contenido de agua, los tipos y tamaños de materiales que los conforman y su estructura suelta.

Schmertmann (1955) y Graham y Li (1985), informaron que las propiedades físicas, el tipo de mineralogía, la composición química y la génesis de los suelos, son características relevantes para identificar el colapso. Igualmente, estos autores mencionaron que los asentamientos se deben a los vacíos entre granos grandes y finos, y a que los finos funcionan como unión o enlace interparticular.

Aitchison y Donald (1956) mencionaron que, para un suelo de granos esféricos uniformes en un empaquetamiento cúbico abierto, la presión agregada máxima debido al efecto capilar ocurre con un contenido de agua de aproximadamente 32%. Para el empaque más denso de granos esféricos uniformes, la tensión máxima ocurre con un contenido de agua del 10%.

Gibbs y Bara (1962) reportaron un criterio sugerido basado en la densidad seca natural y el límite líquido, que distingue entre suelos colapsable y suelos no colapsables como se muestra en la Figura 1. El método se basa en la premisa de que un suelo, que tiene suficiente espacio vacío para mantener su humedad límite líquida en la saturación, es susceptible al colapso al mojarse. La Figura 1 muestra que los suelos por encima de las líneas están en una condición suelta, y cuando están completamente saturados tendrán un contenido de humedad mayor que el límite de líquido.

Figura 1 Clasificación de suelos colapsables.



Nota: Tomado de *Predicting surface subsidence from basic soil tests*, de Gibbs y Bara (1962).

Dudley (1970), explicó para un suelo de este tipo, que el fenómeno del derrumbe (colapso) se debía a los agentes cementantes interparticulares que se desintegran cuando hay contacto con el agua cambiando la estructura de las partículas, y que la presión del agua se vuelve negativa cuando el suelo se seca por debajo del límite de contracción, generando pérdida del volumen bajo los esfuerzos máximos verticales que van variando respecto a la profundidad.

Barden L *et al.* (1973), informaron que los suelos colapsables presentaban condiciones como: estructuras abiertas, agentes cementantes de arcilla, condición de saturación parcial y, además, que las arenas y los limos son propensos al colapso cuando se humedecen.

Jennings y Knight (1975) sugirieron utilizar el ensayo del edómetro sobre una muestra de suelo no alterada para determinar el potencial de colapso.

Clemence y Finbarr (1981), concluyeron que el colapso era lento cuando las partículas de la muestra del suelo estaban unidas por cementantes químicos y más rápido cuando se presenta succión capilar.

Ismael *et al.* (1987), estudiaron los factores que afectan al potencial colapso en las arenas calcáreas mediante el ensayo del edómetro, analizando la influencia de los esfuerzos verticales, el tipo de estructura y la densidad relativa del suelo.

Walsh *et al.* (1993), informaron que existen otras causas potenciales del colapso como los drenajes superficiales o escorrentías y las roturas de las líneas de agua y canales.

Bell y Bruyn (1997), explicó que con el aumento del porcentaje de arcilla el colapso disminuye.

Pereira y Fredlund (2000), realizaron pruebas a muestras de arena limosa en el doble edómetro con un contenido de agua inicial del 10% y bajo esfuerzos verticales, evidenciando que una muestra de suelo soportó un esfuerzo vertical de 800 kPa antes de colapsar.

Miller y Col (2001), examinaron que el contenido de agua y el peso unitario seco son factores que afectan el colapso al momento de aumentar de contenido de agua. Realizaron ensayos de edómetro simple y doble encontrando valores de índice de colapso que variaban entre 0,4% y 1,8%, y que el colapso aumenta a menor densidad seca y mayor contenido agua en la muestra.

Houston *et al.* (2002), propusieron pruebas de colapso in situ donde evidenciaron que los asentamientos diferenciales se debían a que los materiales no eran uniformes y que la conductividad hidráulica vertical era mayor a la horizontal en estos suelos.

Delage *et al.* (2005), observaron que mediante el ensayo de microscopia electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy-SEM) que el colapso era inducido por la humectación, afectando a las partículas grandes con poros grandes y medianos, dando como resultado una estructura más organizada y homogénea con pequeños fragmentos de arcilla.

Reznik (2005) , ofreció un método para calcular los valores de presión estructural del suelo utilizando los resultados de la prueba del edómetro. El método permite calcular las presiones estructurales para cualquier valor de deformación de la muestra.

Das, B. M. (2007), observó mediante el ensayo del hidrómetro, que un suelo es colapsable si las partículas se dispersan en menos de 30 segundos. Además, evidenció que los suelos con relaciones de vacíos entre 0,5 y 0,7 colapsaban.

Howayek *et al.* (2011), explicaron que, debido a las deformaciones inducidas por la humectación y el aumento del esfuerzo vertical en el ensayo del edómetro, estos suelos alcanzaban un punto crítico y luego disminuían su resistencia, desencadenando el colapso del suelo.

Zamani, M., y Badv, K. (2019), mostraron mediante el ensayo de microscopia electrónica de barrido (SEM), que los suelos con un porcentaje mayor de arcilla y carbonatos tienden a una estructura homogénea y baja relación de vacíos. En cambio, si la muestra tiene partículas grandes de arena y poca arcilla, se forma una estructura abierta.

3.2 Desarrollo temático

El colapso es una característica típica de los suelos con baja plasticidad y partículas sueltas que se encuentran en regiones áridas y semiáridas. La mayoría de los suelos colapsables en áreas tropicales están sujetos a un proceso de laterización que consiste en una meteorización intensa con lixiviación de bases y sílice, lo que resulta en una acumulación relativa de caolinita y óxidos de hierro y aluminio en la fracción de arcilla (De Freitas, M. C. *et al.*, 2017). Debido al intemperismo extensivo e intenso, los minerales primarios pueden originar un depósito de suelo colapsable (Mansour Zaid *et al.*, 2008).

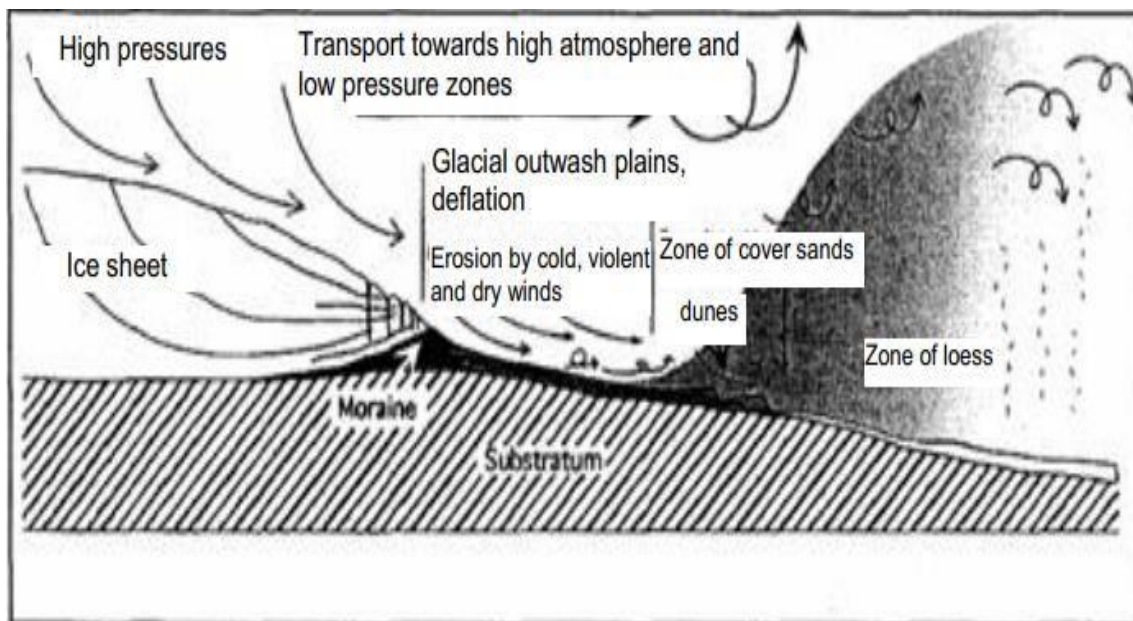
Por otro lado, los suelos colapsables son aquellos que soportan esfuerzos verticales altos sin mostrar alteración en el volumen, pero al saturarse son susceptibles a grandes deformaciones. En algunos casos el suelo experimenta el fenómeno del colapso en condición no saturada, con o sin el aumento de carga adicional (Roger, 1995; Houston,

2001; Gaaver, 2012). Los factores que contribuyen a este fenómeno son: la presión de poros, la resistencia al corte, el grado de saturación y el esfuerzo vertical.

De igual manera estos materiales son susceptibles a los cambios en su contenido de humedad y el aumento en los esfuerzos que actúan sobre ello. Su comportamiento mecánico y los factores externos que interfieren son desencadenantes del fenómeno, su estructura es estable, metaestable o inestable. Tienen además características macroporosas y granulometría fina, predominando los tamaños arcilla, limo y arena, con gran separación entre partículas. Tienen una alta resistencia a la deformación con su contenido de agua natural, presentan una baja plasticidad y alta rigidez en estado seco (Zamani, M., y Badv, K., 2019).

En la Figura 2 se muestra la formación de depósitos de suelos glaciares eólicos: las partículas finas son producidas por los glaciares y se transportan por el flujo preglaciar. Las partículas de arenas, arcillas y limos que se someten a períodos de deshielo y congelación se erosionan y son transportadas por vientos secos fuertes y fríos; las de arena se depositan como dunas y; los limos y arcillas se transportan hacia la zona de baja presión.

Figura 2 Esquema de la deposición del loess eólico en la proximidad de grandes capas de hielo.

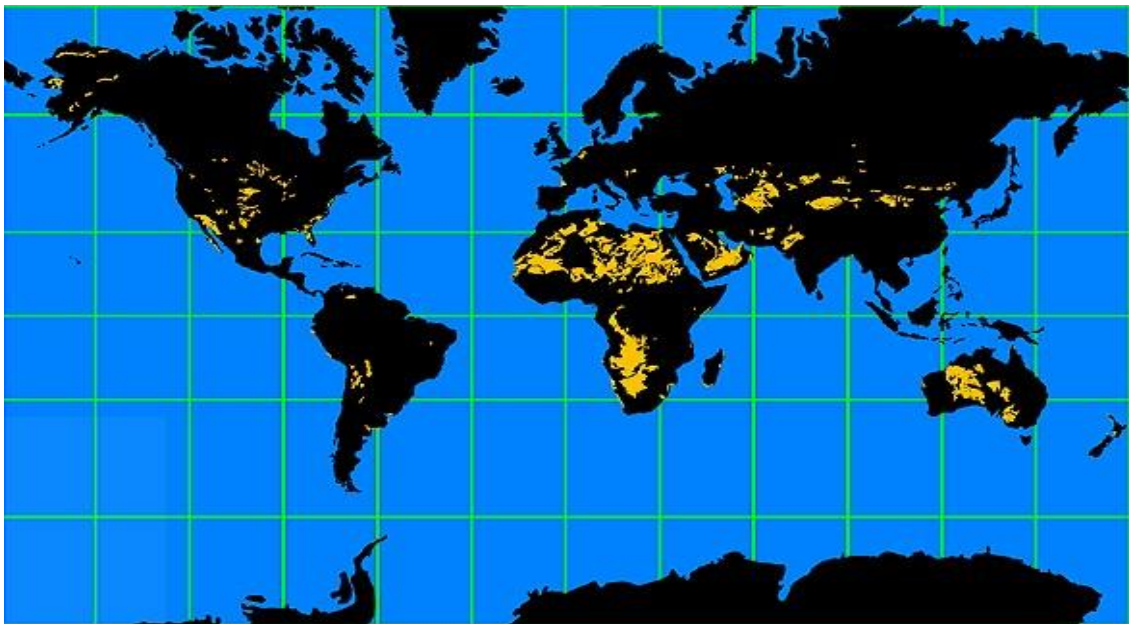


Nota: Tomado de *The Ice age of World*, de Andersen y Borns (1997).

Debido a los ciclos climáticos y la descongelación periódica de los glaciares se forman diferentes tipos de materiales de granos gruesos y finos, los tamaños de los granos y la morfología de las partículas de los suelos loess y arcillosos con illita y caolinita se forman durante un periodo bajo del nivel del mar en un ambiente frío (Andersen y Borns, 1997).

En una categoría general los suelos colapsables están compuestos por depósitos coluviales, aluviales, residuales y toba volcánica. Los depósitos eólicos se encuentran en regiones áridas donde el nivel freático es bajo. Los depósitos aluviales se forman por corrientes de lodos y por precipitaciones irregulares. Los depósitos coluviales se crean mediante transporte por gravedad, los residuales contienen partículas de arcilla y limo y roca siendo estructuras inestables con relaciones de vacíos altas por la lixiviación del material fino y soluble, también se encuentran otros tipos de suelos que presentan colapso al realizar un mejoramiento (NSR-10 Titulo-H) "-como los derivados de toba volcánica, yeso, arenas sueltas cementadas con sales solubles, arcillas dispersivas y, arcillas de montmorillonita ricas en sodio-"(Clemence y Finbarr, 1981).

Figura 3 Distribución global de los principales depósitos de sedimentos eólicos.

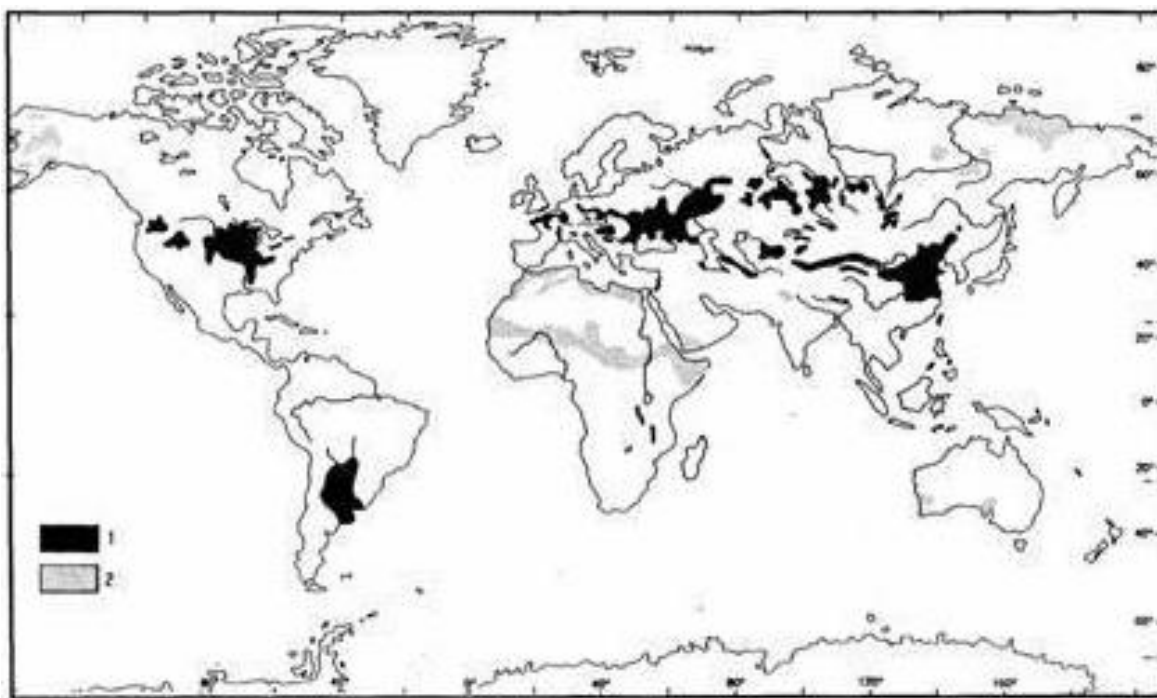


Nota: Tomado de Eolian Processes and Landforms, *Fundamentals of Physical Geography*, de Pidwirny, 2006. www.physicalgeography.net/fundamentals/10ah.html

Este tipo de suelos susceptibles a la disminución del volumen al tener contacto con el agua, se encuentran en gran parte de la superficie de la tierra como se muestra en la Figura 3, particularmente en el medio oeste y sudoeste de los Estados Unidos, partes de Asia, América del Sur y África del Sur (Mitchell y Soga, 2005). En diferentes regiones de Irán, estos suelos han mostrado una reducción repentina e irreversible del volumen al ser sometidos a esfuerzos (Zamani, M., & Badv, K., 2019); sin embargo, en regiones desiertas, áridas y semiáridas con climas húmedos también se encuentran estos suelos que presentan colapso.

La Figura 4 muestra los depósitos de loess en el mundo, el 1 indica los loess y el 2 sedimento de loess. Los depósitos se localizan en las laderas y cuencas aluviales, estos también se encuentran en Siberia, el río Danubio, el río Mississippi, Argentina y las regiones costeras de Brasil y Colombia (Delage, P., 2005). También indicó que estos suelos pueden alcanzar espesores entre 8 y 50 m. Regiones como el norte de Francia, desde Bretaña hasta Normandía, se caracteriza por estar cubiertas por capas de alrededor de 4 a 7 m de espesor de suelos de loess calcáreo, el agente que los transporta ha sido los fuertes vientos.

Figura 4 Depósitos de Loess en el mundo.

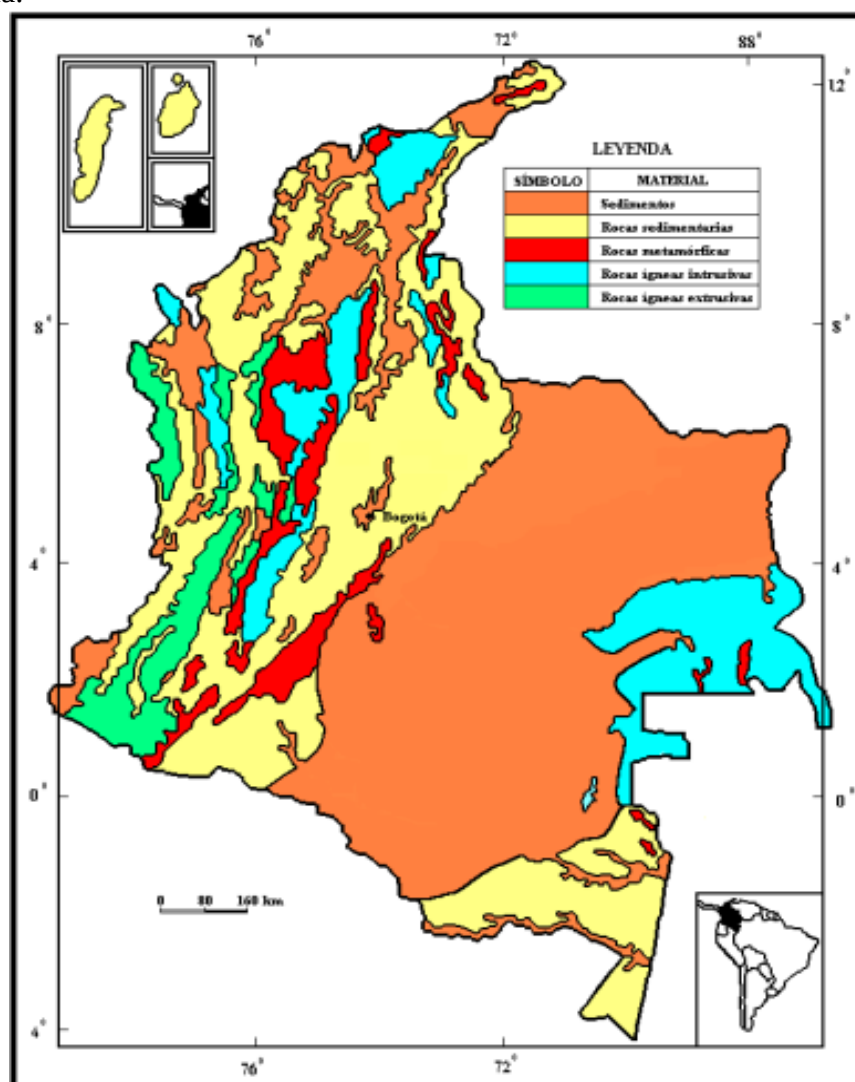


Nota: Tomado de Loess is not just the accumulation of dust, de Pecsí (1990).

3.3 Ubicación y distribución geográfica en Colombia

La distribución general de los suelos colapsables, en las regiones de Colombia, muestra que se encuentran en la Amazonia, en algunos sectores de la cordillera de los Andes, en la región Pacífica y región de la Orinoquía. Estos materiales se encuentran con alta presencia de caolinita con y sin micas, gibsita o cuarzo. En las cordilleras se encuentran materiales compuestos por minerales como alófana, haloisita y mica. Para los valles interandinos y llanuras caribe los materiales colapsables que se encuentran, tienen montmorillonita, vermiculita, micas y caolinita (Jaramillo, 2002).

Figura 5 Distribución generalizada de los grupos de rocas y de sedimentos no consolidados en Colombia.



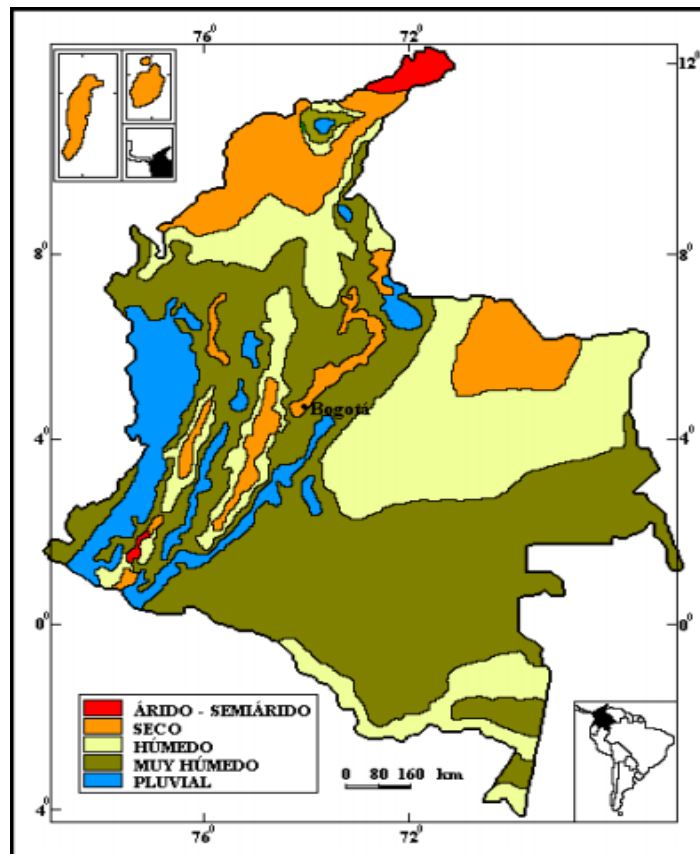
Nota: Tomado de *Introducción a la ciencia del suelo*, de Jaramillo (2002).

En la Figura 5 se aprecia en naranja la distribución de los grupos de rocas sedimentarias, de las cuales se derivan diferentes tipos de sedimentos que forman los suelos colapsables.

Los suelos colapsables se forman en regiones áridas y semiáridas y de acuerdo con la información mostrada en la

Figura 6, se evidencia que este tipo de suelos, también se podrían encontrar en el departamento de Antioquia hacia el oriente, el Norte de Santander, la costa y las cordilleras Central y Oriental. En la región de la Guajira los suelos presentan características desérticas predominando las arenas y los limos. Por su génesis, en las tres cordilleras predominan las cenizas volcánicas que generan procesos de erosión y grandes movimientos en masa. En la zona Caribe se encuentran suelos arcillosos compuestos de montmorillonita y otros minerales arcillosos activos (Jaramillo, 2002).

Figura 6 Distribución de las condiciones húmedas en Colombia.



Nota: Tomado de *Introducción a la ciencia del suelo*, de Jaramillo (2002).

3.4 Características y condiciones del colapso

Los suelos colapsables se caracterizan por presentar un alto porcentaje de partículas de tamaño fino, pero plasticidad nula o leve, una alta relación de vacíos y una alta resistencia y rigidez en condición seca o de bajo contenido de agua.

Por lo general, en un suelo colapsable (lateritas, loess y limos) el contenido de finos es mayor del 60% y la porosidad está entre 50 y 60%, el límite líquido por debajo del 35%, el índice de plasticidad menor del 25%, y el límite plástico inferior al 10%, además de tener presiones negativas de poros que inducen a movimientos y distensión entre las partículas, debido al contenido de agua y la capilaridad, se disminuye la resistencia entre partículas y el volumen del suelo (Howayek, A. et al., 2011).

En ciertos casos el colapso surge en algunos suelos por la escasez de arcilla (inferior al 10%) y si un suelo contiene bastante arcilla al humedecerse se expande haciendo que el colapso sea más lento (Li, P. *et al.*, 2016).

Figura 7 Características típicas de un suelo que es propenso al colapso.



Como muestra la Figura 7, la estructura abierta, suelta, inestable y parcialmente saturada son características de suelos propensos al colapso. Someter este tipo de suelos a un esfuerzo vertical elevado o la saturación parcial, hace que los cementantes de arcilla y sales solubles pierdan adherencia provocando el colapso.

Características de los suelos susceptibles al colapso:

- Alta porosidad y baja densidad seca.
- Bajo grado de saturación.
- Baja resistencia (baja cohesión).

- Alto contenido de limo y bajo contenido de arcilla.
- Formaciones geológicas recientes.
- Estructuras metaestables.

Las características anteriores hacen que el suelo tenga una desorganización radical de sus partículas; debido a la gran pérdida de cementantes y partículas finas por el traspaso de fluidos a través de él, lo que aumenta la posibilidad de que se produzca el colapso por procesos naturales. Estos suelos están sometidos a procesos de cambio constante por el clima durante su historia geológica.

La Figura 8 se muestra el colapso de un suelo a gran escala. Se evidencia que los daños producidos por este fenómeno pueden ser de gran magnitud y la afectación irreversible. Además, en muchas ocasiones el colapso de estos suelos puede causar pérdida de vidas humanas.

Figura 8 Sumidero de 30 m de diámetro en Mala, Lanzhou.



Nota: Tomado de *Genesis and properties of collapsible soils*, de Derbyshire et al. (1995).

3.4.1 Mineralogía

Los suelos colapsables tienen minerales típicos como el cuarzo, feldespato, carbonato, mica y yeso. una fracción arcillosa está compuesta por caolinita en capas mixtas y dolomita de calcita, hidrómica (illita), montmorillonita y cuarzo, finamente dispersos (Howayek, A. et al., 2011). Las partículas finas de arenas y limos contienen un porcentaje

bajo de arcilla, illita, cuarzo, caolinita, hematita, goetita y gibsita, óxidos de hierro y carbonatos (Osipov & Sokolov, 1994).

Estos minerales típicos se pueden dividir en dos grupos, en función del papel que desempeñan en el proceso de colapso (Egri, 1972)

Minerales activos, que se modifican debido al proceso de colapso, y que incluyen carbonatos (principalmente calcita), sulfatos (yeso) y sal.

Minerales pasivos, que no se modifican debido al proceso de colapso, y que incluyen cuarzo, feldespato y mica.

Los minerales arcillosos activos tienen baja densidad, un índice de plasticidad bajo, alta porosidad, enlaces cortos, estructura abierta y son susceptibles a cambios físico-químicos (cambios en las fuerzas de enlace). Son los más propensos al colapso.

Los limos son aquellos suelos con enlaces cortos, estructura abierta y alta relación de vacíos, producidos por la sedimentación. Las arenas tienen enlaces cortos, estructura abierta sin cohesión y una alta relación de vacíos.

3.4.2 Identificación y clasificación

Clemence y Finbarr, (1981), manifiestan que los suelos colapsables se originan como “derivados de tobas volcánicas, yesos, arenas sueltas con sales solubles que actúan como enlaces, las arcillas dispersivas y las arcillas de montmorillonita ricas en sodio”.

Los suelos colapsables limosos de color amarillo o rojizo se identifican por su densidad baja, alta rigidez y resistencia en estado seco (Howayek, A. et al., 2011); los cuales por la infiltración del agua a través de las partículas tienen un proceso de desintegración en los enlaces. Se consideran en estos suelos dos tipos de enlaces o uniones, el enlace hidroestable que ocurre cuando la resistencia no disminuye visiblemente con agua y la unión hidrolábil, que es cuando la resistencia disminuye al entrar en contacto con el agua (Yang.,1989).

Para la identificación de estos suelos es importante realizar primero una evaluación visual para determinar si el suelo tiene indicios de presentar colapso, en caso de tenerlos se llevan muestras al laboratorio y se corrobora mediante ensayos o pruebas.

Jennings y Knight (1975), indicaron que la identificación del suelo colapsable podía hacerse por el grado de saturación y la distribución del tamaño de las partículas que contiene la muestra, como se muestra en la Tabla 1.

Uno de los prerrequisitos clave para que ocurra el colapso es que el suelo debe estar parcialmente saturado; y parece haber un valor crítico para el grado de saturación (S_r) por debajo del cual puede ocurrir el fenómeno de colapso y por encima del cual no ocurrirá. Jennings y Knight (1975)

Tabla 1. Asentamiento de colapso basado en el grado crítico de saturación.

Suelo	Distribución del tamaño de grano (mm)	Grado crítico de saturación, S_r (%)
Gravas finas	1 – 6	6 – 10
Arenas limosas finas	0,002 – 150	50 – 60
Limos arcillosos	0,0002 – 150	90 - 95

Nota: Tomado de *a guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure* de Jennings y Knight (1975).

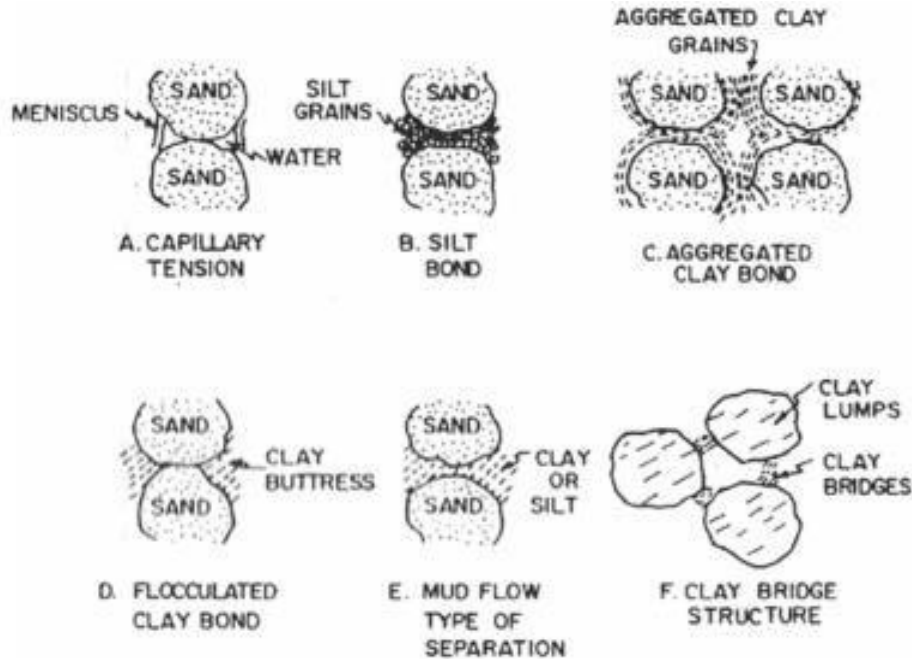
Los minerales de silicatos se originan a partir de las rocas sedimentarias e ígneas, debido a los agentes químicos que las descomponen, originando arcillas y, a esto se debe que las arcillas estén constituidas principalmente de este mineral (Juárez E. y Rico A., 2005).

En la Figura 9, se muestra un esquema de las partículas de arcilla. Las diferentes formas corresponden a la intensidad y lapso con que los agentes químicos y mecánicos han modificado el suelo. Las formas se deben al transporte que tuvieron sus partículas antes de ser depositadas; las formas redondas son frecuentemente visualizadas en los ríos, las angulosas en las arenas residuales y las laminares en las arcillas (Juárez y Rico, 2005).

Los suelos colapsables están compuestos por sedimentos de partículas de diferentes tamaños y tipos, formando esqueletos continuos por los granos gruesos y enlaces por las

partículas finas (Howayek, A. et al., 2011). En esta estructura la sedimentación se da simultáneamente, entre las partículas grandes y finas, al contacto con el agua.

Figura 9 Uniones típicas de suelos colapsables.



Nota: Tomado de *Design Considerations for collapsible soils*, de Clemence y Finbarr (1981).

Handy (1973) determinó que cuando el contenido de arcilla es inferior al 16%, estos suelos están sujetos a una alta probabilidad de colapso y para un contenido de arcilla en el rango de 24 a 32%, la probabilidad de colapso es del 50%.

3.4.2.1 Tipos de estructuras

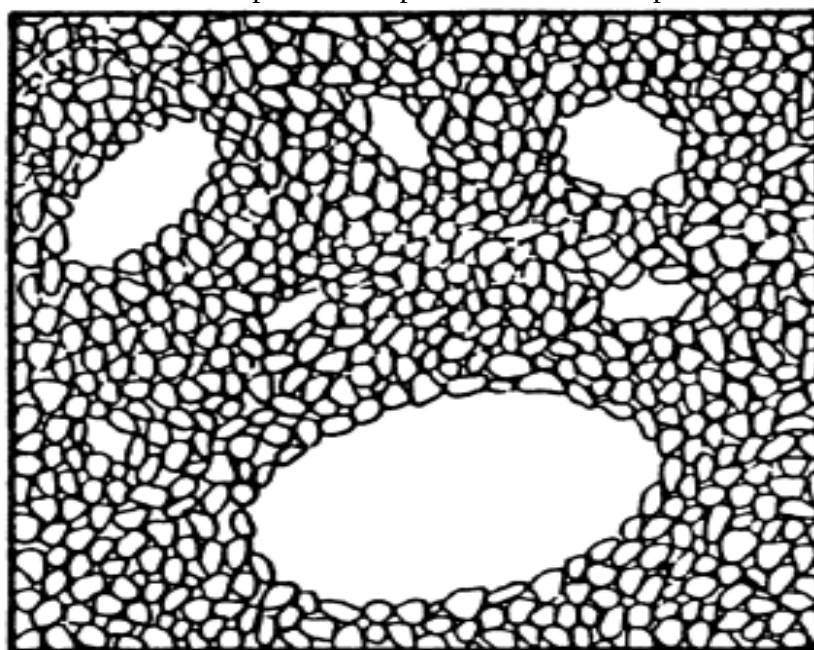
Las microestructuras, que incluyen las partículas, los contactos entre ellas, los enlaces de cementación y los poros, definen el comportamiento colapsable de estos suelos.

Un suelo colapsable tiende a una estructura abierta o metaestable que está conformada por partículas y cementantes susceptibles al colapso, quiere decir que las partículas están desorganizadas con alta relación de vacíos. Inmediatamente se presenta el fenómeno, la estructura se vuelve estable, en otras palabras, las partículas se someten a una disminución considerable de los vacíos resultando en una estructura organizada.

La reorganización de las partículas de mayor tamaño forma una disposición estable, donde la cementación y los enlaces entre partículas pueden descomponerse por completo a medida que las partículas se reorganizan en una estructura más densa.

Las formas de los poros se deben al tipo de sedimentación que ha tenido el suelo, estas se clasifican como: la submicroscópica está relacionada por tener poros pequeños que imposibilita un flujo continuo, la microscópica corresponde a la génesis, uso y estructura del suelo y las macroporosas están conformado por grandes poros que dependen de la capa vegetal que cubre la superficie; las grietas, los cambios volumétricos y la expansión del suelo (Bruckler, 1998), como se muestra en la Figura 10. Los cambios de los poros se deben a las cargas adicionales que exceden la resistencia de suelo, y derivan en su reducción.

Figura 10 Distribución de macroporos en depósito de suelo colapsable.



Nota: Tomado de *Genesis and properties of collapsible soils*, de Derbyshire *et al.* (1995).

3.4.3 Tipos de colapso

Las condiciones para estimar el potencial colapso se evalúan mediante los parámetros físicos y ensayos mecánicos. El colapso es un evento único producido por la combinación de desencadenantes como el contenido de agua total y el aumento de carga (esfuerzo), que ocurre en un momento en particular.

- La susceptibilidad al colapso se determina mediante la utilización de parámetros geotécnicos estándar como la densidad, plasticidad y relación de vacíos del suelo.
- El colapso inducido por humectación o hidrocompresión se presenta con o sin carga adicional, pero se genera cuando el suelo se satura y compacta. Se puede obtener a partir de diferentes contenidos de agua (Li, P. *et al.*, 2016).
- El auto colapso se produce cuando el suelo no soporta su propio peso y el colapso con carga cuando se adiciona peso sobre la estructura del suelo.
- El colapso por compactación se produce por la falta de densificación durante la compactación, se evidencia en los rellenos artificiales (Howayek, A. *et al.*, 2011).
- El pseudo-colapso se produce por cambios en la fuerza de unión entre partículas.

4. Métodos de identificación

Para identificar estos tipos de suelos en la literatura se encuentran métodos de carácter cuantitativo que se basan en el análisis de resultados numéricos, y de carácter cualitativo basados en características de la muestra como la porosidad, los límites de Atterberg, el contenido de agua natural y aumentado, la relación de vacíos y la densidad. Estos métodos son:

- Método por edómetro.
- Método por hidrometría.
- Método por microscopio electrónico de barrido (SEM).
- Método por magnitud del colapso (doble edómetro).

4.1 Método del edómetro

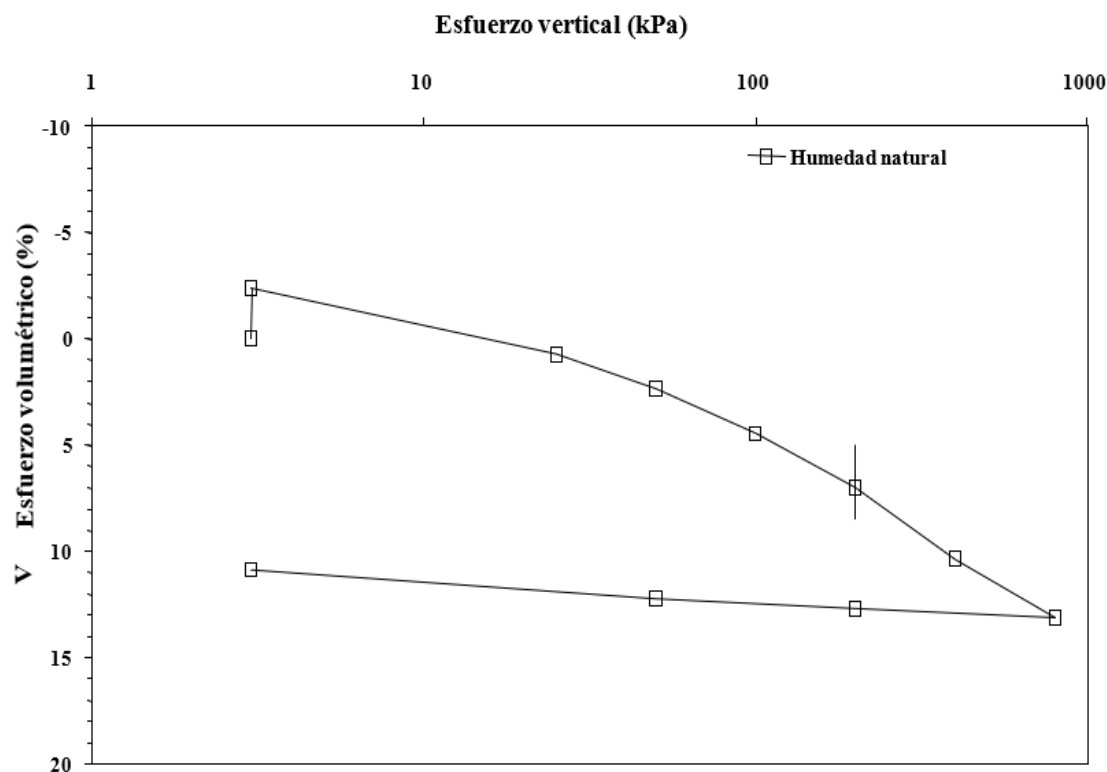
El método del edómetro es de carácter cuantitativo y permite medir la deformación o colapso por la aplicación gradual de una carga vertical, que varía entre 50, 100, 200, 400, 800 y 1600 kPa, sobre una muestra inalterada de un suelo.

El método permite controlar, medir y calcular los factores que afectan el potencial colapso (grado de saturación, densidad seca y esfuerzo máximo que soporta la muestra).

El ensayo del edómetro simple consiste en utilizar una muestra de suelo en estado natural inalterada. En la se muestra la curva de deformación típica de un suelo. Este ensayo se aplica a suelos arcillosos, pero para el caso de las arenas los asentamientos son inmediatos.

Figura 11 se muestra la curva de deformación típica de un suelo. Este ensayo se aplica a suelos arcillosos, pero para el caso de las arenas los asentamientos son inmediatos.

Figura 11 Resultado típico de las curvas de compresión obtenidas de la prueba del edómetro simple bajo un esfuerzo de 200 kPa.



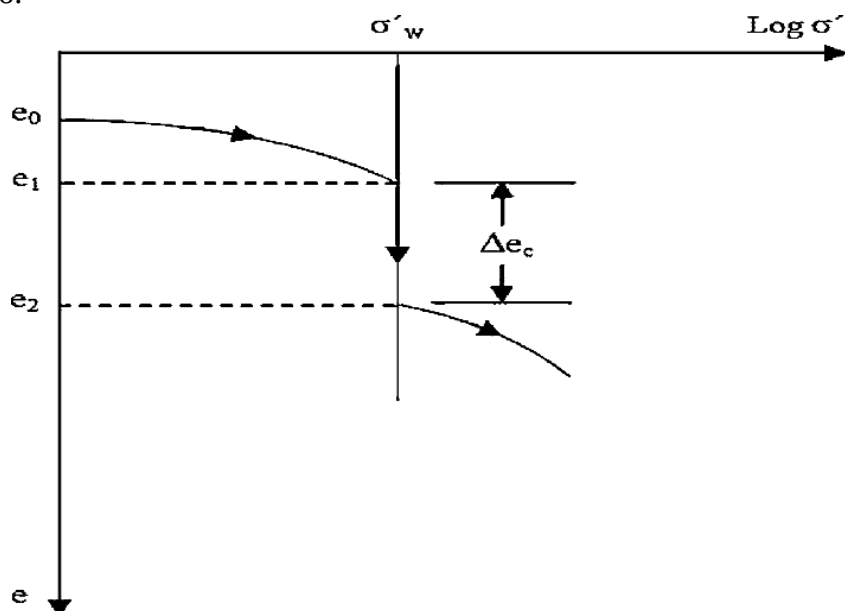
Nota: Adaptado de *Geotechnical problems related with loess deposits in Northern France* de Delage et al. (2005).

La Figura 12 muestra el comportamiento de colapso de un suelo bajo carga que se obtiene mediante el ensayo de consolidación o prueba edométrica con su contenido de agua natural. La muestra contiene aire entre las partículas por lo tanto es más rígida durante la compresión, sufriendo cambios lentos, pero más susceptible al colapso por los grandes poros que tiene. El cambio de la relación de vacíos e_1 a e_2 , indica que el suelo colapsó sin el aumento de la carga.

Ali et al., (1989), Ali et al.,(2010), Delage et al. (2005), De Freitas et al. (2017) y Howayek et al. (2011), coinciden en que el colapso del suelo se presenta en el rango de 50 a 600 kPa de esfuerzo vertical con un contenido de agua menor del 60%, un índice de plasticidad entre 6 y 9% y con una de las menores densidades; demostraron que lo mencionado por Knight's (1963) era lo más acertado con su clasificación, en otros casos

solo se necesita cambiar el porcentaje de saturación del 15% al 30% para provocar el colapso.

Figura 12 Gráfica de relación de vacíos, presión efectiva y el mecanismo típico de colapso del suelo.



Nota: Tomado de *Identifying and Analyzing Problematic Soils* de Ali *et al.* (2010).

Knight's (1963), definió varios grados de susceptibilidad al colapso, cargando el espécimen con humedad natural hasta una carga de 200 kPa, para luego inundarlo durante un periodo de tiempo hasta que se produzca el colapso. De acuerdo con la disminución de volumen observada durante el ensayo, se definieron varios grados de susceptibilidad, desde no colapsable (0 a 1%) hasta muy colapsable (10 a 20%), como se muestra en la

Tabla 2. Criterio de clasificación de la susceptibilidad al colapso (Knight's, 1963).

Deformación unitaria por colapso bajo 200 kPa (%)	Susceptibilidad
0-1	No colapsable
1-5	Ligeramente colapsable
5-10	Colapsable
10-20	Muy colapsable

Nota: Tomado de *The origin and occurrence of collapsing soils* de Knight's (1963).

El método del doble edómetro o prueba en paralelo se basa en la suposición de deformación inducida. La prueba se realiza utilizando dos muestras de suelos idénticas e inalteradas: la primera muestra se ensaya con su contenido de agua natural, a la otra se le aumenta la saturación. Se aplica una secuencia de carga idéntica para ambas muestras, los resultados se presentan mediante dos curvas de deformación unitaria vertical versus el esfuerzo aplicado, que representan el cambio del volumen de las dos muestras.

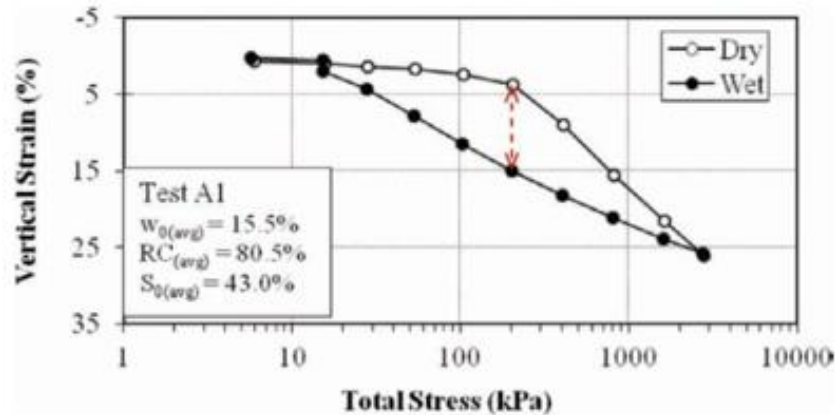
Según Houston et al. (1988), el colapso se evalúa cuando la muestra se satura y se somete a un esfuerzo vertical. En la se muestra la gráfica del ensayo. El colapso se evalúa por la diferencia de la deformación unitaria vertical de las dos curvas bajo el esfuerzo aplicado de 200 kPa.

El desplazamiento vertical entre la curva de la muestra seca y saturada, da como resultado la susceptibilidad al colapso inducido por la saturación: el resultado de deformación de la muestra saturada, alcanza un máximo esfuerzo y luego disminuye alejándose de la curva de la muestra seca. La línea punteada de rojo indica el esfuerzo medio a 200 kPa que soportó la muestra; con este valor se define el índice de colapso que se utiliza en la ASTM D5333-03.

Figura 13 se muestra la gráfica del ensayo. El colapso se evalúa por la diferencia de la deformación unitaria vertical de las dos curvas bajo el esfuerzo aplicado de 200 kPa.

El desplazamiento vertical entre la curva de la muestra seca y saturada, da como resultado la susceptibilidad al colapso inducido por la saturación: el resultado de deformación de la muestra saturada, alcanza un máximo esfuerzo y luego disminuye alejándose de la curva de la muestra seca. La línea punteada de rojo indica el esfuerzo medio a 200 kPa que soportó la muestra; con este valor se define el índice de colapso que se utiliza en la ASTM D5333-03.

Figura 13 Resultado típico de las curvas de compresión obtenidas de la prueba del edómetro doble.



Nota: Tomado de *Identification and behavior of collapsible soils* de Howayek et al. (2011).

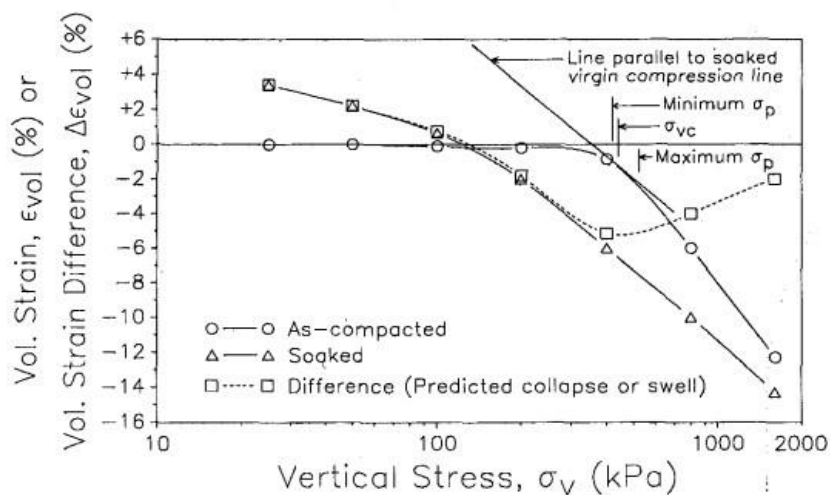
En la se muestra el resultado del doble edómetro: la muestra con contenido de agua natural es la línea con círculos, donde el colapso se presenta por la aplicación de un esfuerzo vertical máximo; para el segundo caso, la línea con triángulos representa la muestra con mayor contenido de agua y tiene como resultado una disminución del colapso por la densificación y el aumento de agua sobre la muestra. La comparación de las curvas desencadena el colapso que se puede observar a un esfuerzo de 400 kPa donde la distancia vertical entre las curvas es más grande y la línea trazada de manera paralela sobre la primera curva indica que coincide el esfuerzo máximo aplicado sobre las dos muestras.

Lawton (1992) concluyó que, aumentando el contenido de agua de la muestra de suelo bajo un esfuerzo de 400 kPa, ésta era susceptible al colapso, pero si el contenido de agua se disminuye al 17% en la muestra, el colapso es más representativo.

Figura 14 se muestra el resultado del doble edómetro: la muestra con contenido de agua natural es la línea con círculos, donde el colapso se presenta por la aplicación de un esfuerzo vertical máximo; para el segundo caso, la línea con triángulos representa la muestra con mayor contenido de agua y tiene como resultado una disminución del colapso por la densificación y el aumento de agua sobre la muestra. La comparación de las curvas desencadena el colapso que se puede observar a un esfuerzo de 400 kPa donde la distancia vertical entre las curvas es más grande y la línea trazada de manera paralela sobre la primera curva indica que coincide el esfuerzo máximo aplicado sobre las dos muestras.

Lawton (1992) concluyó que, aumentando el contenido de agua de la muestra de suelo bajo un esfuerzo de 400 kPa, ésta era susceptible al colapso, pero si el contenido de agua se disminuye al 17% en la muestra, el colapso es más representativo.

Figura 14 Resultados típicos de la prueba de doble edómetro.



Nota: Tomado de *Review of Wetting Induced Collapse in Compacted Soil* de Lawton et al. (1992).

Ecuación para el cálculo

El índice de colapso (I_c) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{|d_f - d_i|}{h_0 - |d_f - d_0|} * 100 \quad (1)$$

De acuerdo a norma ASTM D5333-03 (2003), las variables son:

do: lectura del medidor de deformación en el momento en que se va a iniciar el ensayo.

df: lectura del medidor de deformación al momento del equilibrio con la presión vertical aplicada antes de ser saturada.

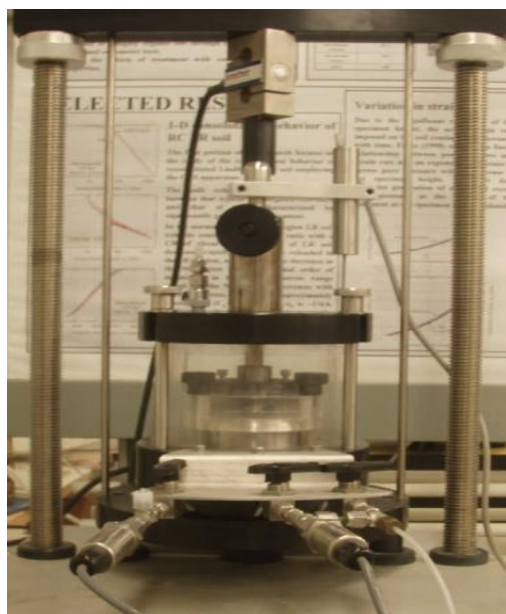
di: lectura del medidor de deformación al momento del equilibrio con la presión vertical aplicada después de ser saturada.

ho: altura inicial de la muestra.

Tabla 3. *Ventajas y desventajas del ensayo del edómetro.*

Ventajas	Desventajas
• Se pueden determinar propiedades físicas como (humedad natural, peso seco, volumen, gravedad específica de sólidos y magnitud del colapso). • Se mide la relación de vacíos in situ y final, para el resultado del cambio volumétrico. • Mide los factores que provocan el colapso: grado de saturación, densidad seca y esfuerzo de sobrecarga (Lawton et al., 1992). • Permite medir la diferencia de deformación parcial y total de la muestra saturada. • Se obtienen muchos datos de una sola prueba. • Se pueden controlar los esfuerzos aplicados y la saturación.	• Las muestras inalteradas de suelos son difíciles de obtener. • Se requiere disponibilidad mínima del edómetro de dos días para la realización del ensayo (la carga se aumenta cada 24 horas). • Se tiene que llevar un riguroso proceso, ya que con cualquier error se alteran los resultados.

Figura 15 Cámara del edómetro.



Nota: Tomado de *Identification and behavior of collapsible soils* de Howayek et al. (2011).

Partes del edómetro

Base rígida (Yugo, contrapeso, palanca, cargador y juego de pesas).

Célula edométrica (piedra porosas inferior u superior, collarín, anillo, papel filtro, tuerca de fijación y pistón de carga).

Computador donde se registra la deformación.

Pasos para uso del edómetro

1. Preparación de la muestra inalterada (tallado y remoldeo con el disco de molde).
2. Se coloca la muestra en el anillo de bronce y se pesa.
3. Se coloca una piedra porosa saturada y papel filtro inferior dentro del edómetro.
4. Se coloca el papel filtro, la piedra porosa saturada y se fija la parte superior.
5. Luego se centra dentro de la caja de bronce edométrica.
6. Se pone la barra de carga.
7. Se procede a colocar el pistón y se aumenta el nivel del agua (saturación).
8. Se sobrecarga gradualmente.
9. Se coloca una carga y se toma la deformación vertical de la probeta después de 24 horas y luego se repite el proceso.
10. El índice de relación de vacíos, se calculará a partir de la deformación vertical de la muestra en cada escalón de carga, esto da la curva edométrica.
11. Se calcula el colapso después de la infiltración del agua.

4.2 Método por hidrometría

El análisis de hidrometría o granulometría por hidrómetro se utiliza para determinar los tamaños de las partículas. Consiste en determinar el tamaño de las partículas finas en suspensión, en agua destilada junto con un agente dispersante, durante un tiempo determinado. Se basa en la ley de Stokes que proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas de suelo en un fluido respecto a su tamaño, solo para las partículas que pasa el tamiz 74 μm (#200) (Juárez E. y Rico A.2005).

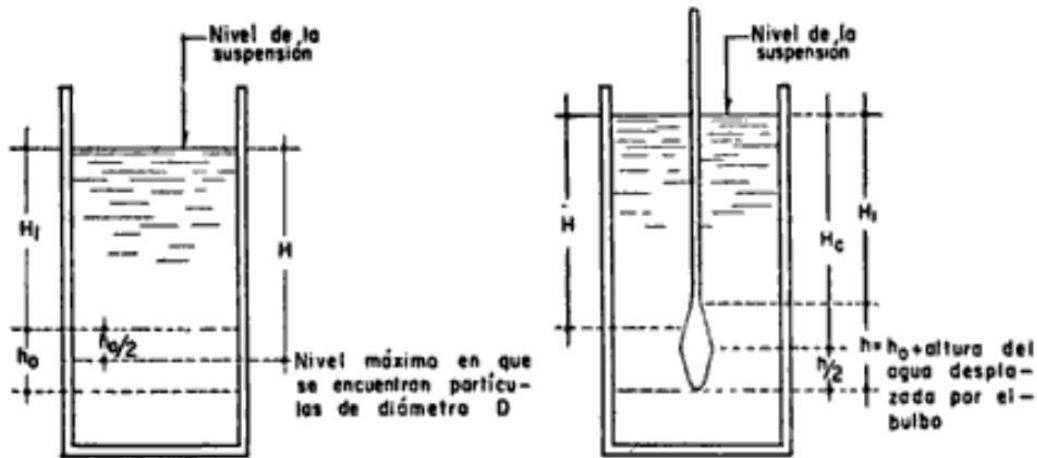
El resultado se representa en una curva de distribución granulométrica (tamaño de partículas del suelo versus porcentaje que pasa), ya que se puede determinar el tamaño de las partículas finas de limos y arcillas que se sedimentan a partir de la densidad de la solución, que va disminuyendo a medida que avanza el ensayo.

Se realizan las correcciones del menisco, defloculante y temperatura: para el caso del menisco se lee en la parte superior del menisco y se suma su altura; la segunda corrección depende de la cantidad de defloculante utilizada; y para la última se recomienda que la temperatura sea constante para toda la prueba a 20°C, teniendo en cuenta los cambios volumétricos del bulbo (Valencia A. y Huertas L., 2018).

Luego de colocar la muestra de suelo en suspensión, se empieza la toma de datos desde el inicio de la sedimentación y después en cada intervalo de tiempo. Las partículas se sedimentan a diferentes velocidades por la forma, tamaño y peso como se muestra en la Para este ensayo el suelo que predomina son los limos y arcillas, y si la muestra presenta escasez de arcilla el comportamiento mecánico de la estructurara se ve afectado.

Figura 16. Para este ensayo el suelo que predomina son los limos y arcillas, y si la muestra presenta escasez de arcilla el comportamiento mecánico de la estructurara se ve afectado.

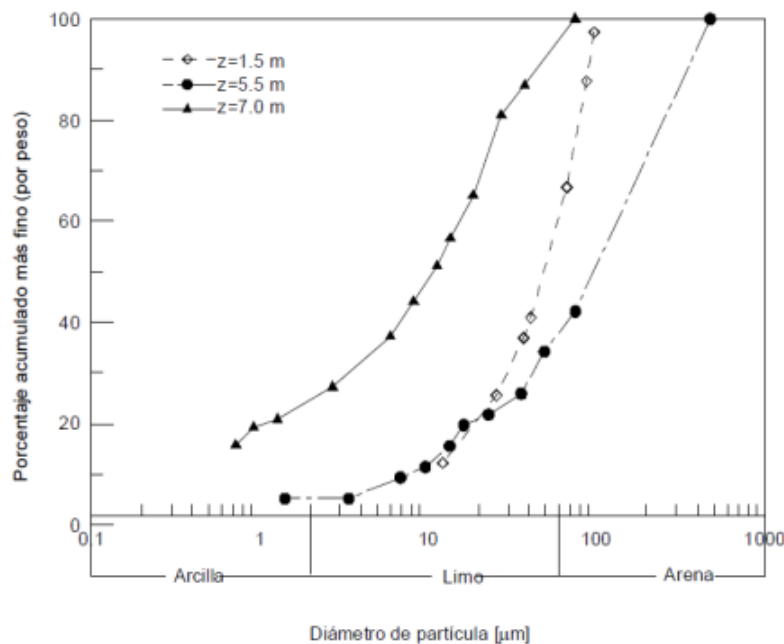
Figura 16 Determinación de la profundidad efectiva de la suspensión sobre el centro del hidrómetro.



Nota: Tomado de *Fundamentos de mecánica de suelos*, de Juárez E. y Rico A. (2005).

En la Figura 17 se muestra la distribución de las partículas de un suelo colapsable mediante el ensayo del hidrómetro, en este caso para las cenizas volcánicas en Colombia.

Figura 17 Distribución de los tamaños de las partículas de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia.



Nota: Tomado de *Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en Colombia*, de Lizcano, A., (2006).

La distribución de partículas de los suelos derivados de cenizas volcánicas depende de la depositación y el grado de meteorización que han soportado. Los métodos experimentales utilizados para la determinación de las propiedades del suelo son ambiguos,

ya que los resultados no son exactos debido a que son afectados por la preparación de la muestra y por la tendencia floculante de los minerales de la fracción de arcilla. (Lizcano *et al.*, 2006).

El sistema analizador del tamaño de partículas del suelo (PARIO), se utiliza para la determinación de la distribución de partículas en soluciones de suelo y funciona también con base en la ley de Stokes. Este sistema clasifica las partículas con tamaños desde 63 μm hasta 1 μm , y facilita obtener la curva completa de distribución de tamaño de partículas. (Group Meter Environment, 2017).

El sistema se basa también en la norma Standard test Method for Particle-size analysis of soils- ASTM 422, la cual sirve como guía para la INV E-124-13. Para el análisis granulométrico por medio del hidrómetro.

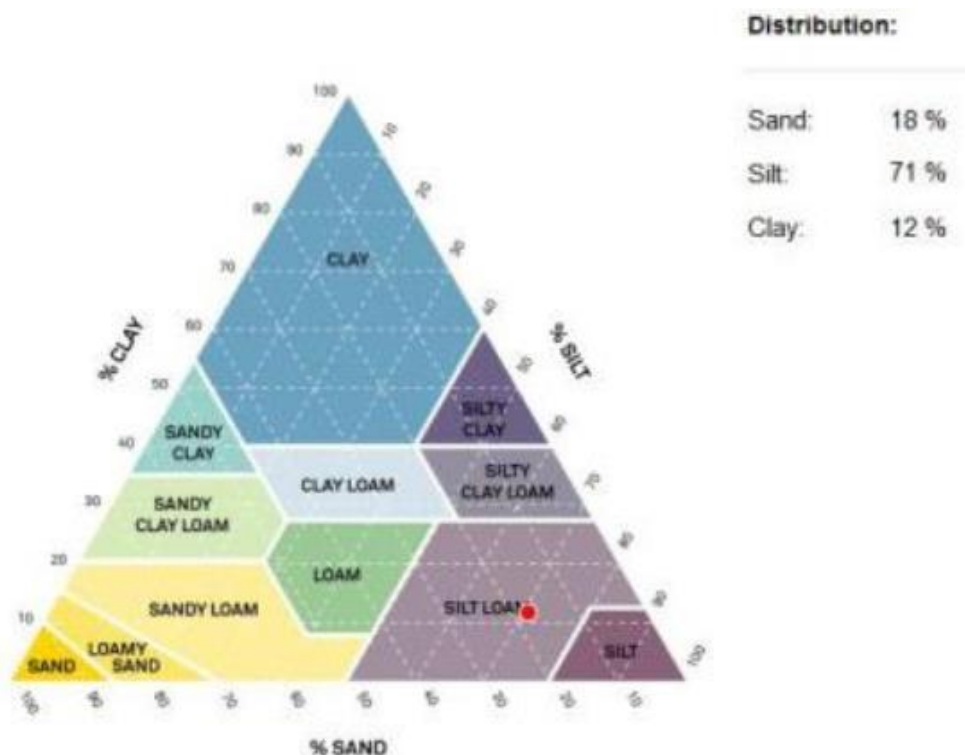
En la Figura 19 se muestra un resultado obtenido mediante la granulometría por tamizado y el sistema PARIO, donde se aprecian los diferentes tamaños de partículas que predominan, permitiendo una identificación más exacta del suelo, como la que se puede obtener mediante el triángulo textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Figura 18 Partes del sistema PARIO.



Nota: Tomado de *Análisis Automatizado del Tamaño de Partículas* de Group Meter Environment. (2017). <https://www.metergroup.com/environment/products/pario/#>

Figura 19 Clasificación del suelo a partir de la granulometría por tamizado y el sistema PARIO.



Nota: Tomado de *análisis de granulometría por hidrómetro y un método automatizado para suelos bentoníticos.*, de Valencia A. y Huertas L., (2018).

Materiales para el ensayo de hidrometría tradicional

- Suelo seco (50 g).
- Agente dispersante (se utiliza el hexametafosfato de sodio).
- Agua destilada.

Pasos del ensayo de hidrometría tradicional

1. Preparación de la muestra de suelo seco (50 a 60 g)
2. Se seca la muestra de suelo en el horno.
3. Se tritura la muestra de suelo (pesar lo que se requiere).
4. Se coloca la muestra de suelo en la probeta.
5. Se agrega agua destilada y dispersante (hexametafosfato de sodio) a la probeta.
6. Calibrar el hidrómetro.
7. Se realizan las lecturas en los tiempos establecidos y se registran.

Figura 20 Muestra de suelo en suspensión (ensayo tradicional).



Nota: Tomado de *Análisis mecánico del suelo* mecánica de los suelos, s.f.
<http://mecanicadelossuelos.blogspot.com/p/analisis-mecanico-del-suelo-hidrometro.html>

Tabla 4. Ventajas y desventajas del ensayo convencional y el sistema PARIO.

Ensayos	Ventajas	Desventajas
TRADICIONAL	• Menor costo. • Se pueden realizar varios ensayos simultáneamente en el laboratorio.	• Se requiere de disponibilidad tiempo para la realización del ensayo. • Se tiene que llevar un riguroso proceso, ya que con cualquier error se alteran los resultados.
	• Ahorra tiempo. • Visualización y evaluación. • Exportaciones automatizadas de datos. • Mejora la precisión y repetibilidad. • Curvas completas de distribución de tamaño de partícula.	• Mayor costo. • Solo un ensayo por día.
PARIO		

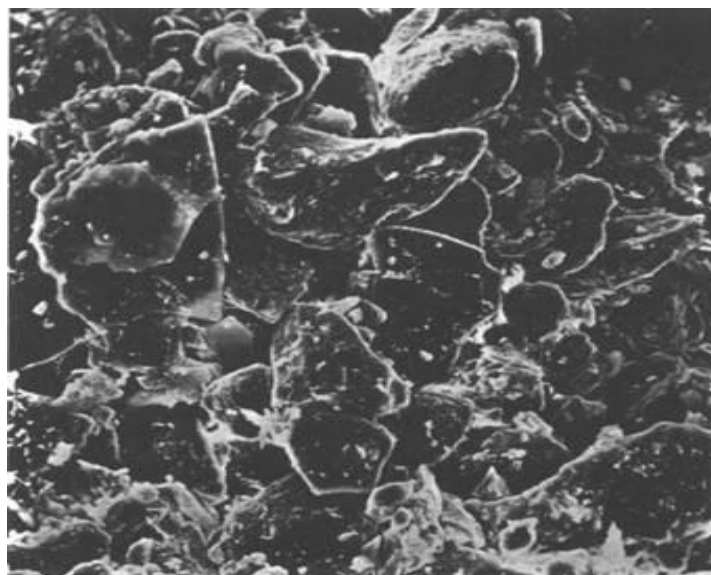
4.3 Método por microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis microestructural se realiza mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM, Scanning Electron Microscope), que permite observar y caracterizar la superficie de materiales orgánicos e inorgánicos, arrojando la composición química y morfológica de la muestra.

El SEM está compuesto por un haz de electrones, enfocado en escanear una superficie de una muestra para crear una imagen de alta resolución. Puede mostrar información importante de la muestra como la morfología, la composición química, su estructura cristalina y la orientación de los minerales; permite, además, determinar cualitativamente las composiciones de la muestra y se considera no destructivo porque no conduce a una pérdida de volumen de la muestra.

Este método permite observar, medir el tamaño y el número de las partículas individuales del material. Los microscopios electrónicos pueden analizar partículas de menor tamaño, aproximadamente entre $0,01\ \mu\text{m}$ - $100\ \mu\text{m}$; la imagen depende de la orientación de las partículas.

Figura 21 Observación de loess mediante el SEM.



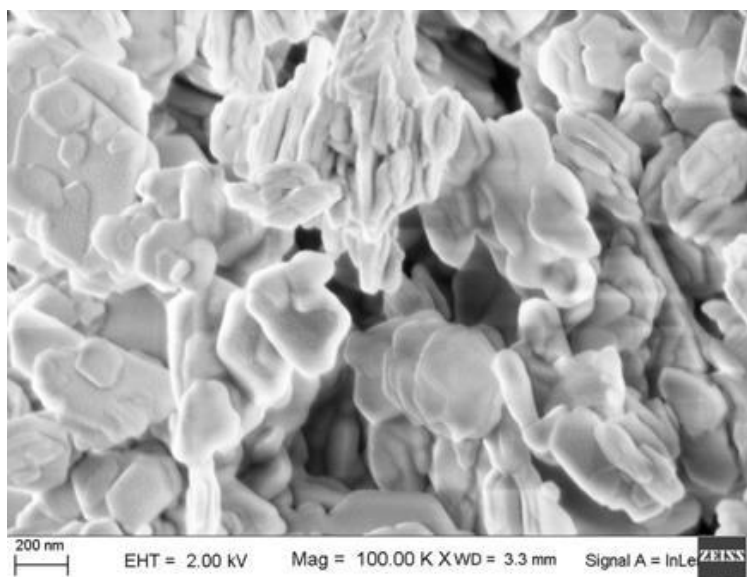
Nota: Tomado de *analysis of microstructures of loess deposits* de Grabowska y Olszewska, (1975).

Milodowski et al., (2015); Xie et al., (2015); Assadi-Langroudi y Jefferson, (2013); concluyeron que el ensayo del SEM, mostraba la composición mineralógica, los tipos de enlaces entre partículas, la orientación y forma de los granos. Adicionalmente, encontraron

que la acción de la meteorización de la calcita y cementos calcáreos, puede hacer que un suelo sea colapsable. Una estructura abierta rígida puede ser tan fuerte como una estructura compacta, pero ambas pueden variar de formas interesantes si hay cambios en los sistemas de unión.

Mediante el SEM Grabowska-Olszewska (1975) observó características típicas de los loess como una estructura suelta con vacíos de 10 μm de diámetro y bordes angulares, redondos y afilados de cuarzo y limo, donde las partículas finas estaban compuestas por arcillas (illita), las cuales son sensibles al colapso. Las dispersiones irregulares de los granos de la muestra se relacionan al proceso de meteorización, las grietas son por el proceso glacial y la uniformidad se relaciona al tipo de transporte al que fue sometido.

Figura 22 Caolinita en forma de polvo.



Nota: Tomado de *Wetting induced collapse behavior of kaolinite* de Chinumani C (2017)

En la Figura 22, se muestran partículas de caolinita dentro de un conjunto esquelético de granos angulares e irregulares de limo, con poros entre 10 y 20 μm de diámetro que corresponden a la zona más débil y susceptible al colapso (Chinumani C., 2017). También se ve el eslabón de limos entre granos, con diferencia significativa de vacíos, y el poco recubrimiento de material cementante.

Tabla 5. Distribución de diámetro de poros (μm) y susceptibilidad al colapso.

Distribución de diámetros de poros, μm	Susceptibilidad al colapso
0-5	No colapsable
5-10	Ligeramente Colapsable
10-15	Colapsable
15-30	Muy colapsable

Nota: Para el caso donde no hay arcilla entre las partículas el resultado es al contrario grandes poros que varían entre 15 a 30 μm de diámetro con bordes afilados contribuye significativamente al colapso (Grabowska-Olszewska., 1975).

Mediante este ensayo (SEM) no es posible identificar el porcentaje de vacíos que determina el colapso, este depende de la estructura, forma, distribución y los tipos de minerales que contiene la muestra. La literatura refiere al diámetro de los vacíos y los tipos de enlaces que tiene la muestra: si tiene una relación de vacíos de 0,8 es crítico, mientras que 0,3 es un valor muy bajo de relación de vacíos y este suelo no podría ser colapsable; aunque el colapso también depende de los minerales presentes en el suelo (Chinumani C., 2017).

En la **Tabla 5** se muestra los tamaños de los diámetros de los poros de una muestra de suelo, que indican la susceptibilidad del colapso como es el caso de las partículas irregulares y la ausencia de material arcilloso con relaciones de vacíos altos que varían entre 2 y 7 μm , y conforman suelos ligeramente colapsables.

La relación del área de poros (PAR) se introdujo para cuantificar el área ocupada por los poros en imágenes microscópicas bidimensionales basadas en la relación entre el área de los poros y el área de la imagen, y se expresa como un porcentaje (Li, X.A., *et al* 2019). Según Pagliai (1988), la porosidad del suelo se puede clasificar con base en la relación del área de poros, como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. *Relación de área poros (%) y clasificación del suelo.*

Relación del área de poros, PAR (%)	Clasificación
<10	Suelo denso
10-25	Suelo moderadamente poroso
25- 40	Suelo poroso

Los suelos colapsables son normalmente porosos y en algunos pocos casos moderadamente porosos.

Componentes del equipo SEM

1. Cátodo
2. Ánodo
3. Lente condensadora
4. Soporte de la muestra
5. Lente objetivo
6. Lente ocular y
7. Dispositivos de visualización / salida de datos

Figura 23 Microscopio electrónico de transmisión.



Nota: Tomado de *Microscopía* de Montalvo, C.E. (2010)

Tabla 7. *Ventajas y desventajas del equipo SEM.*

Ventajas	Desventajas
• Resultados de datos rápidos. • Imágenes detalladas. • Software fácil de usar. • Datos en formatos digitales. • Datos portátiles. • SEM bajo vacío (muestras en condición saturada). • Las muestras requieren una pequeña cantidad de preparación (10cm x 4cm).	• Grande y costoso. • Necesita un operario capacitado para preparar las muestras y operar el microscopio. • Pequeño riesgo de exposición a la radiación. • Debe estar en un entorno donde no haya interferencias eléctricas, magnéticas o vibratorias. • El SEM convencional no sirve para muestras en condición saturada.

4.4 Método por magnitud del colapso

Este método se basa en analizar la magnitud y la velocidad del colapso que depende de la mineralogía, la relación de vacíos, el porcentaje de saturación y los tipos de enlaces.

Para este método se requiere el uso de la norma ASTM D5333-03, en la que la magnitud de colapso del suelo se mide en dos condiciones: con contenido de agua natural y saturado, aplicando un esfuerzo vertical gradualmente que varía entre 50 y 400 kPa. Por medio del ensayo del edómetro se muestra una curva de deformación del suelo antes de colapsar.

El potencial de colapso es una indicación del grado de cambio de volumen total del suelo que, debido a la combinación de carga y la infiltración de agua, cambia la estructura y provoca el colapso.

El potencial colapso es el valor que determina el colapso del suelo bajo un esfuerzo vertical (el que hace que la altura de la muestra disminuya donde las partículas del suelo soportan un cierto esfuerzo afectando la resistencia, relación de vacíos y los enlaces interparticulares). Con la siguiente ecuación (2) se puede determinar el valor de colapso.

A continuación, se indica la ecuación para calcular el potencial de colapso (I_c).

$$I_c = \frac{|d_f - d_i|}{h_0} * 100 \quad (2)$$

Donde:

d_f : lectura del medidor de deformación al momento del equilibrio con la presión vertical aplicada, antes de ser saturada la muestra.

d_i : lectura del medidor de deformación al momento del equilibrio con la presión vertical aplicada, después de ser saturada la muestra.

h_0 : altura inicial de la muestra.

En función de la relación de vacíos, el índice de colapso (I_e) se calcula así:

$$I_e = \frac{|\Delta_e|}{1 + e_0} * 100 \quad (3)$$

Donde:

Δ_e = cambio producido en la relación de vacíos a causa de la inundación.

e_0 = relación de vacíos inicial.

Tabla 8 Clasificación del grado de colapso utilizando el índice de colapso de acuerdo con la norma ASTM D5333-03.

Grado de colapso de la muestra	Índice de colapso, I_e (%)
Sin colapso	0
Ligera	0,1 - 2
Moderado	2,1 - 6
Moderadamente grave	6,1 - 10
Severo	>10

Nota: ASTM D5333-03. (2003)

Con los rangos estipulados en la **Tabla 8** se puede analizar si la muestra de suelo colapsará de acuerdo a los resultados obtenido del ensayo.

El colapso del suelo también depende del cambio de energía interparticular, la permeabilidad (permite que el agua fluya a través de los granos), el contenido de agua, el espesor de la capa y la porosidad primaria; teniendo en cuenta que, La resistencia de las partículas se reduce sustancialmente al ser una estructura denominada metaestable.

5. Criterios de colapso

En la literatura se han propuesto varios criterios para evaluar la susceptibilidad al colapso de un suelo, como el peso unitario seco, el porcentaje de finos, el grado de saturación, los límites de consistencia y la relación de vacíos.

Los criterios basados en los parámetros de densidad seca y grado de saturación solo se recomiendan con el fin de clasificar e identificar el suelo, pero no son indicadores acertados para definir su potencial de colapso.

A continuación, se presentan los criterios para la identificación del colapso en función del límite líquido y relación de vacíos y el porcentaje de contenido de arcilla en muestras de suelos que puedan colapsar (Das, 1999).

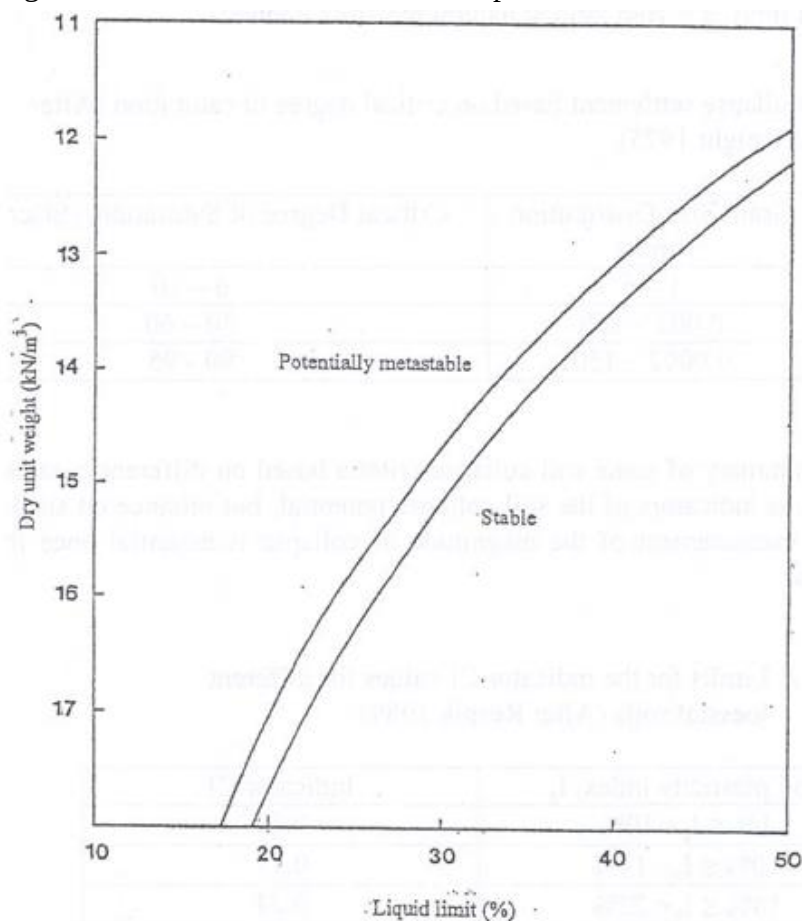
Tabla 9. Criterios para la identificación de suelos colapso.

Investigador	Año	Ecuación	Criterio
Denisov	1951	$K = \frac{e_L}{e} \quad (4)$	Coeficiente de subsidencia, K K = 0,5-0,75: alto potencial de colapso K = 1,0: limo arcilloso que no presenta colapso K = 1,5-2,0: Suelos que no presentan colapso
Priklonski	1952	$K_d = \left(\frac{W_n - LP}{IP} \right) \quad (5)$	$K_d < 0$ alto potencial de colapso $K_d > 0.5$ No colapso $K_d > 1.0$ Suelo expansivo
Clevenger	1958		Si el peso unitario seco es inferior a 12,6 kN/m ³ , el asentamiento será grande; si el peso unitario seco es superior a 14,1 kN/m ³ , el asentamiento será pequeño.
Gibbs	1961	$R = \frac{W_{SAT}}{W_L} \quad (6)$	W_{SAT} = contenido de humedad saturación del suelo. W_L = contenido de humedad límite líquido. Con la Nota: Tomado de <i>Principios de Ingeniería de Fundaciones, Ed.4</i> , de Das, (1999). Figura 24.
Soviet Building Code	1962	$L = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \quad (7)$	e_0 = relación de vacíos natural e_L = relación de vacíos en el límite líquido L > -0,1, Alto potencial de colapso

Investigador	Año	Ecuación	Criterio
Feda	1964	$K_L = \left(\frac{W_n}{S_r} - \frac{L_p}{I_p} \right)$ (8)	$K_L > 0,85$ alto potencial de colapso
Benites	1968	Muestras de suelos con contenido de arcilla bajo ($< 0,002$ mm)	Una prueba de dispersión en la que se deja caer 2 g de suelo en 12 ml de agua destilada y se cronometra hasta que la muestra se dispersa; se obtuvieron tiempos de dispersión de 20 a 30 s para el colapso de los suelos.
Handy	1973	Contenido de arcilla bajo (< 0.002 mm)	$< 16\%$ alta probabilidad colapso $16-24\%$: probabilidad de colapso $24-32\%$: menos del 50% de probabilidad de colapso $> 32\%$ usualmente seguro contra el colapso

Nota: Tomado de *Principios de Ingeniería de Fundaciones, Ed.4*, de Das, (1999).

Figura 24. Clasificación de suelos colapsables.



Nota: Tomado de *Stability problems of collapsing soil. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, de Gibbs y Bara (1962)

6. Propuesta de metodología básica para identificar suelos colapsables

Con la información recopilada se puede inferir que un suelo colapsable cuando presenta ciertas características como una relación de vacíos alta, una granulometría donde predominan las partículas finas con distribución uniforme, unidas por enlaces de arcillas y sales solubles. Estos suelos son susceptibles al colapso bajo esfuerzos verticales pequeños cuando tienen un contenido de agua natural, pero al saturarlos presentan asentamientos más grandes sin la necesidad de aplicar un esfuerzo vertical.

Los siguientes parámetros ayudan a identificar la susceptibilidad al colapso:

- Relación de vacíos.
- Humedad natural.
- Contenido de arcilla.
- Porosidad.
- Plasticidad.
- Densidad seca.

Dudley (1970), Barden et al. (1973) y Mitchell (1993) explicaron el fenómeno del colapso en términos de los agentes cementantes en los puntos de contacto de los granos del suelo. Identificaron cuatro condiciones necesarias para que ocurra el colapso:

1. Una estructura abierta, parcialmente inestable y parcialmente saturada.
2. Un esfuerzo total suficientemente alto para que la estructura sea metaestable.
3. Un aglutinante de arcilla u otro agente cementante lo suficientemente fuerte como para estabilizar la estructura cuando esté seca.
4. La adición de agua al suelo, que reduce la succión en su interior y por tanto produce el colapso.

Para la clasificación del suelo colapsable se debe determinar la composición mineralogía del suelo, teniendo especial cuidado cuando se identifiquen minerales de arcillas, suelos de composición limosa y loess, dado que estos tipos de suelos son los más susceptibles a presentar colapso, por su estructura abierta y suelta entre las partículas finas.

Identificación de suelos colapsables

1. Geología de la zona (origen que pueden ser colapsables, loess, depósitos eólicos, coluviales, tobas volcánicas y en algunos suelos residuales).
2. A partir de los ensayos de la humedad natural y sin previo secado del material de se puede hallar(el peso unitario seco, los límites pueden alcanzar valores significativamente altos, humedad natural, gravedad específica y la saturación del suelo).
3. Se toman muestras y se llevan al laboratorio mediante los criterios de Clevenger, Priklonski, Gibbs y Fedá. Si el resultado coincide con los rangos que indica que un suelo es colapsable realizar el paso siete.
4. Índices de relación de vacíos en el límite líquido y saturado son desencadenantes para un suelo con características al colapso, con el aumento de contenido de agua (Sat) los suelos colapsables son más susceptibles al colapso hace que se debiliten los cementantes entre partículas, disminuyendo la succión, la resistencia del corte y consecuentemente el esfuerzo efectivo interpartícula. Un aumento en el contenido agua produce mayor inestabilidad en un suelo con bajo volumen de vacíos que en uno con mayor porosidad.
5. Mediante el hidrómetro se puede estimar la distribución de tamaño de partículas del suelo (arcillas, limos y arenas). Los suelos mal gradados, tipo loess, son los más susceptibles a presentar el fenómeno del colapso, por su estructura abierta y densidad suelta. Corroborándolos con los criterios de Benites y Handy.
6. El ensayo de microscopía electrónica de barrido, se basa en características cualitativas que permite identificación analizar la estructura, y la forma de partículas y la porosidad de una muestra de suelos en estado inalterado.
7. De acuerdo a los anteriores criterios se puede inferir que un suelo tiene indicios a colapsar y para esto se procede a realizar el ensayo del edómetro siendo más confiable y más frecuencia para la estimación del fenómeno, este permite estimar la deformación del suelo y los índices de colapso como

lo relaciona la **Tabla 8** con respecto a la ecuación (3), con los criterios de Denisov, Soviet Building Code y la norma ASTM.

La resistencia del suelo determina las condiciones de estabilidad y la capacidad de carga o esfuerzo que soporta, la mayoría de los suelos colapsables están sujetos a ciclos de secado y humectación por las condiciones climáticas.

Con la siguiente ecuación es para calcular la severidad del problema asociado en una cimentación sobre un suelo colapsable (Jennings y Knight, 1975).

$$C_p = \Delta\varepsilon = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_0} \quad (9)$$

Donde:

C_p :potencial de colapso

$e_1 - e_2$: relación de vacíos antes y después de la saturación.

e_0 :relación de vacíos en estado natural del suelo

$\Delta\varepsilon$:deformación unitaria vertical

Tabla 10. *Severidad de los problemas de cimentación.*

C_p (%)	Severidad del problema
0-1	Ningún problema
1-5	Problema moderado
5-10	Problema
10-20	Problema severo
20	Problema muy severo

Los criterios existentes para estimar el potencial colapso solo se pueden utilizar para las condiciones iniciales, pero no se puede considerar un sustituto para las pruebas de laboratorio, el ensayo del edómetro es un método eficaz para calcular el fenómeno.

7. Conclusiones

La colapsabilidad puede presentarse en depósitos eólicos, coluviales, tobas volcánicas y en algunos suelos residuales, aunque también se ha encontrado evidencia de colapso en suelos aluviales. Los depósitos eólicos se encuentran en regiones áridas donde el nivel freático es bajo. Los depósitos aluviales que presentan colapsabilidad se han formado por corrientes de lodos por precipitaciones irregulares. Los depósitos coluviales se crean mediante transporte por gravedad, con gradaciones uniformes. Los residuales con susceptibilidad al colapso contienen partículas de arcilla, limo y roca, siendo estructuras inestables con una alta relación de vacíos, por la lixiviación del material fino y soluble.

Los desencadenantes típicos del colapso son el aumento de carga y la saturación del suelo, o la combinación de ambos, durante un periodo de tiempo. Para algunos casos la magnitud del asentamiento depende de la humedad del suelo. Normalmente, el material muestra un comportamiento elástico, hasta que se rompen los enlaces entre las partículas y luego, debido al colapso, los agregados se reordenan y los vacíos disminuyen sin que la carga aumente (comportamiento elastoplástico). Se pueden estimar las deformaciones por colapso teniendo en cuenta la magnitud de las variables de esfuerzos actuantes (tanto los geostáticos como los aplicados por las estructuras en obras civiles).

Dentro del campo geotécnico las propiedades de los suelos dependen de su proceso de formación y factores geológicos. Así, poder identificar un suelo susceptible al colapso es difícil, ya que existen diferentes tipos de materiales y factores que ayudan a este fenómeno.

Uno de los parámetros más relevantes es el incremento de agua, que provoca la anulación de las fuerzas interparticulares e induce al cambio de la estructura del suelo y en los esfuerzos, disminuyendo el volumen del suelo lo cual es un indicativo de que se presenta en fenómenos de colapso, permite estimar el colapso.

La distribución del tamaño de las partículas depende de su composición mineral y el ambiente de formación, como ejemplo los loess tienen partículas uniformes formadas por arena, arcilla, limo, carbonatos y yeso; composición que según lo observado puede favorecer que se presente colapso de la estructura al humectarse.

El potencial de colapso es una indicación del grado de cambio de volumen a escala que exhiben estos suelos, debido a los efectos combinados de la carga y la infiltración de agua. Generalmente se expresa como el cambio volumétrico asociado con la humectación. Hay una gran variedad de enfoques para medir el potencial de colapso de los suelos, incluidos los métodos de laboratorio y los métodos de campo.

El método más utilizado para la identificación de los suelos colapsables es el edómetro. La principal ventaja de este ensayo es que se pueden controlar y medir los tres factores más importantes que afectan el potencial de colapso: grado de saturación, densidad seca y esfuerzo por sobrecarga. Por lo general, los resultados de las pruebas del edómetro se utilizan para el análisis del colapso.

La prueba del edómetro, simple o doble, se utiliza para estimar el potencial colapso. Con el uso de esta técnica, es posible predecir el comportamiento hidrodinámico e hidrostático, acoplado a algunas variables básicas (p. ej. gradación y morfología). El comportamiento hidrodinámico está relacionado con la estructura y composición mineralógica y el hidrostático se produce por la fricción no drenada durante el movimiento y arrastre del suelo hasta alcanzar una relación de vacíos baja (colapso).

El método por microscopia de barrido (SEM) arroja características importantes que permiten identificar detalladamente la composición y estructura de la muestra, así como los tipos de minerales típicos de un suelo colapsable (cuarzo, illita, y arcillas). Su principal desventaja radica en que es costoso y difícil de conseguir.

La técnica por hidrometría convencional es práctica, ya que normalmente se acierta al interpretar los resultados mediante las cartas que tienen las diferentes normas (ASTM, USCS). Esta técnica también es económica y fácil de conseguir. Para que los resultados sean confiables es necesario tener un riguroso control en el momento del ensayo. El sistema analizador del tamaño de partículas del suelo es eficiente, porque permite determinar los tamaños de partículas presentes en la muestra con más precisión.

8. Glosario

- Colapso en suelos: Es la disminución repentina de volumen de un suelo, causante de ocasionar problemas en los cimientos y las estructuras, llevándolas a la falla.
- Contenido de humedad (w): Es la relación porcentual entre el peso del agua contenido en un suelo y el peso de los sólidos que lo conforman.
- Esfuerzo de corte (τ): También llamado esfuerzo cortante, de corte, de cizalla o de cortadura. Es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un suelo.
- Esfuerzo medio actuante (σ): Es el esfuerzo normal promedio que actúa sobre una masa de suelo, es decir la carga transmitida entre partículas dividida entre el área total de la sección perpendicular donde está aplicada. En realidad, los esfuerzos o tensiones son mayores en los puntos de contacto entre partículas, pero por practicidad en mecánica de suelos se trabaja con los promedios.
- Grado de saturación (S_r): Es la relación porcentual entre el volumen de vacíos con agua de un suelo y el volumen total de vacíos (vacíos con agua más vacíos con aire). Si la saturación es 100%, todos los vacíos (espacios entre partículas sólidas) están llenos de agua y se dice que el suelo está saturado.
- Índice de colapso (I_e): Es el valor del colapso determinado, para un esfuerzo vertical de 200 kPa, como el porcentaje de disminución de altura que experimenta la muestra al ser inundada, una vez alcanza el equilibrio bajo la acción de la presión vertical a la cual está siendo evaluada, con respecto a la altura de la probeta en el momento de proceder a la inundación (ASTM, 2003).
- Límites de Atterberg: conjunto de valores de los límites de retracción, plástico y líquido de un suelo.
- Lixiviación: Se llama así al fenómeno de desplazamiento de sustancias solubles o dispersables (arcilla, sales, hierro, humus) causado por el movimiento de agua en el suelo, y es, por lo tanto, característico de climas húmedos.
- Loess: depósito eólico de limo y arena fina, de granulometría uniforme y estructura abierta, con una cohesión relativamente alta debido a la cementación de arcilla.

- Mecanismo de falla: es el proceso o secuencia que ocurre en el suelo cuando falla. Puede haber un mecanismo de falla o varios que se acoplan.
- Meteorización química: proceso de descomposición en el que las rocas y minerales son transformados en la superficie de la tierra. Se debe a procesos de hidrólisis, hidratación, oxidación, carbonatación, intercambio iónico o solución (Hoyos, F, 2012).
- Potencial porcentual de colapso (I_c): Es el valor de colapso determinado, para una presión vertical cualquiera, como el porcentaje de disminución de altura que experimenta la probeta al ser inundada, una vez alcanzado el equilibrio bajo la acción de la presión vertical seleccionada, con respecto a la altura inicial de la probeta (ASTM, 2003).
- Presión de poros (μ): Es la presión del agua (o el aire) que se encuentran dentro de los vacíos en suelo.

9. Referencias

- Abelev Y.M. & Abelev M.O.Y. (1979). Bases de l'élaboration des projets et de la construction sur les sols loessiques affaissables. Translated in French from Russian, Tech. Doc., Paris. additional settlement due to collapse of grain structure. In: Proceedings of the 6th regional conference for Africa on soil mechanics and foundation engineering, Durban, South Africa, pp. 99–105.
- Aitchison, G.D. and Donald, I.B. (1956). Effective stresses in unsaturated soils. Proceedings of the Second Australia – New Zealand Soils Mechanics Conference, pp. 192-199.
- Ali M.M., Nowatzki E.A. and Myers, D.E. (1989). Geostatistical techniques to estimate collapse-related soil parameters. In: Proceedings 25th symposium on engineering geology and geotechnical engineering, Reno, Nevada, March, pp. 289–296.
- Ali, M.M. (2010). Identifying and Analyzing Problematic Soils. Geotechnical and Geological Engineering, 29(3), pp.343–350. doi:10.1007/s10706-010-9380-y.
- Andersen B.J. and Borns H.W. (1997). The Ice age of World. Scandinavian University Press, Oslo.
- Assadi-Langroudi, A. and Jefferson, I. (2013). Collapsibility in calcareous clayey loess: a factor of stress-hydraulic history. Int. J. Geomate 5 (1), pp.620-627.
- ASTM D5333-03. (2003) Standard test method for measurement of collapse potential of soils. ASTM International, West Conshohocken.
- Barden L., Mc Gown A. & Collins K. (1973). The collapse mechanism in partly saturated soil. Eng. Geol. 7, pp. 49-60.
- Bell, F.G. and Bruyn, I.A. (1997). Sensitive, expansive, dispersive and collapsible soils. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Paris, 56: pp.19-38.

- Bruckler, L. (1998). Les transferts dans le sol, pp. 29-40. In: P. Stengel et S. Gelin (coord.). Sol interface fragile. Editions of Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Burland, J.B. 1965. Some aspects of the mechanical behavior of partly saturated soils. In Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas. Butterworths, Sydney, Australia.
- Casagrande, A. 1932. The structure of clay and its importance in foundation engineering. Journal of Boston Society of Civil Engineers.
- Clemence, S. P. and Finbarr, A.O. (1981). Design Considerations for collapsible soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.107(No, GT3), pp.203-3018.
- Culshaw, M.G., Northmore, K.J., Jefferson, I., Assadi-Langroudi, A. and Bell, F.G. (2020). Chapter 6 Collapsible soils in the United Kingdom. Geological Society, London, Special Publications of Geological Engineering, 29 (1), pp 187-203. doi: 10.1144 / egsp29.6.
- Chinumani C. and Tadikonda V. (2017). Wetting induced collapse behavior of kaolinite: Influence of fabric and inundation pressure, pp. 57.
- Das, B. M. (2007). Principles of foundation engineering, Ed.. PWS publishing company, Boston, MA, pp. 686-694.
- DAS, B.M. 1999. Principios de Ingeniería de Fundaciones, , Ed.4.
- De Freitas, M.C., Tsuha, C. de H.C., & Vilar, O.M. (2017). Briefing: Compacted soil columns for collapsible lateritic soil improvement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 170(4), pp. 186–192. doi:10.1680/jgrim.16.00019
- Delage, P., Cui, Y.J. and Antoine, P. (2005). Geotechnical problems related with loess deposits in Northern France.

- Derbyshire E., Meng X., Wang J., Zhou Z. & Li B. (1995). Collapsible loess on the loess plateau of China, pp. 267-293, E. Derbyshire et al. Kluwer Academic Publishers.
- Derbyshire, E., Dijkstra, T. y Smalley, I.J. (Eds.). (1995). Genesis and properties of collapsible soils, pp. 2-205 doi: 10.1007 / 978-94-011-0097-7.
- Dudley, J.H. (1970). Review of Collapsing Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, pp. 96, 925–947.
- Egri, G. (1972). The physico-chemical properties and engineering problems of the loess soils. Acta Gelo. Acad, Sci. Hung., 16, pp. 337–345
- Escario, V., (1969). Swelling of soil in contact with water at negative pressure. International research and engineering conference on expansive clay soils. Texas: Proceedings, 1, pp. 207–217.
- Fredlund D.G. and Morgenstern N.R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division; pp. 447.
- Gaaver, K.E. (2012). Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils. Alex Eng. J. 51(3), pp. 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.05.002>.
- Gibbs, H.J. (1961). Propiedades que dividen suelos sueltos y densos no fermentados. Informe del Laboratorio de la Tierra em-658, Oficina de Recuperación, Departamento del Interior de los Estados Unidos, Washington, D.C.
- González de Vallejo, L.I. y Ferrer, M.O. (2002). Ingeniería Geológica. pp.744 GIBBS, H.J. and BARA, J.P. 1967. Stability problems of collapsing soil. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 93: 577-594.
- Grabowska-Olszewska B. 1975. SEM analysis of microstructures of loess deposits. Bull. Int. Ass. Engineering Geology 11, pp. 45-48.
- Graham, J. and Li, E.C. (1985). Comparison of natural and remolded plastic clay. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 111 (7), pp. 865–881.

- Holtz, W.G. and Hilf, J.W. 1961. Settlement of soil foundations due to saturation. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris
- Houston, S.L., Houston, W.N., Zapata, C.E. y Lawrence, C. (2001). Práctica de ingeniería geotécnica para suelos colapsables. Conceptos de suelos insaturados y su aplicación en la práctica geotécnica, 333–355. doi: 10.1007 / 978-94-015-9775-3_6
- Houston, S. L., Houston, W. N., and Lawrence, C.A. (2002). Collapsible soil engineering in highway infrastructure development. Journal of Transportation Engineering, Vol.128(No. 3), pp.295–300
- Houston, S.L., Houston, W.N. and Spadola, D.J. (1988). Prediction of field collapse of soils due to wetting. J Geotech Eng 114(1), pp.40–58.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339410\(1988\)114:1\(40\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339410(1988)114:1(40)).
- Howayek, A.E., Huang, P.T., Bisnett, R. and Santagata, M.C. (2011). Identification and behavior of collapsible soils. Publication FHWA/IN/JTRP-2011/12. Joint Transportation Research Program Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana. doi: 10.5703/1288284314625.
- Hoyos, F. (2012). Geotecnia diccionario básico.
- Ismael, N.F., Jeragh, A., Mollah, M.A., and Khalidi, O. (1987). Factors affecting the collapse potential of calcareous desert sands. Proceedings of the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand, December 7-11, 1987, No. 5, pp.147-158.
- Jaramillo, D.F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. 1a ed. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, pp. 81-116.
- Jennings, J.E. and Knight, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. Proceedings of

- the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa, pp. 99-105.
- Jennings, J.E. and Knight, K. 1957. The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting. Proceedings of the 4th International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London
- Juárez E. y Rico A., (2005). Fundamentos de mecánica de suelos. Mecánica de suelos tomo I: Limusa México, pp. 42-57.
- Knight K. (1963). The origin and occurrence of collapsing soils. Proc. 3rd Reg. African CSMFE pp. 125-130.
- Lawton, E.C., Frigaszy, R.J., & Hetherington, M.D. (1992). Review of Wetting-Induced Collapse in Compacted Soil. Journal of Geotechnical Engineering, 118(9), 1376–1394. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1992)118:9(1376)
- Li, P., Vanapalli, S., & Li, T. (2016). Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(2), 256–274. doi:10.1016/j.jrmge.2015.12.002
- Li, X.-A., Li, L., Song, Y., Hong, B., Wang, L. y Sun, J. (2019) Characterization of the mechanisms underlying loess collapsibility for land creation project in Shaanxi Province, China—a study from a micro perspective, 77–88. doi: 10.1016 / j.enggeo.2018.12.024
- Lizcano, A., Herrera, M.C., and Santamarina, J.C., (2006) Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en Colombia, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Mansour Zaid M., Chik Z. and Taha M.R. (2008). On the procedures of soil collapse potential evaluation. Journal of Applied Sciences, 8(23): pp. 4434-4439.
- Meng, Z., Liyi, C., Shanyong, W. and Honggang, W. (2020). Experimental study of the microstructure of loess on its macroscopic geotechnical properties of the Baozhong railway subgrade in Ningxia, China. doi: 10.1007 / s10064-020-01816-9.

- Milodowski, A.E., Northmore, K.J., Kemp, S.J., Entwisle, D.C., Gunn, D.A., Jackson, P.D., Boardman, D.I., Zoumpakis, A., Rogers, C.D.F., Dixon, N., Jefferson, I.F., Smalley, I.J., Clarke, M., (2015). The mineralogy and fabric of 'Brickearths' (loess) in Kent, UK and their relationship to engineering behaviour. *Bull. Eng. Geol.*
- Miller, G.A., Muraleetharan, K.K., and Lim, Y.Y. (2001). Wetting-induced settlement of compacted-fill embankments. *Transportation Research Record*, 1755, 111–118.
- Mitchell, J. K., and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.
- Montalvo, C.E. (2010.) *Microscopía*.
- NRS.10.(2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Título-H. Estudios geotécnicos-Colombia. pp. H.9.3.1.
- Osipov, V.I., and Sokolov, V. N. (1994). Factors and mechanism of loess collapsibility. *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils*, Loughborough, U.K., 413
- Pagliai, M., (1988). Soil porosity aspects. *Int. Agrophys.*, pp. 215–232.
- Pécsi, M. (1990). Loess is not just the accumulation of dust. *Quaternary International* 7/8: pp 121.
- Pereira, J.H.F., and Fredlund, D.G. (2000). Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(10), pp. 907–916.
- Reznik, Y.M., (2005). A Method of Calculations of Soil Structural Pressure Values' *Engineering Geology*, vol. 78. Elsevier Science Publishers BV, Amsterdam, pp. 95–104.
- Rogers, C.D.F. (1995). Types and distribution of collapsible soils. In: Derbyshire E, Dijkstra T, Smalley IJ (eds) *Genesis and properties of collapsible soils*, NATO ASI

- series (series C: mathematical and physical sciences), vol 468. Springer, Dordrecht, pp. 1–17. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0097-7_1.
- Rollins, K. y Rogers, G. 1994. Medidas de mitigación para pequeñas estructuras en suelos aluviales plegables. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, pp. 1533-1553.
- Schmertmann, J.H., (1955). The undisturbed consolidation behavior of clay. *Transactions, American Society of Civil Engineers* 120, 1201–1227.
- Shao, X.X., Zhang, H.Y., Tan, Y., (2018). Collapse behavior and microstructural alteration of remolded loess under graded wetting tests. *Eng. Geol.* 233, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.025>.
- Valencia, A. y Huertas, L., (2018). Análisis de granulometría por hidrómetro y un método automatizado para suelos bentoníticos. *Universidad Católica, Bogotá Colombia* pp. 52-57
- Vaughan, P.R., (1985). Mechanical and hydraulic properties of in-situ residual soils. *Proceedings of the First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brazil*, pp. 1–33.
- Walsh K. Houston W. and Houston S. (1993). Evaluation of in-place wetting using soil suction measurements. *J. Geotech. Eng., ASCE* 119, pp. 862-973.
- Wang, L., Shao, S. and She, F. (2019). A new method to evaluate the collapsibility of Loess and its application. *Engineering Geology*, 105376. doi: 10.1016 / j.enggeo.2019.105376.
- Xie, W.L., Wang, Y.S., Ma, Z.H., Ge, R.H. and Wang, J.D., (2015). Research status and prospect of loess collapsibility mechanism-in Chinese. *Geoscience* 29, pp.397-407.
- Yang, Y. (1989). Study of mechanism of loess collapse. *Science in China (Ser. B)*, 32(5), pp. 604–617.

- Zamani, M., and Badv, K. (2019). Assessment of the Geotechnical Behavior of Collapsible Soils: A Case Study of the Mohammad-Abad Railway Station Soil in Semnan. *Geotechnical and Geological Engineering*. doi:10.1007/s10706-018-00800-
- Zhou, A. and Sheng, D. (2015). An advanced hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils with different initial densities. *Computers and Geotechnics*, 63, pp. 46- 66.
- Zhu, Y. and Chen, Z. (2009). Un nuevo método para estudiar la colapsabilidad del loess. *Fronteras de la arquitectura y la ingeniería civil en China*, 3 (3), pp. 305–311. doi: 10.1007 / s11709-009-0040-3.1