

Estudio experimental de clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas en el suroccidente colombiano con el método SUCS, el AASHTO y un nuevo método de clasificación de suelos

Experimental study of Colombian volcanic ash soil classification in the Colombian southwest with SUCS, AASHTO method and a new classification method

Cristian Camilo Guerrero*
Lucio Gerardo Cruz Velasco**
Universidad del Cauca (Colombia)

*Ingeniero Civil, Universidad del Cauca, Departamento de Geotecnia, Especialista en Ingeniería de vías terrestres, Universidad del Cauca. guerrercristian@unicauca.edu.co

**PhD. en Ingeniería, Universidad del Cauca, Departamento de Geotecnia, Universidad de los Andes. lucruz@unicauca.edu.co

Correspondencia: Cristian Camilo Guerrero, Calle 19AN#17BIS-04.

Resumen

Se presentan los resultados de un estudio comparativo entre tres sistemas de clasificación de suelos finos: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), American Association of State Highway Officials (AASHTO) y una nueva clasificación de suelos basada en la sensibilidad eléctrica [1]. La nueva clasificación utiliza parámetros tales como la sensibilidad química del suelo y las propiedades en los fluidos de poro, los cuales no se han tenido en cuenta en los métodos de clasificación que en la actualidad se utilizan en la geotecnia. Estos tres métodos se aplican a muestras de suelos derivados de cenizas volcánicas que son de particular interés en la Región Andina de Colombia por ser un suelo de ocurrencia común, en una de las zonas con más densidad de población del país. Como conclusión importante del estudio se obtuvo que una clasificación de suelo basado en la sensibilidad eléctrica de las partículas describe mejor el comportamiento plástico de suelos derivados de ceniza volcánica, y mejora finalmente la solución de ingeniería seleccionada.

Palabras clave: ceniza volcánica, límite líquido, métodos de clasificación de suelos.

Abstract

It is presented the results of a comparative study of three classification systems for fine soils: The Unified System of Soil Classification (USCS), American Association of State Highway Officials (AASHTO) and a new soil classification based on electrical sensitivity [1]. The new classification uses parameters such as chemical sensitivity and properties in soil pore fluids that have not been taken into account by the classification methods currently used in geotechnics. These three methods are applied to samples of soils derived from volcanic ash that are of particular interest in the Andean region of Colombia to be a common occurrence groundfloor in one of the location most densely populated in the country. As an important conclusion of the study, it was obtained that a soil classification based on the electrical sensitivity of the particles better describes the plastic behavior of soils derived from volcanic ash, ultimately enhancing the selected engineering solution.

Keywords: colombian volcanic ash, liquid limit, soil classification methods.

Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2017
Fecha de aceptación: 21 de marzo de 2018

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente se aplican dos sistemas de clasificación de suelos: el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [2] y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) [3]. Estas dos metodologías parten de la misma información y son de primordial aplicación en la caracterización de suelos [4]: granulometría y límites de Atterberg. Recientemente [1] plantearon un nuevo sistema de clasificación de suelos finos que podría representar de una mejor forma las propiedades físico-químicas de los suelos.

Si bien existe una carta de plasticidad que se usa a nivel global, presenta inconsistencias en la clasificación de algunos suelos [1]. Lo ideal es probar la veracidad de un nuevo sistema de clasificación con conceptos modernos mediante su aplicación, por primera vez, en suelos de Colombia, y realizar así un análisis general entre métodos de clasificación. Lo anterior, con el fin de conocer con cuál de los métodos que existen se caracterizan los suelos de una mejor forma, en especial los suelos derivados de cenizas volcánicas que presentan un comportamiento particular dentro del marco de la mecánica de suelos. En Colombia, los suelos derivados de cenizas volcánicas o suelos alofánicos cubren gran parte de la Región Andina, debido a que las cordilleras Oriental, Central y Occidental la atraviesan de sur a norte y comprenden la mayoría de macizos volcánicos en el país. Esta región se caracteriza porque allí se concentra la mayor población de Colombia, y es la que proyecta un mayor crecimiento económico. Las propiedades de estos suelos pueden diferir según las técnicas utilizadas en laboratorio y en la exploración de las condiciones *in situ*, dada la alta sensibilidad que presentan durante la fabricación de la muestra. Los principales problemas de tipo geotécnico abarcan la inestabilidad de taludes, alta sensibilidad, agrietamiento y dificultades tales como humedad excesiva y consistencia muy blanda al usarse como materiales de construcción [5]. Lizcano *et al.* [5] sostienen que los criterios conocidos para el diseño y la construcción de estructuras geotécnicas resultan inaplicables en presencia de estos materiales, por lo cual sugieren métodos diferentes a los convencionales para su caracterización, como, por ejemplo, ensayos de mineralogía, la capacidad de intercambio catiónico y la conductividad eléctrica, de manera que permiten analizar la influencia de la composición del suelo sobre su comportamiento general. Polidori [6], por su parte, señala que los minerales de arcilla no

laminares (como las alófanas y haloisitas), presentes con mucha frecuencia en suelos derivados de cenizas volcánicas, desarrollan un comportamiento variado aun si son del grupo de las arcillas, por lo que asegura que caracterizar los suelos que presentan estos minerales no es fácil. Sin embargo, presentan características que hacen al suelo mejor para su uso en ingeniería, en comparación con aquellos que contienen minerales de arcilla laminares (caolinitas, illitas, montmorillonitas).

The New Zealand Geotechnical Society (NZGS) [7] recomienda que aquellos suelos que no encajan fácilmente en un sistema de clasificación no sean forzados a hacerlo. Ejemplo de esto son suelos derivados de cenizas volcánicas con un alto contenido de alófanas y los que se encuentran en las islas Norte y Sur (Nueva Zelanda). Por otra parte, estos materiales pueden sufrir considerables cambios al retirarlos de su condición *in situ* [7]. Ante esta situación, la descripción es difícil y la NZGS recomienda realizar dos descripciones: una de la muestra sin perturbar y otra de la muestra perturbada.

Polidori [8] planteó una modificación a la carta de plasticidad planteada por Casagrande (fracciones menores a 425 micras, esto es, partículas de limos y arcillas). Él señala que el comportamiento del suelo depende del porcentaje de arcilla y asegura que este valor podría ser más útil en su clasificación [9]. Para suelos predominantemente finos se encontró que otros parámetros como, por ejemplo, la compresibilidad y el ángulo de fricción interna residual, se pueden estimar al conocer el límite líquido (LL), la fracción ($<425 \mu\text{m}$) y el contenido de arcilla ($<2 \mu\text{m}$) [8].

Recientemente [1] compilaron información de clasificación de suelos publicada por diversos autores y lograron relacionar directamente el índice de plasticidad con el límite líquido (LL) de los suelos cuyo contenido era 100 % de minerales de arcilla.

Por otra parte, el uso de la carta de plasticidad de Casagrande tiene sus limitantes: (a) a menudo suelos arcillosos caen por debajo de la línea "A" y se clasifican como limos aun con límites líquidos (LL) tan altos como 250; (b) suelos orgánicos pueden ubicarse por debajo o por encima de la línea "A" [10]; (c) muestras de caolinita pura a menudo se ubican por debajo de la línea "A", en la zona de limos [8]; (d) los métodos para determinar el límite plástico (LP) de un suelo tienen sus limitaciones y no se consideran

muy precisos dada su subjetividad, lo cual afecta la exactitud del valor del índice de plasticidad [11]; (e) en arcillas altamente plásticas, el índice de plasticidad está fuertemente dominado por el límite líquido (LL) [1].

Últimamente, varias investigaciones [12]-[16] han estudiado la exposición de suelos finos con diferentes fluidos de poro, y demuestran que causan variaciones en los límites de Atterberg. En suelos de baja plasticidad se produce un aumento del límite líquido conforme se aumenta la concentración de la solución a la cual han sido expuestos, lo cual se daría por la dispersión de las partículas de arcilla y la formación de nuevos componentes expansivos [13]-[15]. Por el contrario, en suelos de alta plasticidad el límite líquido disminuye conforme se aumenta la concentración de la solución a la cual han sido expuestos, lo que genera la disminución de las fuerzas repulsivas debido al aumento de la concentración o la valencia de los cationes, de manera que causa la floculación de las partículas (teoría de Gouy-Chapman-Stern) [12], [15], [16].

II. MARCO TEÓRICO

A. Sensibilidad eléctrica

La sensibilidad eléctrica S_E es un concepto que plantea en [1], en su propuesta de clasificación de suelos, en la que la definen – a fin de captar en un solo parámetro – los cambios en el LL con la permitividad del fluido de poro y la conductividad eléctrica, es decir, fuerzas de van der Waals (vdW) y doble capa difusa, respectivamente.

Para el cuadrante, donde $\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} > 1,0$ y $\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} > 1,0$ la sensibilidad eléctrica se define matemáticamente como sigue:

$$S_E = \sqrt{\left(\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} - 1\right)^2 + \left(\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} - 1\right)^2} \quad (1)$$

En donde, gráficamente, S_E es la distancia desde el origen ($LL_{ker}/LL_{NaCl} = 1,0$, $LL_{AD}/LL_{NaCl} = 1,0$) al punto dibujado. Las relaciones de LL deben haberse corregido previamente [1]. Si alguna de las relaciones anteriores de LL da menor que 1,0 se debe reemplazar en la Ecuación 1 por el recíproco de las relaciones y el punto se graficará en el cuadrante opuesto.

La relación entre el LL con agua desionizada y con la solución NaCl refleja la sensibilidad del suelo a la fuerza doble capa difusa (repulsión). La relación entre el LL con kerosene y con la solución NaCl refleja la sensibilidad del suelo a la fuerza de van der Waals (vdW)-atracción.

III. METODOLOGÍA

A. Recolección de muestras de suelos

Se tomaron cinco muestras de suelo derivadas de ceniza volcánica de forma aleatoria en Popayán. Las muestras obtenidas fueron de tipo alterado. Las muestras se tomaron durante febrero y marzo del 2016, y el tiempo climatológico durante este tiempo y en los meses previos fue seco con escasez de lluvia.

B. Ensayos de laboratorio para caracterización física

Una vez recolectadas las muestras de suelo, se llevaron al laboratorio, se secaron al aire y luego se realizó un tamizado por la malla n.º 200; sobre esta fracción se llevaron a cabo las siguientes pruebas con el propósito de caracterizar físicamente cada una de las muestras: (a) granulometría por tamizado; (b) granulometría por hidrómetro (pasante n.º 200); y (c) gravedad específica.

C. Ejecución del límite líquido (LL): tres métodos y tres fluidos de poro, y límite plástico (LP): dos métodos (solo con agua desionizada)

A fin de determinar el LL de los suelos se utilizaron los tres métodos de ensayo más comunes: Casagrande ranurador plano [3], [17], Casagrande ranurador curvo [2], y penetrómetro de cono [18]. Para cada fluido de poro, con excepción del kerosene, se realizaron cinco determinaciones de LL a cada muestra de suelo por cada método. La particular consistencia adquirida por el suelo expuesto a kerosene no permitió la determinación del LL por el método Casagrande-ranurador plano; con el método Casagrande-ranurador curvo se realizaron dos determinaciones y cinco con el penetrómetro de cono.

Por otra parte, para la determinación del LP se realizaron dos determinaciones a cada muestra por el método del rollo y cinco determinaciones por el método de penetrómetro de cono.

El nuevo método de clasificación de suelos finos [1] precisa la utilización de tres fluidos de poro (véase la Tabla 1), con diferente permitividad y conductividad eléctrica para determinar el LL de las muestras.

Tabla 1. Permitividad (constante dieléctrica) y conductividad eléctrica de los fluidos usados en la nueva clasificación [1]

Fluido	Permitividad	Conductividad eléctrica (S/m)
Agua desionizada	80	10^{-6}
Salmuera NaCl (C:2M)	55	12
Kerosene	2	10^{-11}

D. Procesamiento de datos y análisis estadístico de los datos

A todo el juego de resultados de datos se le realizó el procesamiento a fin de obtener resultados y, adicionalmente, un análisis estadístico con el fin de determinar la confiabilidad de resultados (la cual fue superior al 95 %).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Tabla 2 presenta los resultados de todos los LL determinados para cada una de las cinco muestras de suelo con cada tipo de fluido de poro, y en la Tabla 3 su resumen.

Tabla 2. Resultados de todos los límites líquidos determinados a cada suelo por cada método y por cada fluido de poro

No. Muestra	LL Copa de Casagrande (%)					LL Cono de caída (%)		
	Ranurador plano		Ranurador curvo			Agua desionizada	NaCl	Kerosén
	Agua desionizada	NaCl	Agua desionizada	NaCl	Kero-sén			
1	78,2	51,6	73,1	53,5	56,9	86,6	53,4	70,6
	78,0	51,7	73,0	51,7		86,3	53,4	70,3
	77,4	51,4	74,3	50,1	56,8	88,6	53,6	70,0
	80,1	52,5	71,7	49,4		87,5	53,7	69,9
	80,2	51,9	73,6	53,8		88,4	54,4	71,0
2	75,4	47,9	73,4	44,9	64,0	77,5	54,1	77,2
	73,8	47,7	71,8	47,6		78,8	53,0	77,0
	72,9	48,6	74,0	47,1	63,3	77,5	52,9	76,8
	74,9	49,1	71,8	47,9		80,1	52,7	76,8
	74,3	47,7	72,8	46,3		81,6	53,9	77,0
3	77,2	44,0	71,5	43,1	53,8	77,8	43,7	60,9
	78,4	43,8	71,2	41,7		79,0	44,1	61,4
	77,1	43,4	71,0	42,1	53,5	77,4	44,0	62,0
	77,3	45,2	72,8	43,6		76,9	44,2	61,3
	75,4	43,5	71,2	43,5		75,9	44,2	61,2
4	80,6	49,1	73,4	43,9	66,2	87,2	48,0	73,2
	77,4	47,2	74,3	46,0		86,7	47,6	73,2
	81,2	48,2	74,1	44,2	66,0	87,3	47,5	73,3
	79,7	48,5	75,1	44,7		87,4	47,6	73,5
	78,1	48,8	74,1	45,8		86,6	48,5	73,2
5	96,1	58,4	92,6	54,0	69,9	94,0	56,5	81,7
	94,8	58,9	93,2	54,4		96,2	56,3	81,8
	95,3	59,5	90,6	55,1	71,2	96,2	57,3	81,3
	94,9	59,4	91,4	53,9		96,1	57,0	81,6
	93,9	58,6	91,6	54,8		95,3	56,3	81,6

Tabla 3. Resultados promedio de los límites líquidos determinados a cada suelo por cada método y por cada fluido de poro

No. Muestra	LL Copa de Casagrande (%)					LL Cono de caída (%)		
	Ranurador plano		Ranurador curvo			Agua desionizada	NaCl	Kerosene
	Agua desionizada	NaCl	Agua desionizada	NaCl	Kerosene			
1	78,8	51,8	73,1	51,7	56,9	87,5	53,7	70,4
2	74,3	48,2	72,8	46,8	63,7	79,1	53,3	77,0
3	77,1	44,0	71,5	42,8	53,7	77,4	44,0	61,4
4	79,4	48,4	74,2	44,9	66,1	87,0	47,8	73,3
5	95,0	59,0	91,9	54,4	70,6	95,6	56,7	81,6

En Tabla 4 se presentan los resultados promedios de los límites plásticos determinados por el método de rollo y por el método de Feng (agua desionizada).

Tabla 4. Resultados de límites plásticos por método de rollo y [18]

Suelo	LP (Método rollo)	LP (Feng)
1	33,7	41,8
2	44,7	34,8
3	28,2	21,8
4	50,5	61,4
5	61,1	67,2

Según los resultados obtenidos con el ensayo de granulometría e hidrómetro se logró determinar la curva granulométrica de cada suelo desde su tamaño máximo nominal hasta un diámetro de partícula de 2 μm , y se pudo determinar el contenido de arena, limo y arcilla presente en cada suelo con base en cada curva granulométrica. Estos datos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Contenido de arena, limo y arcilla en cada uno de los cinco suelos con base en toda su gradación y la fracción pasa n.o 200

Suelo	Gradación total			Fracción pasa n.o 200	
	Contenido de arena (%)	Contenido de limo (%)	Contenido de arcilla (%)	Contenido de limo (%)	Contenido de arcilla (%)
1	43,0	50,0	7,0	87,7	12,3
2	24,4	55,6	20,0	73,5	26,5
3	31,5	53,7	14,8	78,4	21,6
4	5,5	47,8	46,7	50,6	49,4
5	3,8	60,1	36,1	62,5	37,5

A. Clasificación de las muestras según SUCS y AASHTO

En la Figura 1 se aprecia la clasificación de los suelos según SUCS obtenida con cada uno de los tres métodos que se usó a fin de determinar el LL de las muestras, según los resultados promedio del LL (véase la Tabla 3), y LP según método de rollo (véase la Tabla 4). Se presenta en la Figura 2 la clasificación de los suelos por el sistema AASHTO según cada método de determinación del LL.

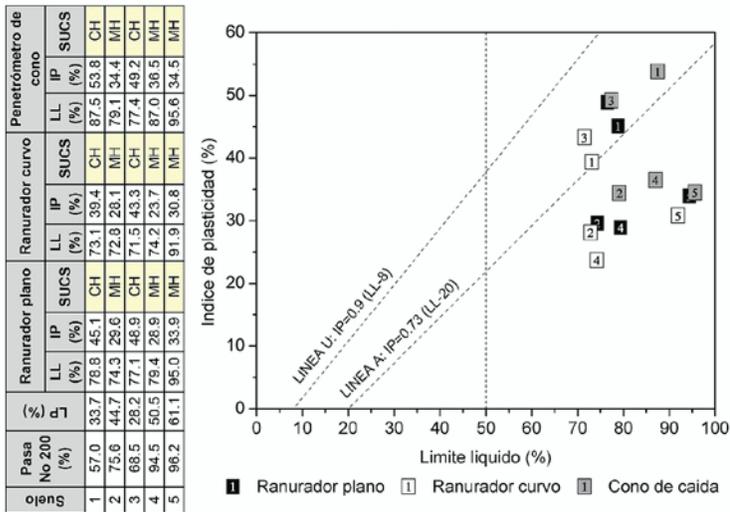


Figura 1. Clasificación SUCS de las muestras por los tres métodos utilizados (la tabla presenta el resumen de valores).

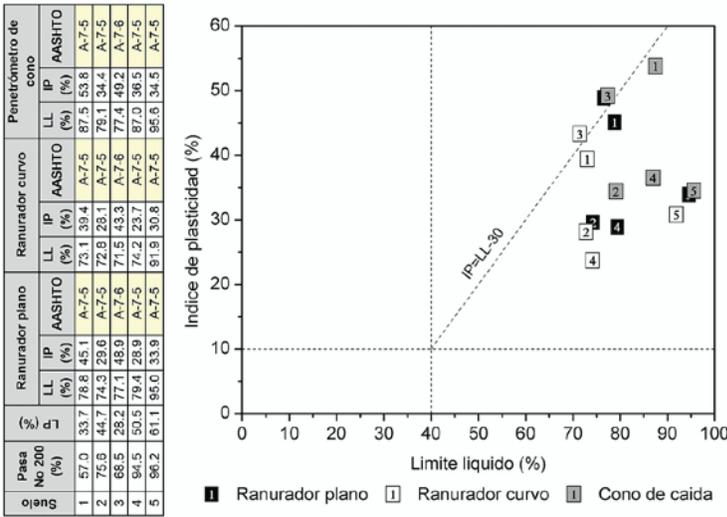


Figura 2. Clasificación AASHTO de las muestras por los tres métodos utilizados (la tabla presenta el resumen de valores).

B. Clasificación de las muestras según el nuevo método

La clasificación se realizó con los resultados de la prueba de penetrómetro de cono y de Casagrande-ranurador curvo. Con la prueba de Casagrande-ranurador plano no se pudo determinar el LL cuando el fluido de poro era el kerosene, por lo cual la clasificación por este método no fue posible. Una vez calculadas y corregidas las relaciones, se ubican los suelos en la Figura 3, la cual representa la sensibilidad eléctrica.

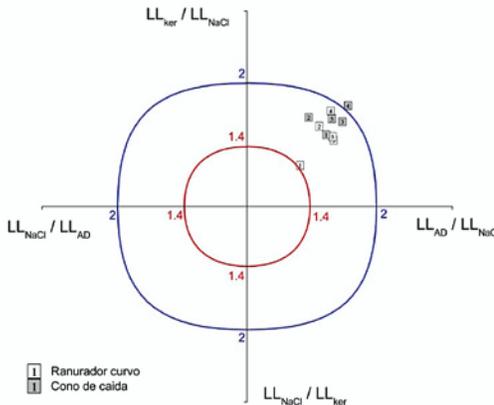


Figura 3. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica de los cinco suelos. Método cono y ranurador curvo.

Finalmente, se ubica cada suelo en la nueva carta planteada por [1]. El resumen de la clasificación de los suelos por el nuevo método se aprecia en la Tabla 6 para el método de penetrómetro de cono y Casagrande-ranurador curvo. Se informa la clasificación como no (N), baja (L), intermedia (I) o alta (H) plasticidad de los granos finos; y de baja (L), intermedia (I) o alta (H) sensibilidad eléctrica.

Tabla 6. Resumen de clasificación de los cinco suelos según la nueva clasificación [1]

Suelo	Pasa No 200 (%)	Penetrómetro de cono				Ranurador curvo			
		LL (NaCl)	SE	Nueva clasificación		LL (NaCl)	SE	Nueva clasificación	
				Plasticidad	Sensitividad SE			Plasticidad	Sensitividad SE
1	57,0	53,7	0,72	I	I	51,7	0,42	I	I
2	75,6	53,3	0,76	I	I	46,8	0,74	L	I
3	68,5	44,0	0,90	L	I	42,8	0,74	L	I
4	94,5	47,8	1,05	L	H	44,9	0,90	L	I
5	96,2	56,7	0,86	I	I	54,4	0,75	I	I

La Tabla 7 muestra el resumen comparativo de las clasificaciones.

Tabla 7. Resumen de clasificación de los cinco suelos por los tres sistemas

Suelo	Clasificación SUCS			Clasificación AASHTO			Nueva clasificación [1]			
	R. plano	R. curvo	Cono	R. plano	R. curvo	Cono	R. curvo		Cono	
							P ¹	S ²	P ¹	S ²
1	CH	CH	CH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	I	I	I	I
2	MH	MH	MH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	L	I	I	I
3	CH	CH	CH	A-7-6	A-7-6	A-7-6	L	I	L	I
4	MH	MH	MH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	L	I	L	H
5	MH	MH	MH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	I	I	I	I

¹: Plasticidad; ²: Sensitividad eléctrica

En la Figura 4 se presenta la ubicación de los cinco suelos en la nueva carta de clasificación.

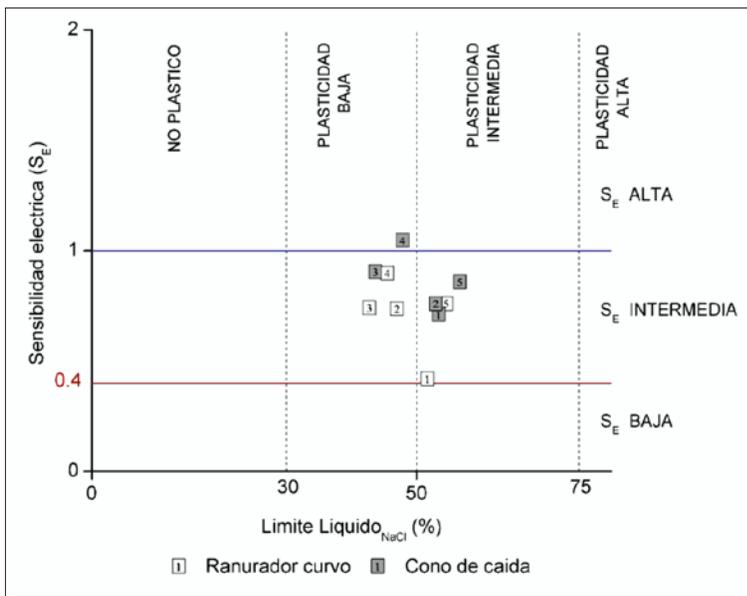


Figura 4. Ubicación de los cinco suelos en la nueva carta de clasificación

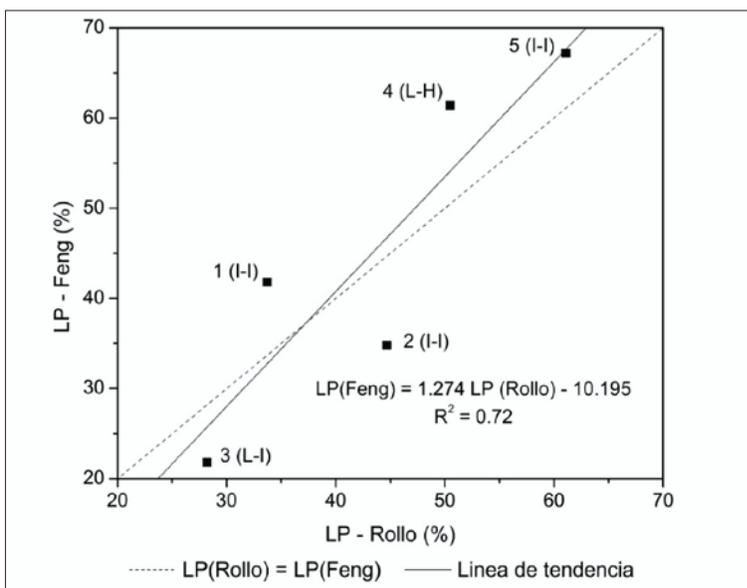


Figura 5. Gráfica de relación entre los límites plásticos según [18] y método de rollo al clasificar los suelos con el nuevo sistema

En la Figura 5 se graficó el LP estimado para cada suelo por los dos métodos. Cabe destacar que tan solo se determinaron cinco puntos, lo cual dificulta establecer una correlación lineal confiable entre ambos métodos. Lo que se puede apreciar es que la tendencia podría ser lineal hacia la línea LP (Rollo) = LP (Feng). Para este caso es imposible aceptar o descartar una relación entre ambos métodos, pero sí se podría investigar aún más a fin de estar en capacidad de estimar el LP de un suelo mediante una prueba más confiable, reproducible y objetiva que el método del rollo.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. SUCS y AASHTO

La clasificación de cada suelo fue la misma para los tres métodos de determinación del LL. Los suelos con mayor porcentaje de partículas pasante del tamiz n.º 200 (mayor fracción fina) son, en orden descendente, los suelos 5, 4, 2, 3 y 1 (véase la Tabla 5). Las muestras con menor contenido de arcilla tienen un mayor índice de plasticidad y, por tanto, un mayor potencial de expansión. Con el método Casagrande-ranurador (C-R) curvo se obtuvieron, en promedio, los LL más bajos; de manera opuesta, con el penetrómetro de cono (PdC) se obtuvieron los LL más altos, lo cual conlleva a que pueda existir una diferencia en su clasificación.

Por otra parte, se puede notar que los suelos MH (suelos 2, 4 y 5) tienen los mayores porcentajes de contenido de arcilla mientras que los CH (suelos 1 y 3) tienen los porcentajes de arcilla más bajos. Lo anterior podría deberse a: (a) no todas las partículas cuyo tamaño es menor a $2\ \mu\text{m}$ son minerales de arcilla; (b) el porcentaje de arcilla a menudo se ha relacionado con la actividad de un suelo, pero se debe estudiar en conjunto con la mineralogía de dicho contenido; (c) los ensayos se realizaron con muestras que se secaron previamente, en algunos casos a temperatura ambiente (p. ej., determinación de LL), y en otros, secadas al horno a una alta temperatura (p. ej., granulometría e hidrómetro). Algunos autores [19]-[21] mencionan que hay cambios en la fracción fina del suelo si se producen cambios de temperatura en procesos de secado.

Al realizar la clasificación de los cinco suelos con AASHTO, al igual que con SUCS, no se presentó variación en la clasificación entre los tres métodos

para determinar el LL. De acuerdo con esta clasificación, los suelos estarían dominados por arcillas plásticas a muy plásticas, susceptibles a cambios volumétricos.

B. Clasificación según [1]

Esta nueva clasificación define el grado de plasticidad de un suelo con base en el valor de su LL determinado con salmuera 2-M, el cual fue menor que el LL con agua desionizada para todos los suelos estudiados. Por una parte, este resultado era el esperado teóricamente, ya que todos los suelos según la clasificación SUCS son de alta plasticidad. De esta manera, el aumento de iones en el fluido de poro tiende a disminuir el espesor de la doble capa difusa y, por tanto, a reducir el valor del LL si en lugar de agua desionizada se utiliza salmuera. Sin embargo, esta disminución en el LL permite considerar los suelos en rangos de plasticidad baja a intermedia. Para los límites determinados con la copa de C-R curvo, los suelos 1 y 5 son de plasticidad intermedia (I), mientras que los suelos 2, 3 y 4 son de plasticidad baja (L). Con el PdC se obtuvo que los suelos 1, 2 y 5 son de plasticidad intermedia, mientras que los suelos 3 y 4 son de plasticidad baja. Esta consideración puede diferir un poco con la realidad de los suelos, sobre todo para suelos de baja plasticidad, ya que los suelos con agua desionizada presentaron una alta plasticidad, de manera que esta reducción tan drástica indica que los suelos mostraron una notoria reducción en el efecto de la doble capa difusa. Dicha sensibilidad es propia de suelos con considerable potencial expansivo y alta-intermedia plasticidad.

La clasificación con cada método utilizado varió en los suelos 2 y 4. En general, los LL determinados con el PdC fueron mayores a los determinados con la copa de C-R plano. El origen de las diferencias en la clasificación de cada suelo (2 y 4) fue distinto, ya que para el suelo 2 la divergencia estuvo determinada por la plasticidad (LL salmuera); para el suelo 4, la sensibilidad eléctrica fue notoriamente distinta con cada método, por lo cual se da una clasificación diferente.

Los LL con kerosene determinados con el ranurador curvo se estimaron con una alta complejidad, dada la dificultad de adecuar la muestra en la copa y, sobre todo, de realizar la ranura (desgarre, comportamiento aparentemente no plástico). Por tanto, si bien la clasificación con este método se realizó

y no presentó diferencias abismales con el penetrómetro de cono, no se considera confiable. Las grandes diferencias en los valores de los LL entre estos dos métodos y la dificultad para realizar el ensayo con el kerosene con la copa de C-R curvo, resultan ser una buena explicación de las diferencias en la clasificación con este nuevo sistema. Los cinco suelos estudiados se consideran todos de alta plasticidad (SUCS), y cumplen además con que los LL con kerosene fueran mayores con relación a los de salmuera, los cuales determinan una intermedia plasticidad según la nueva clasificación.

Un suelo con un LL en salmuera mayor que en kerosene indica que, aun con la reducción del efecto doble capa difusa, este fenómeno sigue teniendo gran influencia. Al exponer el mismo suelo al kerosene, el efecto doble capa es casi nulo, por lo cual, si bien existe un aumento en la fuerzas de vdW, el efecto es menos estable que el aportado por la doble capa reducida al haber expuesto el suelo en salmuera, por lo cual el LL disminuye de salmuera a kerosene.

Al tomar como punto de partida los resultados determinados con el PdC y la nueva clasificación, los cinco suelos estudiados presentan una sensibilidad eléctrica intermedia, por lo cual tienen características similares a las de arcillas de compresibilidad intermedia como, por ejemplo, la caolinita. Los suelos son de origen volcánico, por lo cual se espera que la mayor proporción de minerales presentes sea de tipo amorfo, cuyo comportamiento se puede comparar al de arcillas intermedias.

La plasticidad se considera baja en los suelos 3 y 4, e intermedia en los suelos 1, 2 y 5. Esta característica tampoco concuerda con el contenido de arcilla en los suelos, tal como sucedió con los sistemas SUCS y AASHTO. Incluso, el suelo con mayor contenido de arcilla y el de menor contenido (5 y 1, respectivamente), clasifican como suelos con plasticidad intermedia según este método. Desde el punto de vista de la sensibilidad eléctrica, se obtuvo que solo el suelo 3 fue más sensible al efecto de la doble capa difusa que a las fuerzas de vdW. Esta característica indica que los suelos no son altamente plásticos, sensibles o con un alto potencial expansivo.

La mayor susceptibilidad de los suelos cuando de salmuera se pasó a kerosene, en las fuerzas de vdW y el aumento del LL, indican que el cambio de pH afectó en gran medida su comportamiento, lo que promovió la atracción en

las partículas y, dadas las características de sensibilidad intermedia, los suelos no llegaron a la floculación, pero sí a una atracción con efecto moderado de la resistencia al corte en el contacto entre partículas. Por otra parte, la consistencia del suelo en el LL con kerosene era poco plástica con el método de Casagrande, mientras que se necesitaba una consistencia mucho más fluida de los suelos humedecidos con kerosene para lograr una penetración cercana al LL con el método del penetrómetro de cono. Se observó, en varias ocasiones en la toma de muestra de suelo, que con el PdC se lograba una penetración cercana a la del LL, mientras que dicha muestra con la prueba de Casagrande no permitía ni siquiera el desarrollo de la prueba. Este comportamiento del suelo con kerosene posiblemente se deba a: (a) el kerosene por ser un fluido no polar, genera una alta resistencia al corte en el contacto entre partículas, pero con una alta relación de vacíos; (b) el efecto doble capa no se genera en suelos cuando el fluido de poro es no polar como el kerosene [22]-[24]; (c) el efecto del kerosene en las muestras, al reducir el espesor de la doble capa difusa, redujo la plasticidad de las muestras al punto en que eran no plásticas.

VI. CONCLUSIONES

En suelos con plasticidad muy baja o nula, la determinación del LL se realiza con mayor facilidad con el método de PdC que con la prueba de Casagrande. Los suelos expuestos al kerosene presentaron características no plásticas, por lo cual el método de Casagrande fue de imposible (ranurador plano) a muy difícil ejecución (curvo).

La determinación del LL con kerosene es poco viable con el método de Casagrande debido a los efectos dinámicos durante el ensayo (colapso de la muestra).

En general, con los tres métodos que se determinó el LL se obtuvo la misma clasificación SUCS y AASHTO para cada uno de los cinco suelos, por lo cual no se tendría un error en la clasificación si se usa uno u otro, aunque la posibilidad de otra clasificación no es improbable como lo demuestran los resultados obtenidos.

El porcentaje de arcilla a menudo se ha correlacionado con la actividad y el comportamiento en general de un suelo; sin embargo, se debe estudiar en conjunto con la mineralogía del suelo. No se logró obtener una relación directa entre este porcentaje y los límites de Atterberg de los suelos estudiados.

Suelos potencialmente expansivos (antigua clasificación) con la nueva clasificación muestran mejor su verdadero comportamiento, lo cual ahorra el ensayo de determinación del potencial expansivo. Los LL determinados con kerosene fueron mayores a los estimados con salmuera. Este efecto se debe al aumento en la atracción entre partículas con tendencias a la floculación, lo cual aumenta el LL de los suelos de alta plasticidad. La sensibilidad de los suelos fue mayor en las fuerzas de vdW que en la doble capa difusa.

Con la nueva clasificación de suelos finos y de acuerdo con los resultados de LL determinados con el PdC, los suelos 1, 2 y 5 tienen una plasticidad y sensibilidad eléctrica (SE) intermedia (I-I), el suelo 3 tiene una baja plasticidad y SE intermedia (L-I), mientras que el suelo 4 es de baja plasticidad y SE alta (L-H). En general, la sensibilidad eléctrica indica la sensibilidad que tiene el suelo a generar propiedades de plasticidad, potencial expansivo, aumento en el intercambio catiónico, floculación e inestabilidad volumétrica. Se logra a partir del cambio de propiedades del fluido de poro tales como la concentración de iones disponibles y la capacidad de polarización de las moléculas, lo cual se ve reflejado en cambios en los efectos doble capa difusa y fuerzas de vdW.

REFERENCIAS

- [1] J. Jang y J. C. Santamarina, "Fines classification based on sensitivity to pore-fluid chemistry", *Jour. of Geot. Geoenv. Engin.*, 2015. [En línea]. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001420
- [2] AASHTO, "Standard method of test for determining the liquid limit of soils", T-89, 2013.
- [3] ASTM, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", ASTM D 4318-05, abr. 2005. [En línea]. doi: 10.1520/D4318.
- [4] J. Guardo P, "Estudios geotécnicos. Una necesidad en obras civiles", *Ing. & Des.*, n.º 6, pp. 117-126, 1999.
- [5] A. Lizcano, M. C. Herrera y J. C. Santamarina, "Suelos derivados de cenizas volcánicas", *Rev. Int. Des. Nat., Acc. Infr. Civ.*, vol. 6, n.º 2, pp. 167-197, 2006.
- [6] E. Polidori, "Proposal for a new classification of common inorganic soils for engineering purposes", *Geotech. geol. eng.*, vol. 33, pp. 1569-1579, 2015. [En línea]. doi: 10.1007/s10706-015-9922-4.
- [7] New Zealand Geotechnical Society, "Field description of soils and rocks. Guideline for field classification and description of soils and rocks for

- engineering purposes", 2005. [En línea]. Disponible en: http://www.nzgs.org/Publications/Guidelines/soil_and_rock.pdf
- [8] E. Polidori, "Proposal for a new plasticity chart", *Géotech.*, vol. 53, n.º 4, pp. 397-406, 2003. [En línea]. Disponible en: doi: 10.1680/geot.2003.53.4.397
- [9] E. Polidori, "Reappraisal of the activity of clays. Activity chart", *Jap. Geotech. Soc.*, vol. 49, n.º 3, pp. 431-441, 2009. [En línea]. doi: 10.3208/sandf.49.431.
- [10] A. K. Howard, "The revised ATM standard on the unified classification system", *Geotech. Test. Jour.*, vol. 7, n.º 4, pp. 216-222, 1984.
- [11] I. L. Whyte, "Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion", *Gr. Eng.*, vol. 15, n.º 1, pp. 16-24, 1982.
- [12] R. N. Yong, A. M. Mohamed y B. P. Warkentin, *Principles of contaminant transport in soils, developments in geotechnical engineering*. Vol. 73, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992, p. 327.
- [13] R. M. Schmitz y L. A. Van Paassen, "The decay of the liquid limit of clays with increasing salt concentration", *Ingeokring Newsletter*, vol. 9, n.º 1, pp. 1-14, 2003.
- [14] G. Yilmaz, T. Yetimoglu y S. Arasan, "Hydraulic conductivity of compacted clay liners with inorganic salt solutions", *Waste Manag. & Res.*, vol. 26, n.º 5, pp. 464-473, 2008. [En línea]. doi: 10.1177/0734242X08091586.
- [15] S. Arasan y T. Yetimoglu, "Effect of inorganic salt solution on the consistency limits of two clays", *Turk. J. Eng. Env. Sc.*, vol. 32, pp. 107-115, 2008.
- [16] N. Shariatmadari, M. Salami y M. Karimpour-Fard, "Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers", *Inte. J. Civ. Eng.*, vol. 9, n.º 2, pp. 102-110, jun. 2011.
- [17] Invías. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, Sección-100 Suelos, 2013.
- [18] T. W. Feng, "Fall-cone penetration and water content relationship of clays", *Géotech.*, vol. 50, n.º 2, pp. 181-187, 2000. [En línea]. doi: 10.1680/geot.2000.50.2.181.
- [19] P. M. Paredes y A. R. Verdugo, "Génesis y estructura de los suelos alofánicos en Chile", en *V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, Santiago de Chile, 2004.
- [20] M. C. Herrera, "Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería", Tesis de doctorado, Universidad de los Andes, p. 265, 2006.
- [21] C. Luna, *Suelos de ceniza volcánica del cauca*. Vol. XI, Bogota D. C.: IGAC, 1975.
- [22] R. E. Olson y G. Mesri, "Mechanisms controlling compressibility of clays", *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 6, n.º 11, pp. 1863-1878, 1970.

- [23] J. K. Mitchell y K. Soga, *Fundamentals of soil behavior*. 3ª ed., Nueva York: Wiley, 2005.
- [24] A. Sridharan y G. V. Rao, "Mechanisms controlling volume change of saturated clays", *Géotech.*, vol. 23, n.º 3, pp. 359-382, 1973. [En línea]. doi: 10.1680/geot.1973.23.3.359.