



Universidad
Señor de Sipán

**FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**Comportamiento del cloruro de magnesio (bischofita) y
óxido de calcio (cal) como estabilizadores de suelos para
fines de pavimentación.**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER
EN INGENIERIA CIVIL**

Autor(es)

Amaya Diaz Gianmarco Antonio

<https://orcid.org/0009-0005-8826-9649>

Soberon Leon Alin Jherlin

<https://orcid.org/0009-0001-3912-4022>

Asesor

Muñoz Pérez Sócrates Pedro

<https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

Línea de Investigación

**Tecnología y Innovación en el desarrollo de la construcción y la
industria en un contexto de sostenibilidad**

Sublínea de Investigación

**Innovación y Tecnificación en Ciencia de los Materiales, Diseño e
Infraestructura**

Pimentel – Perú

2024



Universidad
Señor de Sipán


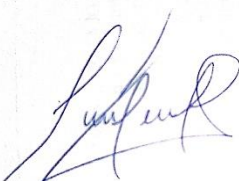
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quien(es) suscribe(imos) la **DECLARACIÓN JURADA**, soy(somos) del programa de estudios de ingeniería civil de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaro (amos) bajo juramento que soy (somos) autor(es) del trabajo titulado:

Comportamiento del cloruro de magnesio (bischofita) y óxido de calcio (cal) como estabilizadores de suelos para fines de pavimentación.

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, con relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Amaya Diaz Gianmarco Antonio	DNI: 71029021	
Soberon Leon Alin Jherlin	DNI: 73861341	

Pimentel, 26 de agosto de 2024

PAPER NAME

**Art. Review - Amaya Diaz Gianmarco & S
oberon Leon Alin ..**

AUTHOR

-

WORD COUNT

3093 Words

CHARACTER COUNT

15126 Characters

PAGE COUNT

59 Pages

FILE SIZE

19.2KB

SUBMISSION DATE

Aug 26, 2024 11:35 PM GMT-5

REPORT DATE

Aug 26, 2024 11:36 PM GMT-5

● **12% Overall Similarity**

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 11% Internet database
- 8% Submitted Works database
- 0% Publications database

Dedicatoria

Dedico esta investigación a los integrantes de mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional han estado presentes en cada etapa de este recorrido. A mis padres, por inculcarme el valor del esfuerzo y la perseverancia; por su comprensión y constante aliento, que me motivaron a continuar, incluso en los momentos más desafiantes

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia por su paciencia, comprensión y constante apoyo, que me brindaron la fortaleza necesaria para seguir adelante y concluir este trabajo. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Comportamiento del cloruro de magnesio (bischofita) y óxido de calcio (cal) como estabilizadores de suelos para fines de pavimentación.

Behavior of magnesium chloride (bischofite) and calcium oxide (lime) as soil stabilizers for paving purposes.

G. Amaya^a, A. Soberon^b

Universidad Señor de Sipán. Campus Universitario Carretera a Pimentel km 5, (Chiclayo, Perú)

✉^a: adiazgianmar@uss.edu.pe

✉^b: sleonalinjherli@uss.edu.pe

RESUMEN: El pavimento mejora la transitabilidad vehicular, sin embargo, existen suelos como los arcillosos o limosos en donde es necesario mejorar la capacidad de la subrasante para que el pavimento se comporte eficientemente. Una forma de mejorar las propiedades del suelo es la estabilización por agentes químicos. El óxido de calcio, más conocido como cal, es un aglutinante conocido a nivel mundial. Pero el cloruro de magnesio o también llamado bischofita, tiene un uso reciente para fines de estabilización de suelos dado que se ha utilizado como controlador de polvo. Esta investigación tiene el objetivo de revisar sistemáticamente la literatura del uso de bischofita y cal como estabilizadores de suelos para fines de pavimentación. Para lo cual se revisaron 80 documentos entre los años 2017 a 2021 indexados en las bases de datos de Scopus, ScienceDirect y Web of Science, encontrando en este último coincidencias en 32 manuscritos de Scopus y 36 en ScienceDirect, cabe indicar que la totalidad de manuscritos indexados en la base de datos de Scopus son 42 y la totalidad de manuscritos indexados en ScienceDirect son 38. Los resultados mostraron que la estabilización con bischofita en un 6% y cal en porcentajes entre 4% a 7% mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo, especialmente el CBR y el ensayo de resistencia a compresión uniaxial. Se concluye que la bischofita tiene un excelente comportamiento, aunque existen pocas investigaciones y para la cal se analizaron las mejoras de las propiedades físicas y mecánicas para diferentes tipos de suelo.

PALABRAS CLAVE: Estabilización de suelos, óxido de calcio, cal, cloruro de magnesio, bischofita.

ABSTRAC: The pavement improves vehicular trafficability; however, there are soils such as clayey or silty soils where it is necessary to improve the capacity of the subgrade for the pavement to perform efficiently. One way to improve soil properties is stabilization by chemical agents. Calcium oxide, better known as lime, is a binder known worldwide. But magnesium chloride or also called bischofite, has a recent use for soil stabilization purposes since it has been used as a dust controller. The objective of this research is to systematically review the literature on the use of bischofite and lime as soil stabilizers for paving purposes. For which 80 papers were reviewed between the years 2017 to 2021 indexed in the databases of Scopus, ScienceDirect and Web of Science, finding in the latter coincidence in 32 manuscripts in Scopus and 36 in ScienceDirect, it should be noted that the total number of manuscripts indexed in the Scopus database are 42 and the total number of manuscripts indexed in ScienceDirect are 38. The

results showed that stabilization with bischofite at 6% and lime at percentages between 4% to 7% improve the physical and mechanical properties of the soil, especially the CBR and the uniaxial compressive strength test. It is concluded that bischofite has an excellent performance, although there is little research, and for lime the improvements in physical and mechanical properties were analyzed for different types of soil such as clayey, silty, silty-clayey and expansive.

KEY WORDS: Soil stabilization, calcium oxide, lime, magnesium chloride, bischofite.

ORCID ID: G. Amaya (<https://orcid.org/0009-0005-8826-9649>); A. Soberon (<https://orcid.org/0009-0001-3912-4022>).

1. INTRODUCCION

Los pavimentos proveen de una superficie resistente a las cargas de los vehículos y las transmiten a través de sus capas hacia la subrasante, por tanto, el suelo debe ser lo suficientemente resistente para permitir esta distribución de esfuerzos. En su construcción, es necesario definir la calidad del suelo que servirá como terreno de fundación, es decir, para resistir las cargas que son transmitidas por el conjunto de capas que conforma un pavimento, a esto llamamos subrasante y que por medio de ensayos de laboratorio se conocen sus propiedades físicas y mecánicas. De acuerdo a la clasificación de suelos arcillosos o limosos son suelos problemáticos para ser usados como subrasante.

Uno de los ensayos esenciales para el diseño de pavimentos es el CBR (California Bearing Ratio), que es un parámetro en porcentaje que representa la capacidad portante. Los suelos que tienen valores muy bajos (menores a 6%), son los suelos finos: arcillas y limos; las alternativas para este problema suelen ser el reemplazo de material o la estabilización mecánica (por medio de vibración) o química, que ocurre por medio de agentes químicos al ser mezclados con el suelo.

El daño de las arcillas expansivas con potencial alto de hinchamiento, han ocasionado pérdidas financieras en todo el mundo, debido a que cuando cambia el contenido de humedad de arcillas expansivas, pueden provocar el colapso del pavimento [1].

Los suelos erosionables pueden reaccionar modificando sus propiedades por la adición de agentes químicos, permitiendo así satisfacer tres necesidades fundamentales: eficiencia, economía y sostenibilidad [2]. Este tipo de suelos, también llamados dispersivos, son susceptibles a fenómenos de erosión externa e interna cuando entran en contacto con agua relativamente pura y por lo general, dicha inestabilidad estructural está relacionada con la presencia de altas cantidades de sodio adsorbido (Na^+) [3].

En la estabilización de suelos con agentes químicos existen aglutinantes como puzolana, cemento portland o geopolímeros que permiten mejorar el rendimiento mecánico de los suelos [4], pero también combinaciones con cal y cenizas volantes, dado que las granulometrías de sus partículas son similares [5, 6].

El cloruro de magnesio hexahidratado (MgCl_2) o bischofita, es una sal marina que se usa generalmente para el control de polvo, prevenir dispersión de partículas gruesas y el hielo en carreteras, y que, recientemente se está usando como estabilizador ecológico [7], dado que no daña a los seres vivos ni produce corrosión [8]. Se puede crear un aditivo de alcalinización de magnesio, mezclándolo con hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3), con esto se logra producir menor emisión de CO_2 [9]. Algunas de las propiedades que se modifican cuando se mezcla MgCl_2 , son el aumento de la densidad seca y la disminución de contenido óptimo de

humedad [10]. La bischofita también permite la disolución de sílice y alúmina, que están presentes en metales alcalinos que actúan como catalizadores para la reacción de condensación [11].

El óxido de calcio (CaO) o cal, es un aglutinante cuyas propiedades son compatibles con el suelo especialmente cuando son partículas finas, pero cuando se usa cal hidratada, se requiere un prolongado tiempo de curado [12]. Algunas de las propiedades de la cal comercial son: inolora, color blanco, resistente a ácidos y álcalis y gravedad específica de 0.9 [13], además de que el entorno de pH para un material de hidratación mejora [14]. La cal comercial suele tener porcentajes de trióxido de azufre casi en un 6% y óxido de magnesio en un 1% [15]. La cal puede tener costos reducidos, gran disponibilidad y mínimo impacto ambiental [16]. Aunque las mejoras adicionales en los parámetros de bioestabilización (proceso en el que la materia se desintegra de forma natural) atribuibles como pH, conductividad o temperatura pueden no ser rentables [17].

El tratamiento con cal ocurre en dos etapas, la primera es instantánea debido a un intercambio de iones Ca^{2+} mientras que la segunda ocurre a largo plazo y es la solidificación de compuestos. [18]. La fuerza de la mezcla cal-suelo está influenciada por varios factores como: tipo de suelo, cantidad de cal agregada, contenido de humedad, período de curado, peso unitario del suelo y tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación [19]. Si se agrega cal a un suelo arcilloso (CH), ocurre la floculación que modifica las propiedades del suelo, pero eso solo sucede si se le agrega el porcentaje correcto de cal, ya que una mayor adición no provoca más cambios en el límite plástico de este [20]. En otras palabras, mediante la sustitución de iones monovalentes por iones de calcio reducen la capacidad de retención de agua, entonces las partículas arcillosas se juntan y promueven la floculación, aumentando su trabajabilidad [21]. Así mismo, dentro de las primeras horas, comienza la etapa inicial del procedimiento para que, dentro de unos años, logra una configuración diseñada correctamente, haciendo que la mezcla se vuelve impermeable, firme y duradera estructuralmente [22]. Esto provoca que el ensayo de resistencia a compresión uniaxial (UCS) aumente junto con los parámetros de resistencia al corte después de las 24 horas [23].

El límite líquido de los suelos inicialmente disminuye con un aumento en el contenido de cal. La razón que señala esta disminución se debe a la reducción en el espesor de la doble capa difusa, y esto se atribuye al aumento de la concentración de electrolitos en el líquido de los poros [24].

La estabilización de suelos con agentes químicos permite incrementar el porcentaje del CBR de los suelos como arcillas y limos, debido a la floculación que promueven el cloruro de magnesio y la cal, mejorando así propiedades de trabajabilidad, resistencia y reduce la contaminación del medio ambiente. Por lo mencionado, esta investigación tiene como objetivo revisar la literatura sobre la estabilización de suelos con fines de pavimentación.

2. MATERIALES Y METODOS

Se realizó una búsqueda literaria en la base de datos de Scopus el 24 de noviembre de 2021, se buscaron las palabras clave: soil stabilization lime y soil stabilization magnesium chloride, encontrando 2411 y 55 documentos respectivamente. Los resultados fueron filtrados entre los años 2017-2021 y se tomaron áreas temáticas de Ingeniería (Engineering) y Ciencia de los materiales (Materials science) teniendo como resultado 964 y 28 artículos científicos. Se escogieron 34 artículos para estabilización con cal y 4 para la estabilización con bischofita, como se presenta en la Tabla 1.

De forma similar se realizó una búsqueda literaria en la base de datos de ScienceDirect el 24 de noviembre de 2021, teniendo como palabras clave: stabilization soil lime y stabilization soil magnesium chloride, encontrando 15992 y 8824 documentos respectivamente. Los resultados fueron filtrados entre los años 2017-2021, tomándose áreas temáticas de Ingeniería (Engineering)

y Ciencia de los materiales (Materials science), teniendo como resultado 465 y 69 artículos científicos. Se tomaron 33 manuscritos para la estabilización con cal y 9 para la estabilización con bischofita.

Así también, se revisó en la base de datos de Web of Science, coincidiendo 32 manuscritos de la base de datos de Scopus y 36 en la base de datos de ScienceDirect.

Tabla 1. Criterios de búsqueda y de selección de los artículos usados en la presente investigación.

PALABRAS CLAVES	DOCUMENTOS ENCONTRADOS	AÑOS DE PUBLICACIÓN DE DOCUMENTOS	FILTRO DE BÚSQUEDA	DOCUMENTOS DESPUÉS DEL FILTRO	DOCUMENTOS SELECCIONADOS EN SCOPUS	DOCUMENTOS SELECCIONADOS EN SCIENCE DIRECT	DOCUMENTOS ENCONTRADOS EN WOS
stabilization lime soil	2411	2021-2017	Engineering/Materials Science/Research Articles	964	5		29
stabilization magnesium chloride soil	55	2021-2017	Engineering/Materials Science/Research Articles	28	1		3
stabilization lime soil	15992	2021-2017	Engineering/Materials Science/Research Articles/ Construction And Building Materials	465		1	32
stabilization magnesium chloride soil	8824	2021-2017	Engineering/Materials Science/Research Articles/ Construction And Building Materials	69		5	4
TOTAL EN BASES DE DATOS					6	6	68
TOTAL					80		

Fuente: *Elaboración Propia.*

3. DISCUSION

3.1. Estabilización con bischofita

En la revisión sistemática se tuvieron pocos estudios en el uso de la bischofita como estabilizante de suelos de estos, la adición de $MgCl_2$ tuvo buenos resultados en un suelo orgánico pantanoso con alto contenido de humedad, el ensayo de UCS del suelo sin estabilizar mostró 13 kPa, que al agregar 6% de bischofita en los días 3, 7 y 28 se tuvo valores de 80 kPa, 90 kPa y 96 kPa respectivamente [25]. En cuanto a una arena limosa (SM) con contenido de humedad de 15%, densidad seca máxima de 15 kN/m^3 y UCS de resultado de 142 kPa. Cuando el porcentaje de $MgCl_2$ excede el 8%, el ensayo de UCS muestra reducción [26]. Mientras que, en un suelo

arcilloso marino, compuesto químicamente por óxido de silicio (SiO₂) en más del 50%, con densidad de 15.1 kN/m³, límite líquido de 55.1% y UCS con valor de 2.4 kPa; al adicionarse bischofita en 0.8%, mediante una estabilización electrocinética (tratamiento químico) se obtuvo un valor de UCS de 21 kPa [27].

3.2. Estabilización con cal

En la estabilización con cal se encontró abundantes manuscritos por lo que se decidió ordenar la información de acuerdo a la clasificación de suelos de acuerdo al sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), teniendo: suelos arcillosos de alta y baja plasticidad, suelos limosos de alta y baja plasticidad, suelos limo-arcillosos, suelos expansivos, arenas y otros. Las propiedades que se analizaron fueron:

Índice de plasticidad (IP), potencial de hidrógeno (pH), máxima densidad seca (MDS), óptimo contenido de humedad (w_{opt}), Relación de Soporte California a los 28 días (CBR), Resistencia a Compresión Uniaxial a los 28 días (UCS), porcentaje de hinchamiento (Swell). Se realizaron las conversiones necesarias a las unidades, para que los resultados puedan ser analizados. El denominado control es el suelo no tratado que se utiliza en dicha investigación, con el fin de comparar los estudios.

Tabla 2. Análisis de la adición de cal en diferentes tipos de suelos.

Clas. SUCS/Tipo de suelo	Cal (%)	IP (%)	pH	MDS (g/cm ³)	w_{opt} (%)	CBR (%)	UCS (kPa)	Swell (%)	Ref.
CH	Control			1.32	15		35.46	63	[28]
	12						3367	12	
CH	Control					1.2	196		[29]
	9		12.45			11.5	1000		
CH	Control			1.69	19.55				[30]
	6		12.7	1.53	23				
CH	Control			1.84	15.5	3.2	220		[31]
	4			1.7	17	45	1880		
CH	Control	23		1.66	15.92	3.5			[32]
	6	8		1.57	24.5	22			
CH	Control	40.4	6.04	1.37	32.5		312		[33]
	6		11.65				1350		
CH	Control	53		1.77	31			16.2	[34]
	6							3.9	
CH	Control	38.4			50		16.66		[35]
	5	32.5		1.26	41		2063		
CH	Control	46.6		1.52	20.5			90.1	[36]
	5			1.48	23			0.2	
CH	Control	28.6		1.56	23.5	3	107.24	52.5	[37]
	8		10.5	1.49	25.5	33	1650		
CH	Control	32		2.47	14.7		275		[38]
	6	12		1.27	25		1630		
CH	Control	73	8	1.56	23				[39]
	4.5	6	10.5						

CH	Control	33.52	8.75	1.81	14.62	2.16			[40]
	5	16	12.35	1.7	10.7	97			
CH	Control		9.84	1.21	45.5		540		[41]
	5		10.7				3500	4	
CH	Control	42.4	8.95	1.38	29.5	1.6	330	17.5	[42]
	6		12.6	1.34	33	50	790	1	
CH	Control	50.5		1.52	25				[43]
	4			1.49	26.9				
CH	Control	31.4	8.5	1.55	22.8		180	4	[44]
	8			1.37	31.1		720		
CH	Control	41	6.53	1.56	25		115.8	98	[45]
	7	12					1950	8	
CH	Control	48		1.44	28			11	[46]
	8			1.28	27.5		1350		
CH	Control	53.4		1.56	38	7.15		74	[47]
	4			1.42	28.5	14			
CH	Control	31	5.7	1.77	17.5		200		[48]
	7	6	13				1210		
CH	Control	31	8.12	1.35	31.5	1.6			[49]
	6		12.5			15	1300		
CH	Control	28.2		1.69	13	0.7			[50]
	10	4.5	12.1	1.47	18	19.7			
CL	Control			1.62	22.9	2	100		[51]
	10			1.54	24.2	40	1100		
CL	Control	18	7.8						[52]
	8						620		
CL	Control	7.9		1.7	15.1		150		[53]
	8			1.66	19.5		4150		
CL	Control	10.08	9.6	1.22					[54]
	40						196.1		
CL	Control	8		1.97	10.2		566.5		[55]
	6			1.84	15		1000		
CL	Control	24.56		1.72	15.27				[56]
	8	22		1.63	18				
CL	Control	21		1.64	21				[57]
	5	22		1.62	22.1				
CL	Control	16	8.2						[58]
	6			1.71	14.5		950		
CL	Control	16							[59]
	8			1.71			850	25.1	
CL	Control	20.3	7.38	1.58	20.91	6	200		[60]
	5		12.23			18.1	670		
CL	Control	28	7.38	1.83	16	5			[61]
	5		12.4	1.73	18.1	20			
CL	Control	21.1		1.54	24.9	4.2	188		[62]
	5					16.4	571	1	
MH	Control	18	5.3	1.49	27.6		266		[63]
	4						1125		
MH	Control	36		1.63	15.84				[64]
	6			1.65	15.39				

MH	Control	24.3	6.7	1.62	20.3		290		[65]
	8	20.8		1.56	21.5		343		
ML	Control	24.9		1.53	23.2		110		[66]
	2			1.52	24.5		250		
ML	Control	8	5.89	1.72	19.3				[67]
	6		12.6	1.66	19.7		250		
ML	Control	10.8		1.83	13.8		143		[68]
	6	7.6		1.82	19.6		256		
CL-ML	Control			1.87	11.4	8		97.7	[69]
	5						1200	57	
CL-ML	Control	10.2		1.77	17.5		400		[70]
	7						2100		
Expans.	Control	56		1.18		2.5		2	[71]
	6	22				25		0.7	
Expans.	Control	59.3	8.4	1.51	24			13.2	[72]
	4	14.3		1.43	25			0.4	
Expans.	Control	39.6		1.62	22.2		210	85	[73]
	6.5	32		1.575	22.55		790	21	
Expans.	Control			1.44	23.8	0.73	1438		[74]
	9			1.41	30.7	9	1799		
SC	Control	19.3		1.73	16.4		75		[75]
	5			1.44	19.5		340		
SC	Control	13	5.4	1.96	12.2		120		[76]
	4	13.5	8.7	1.85	13.6		280		
SC	Control	21.3	6.8	1.41	29		380		[77]
	9			1.41	31.5		840		
Caolín	Control	25		1.55			370		[78]
	5						380		
Caolín	Control			1.94	20		58.84		[79]
	4						254.97		
Alto en sal	Control	26.75	7.6	1.781	15.6		300		[80]
	6	21.5		1.64	20.98		584.03		

Fuente: *Elaboración Propia.*

4. ANALISIS Y RESULTADOS

4.1. Bischofita

La adición de $MgCl_2$ en los tipos de suelo tuvo mejoras en el ensayo de UCS, aunque al adicionarse más del 8% los resultados disminuyen considerablemente, la estabilización electrocinética es un tratamiento químico que permite una mejor distribución de las partículas de la bischofita con el suelo.

4.2. Estabilización con cal

4.2.1. Suelos arcillosos

En los suelos arcillosos de alta plasticidad (CH), en la adición de cal en promedio del 6.5%, se tienen los mejores resultados, esto varía también de acuerdo a la cantidad de CaO que contiene la cal usada en el estudio, generalmente la cal comercial contiene entre 80 a 95% de CaO. Los resultados muestran que una vez adicionada, el índice plástico (IP) disminuye entre un 25 a 60%, así mismo, la máxima densidad seca disminuye y el correspondiente contenido óptimo de humedad aumenta de 3% a 5%. El pH que en la media está en 7, se incrementa a aproximadamente 12.5. El hinchamiento disminuye notoriamente desde casi un 90% hasta valores menores de 10%. Por lo que los resultados muestran un incremento tanto en el ensayo de CBR como en el de UCS, entre 10% hasta 50% en el primero y entre 460 hasta 3600 kPa.

En las arcillas de baja plasticidad (CL) el índice de plasticidad no tuvo gran significancia cuando se le adicionó entre 5% a 10%, el valor del pH se incrementó casi en 12% junto al contenido óptimo de humedad desde 1.1% a 4.8%, por lo que la máxima densidad seca disminuyó. El ensayo de CBR tuvo como resultado un incremento en promedio de 15%, de forma alternada, en el UCS el incremento va desde 382 a 4000 kPa.

4.2.2. Suelos limosos

En los suelos limosos de alta plasticidad (MH) se tiene un pH de aproximadamente 6, al adicionarse entre 4% a 8% de cal, se tienen mejoras en el ensayo de UCS, que van desde 50 kPa hasta 800 kPa. No obstante, en los suelos de baja plasticidad (ML), la cal se adiciona en frecuencia 6%, en consecuencia, el índice de plasticidad disminuye junto con la máxima densidad seca, por lo que el óptimo contenido de humedad se incrementa. En el ensayo de UCS se tiene valores que se incrementan desde 113 a 140 kPa.

4.2.3. Suelos limo-arcillosos

Para los suelos limo-arcillosos (CI-ML) se tuvieron dos manuscritos, que indican una adición de cal entre 5% a 7%, se tienen mejoras en los valores del ensayo de UCS y una disminución del porcentaje de hinchamiento.

4.2.4. Suelos expansivos

En los suelos expansivos se tuvieron adiciones de cal que van desde 4 a 9%, lo que corresponde a una disminución de la máxima densidad seca de casi 0.05 g/cm^3 , de forma similar ocurre con el índice de plasticidad. El óptimo contenido de humedad aumenta y provoca que los valores de los ensayos de CBR y UCS se incrementen, en aproximadamente 8% a 22% y desde 360 kPa a 580 kPa respectivamente.

4.2.5. Arenas y otros

En las arenas con contenido de arcilla (SC), se utilizaron porcentajes de cal entre 4 a 9%, teniendo un incremento en el pH, índice de plasticidad y contenido óptimo de humedad, de igual forma con la cohesión, el ángulo de fricción y el resultado del ensayo de UCS, que van desde 160 a 460 kPa. En el caolín se adicionó en 4 y 5% eficiente y en el ensayo de UCS las mejoras no son muy considerables. En un suelo con alto contenido de sal, se tiene una disminución del índice de plasticidad y en la máxima densidad seca,

lo que incrementa el óptimo contenido de humedad y en casi 285 kPa el resultado de UCS.

5. CONCLUSIONES

Se concluye que el uso de la bischofita y la cal mejoraron las propiedades físicas y químicas del suelo. El porcentaje óptimo de la bischofita es el 6%, cuando se adiciona en porcentajes mayores a 8%, se tiene decrecimiento en el ensayo de resistencia a compresión uniaxial. Por otro lado, la adición de cal en porcentajes entre 4 a 7% mejora de forma notoria el CBR y el ensayo UCS, siendo los suelos arcillosos los que se comportan de mejor manera. Las propiedades del suelo que se transforman después de la adición de cal son: en el ensayo de Proctor Estándar, la máxima densidad seca disminuye por lo que el óptimo contenido de humedad incrementa; el pH se incrementa en promedio a 12.5; el índice de plasticidad disminuye a aproximadamente 10%, y el porcentaje de hinchamiento disminuye hasta un 10%. Entre la bischofita y la cal, el mejor estabilizador de suelos con fines de pavimentación es la cal.

REFERENCIAS

- [1] J. F. Rivera, A. Aguirre, R. Mejía y A. Orobio, «Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión),» *Informador Técnico*, vol. 84, n° 2, pp. 202-226, 2020.
- [2] C. Costa, M. Moreira y A. Saliba, «Soil stabilization with lime for erosion control in solar plants,» *REM - International Engineering Journal*, vol. 74, n° 3, pp. 329-335, 2021.
- [3] H. Filho, C. Martins, R. Menezes, L. Dornelles y N. Consoli, «The Effect of Key Parameters on the Strength of a Dispersive Soil Stabilized with Sustainable Binders,» *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, n° 7, pp. 5395-5404, 2021.
- [4] C. Gravina da Rocha, E. J. Bittar Marin, R. A. Quiñónez Samaniego y N. C. Consoli, «Decision-Making Model for Soil Stabilization: Minimizing Cost and Environmental Impacts,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, n° 2, pp. 1-12, 2021.
- [5] J. F. Rivera, A. Orobio, N. Cristelo y R. Mejía, «Fly ash-based geopolymer as A4 type soil stabiliser,» *Transportation Geotechnics*, vol. 25, pp. 1-8, 2020.
- [6] J. Jijo, P. Ebenezer, N. Mahalakshmi, K. Mohan y M. Jayapal, «Pozzolanic benefit of fly ash and steel slag blends in the development of uniaxial compressive strength of lime stabilized soil,» *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 27, n° 49, pp. 7-21, 2018.
- [7] M. Nurmunira y S. Sumi, «Investigation Of The Strength Development Using Magnesium Alkalinization For Subgrade,» de *6th International Conference on Engineering Mechanics and Materials 2017*, 2017.
- [8] F. Habibbeygi y H. Nikraz, « Compression Behaviour Of Highly Expansive Clays Stabilised With A Green Stabiliser Of Magnesium Chloride,» *International Journal of GEOMATE*, vol. 14, n° 45, pp. 144-150, 2018.
- [9] N. Muhammad y S. Siddiqua, «Full factorial design for optimization of magnesium alkalinization additive,» *Transportation Geotechnics*, vol. 21, 2019.

- [10] G. Radhakrishnan, K. M. Anjan y R. G.V.R.P., «Laboratory Evaluation of the Effects of 3-Chloride Compounds on the Geotechnical Properties of an Expansive Subgrade Soil,» *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 98, nº 4, pp. 477-482, 2017.
- [11] M. Nurmunira, M. Sumi Siddiqua y M. Nima Latifi, «Solidification of Subgrade Materials Using Magnesium Alkalinization: A Sustainable Additive for Construction,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, nº 10, pp. 1-13, 2018.
- [12] M. M. Barbero-Barrera, F. Jové-Sandoval y S. González Iglesias, «Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks,» *Construction and Building Materials*, vol. 260, pp. 1-14, 2020.
- [13] D. S. V. Prasad, C. Sivannarayana y P. Sunitha, «Effect of bamboo fibres and lime on engineering properties of expansive soil,» *International Conference on Sustainable Systems and Structures*, vol. 1025, nº 1, pp. 1-10, 2021.
- [14] H. Baloochi, D. Aponte y M. Barra, «Soil Stabilization Using Waste Paper Fly Ash: Precautions for Its Correct Use,» *Applied Sciences*, vol. 10, nº 23, pp. 2076-3417, 2020.
- [15] S. Shah, M. Arif, M. Sabir y Q. Ur Rehman, «Impact of Igneous Rock Admixtures on Geotechnical Properties of Lime Stabilized Clay,» *Civil and Environmental Engineering*, vol. 16, nº 2, pp. 329-339, 2020.
- [16] S. Guzmán y M. Iñiguez, «Metodología para elección de estabilizantes químicos para bloques de tierra,» *Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, vol. 5, nº 9, pp. 151-159, 2016.
- [17] N. Kennedy, R. Lally, S. Walsh, D. Dowling y D. Ryan, «Effect of green waste and lime amendments on biostabilisation, physical-chemical and microbial properties of the composted fine fraction of residual municipal solid waste,» *Waste Management and Research*, vol. 39, nº 8, pp. 1069-1077, 2021.
- [18] S. Bhuvaneshwari, R. Robinson y S. Gandhi, «Effect of Functional Group of the Inorganic Additives on Index and Microstructural Properties of Expansive Soil,» *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 6, nº 4, pp. 1-15, 2020.
- [19] G. Santhosh y K. Beena, «Variation of Swelling Characteristics of Bentonite Clay Mixed with Jarofix and Lime,» de *Indian Geotechnical Conference, IGC 2018*, 2021.
- [20] N. Datta y S. Pal, «Influence of Fly Ash Mixed with Bentonite and with Lime on Plasticity and Compaction Characteristics Including XRD and SEM Analysis,» de *Indian Geotechnical Conference, IGC 2018*, 2020.
- [21] D. Padmaraj y D. N. Arnepalli, «Durability of Cementitious Phases in Lime Stabilization: A Critical Review,» de *Indian Geotechnical Conference, IGC 2018*, 2021.
- [22] R. Samal y A. Mishra, «Effect of Stone dust and Lime in the Geotechnical Properties of Clayey Soil,» de *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020.
- [23] N. Correia, F. Portelinha, I. Mendes y J. da Silva, «Lime treatment of a diesel-contaminated coarse-grained soil for reuse in geotechnical applications,» *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 11, nº 1, pp. 1-15, 2020.

- [24] M. Joju y S. Chandrakaran, «Comparative Study on Stabilization of Marine Clay Using Nano-silica and Lime,» de *Indian Geotechnical Conference, IGC 2018*, 2021.
- [25] W. H. Wan Hassan, A. S. Rashid, H. S. Latifi Nima y S. Borhamdin, «Strength and morphological characteristics of organic soil stabilized with magnesium chloride,» *Geological Society of London*, vol. 50, n° 4, pp. 454-459, 2017.
- [26] N. Muhammad y S. Siddiqua, «Investigation Of The Strength Development Using Magnesium Alkalinization For Subgrade,» *Leadership en Infrastructures Durables*, 2017.
- [27] Y. Tang, N. Wang, F. Xu, D. Teng y X. Cui, «Electrokinetic stabilization of marine clayey soil using magnesium chloride solution: A green soil stabilizer,» *Marine Georesources & Geotechnology*, pp. 1-7, 2021.
- [28] M. Arun kumar, P. Kulanthaivel, S. Selvapraveen, S. Vinodhkumar y V. Naveenraj, «Strength Behaviour of Clay Soil Stabilized With Lime,» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 961, pp. 1-7, 2020.
- [29] S. F. Chitragar, C. B. Shivayogimath y R. H. Mulangi, «Study on strength and volume change behavior of stabilized black cotton soil with different pH of soil-lime mixes for pavement subgrade,» *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 14, n° 5, pp. 543-548, 2020.
- [30] A. Driss, K. Harichane y M. Ghrici, «Effect of natural pozzolana on microstructural behavior and hydraulic conductivity of lime-stabilized clayey soil,» *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 6, n° 4, pp. 1-17, 2021.
- [31] S. Nagesh, H. Jagadeesh y K. Nithin, «Study on effect of laboratory roller compaction on unconfined compressive strength of lime treated soils,» *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 12, n° 1, pp. 1-16, 2021.
- [32] S. Mukherjee y P. Ghosh, «Soil Behavior and Characterization: Effect of Improvement in CBR Characteristics of Soil Subgrade on Design of Bituminous Pavements,» *Indian Geotechnical Journal*, vol. 54, n° 3, pp. 567-582, 2021.
- [33] M. Amaya, E. Botero y E. Ovando, «Lime stabilisation of highly compressible surface from soils in ex-Lake Texcoco, Mexico,» *Environmental Geotechnics*, vol. 8, n° 6, pp. 416-427, 2019.
- [34] S. Khadka, P. Jayawickrama, S. Senadheera y B. Segvic, «Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum,» *Transportation Geotechnics*, vol. 23, pp. 1-13, 2020.
- [35] A. Jha y P. Sivapullaiah, «Lime Stabilization of Soil: A Physico-Chemical and Micro-Mechanistic Perspective,» *Indian Geotechnical Journal*, vol. 50, n° 3, pp. 339-347, 2020.
- [36] D. Toksöz Hozathoğlu y I. Yılmaz, «Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils,» *Engineering Geology*, vol. 280, pp. 1-11, 2021.
- [37] R. Etim, A. Eberemu y K. Osinubi, «Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture,» *Transportation Geotechnics*, vol. 10, pp. 85-95, 2017.

- [38] M. Ismeik y F. Shaqour, «Effectiveness of lime in stabilising subgrade soils subjected to freeze–thaw cycles,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, n° 1, pp. 42-60, 2020.
- [39] P. Sriram Karthick Raja y T. Thyagaraj, «Effect of short-term sulphate contamination on lime-stabilized expansive soil,» *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 15, n° 8, pp. 964-976, 2021.
- [40] M. Zagvozda, T. Rukavina y S. Dimter, «Wood bioash effect as lime replacement in the stabilisation of different clay subgrades,» *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-11, 2020.
- [41] M. Salimi, M. Ilkhani y A. Vakili, «Stabilization treatment of Na-montmorillonite with binary mixtures of lime and steelmaking slag,» *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 14, n° 3, pp. 295-301, 2020.
- [42] S. Rabab'ah, M. Taamneh, H. Abdallah, O. Nusier y L. Ibdah, «Effect of Adding Zeolitic Tuff on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Expansive Soil,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, n° 12, pp. 4596-4609, 2021.
- [43] A. Al-Taie, M. Disfani, R. Evans, A. Arulrajah y S. Horpibulsuk, «Volumetric behavior and soil water characteristic curve of untreated and lime-stabilized reactive clay,» *International Journal of Geomechanics*, vol. 19, n° 2, pp. 1-13, 2019.
- [44] M. Nabil, A. Mustapha y S. Rios, «Impact of wetting—drying cycles on the mechanical properties of lime-stabilized soils,» *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 13, n° 1, pp. 83-92, 2020.
- [45] J. James, «Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 12, n° 2, pp. 395-402, 2020.
- [46] S. Bhuvaneshwari, R. Robinson y S. Gandhi, «Resilient Modulus of Lime Treated Expansive Soil,» *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, n° 1, pp. 305-315, 2019.
- [47] C. Ikeagwuani, I. Obeta y J. Agunwamba, «Stabilization of black cotton soil subgrade using sawdust ash and lime,» *Soils and Foundations*, vol. 59, n° 1, pp. 162-175, 2019.
- [48] M. Mahedi, B. Cetin y D. White, «Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, n° 7, pp. 1-16, 2020.
- [49] Y. Cheng, S. Wang, J. Li, X. Huang, C. Li, C. Li y J. Wu, «Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans,» *Construction and Building Materials*, vol. 187, pp. 1031-1038, 2018.
- [50] C. Okeke, «Engineering behaviour of lime- and waste ceramic dust-stabilized expansive soil under continuous leaching,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 79, n° 4, pp. 2169-2185, 2020.
- [51] J. Pooni, D. Robert, F. Giustozzi, S. Setunge, Y. Xie y J. Xia, «Performance evaluation of calcium sulfoaluminate as an alternative stabilizer for treatment of weaker subgrades,» *Transportation Geotechnics*, vol. 27, 2021.

- [52] D. Padmaraj y D. Arnepalli, «Mechanism of Carbonation in Lime-Stabilized Silty Clay from Chemical and Microstructure Perspectives,» *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 7, n° 4, pp. 1-12, 2021.
- [53] S. Shirmohammadi, S. Jahromi, M. Payan y K. Senetakis, «Effect of lime stabilization and partial clinoptilolite zeolite replacement on the behavior of a silt-sized low-plasticity soil subjected to freezing–thawing cycles,» *Coatings*, vol. 11, n° 8, pp. 1-21, 2021.
- [54] M. Jebeli y N. Heidarzadeh, «Enhancement of the quick lime-based solidification/stabilization of oily wastes using modified clay,» *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 96, n° 8, pp. 2265-2274, 2021.
- [55] M. Aziz, F. Sheikh, M. Qureshi, A. Rasool y M. Irfan, «Experimental Study on Endurance Performance of Lime and Cement-Treated Cohesive Soil,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, n° 9, pp. 3306-3318, 2021.
- [56] K. Harichane, M. Ghrici y S. Kenai, «Stabilization of algerian clayey soils with natural pozzolana and lime,» *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 62, n° 1, pp. 1-10, 2018.
- [57] E. Fratolocchi, M. Di Sante, F. Mazzieri y E. Pasqualini, «Prediction of shear strength parameters in soil-lime mixture design - Part 2: Hydrated lime,» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, vol. 173, n° 3, pp. 159-169, 2020.
- [58] N. Cesar Consoli, E. Bittar Marin, R. Quiñónez Samaniego, H. Scheuermann Filho y N. Cordeiro Cristelo, «Field and laboratory behaviour of fine-grained soil stabilized with lime,» *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 57, n° 6, pp. 933-938, 2020.
- [59] N. Consoli, E. Bittar Marin, R. Quiñónez Samaniego, H. Scheuermann Filho, T. Miranda y N. Cristelo, «Effect of Mellowing and Coal Fly Ash Addition on Behavior of Sulfate-Rich Dispersive Clay after Lime Stabilization,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, n° 6, pp. 1-10, 2019.
- [60] S. Dhar y M. Hussain, «The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction,» *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 15, n° 4, pp. 471-483, 2021.
- [61] C. Okeke, S. Abbey, J. Oti, E. Eyo, A. Johnson, S. Ngambi, T. Abam y M. Ujile, «Appropriate use of lime in the study of the physicochemical behaviour of stabilised lateritic soil under continuous water ingress,» *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n° 1, pp. 1-26, 2021.
- [62] S. Dhar y M. Hussain, «The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, n° 8, pp. 1757-1778, 2019.
- [63] K. Mahesh Bhat y S. Nayak, «Experimental Studies and its Application using PLAXIS-2D for Lithomargic Clay Stabilized by GBFS and Lime,» *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, n° 7, pp. 4901-4915, 2021.
- [64] N. Talluri, A. Puppala, S. Congress y A. Banerjee, «Experimental Studies and Modeling of High-Sulfate Soil Stabilization,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 146, n° 5, pp. 1-12, 2020.

- [65] S. Islam, N. Hoque, M. Hoque, P. Mishra, M. Mamun y S. Dey, «Strength development in fine-grained paddy field soil by lime addition,» *Journal of Building Engineering*, vol. 26, pp. 1-7, 2019.
- [66] H. Menaceur, O. Cuisinier, F. Masrouri y H. Eslami, «Impact of monotonic and cyclic suction variations on the thermal properties of a stabilized compacted silty soil,» *Transportation Geotechnics*, vol. 28, pp. 1-8, 2021.
- [67] Y. Zhang, J. Daniels, B. Cetin y I. Baucom, «Effect of Temperature on pH, Conductivity, and Strength of Lime-Stabilized Soil,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, n° 3, pp. 1-12, 2020.
- [68] A. Rouaiguia y A. El Aal, «Enhancement of the Geotechnical Properties of Soils Using Marble and Lime Powders, Guelma City, Algeria,» *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, n° 5, pp. 5649-5665, 2020.
- [69] A. Seco, J. del Castillo, S. Espuelas, S. Marcelino y B. García, «Sulphate soil stabilisation with magnesium binders for road subgrade construction,» *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-11, 2020.
- [70] H. Bahmyari, M. Ajdari, A. Vakili y M. Ahmadi, «The Role of the Cement, Lime, and Natural Pozzolan Stabilizations on the Mechanical Response of a Collapsible Soil,» *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 8, n° 3, pp. 452-472, 2021.
- [71] T. Karatai, J. Kaluli, C. Kabubo y G. Thiong'O, «Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction,» *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 143, n° 5, pp. 1-5, 2017.
- [72] I. Belchior, M. Casagrande y J. Zornberg, «Swelling behavior evaluation of a lime-treated expansive soil through centrifuge test,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, n° 12, pp. 1-12, 2017.
- [73] N. Ijaz, F. Dai, L. Meng, Z. Rehman y H. Zhang, «Integrating lignosulphonate and hydrated lime for the amelioration of expansive soil: A sustainable waste solution,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, pp. 1-13, 2020.
- [74] W. Negawo, G. Di Emidio, A. Bezuijen, R. Verastegui Flores y B. François, «Lime-stabilisation of high plasticity swelling clay from Ethiopia,» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 23, n° 4, pp. 504-514, 2019.
- [75] L. Sharma, N. Sirdesai, K. Sharma y T. Singh, «Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study,» *Applied Clay Science*, vol. 152, pp. 152-183, 2018.
- [76] F. Portelinha, N. De Souza Correia, I. Santos Mendes y J. Silva, «Geotechnical Properties and Microstructure of a Diesel Contaminated Lateritic Soil Treated with Lime,» *Soil and Sediment Contamination*, vol. 30, n° 7, pp. 838-861, 2021.
- [77] J. Baldovino, E. Moreira, W. Teixeira, R. Izzo y J. Rose, «Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, n° 1, pp. 188-194, 2018.

- [78] M. Abdi, A. Ghalandarzadeh y L. Shafiei Chafi, «An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 13, n° 4, pp. 885-898, 2021.
- [79] G. Parra Gómez, J. G. Bastidas Martínez y J. C. Ruge Cárdenas, «Soil stabilization with lime and fly ash,» de *2019 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONITI)*, 2019.
- [80] Y. Liu, Q. Wang, S. Liu, Y. ShangGuan, H. Fu, B. Ma, H. Chen y X. Yuan, «Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling,» *Cold Regions Science and Technology*, vol. 161, n° 32, pp. 32-42, 2019.