

APLICACIÓN DEL MÉTODO RACIONAL EN LA DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS SUELO-CAL EMPLEANDO ARCILLAS TROPICALES BOLIVIANAS

René Fernando Salgueiro Bustillos ¹ Brian Edin Castelu Tinta Sarco ²

1. Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

rfsalgueiro@umsa.bo | ORCID: 0009-0003-3347-7905

2. Carrera de Construcciones Civiles, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

ORCID: 0009-0004-1819-412X

RESUMEN

La estabilización química es esencial en proyectos viales donde los materiales locales son deficientes. A pesar del amplio uso de la cal en suelos finos, su dosificación suele depender de métodos empíricos. Para superar esta limitación, el método racional de dosificación propone predecir la resistencia mecánica en función de la porosidad de la mezcla compactada y el contenido volumétrico del estabilizante. Este artículo expone los resultados de la estabilización de dos suelos arcillosos tropicales (A-6 y A-7) del departamento de Beni, Bolivia, empleando cal hidratada. Se determinó un contenido óptimo de cal del 3% (A-6) y 5% (A-7). Posteriormente, se evaluó la resistencia a la compresión simple comparando el suelo natural frente a mezclas tratadas, compactadas bajo tres niveles de energía y curadas 28 días a 23°C. Los resultados demostraron incrementos notables en su resistencia, alcanzando máximos de 2735 kPa para el suelo A-6 y 3440 kPa para el A-7 bajo energía modificada. Asimismo, se determinó una ecuación de ajuste, estableciendo mediante iteración matemática exponentes volumétricos de 0.10 y 0.09 para los suelos A-6 y A-7, respectivamente. Estos modelos predictivos alcanzaron elevados coeficientes de determinación, evidenciando la solidez de la metodología para optimizar diseños de pavimentos en la región.

Palabras clave: Estabilización de suelos, Método racional de dosificación, Porosidad, Mezcla suelo-cal, Suelo arcilloso.

1. INTRODUCCIÓN

El término estabilización de suelos es aplicado a cualquier proceso mediante el cual se mejoran las propiedades físico-mecánicas de un terreno. En el caso de proyectos viales en regiones tropicales, como el tramo San Javier - San Pedro en el departamento de Beni (Bolivia), la predominancia de suelos arcillosos altamente susceptibles a la inestabilidad volumétrica y erosión representa un desafío técnico significativo. La solución convencional de reemplazar estos materiales puede ser muy costosa y generar impactos medioambientales debido a las largas distancias de transporte.

Dentro de los métodos de estabilización química, la cal ha demostrado ser altamente efectiva para reducir la plasticidad, aumentar la capacidad portante y mejorar la resistencia en suelos arcillosos. Sin embargo, uno de los inconvenientes históricos de estos tratamientos es la carencia de procedimientos generales de dosificación, dependiendo en gran medida de formulaciones empíricas vinculadas al pH o a la mera reducción del índice de plasticidad.

Frente a esta limitación, investigaciones lideradas por Consoli et al. (2007, 2009) propusieron un procedimiento aplicable a mezclas estabilizadas denominado "método racional". Este enfoque utiliza un parámetro de control que relaciona la porosidad de la mezcla η y el contenido volumétrico del agente estabilizante C_{cal} para evaluar la resistencia a la compresión no confinada q_u .

La metodología antes indicada es aplicable a cualquier tipo de suelo y agente estabilizante. Así, investigaciones precedentes han empleado con éxito esta técnica de dosificación en suelos del norte del país con la adición de cemento (Salgueiro & Portillo, 2021).

En el presente artículo se exponen los resultados experimentales de la estabilización de dos arcillas representativas (A-6 y A-7) utilizando cal. Se compara la resistencia del suelo natural frente a probetas estabilizadas bajo diferentes niveles de energía de compactación y curadas durante 28 días en condiciones controladas. Finalmente, se detalla el procedimiento para determinar el exponente empírico x al que se debe elevar el contenido volumétrico de cal para maximizar el coeficiente de determinación R^2 , validando la aplicabilidad de este método racional para la dosificación en suelos tropicales bolivianos.

2. METODOLOGÍA

El material base correspondió a dos tipos de suelos finos procedentes del tramo San Javier - San Pedro, en el departamento del Beni. Con el fin de observar el comportamiento de la cal frente a

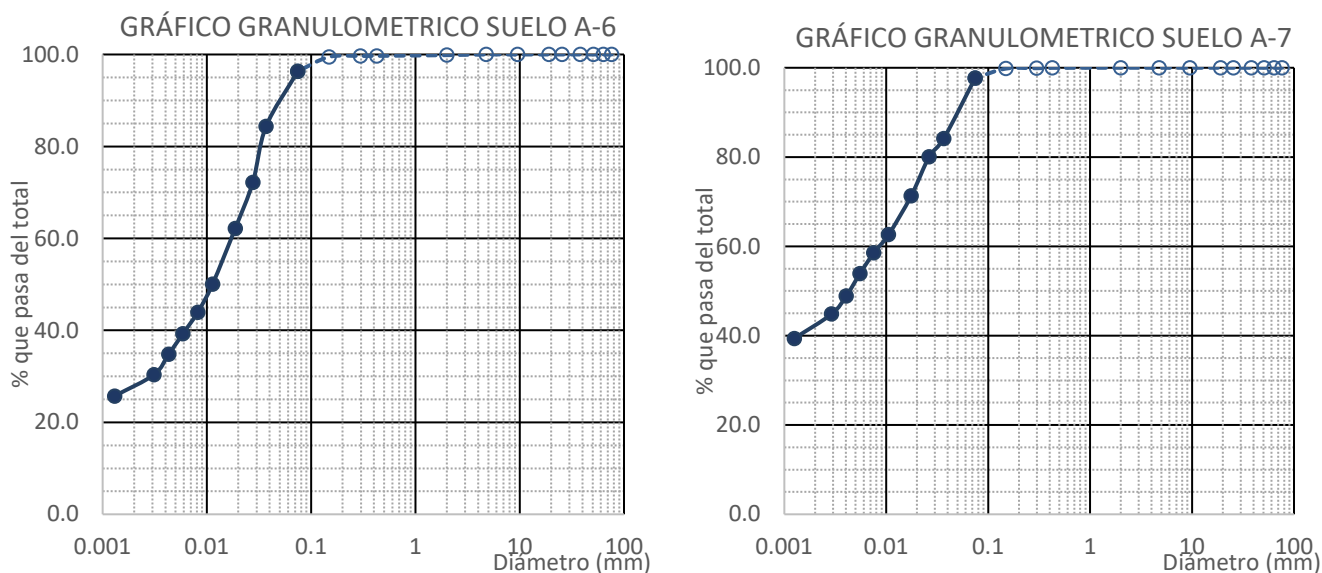
suelos de diferentes características plásticas, se seleccionaron dos muestras representativas. La caracterización geotécnica en estado natural permitió clasificarlos bajo el sistema AASHTO como un suelo A-6 (arcilla de baja a media plasticidad) y un suelo A-7-6 (arcilla de alta plasticidad). En la Tabla 1 se presentan las principales características físicas de los suelos empleados en la investigación, mientras que en la Figura 1 se muestran las curvas granulométricas asociadas a ambos tipos de suelo.

Tabla 1.
Caracterización física de los suelos naturales

CÓDIGO	CLASIFICACIÓN DE SUELOS		LÍMITES CONS.		H. NAT	GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO			GRANULOMETRÍA POR HIDROMETRÍA		GRAVEDAD ESPECÍFICA, GS (-)			%
	AASHTO	SUCS	% LL	% IP	W (%)	GRAVA	ARENA	FINOS	LIMO	ARCILLA	GRUESO	FINO	POND.	
A-6	A-6(15)	CL	35	15	3,4	0,0	3,6	96,4	68.3	28.1	-	2,68	2,68	28,1
A-7	A-7-6(26)	CH	50	22	4,8	0,0	2,3	97,7	55.3	42.4	-	2,71	2,71	42,4

Fuente: Laboratorio de suelos y materiales GAMLP

Figura 1
Curvas granulométricas de las muestras representativas



Fuente: Elaboración propia

Para el proceso de estabilización se empleó cal hidratada, elaborada en una industria nacional. Mediante ensayos iterativos de límites de Atterberg, orientados a encontrar el punto de reducción significativa de la plasticidad, se determinaron los contenidos óptimos de cal en peso: 3% para el suelo A-6 y 5% para el suelo A-7. Durante la fase de validación del método racional, se moldearon probetas con dosificaciones adicionales por encima y por debajo de este óptimo (de 1% a 5% para A-6, y de 3% a 7% para A-7).

Con el objetivo de evaluar la influencia de la compactación en la resistencia final, el programa experimental incluyó tres niveles de energía de compactación: estándar, intermedia (adoptada como un punto medio) y modificada. Las mezclas de suelo-cal se prepararon garantizando la homogeneidad y la humedad óptima requerida para cada nivel. Posteriormente, las probetas cilíndricas (5 cm de diámetro por 10 cm de altura) se moldearon utilizando una prensa estática manual (Figura 2), controlando rigurosamente alcanzar el peso específico seco γ_d de diseño establecido previamente en los ensayos Proctor, cuyos valores se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2
Datos para la elaboración de probetas

SUELO	D (CM)	H (CM)	W _{OPT} (%)	$\gamma_{D\ MAX}$ (KG/M ³)	CAL (%)	TIPO PROCTOR
Suelo tipo A-6 (+3% cal)	5,0	10,0	18,5	1673,0	3,0	Estándar
	5,0	10,0	16,9	1768,0	3,0	Intermedio
	5,0	10,0	15,6	1816,0	3,0	Modificado
Suelo tipo A-7 (+5% cal)	5,0	10,0	20,6	1640,0	5,0	Estándar
	5,0	10,0	17,8	1717,0	5,0	Intermedio
	5,0	10,0	18,2	1770,0	5,0	Modificado

Fuente: Elaboración propia basada en requerimientos del estudio.

Figura 2
Proceso de remoldeado de probetas suelo-cal en prensa manual y hermetización



Fuente: Archivo

fotográfico

Para el proceso de curado, los especímenes se envolvieron en bolsas plásticas de cierre hermético para evitar la alteración de su humedad inicial. Estas bolsas se sumergieron en un baño de agua (piscina termostatzada) equipado con un sistema de calentamiento que mantuvo la temperatura constante a 23°C durante un período de 28 días (Figura 3). Finalizado este lapso, se ejecutó un estricto control de calidad midiendo nuevamente el peso y las dimensiones de cada probeta; aquellos especímenes que presentaron ingreso de agua debido a fallas en el sello hermético fueron descartados del análisis para garantizar la fiabilidad absoluta de los resultados mecánicos.

Figura 3

Proceso de curado sumergido y rotura en prensa semiautomática Humboldt



Fuente: Archivo fotográfico

Los ensayos de compresión no confinada se llevaron a cabo utilizando una prensa semiautomática (Figura 3). Las probetas estabilizadas y curadas a 28 días, así como las probetas de control de suelo natural (sin cal y sin curado), se sometieron a la aplicación de carga axial. La automatización del equipo permitió mantener una velocidad de deformación constante y registrar los datos de carga máxima de rotura con alta precisión.

3. RESULTADOS

Para establecer una línea base del comportamiento mecánico de los materiales en estudio, se evaluó inicialmente la resistencia a la compresión no confinada q_u de los suelos A-6 y A-7 en su estado natural (sin adición de cal y sin período de curado). Como es característico en los suelos cohesivos, la energía de compactación demostró ser un factor determinante: al incrementar la energía de compactación de estándar a modificada, la q_u del suelo A-6 aumentó de 358.1 kPa a 1581.9 kPa, mientras que la del suelo A-7 ascendió de 508.1 kPa a 1369.2 kPa.

Sin embargo, los beneficios mecánicos más significativos se materializaron al introducir la estabilización química combinada con el curado a largo plazo. En la Tabla 3 se presenta la comparativa directa entre el suelo natural y las mezclas estabilizadas con sus dosificaciones óptimas de cal (3% para el A-6 y 5% para el A-7), tras un curado normado de 28 días a 23°C.

Tabla 3
Comparativa de la resistencia a la compresión simple q_u promedio

TIPO DE SUELO	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	q_u SUELO NATURAL (KPA)	q_u SUELO ESTABILIZADO A 28 DÍAS (KPA)	INCREMENTO RELATIVO (%)
A-6 (3% Cal)	Estándar	358.1	1062.6	196%
	Intermedia	1066.5	1674.3	57%
	Modificada	1581.9	1984.9	25%
A-7 (5% Cal)	Estándar	508.1	1459.8	187%
	Intermedia	1029.5	2985.6	190%
	Modificada	1369.2	3018.0	120%

Fuente: Laboratorio de suelos y materiales GAMLP.

El análisis de estos resultados evidencia la efectividad de las reacciones puzolánicas desarrolladas durante los 28 días de curado. El suelo A-7, a pesar de poseer una plasticidad inicial mucho más alta y ser más desfavorable en su estado natural, mostró una respuesta excepcional a la

estabilización, superando los 3000 kPa bajo compactación modificada. Esta ganancia de resistencia estructural se atribuye a la formación progresiva de compuestos cementantes estables (silicatos y aluminatos de calcio hidratados) que aglomeran las partículas de arcilla y rigidizan la matriz del suelo. Se corrobora el principio fundamental de que la resistencia de un suelo estabilizado es directamente proporcional a la densificación de la mezcla (reducción de la porosidad) y a la cantidad del agente cementante.

Para la aplicación del método racional, es requisito fundamental determinar las propiedades de estado de cada una de las probetas ensayadas tras su curado de 28 días. A partir de la densidad seca γ_d y la gravedad específica de los sólidos G_s , se calculó la porosidad η de cada mezcla. Asimismo, en función de la dosificación en peso, se determinó el volumen de cal V_{cal} correspondiente. En la Tabla 4 y la Tabla 5 se presenta el resumen de los parámetros volumétricos y mecánicos obtenidos para todas las probetas de los suelos A-6 y A-7, respectivamente.

Tabla 4
Propiedades de estado y cálculos suelo A-6 curado 28 días

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VO L. CA L	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL [^] 0,1
NR O.	MUESTR A	% CAL	W	γ_d	GS	N	(KPA)	CM ³	CM ³		
1	A6-1-1-E-28	1,00	16,29	1,753	2,68	33,13	538,48	191,82	1,65	0,86	33,62
2	A6-1-2-E-28	1,00	16,71	1,758	2,68	32,93	555,69	191,02	1,66	0,87	33,40
3	A6-1-3-E-28	1,00	16,64	1,750	2,68	33,25	522,20	192,10	1,66	0,86	33,74
4	A6-1-1-I-28	1,00	15,31	1,838	2,68	29,86	967,17	192,37	1,73	0,90	30,18
5	A6-1-2-I-28	1,00	15,39	1,849	2,68	29,45	979,76	191,48	1,73	0,90	29,75
6	A6-1-3-I-28	1,00	15,54	1,845	2,68	29,61	1047,32	191,73	1,73	0,90	29,92
7	A6-1-1-M-28	1,00	14,01	1,814	2,68	30,81	1285,40	200,94	1,76	0,87	31,22
8	A6-1-2-M-28	1,00	14,05	1,843	2,68	29,67	1391,30	197,43	1,76	0,89	30,02

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VO L. CA L	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL [^] 0,1
NR O.	MUESTR A	% CAL	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM3	CM 3		
9	A6-1-3-M-28	1,00	14,00	1,804	2,68	31,17	1463,93	202,08	1,76	0,87	31,61
10	A6-2-1-E-28	2,00	16,91	1,725	2,67	33,94	681,09	194,32	3,28	1,69	32,21
11	A6-2-2-E-28	2,00	16,45	1,739	2,67	33,42	830,02	194,02	3,29	1,70	31,70
12	A6-2-3-E-28	2,00	16,58	1,745	2,67	33,19	810,17	193,13	3,29	1,70	31,47
13	A6-2-1-l-28	2,00	15,44	1,832	2,67	29,83	1356,93	193,22	3,42	1,77	28,17
14	A6-2-2-l-28	2,00	15,30	1,830	2,67	29,91	1383,75	192,95	3,41	1,77	28,25
15	A6-2-3-l-28	2,00	15,23	1,817	2,67	30,43	1438,33	194,72	3,42	1,75	28,77
16	A6-2-1-M-28	2,00	13,52	1,810	2,67	30,69	1309,95	202,43	3,49	1,72	29,07
17	A6-2-2-M-28	2,00	14,06	1,758	2,67	32,67	1440,65	206,88	3,48	1,68	31,01
18	A6-2-3-M-28	2,00	14,39	1,872	2,67	28,32	1627,89	194,25	3,49	1,79	26,71
19	A6-3-1-E-28	3,00	16,63	1,738	2,67	33,43	1112,86	193,88	4,89	2,52	30,47
20	A6-3-2-E-28	3,00	16,46	1,743	2,67	33,26	967,01	193,63	4,89	2,53	30,32
21	A6-3-3-E-28	3,00	16,67	1,737	2,67	33,48	908,05	193,54	4,88	2,52	30,52
22	A6-3-1-l-28	3,00	15,99	1,827	2,67	30,03	1487,79	193,17	5,10	2,64	27,25
23	A6-3-2-l-28	3,00	15,45	1,831	2,67	29,88	1662,58	193,71	5,10	2,63	27,12
24	A6-3-3-l-28	3,00	15,24	1,838	2,67	29,60	1872,72	193,24	5,10	2,64	26,86
25	A6-3-1-M-28	3,00	13,49	1,848	2,67	29,25	1908,30	197,59	5,16	2,61	26,57

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VO L. CA L	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL [^] 0,1
NR O.	MUESTR A	% CAL	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM3	CM 3		
26	A6-3-2-M-28	3,00	13,57	1,839	2,67	29,59	1935,54	199,03	5,17	2,60	26,89
27	A6-3-3-M-28	3,00	13,35	1,838	2,67	29,61	2110,91	199,19	5,17	2,59	26,92
28	A6-4-1-E-28	4,00	16,32	1,734	2,67	33,59	1209,61	195,31	6,48	3,32	29,79
29	A6-4-2-E-28	4,00	16,65	1,761	2,67	32,57	1172,64	191,25	6,46	3,38	28,84
30	A6-4-3-E-28	4,00	16,64	1,756	2,67	32,75	1091,60	191,71	6,45	3,37	29,00
31	A6-4-1-l-28	4,00	15,51	1,773	2,67	32,11	1692,04	199,23	6,71	3,37	28,44
32	A6-4-1-l-28	4,00	15,51	1,773	2,67	32,11	1692,04	199,23	6,71	3,37	28,44
33	A6-4-3-l-28	4,00	15,27	1,820	2,67	30,28	2054,25	194,70	6,72	3,45	26,76
34	A6-4-1-M-28	4,00	13,74	1,860	2,67	28,78	2074,05	195,86	6,81	3,48	25,40
35	A6-4-2-M-28	4,00	13,52	1,820	2,67	30,29	2084,35	200,74	6,82	3,40	26,81
36	A6-4-3-M-28	4,00	13,62	1,823	2,67	30,19	2049,18	200,89	6,84	3,40	26,71
37	A6-5-1-E-28	5,00	17,07	1,691	2,66	34,98	1133,00	198,22	7,99	4,03	30,43
38	A6-5-2-E-28	5,00	17,05	1,749	2,66	32,78	1267,45	192,60	8,02	4,17	28,42
39	A6-5-3-E-28	5,00	16,63	1,751	2,66	32,68	1205,36	192,22	7,99	4,16	28,34
40	A6-5-1-l-28	5,00	15,17	1,784	2,66	31,42	1942,20	198,44	8,30	4,18	27,24
41	A6-5-2-l-28	5,00	15,25	1,842	2,66	29,18	2225,85	196,11	8,47	4,32	25,21
42	A6-5-3-l-28	5,00	15,86	1,798	2,66	30,87	2016,67	195,90	8,31	4,24	26,72

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VO L. CAL	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL ^{0,1}
NR O.	MUESTR A	% CAL	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM ³	CM ³		
43	A6-5-1-M-28	5,00	13,62	1,833	2,66	29,54	2655,90	199,55	8,46	4,24	25,57
44	A6-5-2-M-28	5,00	13,56	1,842	2,66	29,19	2735,12	198,73	8,46	4,26	25,26
45	A6-5-3-M-28	5,00	12,99	1,845	2,66	29,06	2658,20	199,12	8,45	4,24	25,15

Fuente: Laboratorio de suelos y materiales GAMLP.

Tabla 5
Propiedades de estado y cálculos suelo A-7 curado 28 días

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VOL · CAL	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL ^{0,09}
NR O.	MUESTR A	% CAL	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM ³	CM ³		
1	A7-3-1-E-28	3,00	18,63	1,746	2,70	33,87	1231,29	188,85	4,87	2,58	31,11
2	A7-3-2-E-28	3,00	18,69	1,723	2,70	34,73	1193,45	191,50	4,88	2,55	31,93
3	A7-3-3-E-28	3,00	18,36	1,717	2,70	34,98	1373,97	192,80	4,88	2,53	32,18
4	A7-3-1-I-28	3,00	16,35	1,774	2,70	32,83	1887,75	194,88	5,01	2,57	30,15
5	A7-3-2-I-28	3,00	16,60	1,732	2,70	34,39	1915,12	198,71	5,00	2,51	31,66
6	A7-3-3-I-28	3,00	16,24	1,790	2,70	32,20	2100,41	193,07	5,00	2,59	29,55
7	A7-3-1-M-28	3,00	17,16	1,866	2,70	29,33	2464,14	190,27	5,18	2,72	26,80
8	A7-3-2-M-28	3,00	17,13	1,853	2,70	29,83	2679,50	191,40	5,17	2,70	27,28

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VOL · CAL	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL ^{^0} ,09
NR O.	MUESTR A	% CA L	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM ³	CM ³		
9	A7-3-3-M-28	3,00	17,08	1,835	2,70	30,50	2551,03	193,05	5,16	2,67	27,91
10	A7-4-1-E-28	4,00	18,66	1,719	2,69	34,65	1477,38	192,25	6,45	3,35	31,08
11	A7-4-2-E-28	4,00	19,57	1,712	2,69	34,91	1382,79	191,69	6,45	3,37	31,30
12	A7-4-3-E-28	4,00	18,93	1,724	2,69	34,49	1525,27	191,92	6,47	3,37	30,92
13	A7-4-1-I-28	4,00	16,44	1,747	2,69	33,61	2138,60	197,71	6,61	3,34	30,15
14	A7-4-2-I-28	4,00	16,23	1,764	2,69	32,95	2424,82	195,93	6,60	3,37	29,54
15	A7-4-3-I-28	4,00	16,41	1,788	2,69	32,05	2327,13	193,22	6,61	3,42	28,69
16	A7-4-1-M-28	4,00	16,00	1,859	2,69	29,35	3359,59	192,43	6,82	3,54	26,19
17	A7-4-2-M-28	4,00	16,59	1,818	2,69	30,88	3320,98	195,97	6,83	3,48	27,60
18	A7-4-3-M-28	4,00	16,70	1,835	2,69	30,25	3362,68	193,44	6,81	3,52	27,01
19	A7-5-1-E-28	5,00	19,33	1,700	2,69	35,37	1484,55	193,56	7,99	4,13	31,13
20	A7-5-2-E-28	5,00	18,84	1,688	2,69	35,83	1608,85	194,53	7,94	4,08	31,56
21	A7-5-3-E-28	5,00	19,41	1,683	2,69	36,03	1287,01	196,49	8,04	4,09	31,74
22	A7-5-1-I-28	5,00	16,41	1,772	2,69	32,65	2503,44	194,53	8,16	4,20	28,70
23	A7-5-2-I-28	5,00	16,33	1,769	2,69	32,75	2338,95	194,78	8,16	4,19	28,79
24	A7-5-3-I-28	5,00	16,53	1,743	2,69	33,75	2234,03	198,12	8,19	4,13	29,70

			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VOL · CAL	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL ^{^0} ,09
NR O.	MUESTR A	% CA L	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM ³	CM ³		
25	A7-5-1-M-28	5,0 0	17,31	1,820	2,69	30,83	2881,41	194, 51	8,45	4,34	27,02
26	A7-5-2-M-28	5,0 0	17,20	1,823	2,69	30,71	2994,10	193, 85	8,43	4,35	26,91
27	A7-5-3-M-28	5,0 0	16,65	1,827	2,69	30,55	3178,46	194, 43	8,43	4,34	26,77
28	A7-6-1-E-28	6,0 0	18,55	1,719	2,69	34,66	1635,95	192, 45	9,49	4,93	30,02
29	A7-6-2-E-28	6,0 0	18,96	1,709	2,69	35,02	1688,44	193, 07	9,50	4,92	30,35
30	A7-6-3-E-28	6,0 0	18,35	1,715	2,69	34,82	1582,59	193, 50	9,50	4,91	30,17
31	A7-6-1-I-28	6,0 0	15,77	1,751	2,69	33,46	2496,13	198, 37	9,72	4,90	29,00
32	A7-6-2-I-28	6,0 0	16,21	1,744	2,69	33,72	2518,68	197, 86	9,70	4,90	29,23
33	A7-6-3-I-28	6,0 0	16,26	1,749	2,69	33,52	2498,08	197, 66	9,72	4,92	29,04
34	A7-6-1-M-28	6,0 0	16,85	1,804	2,69	31,42	3290,21	197, 08	10,0 5	5,10	27,13
35	A7-6-2-M-28	6,0 0	16,60	1,840	2,69	30,07	3309,22	193, 69	10,0 5	5,19	25,93
36	A7-6-3-M-28	6,0 0	16,71	1,812	2,69	31,13	3440,21	196, 05	10,0 3	5,12	26,87
37	A7-7-1-E-28	7,0 0	18,51	1,717	2,68	34,49	1584,63	192, 64	10,9 6	5,69	29,50
38	A7-7-2-E-28	7,0 0	18,15	1,727	2,68	34,09	1692,55	192, 06	10,9 6	5,71	29,15
39	A7-7-3-E-28	7,0 0	18,47	1,673	2,68	36,16	1684,68	198, 31	10,9 9	5,54	31,00
40	A7-7-1-I-28	7,0 0	16,15	1,773	2,68	32,37	2809,59	194, 60	11,2 0	5,76	27,65

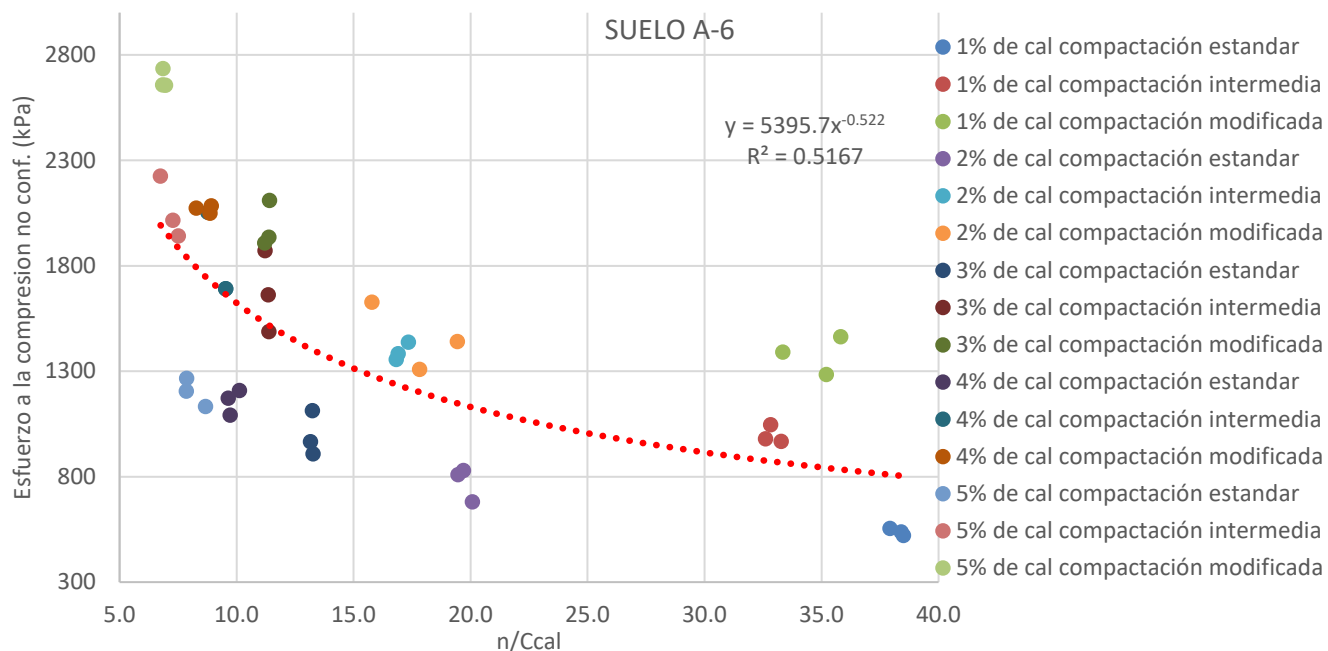
			HUMED AD (%)	DENSID AD SECA (G/CM ³)	GRAVED AD ESP. (-)	POROSID AD (%)	ESFUER ZO A LA COMP. SIMPLE	VOL. TOT AL	VOL · CAL	CCAL=VCAL /VT	N/CCAL ^{0,09}
NR O.	MUESTR A	% CAL	W	ρ_d	GS	N	(KPA)	CM ³	CM ³		
41	A7-7-2-I- 28	7,0 0	16,77	1,754	2,68	33,10	2228,16	196, 23	11,2 3	5,72	28,29
42	A7-7-3-I- 28	7,0 0	16,38	1,796	2,68	31,47	2371,43	191, 83	11,2 1	5,84	26,85
43	A7-7-1- M-28	7,0 0	16,96	1,782	2,68	32,02	2894,98	198, 99	11,5 9	5,83	27,32
44	A7-7-2- M-28	7,0 0	17,16	1,787	2,68	31,80	3049,54	198, 12	11,6 0	5,85	27,13
45	A7-7-3- M-28	7,0 0	17,16	1,774	2,68	32,30	2842,92	199, 67	11,6 1	5,81	27,57

Fuente: Laboratorio de suelos y materiales GAMLP.

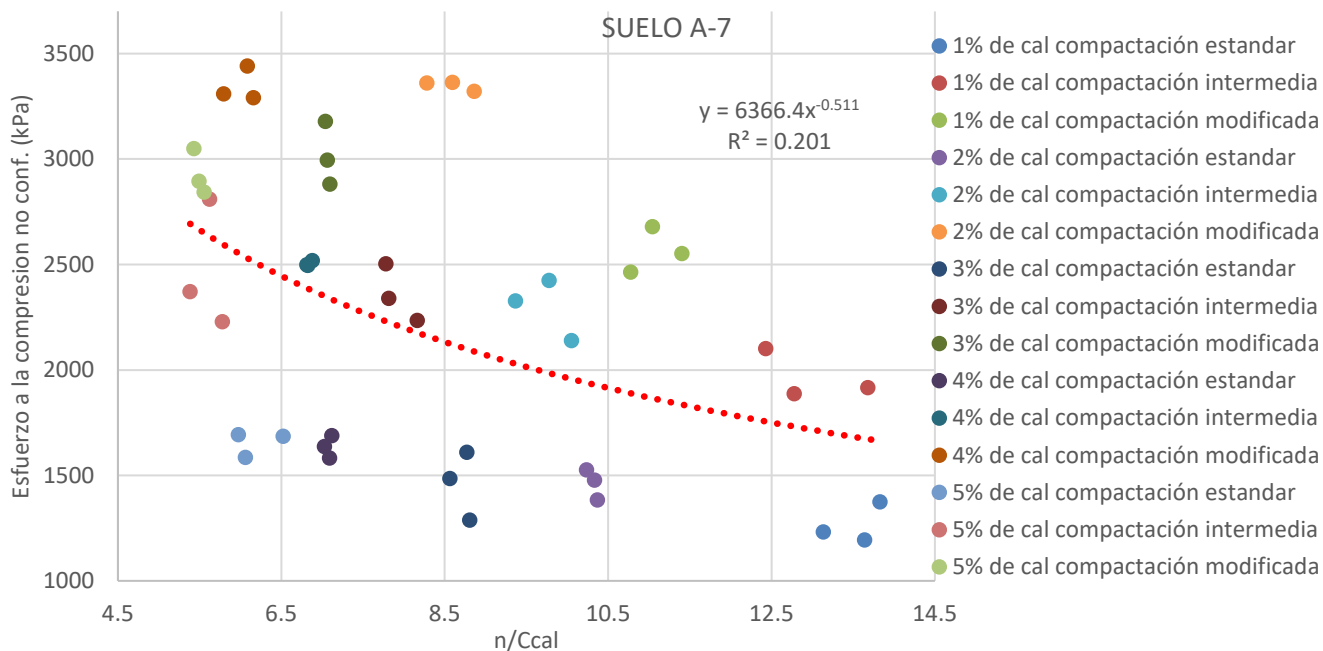
Al graficar inicialmente la q_u en función de la relación directa η/C_{cal} (sin aplicar ningún exponente de ajuste), se observó una dispersión considerable en los datos para ambos suelos. Los coeficientes de determinación R^2 obtenidos mediante regresión potencial fueron bajos (0.49 para el suelo A-6 y 0.21 para el suelo A-7), lo que indica que la relación lineal entre estas dos variables volumétricas no es suficiente para predecir con exactitud el comportamiento mecánico de estas arcillas. En la Figura 4 se presentan los gráficos de dispersión obtenidos para ambos suelos.

Para aplicar la metodología racional propuesta por Consoli et al. (2007), se procedió a vincular la resistencia a la compresión no confinada q_u con los parámetros volumétricos de las probetas curadas a 28 días. En este enfoque, la variable independiente principal es el cociente entre la porosidad de la mezcla compactada η y el contenido volumétrico de cal C_{cal} .

Figura 4
Variación inicial de q_u con η/C_{cal} para ambos suelos (dispersión sin ajuste)



Fuente: Elaboración propia.

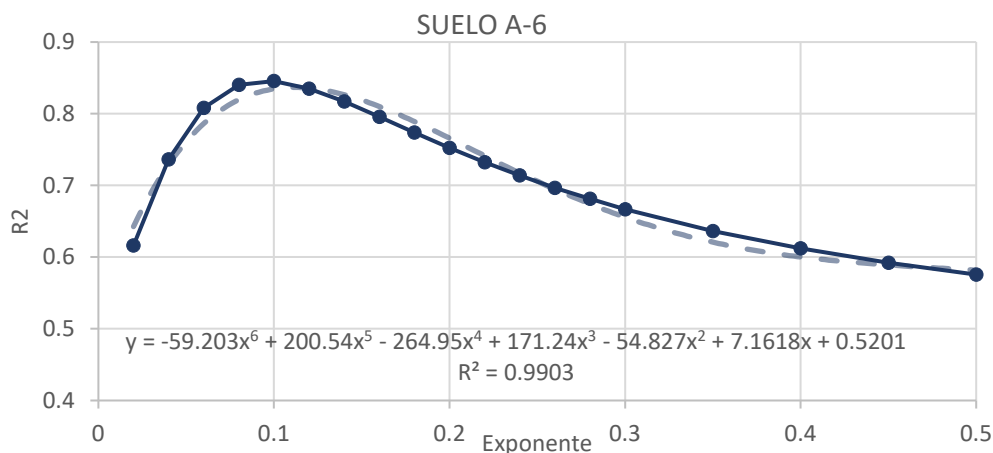


Fuente: Elaboración propia.

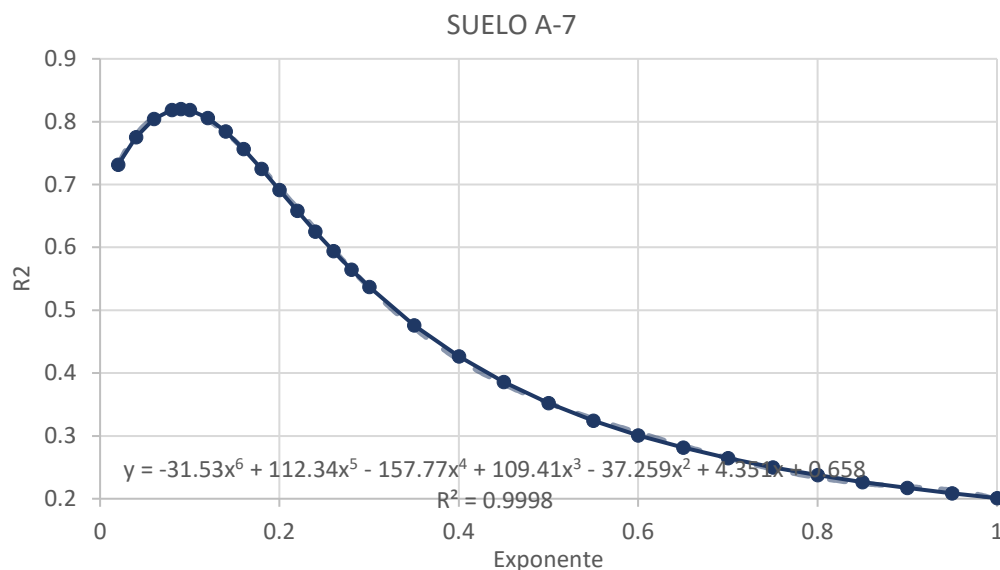
Para optimizar esta correlación y encontrar una "curva maestra" de dosificación, se introdujo un exponente empírico x aplicado exclusivamente al contenido volumétrico de cal, modificando el parámetro de control a $\eta/(C_{cal})^x$. Se desarrolló un proceso de iteración matemática variando el exponente x desde 0.01 hasta 1.0, con el objetivo de maximizar el valor del coeficiente R^2 para cada tipo de suelo. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.

Figura 5

Iteraciones para maximizar el coeficiente de determinación en suelos A-6 y A-7



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

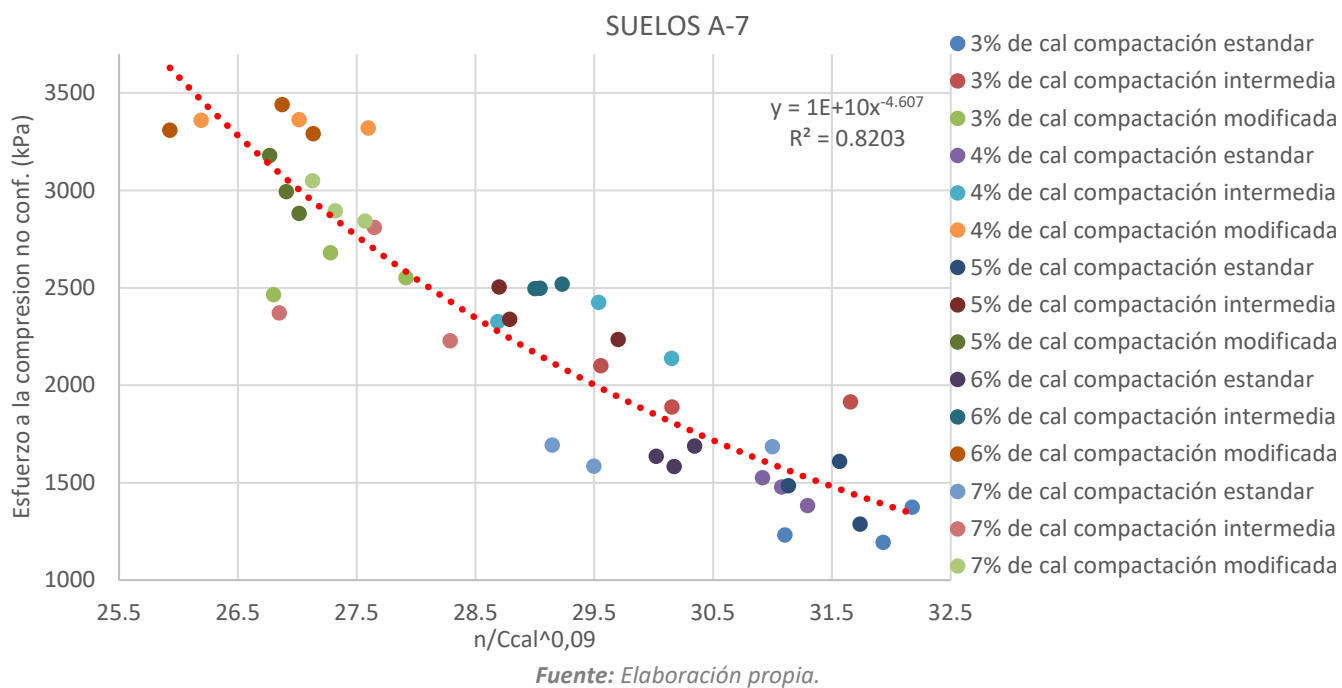
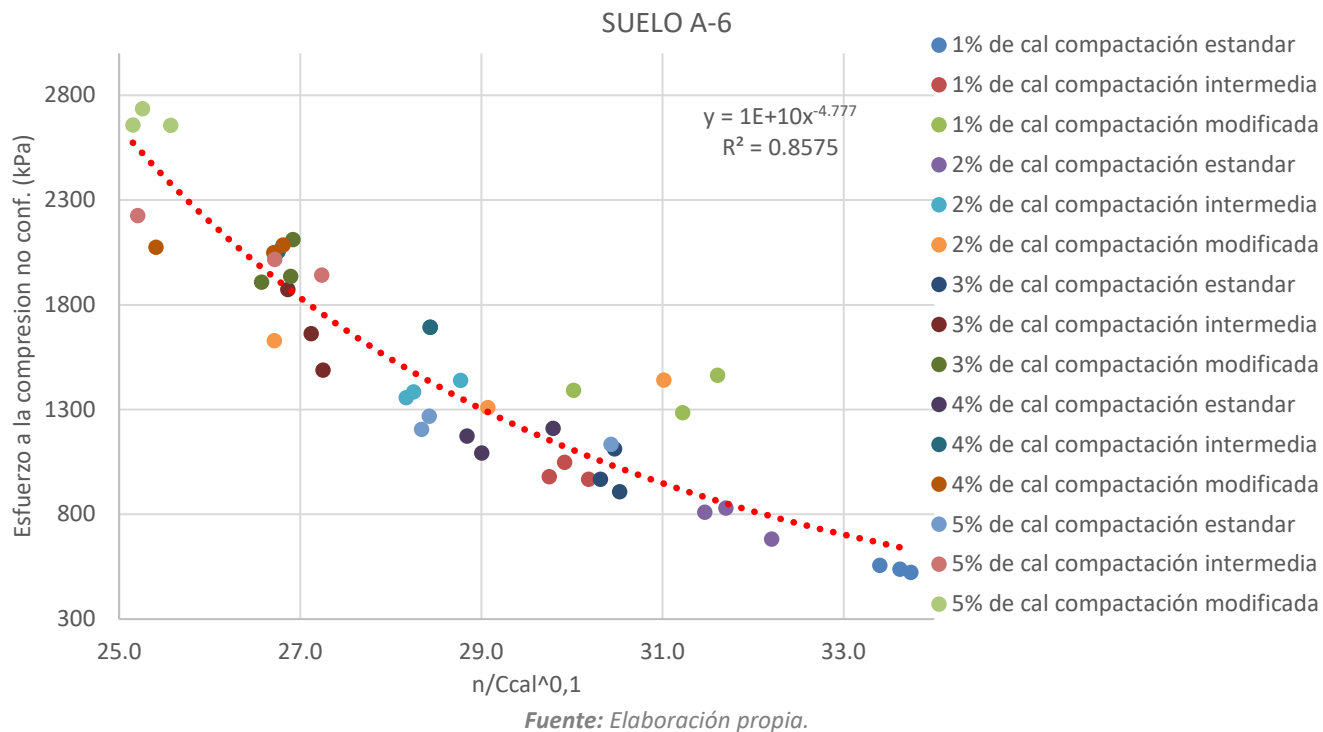
La iteración demostró que la correlación entre las variables mejora significativamente al aplicar exponentes específicos para cada material:

- Para el suelo A-6: El exponente que maximiza la correlación es $x = 0.10$, elevando el coeficiente de determinación a un $R^2 = 0.845$.
- Para el suelo A-7: El exponente óptimo es $x = 0.09$, logrando un ajuste con un $R^2 = 0.827$.

La aplicación de estos exponentes permitió unificar los datos de todas las dosificaciones de cal y las diferentes energías de compactación en una única curva de tendencia potencial para cada material, mismas que se presentan en la Figura 6.

Figura 6

Curvas predictivas maestras de variación del q_u con $\eta/(C_{cal})^x$ para los suelos A-6 y A-7.



Las ecuaciones predictivas resultantes para estimar la resistencia a la compresión a los 28 días son:

Ecuación para el Suelo A-6:

$$q_u = 1 * 10^{10} \left[\frac{\eta}{(C_{cal})^{0.10}} \right]^{-4.777}$$

Ecuación para el Suelo A-7:

$$q_u = 1 * 10^{10} \left[\frac{\eta}{(C_{cal})^{0.09}} \right]^{-4.607}$$

Estos resultados confirman que el método racional es plenamente aplicable a las arcillas tropicales bolivianas analizadas. La alta convergencia de los datos hacia una “curva maestra” demuestra que, conociendo el exponente característico del suelo x , es posible predecir la resistencia final de la mezcla manipulando únicamente el peso específico seco en obra (que define la porosidad) y la cantidad de cal a incorporar.

Esto otorga a la ingeniería vial una herramienta de diseño racional, permitiendo optimizar costos al equilibrar un mayor esfuerzo de compactación mecánico con una menor dosificación del agente químico para alcanzar una resistencia objetivo.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El método racional propuesto inicialmente por Consoli et al. (2007), conceptualizado en sus inicios para suelos granulares estabilizados con cemento, devela de forma empírica que la resistencia de una mezcla será mayor en la medida en que esta sea más compacta (menor porosidad) y se le agregue una mayor proporción de agente estabilizante. El presente estudio demuestra que este principio rector es plenamente aplicable a suelos finos con alta plasticidad (A-6 y A-7) estabilizados con cal, típicos de las regiones tropicales de Bolivia.

Los resultados probaron que la adición de cal hidratada, combinada con un curado estándar de 28 días a 23°C, es una técnica altamente eficaz. Se registraron incrementos notables en la q_u , superando los 3000 kPa en el suelo A-7 bajo energía modificada, lo que transforma un material natural deficiente en una capa estructuralmente útil para pavimentos.

Al analizar la relación inicial simple η/C_{cal} , se observó una alta dispersión de resultados, con coeficientes R^2 bajos. Esta dispersión es atribuible a la naturaleza altamente plástica de las arcillas,

las cuales requieren un ajuste matemático que pondere adecuadamente el impacto del agente cementante en la matriz del suelo. Mediante un proceso iterativo de optimización, se introdujo el exponente empírico x , demostrando que existe un valor que optimiza el ajuste: $x = 0.10$ para el suelo A-6 y $x = 0.09$ para el suelo A-7. Este ajuste logró elevar el coeficiente de determinación a valores superiores a 0.82, indicando una correlación alta y robusta. Al aplicar estos exponentes, los datos de todas las probetas convergieron en una única curva de tendencia, validando estadísticamente la metodología.

La gran ventaja que ofrece esta validación es su capacidad predictiva. A partir de una resistencia objetivo impuesta por el diseño de pavimento, el proyectista puede utilizar las ecuaciones desarrolladas para calcular el parámetro de control. Considerando una densidad de campo objetivo, se establece la porosidad y se determina matemáticamente el contenido de cal requerido para la construcción. Esto elimina el costoso proceso empírico de ensayo y error, consolidando al método racional como una herramienta altamente eficiente para optimizar técnica y económicamente la infraestructura vial en el Beni.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Laboratorio de suelos y materiales del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, por permitir utilizar sus instalaciones para la ejecución de los diferentes ensayos que permitieron la elaboración del presente trabajo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (ASTM D1557).*

ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM D2166).*

ASTM International. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D854).*

ASTM International. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D4318).*

Consoli, N. C., Bittar Marin, E. J., Quiñónez Samaniego, R. A., Scheuermann Filho, H. C., & Cordeiro Cristelo, N. M. (2020). *Field and laboratory behaviour of fine-grained soil stabilized with lime. Canadian Geotechnical Journal, 57(6).*

Consoli, N. C., da Silva Lopes, L., & Salvagni Heineck, K. (2009). *Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. Journal of Materials in Civil Engineering, 21(5), 210-216.*

Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., & Heineck, K. S. (2007). *Key parameters for strength control of artificially cemented soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(2), 197-205.*

Salgueiro, R.F. & Portillo, G. (2021). *Aplicación de un método racional en la dosificación de mezclas suelo-cemento empleando suelos dispersivos bolivianos. Investigación y Desarrollo. Revista del Instituto de Ensayo de Materiales – UMSA, 15(1), 74-82.*