

ESTABILIZACIÓN GEOPOLIMÉRICA DE SUBRASANTE LOÉSSICA (CÓRDOBA, ARGENTINA)

Geopolymer stabilization of loessic subgrade (Córdoba, Argentina)

María Pía Cruz^a, Italo Federico Martin-Schmädke^a, Francisco Locati^{a,b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba, Argentina.

^b Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET-UNC), Argentina.

RESUMEN – La estabilización de caminos de tierra ha adquirido importancia. Son relativamente nuevos los estudios con metodologías físico-químicas no convencionales en suelos problemáticos, incorporando geopolímeros en el proceso de compactación. En este trabajo, se presenta una síntesis de la línea investigativa en geotecnia vial de la Universidad Católica de Córdoba, Argentina. Se aborda la estabilización de suelos limo-loésicos (A-4) mezclados con metasilicato de sodio en estado sólido e hidróxido de calcio, conformando así un geopolímero. Se caracterizan suelos erodables y colapsables regionales, se establece la dosificación óptima con el geopolímero, y su respuesta en tramo piloto de camino, monitoreando el comportamiento geotécnico-vial de la macro y microestructura de una subrasante solicitada a inclemencias climáticas y tránsito. Se comprueba la efectiva estabilización diseñada y se compara con otros paquetes estructurales viales de igual número estructural equivalente, evaluando las ventajas de su utilización.

ABSTRACT – The development of dirt-road stabilization has acquired significance. Studies using unconventional physical-chemical methodologies in problematic soils, incorporating geopolymers in the compaction process, are relatively new. In this study, a summary of the research line in road geotechnics at the Universidad Católica de Córdoba, Argentina, is presented. The stabilization of silty-loessic soils (A-4) mixed with solid sodium metasilicate and calcium hydroxide, thus forming a geopolymer, is addressed. Regional erodible and collapsible soils are characterized, the optimal geopolymer dosage is established, and its response is monitored on a pilot road section. The geotechnical behavior of the macro- and microstructure of a subgrade subjected to inclement weather and traffic is monitored. The effective stabilization design is verified and compared with other road structural packages of the same equivalent structural number, evaluating the advantages of its use.

Palavras Chave – geopolímero, limo-loésico, silicato de sodio.

Keywords – geopolymer, loessic silt, sodium silicate.

1 – INTRODUÇÃO

El grupo de investigación de geotecnia de la Universidad Católica de Córdoba (U.C.C.), viene trabajando con la estabilización vial de suelos erodables y colapsables de la región pampeana cordobesa (Argentina) a través de incorporar nuevos aditivos no convencionales. Dichas subrasantes problemáticas sin pavimentar del centro-este provincial, corresponden a sedimentos finos del tipo A-4 o A-6 según la American Association of State Highway and Transportation Officials

E-mails: 9606773@ucc.edu.ar (M. Cruz), italo.martin@ucc.edu.ar (I. Martin), flocati@unc.edu.ar (F. Locati)

ORCID: orcid.org/0000-0001-8522-174X (M. Cruz), orcid.org/0000-0003-4371-2959 (I. Martin),
orcid.org/0000-0001-9067-1497 (F. Locati)

(A.A.S.H.T.O.). Manifiestan un variado comportamiento tenso-deformacional ante aumentos del contenido de humedad natural, grado de saturación, tensión de corte, tensión normal media y presión de poros (Zur y Wiseman, 1973). En la Figura 1 se pueden apreciar diversas patologías viales relevadas durante el diagnóstico inicial de la traza en estudio dentro del establecimiento “La Toma”; ubicado próximo a la localidad de Pedro Vivas sobre ruta nacional N°19 en el departamento Río Primero (Córdoba), ver Figura 2.



Fig. 1 – Patologías de subrasantes no pavimentadas limo-loésicas: a) suelo friable al tacto; b) falta de bombeo transversal; c) ahuellamiento excesivo; d) carcavamientos localizados; e) polvo en suspensión; y f) zonas inundables.

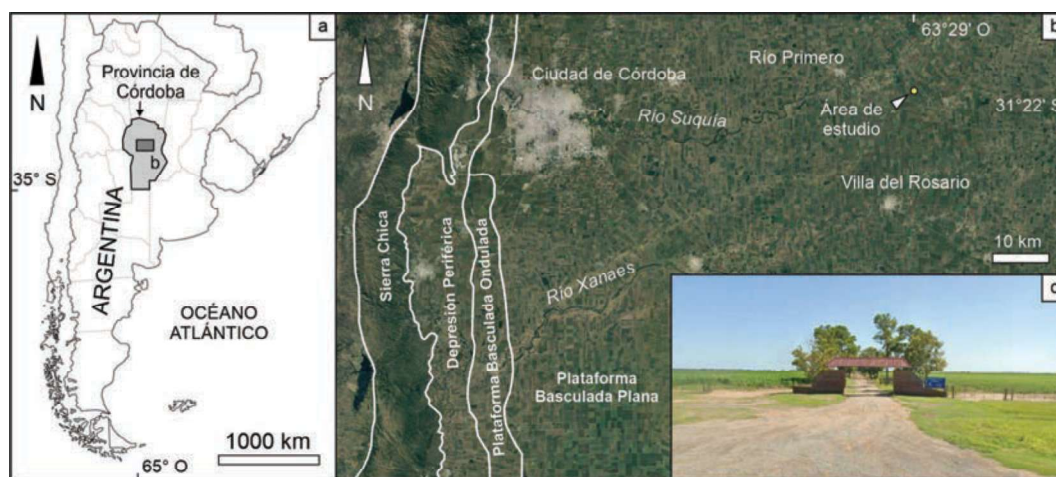
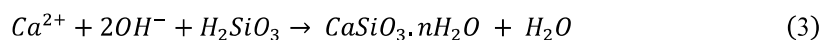
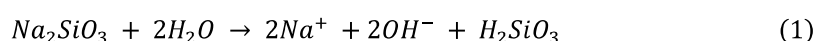


Fig. 2 – Localización del sector de estudio en: a) Argentina, b) en provincia de Córdoba. c) Ingreso al campo “La Toma” de la U.C.C.

Al manifestarse las patologías citadas se producen cíclicas pérdidas económicas en esta zona agro-ganadera. Existe una dificultad para extraer de los campos la producción de cultivos y el ganado

tanto en épocas de lluvia cuando los caminos se inundan y permanecen anegados, como en épocas con bajas precipitaciones pluviales, cuando los caminos muy deteriorados por la acumulación de sectores erodados pierden su capacidad soporte y aminoran el módulo resiliente final, Rahman et al. (2023). En las estaciones secas, los caminos presentan gran cantidad de polvo en suspensión, que produce afecciones respiratorias, acumulación de polvo en cultivos con baja de la actividad de fotosíntesis y constituye un grave factor que impacta en la accidentología vial (en general). Según mediciones de este grupo, los suelos limo-loésicos cordobeses sufren una modificación de sus parámetros naturales reflejados en reducción de la densidad seca (pasa de 1,35 tn/m³ a <1,2 tn/m³), agotamiento de la resistencia al corte no drenado (pasa de 24,52 KPa a <9,81 KPa), aumento de la deformación vertical por colapso por arriba de un 3% e incremento de erosión por arriba de 10 tn/ha.año (entre leve y superior según Gaitán et al. (2017)). Estos valores son compatibles con trabajos internacionales sobre caminos de suelos loésicos sin pavimentar según referencian Li et al. (2016), Xie et al. (2018), Ramos-Scharrón (2018) y Wang et al. (2025). Una reducción de un 11% de la densidad seca es coherente con pérdida de bombeo, estructura y erosión superficial (Moloisane y Visser, 2014). La caída de un 60% de la resistencia al corte no drenado es elevada, pero no extrema como otras de hasta un 90% (Liu et al., 2024). Las deformaciones por colapso varían entre un 2% a 8% (Jiang et al., 2017). La erosión calculada sobrepasa registros sudamericanos que oscilan entre 0 y 9,25 tn/ha.año (Riquetti et al., 2022).

Desde hace diez años este grupo ha abordado la estabilización de suelos finos limo-loésicos (A-4 o A-6) con la incorporación puntual del agente químico conocido como silicato de sodio; empleándose en una primera etapa el silicato de sodio en fase líquida (Cruz et al., 2015) y por último en fase sólida (Simón y Pagés, 2017). En varias regiones de la provincia de Córdoba, la presencia de calcio natural intercambiable es fluctuante por lo que, dependiendo de la región, se adiciona junto con el silicato de sodio sólido una fracción de hidróxido de calcio (cal hidratada). Se forma un geopolímero que involucra a los silicatos (ricos en sílice), la cal hidratada y suelos finos inestables tenso-deformacionales, que al mezclarse forman ácido silícico que aglomera a las partículas limo-loésicas sueltas. El alto potencial alcalino (pH) de los aditivos facilita las reacciones alcalinas que transforman partículas dispersas en cementadas. Al hidratarse, el silicato de sodio forma ácido silícico (1) que reacciona con el calcio proveniente de la cal hidratada (2), para formar un gel de silicato cálcico hidratado (3), generalmente denominado C-S-H por sus siglas en inglés. Es un gel insoluble microcristalino cementante que actúa como adhesivo de las partículas del suelo, va ocupando los poros y envolviendo las partículas limosas, generando una estructura más firme y cohesiva, con menores deformaciones y reducción de erodabilidad en el tiempo (ver Figura 3).



donde *n*, representa cantidades variables de agua.

Los estudios de nuevos aditivos químicos no convencionales se enfocan en activación alcalina de cenizas volantes, puzolanas o escorias de alto horno, que mejoran la capacidad portante y durabilidad de suelos blandos y expansivos. Tienen menor huella de carbono en su fabricación que la estabilización con cemento Portland, ya que son preparados con menor consumo energético y emplean desechos de otras industrias (Cruz et al., 2023). Se crean geles estables de sílice-alúmina o de silicato-calcio para aglutinar las partículas del suelo. Tienen limitación de depender de residuos industriales con alta variabilidad química y de producción (según ciclos económicos). La mejora de la resistencia al corte no drenado del suelo tratado oscila entre 150% y 400% (Abdila et al., 2022;

Wu et al., 2022); el incremento de CBR entre 100% y 350% (Disu y Kolay, 2021); la reducción por colapso varía entre un 40% y 80% (Raj et al., 2025); la pérdida de masa en ciclos de durabilidad entre un 5% y 12% (Abdila et al., 2022; Wu et al., 2022).



Fig. 3 – a y b) Lente de suelo estabilizado extraído de tramo piloto; c) Fotomicrografía tomada bajo microscopio petrográfico de una muestra estabilizada en campo (sección delgada), donde se puede ver un nódulo de bordes redondeados cementado por el silicato de sodio (nicoles paralelos).

El estudio de la evolución investigativa de estabilización de subrasantes limo-loésicas demandó la necesidad de identificar aspectos geotécnicos del suelo natural erodable y colapsable, determinar la mezcla óptima limo-cal-silicato (descrita en sección 3.4), estudiar la variación de resistencia de la mezcla adoptada con el paso del tiempo ante condiciones extremas en laboratorio (alternancia de periodos acelerados de secado y humedecimiento) y finalmente ratificar dicha resistencia (entre otros parámetros) en un testeo in situ con la materialización de un paquete estructural vial con la dosificación óptima, incorporando solicitaciones reales en la subrasante estabilizada, principalmente tránsito de vehículos pesados rurales con condiciones climáticas propias de climas secos y húmedos. Se complementó la valoración de dicha subrasante estabilizada con la materialización de otros dos tramos seriados testigos contiguos (ver sección 4.1). Se establecieron analogías de durabilidad en términos de pérdida de masa, cambio volumen, módulo de elasticidad inicial, densidad seca y resistencia al corte no drenado entre probetas remoldeadas en el laboratorio con la dosificación óptima, respecto a probetas remoldeadas del suelo problemático compactado. Sin embargo, no se considera factible hacer una correlación directa entre los resultados de resistencia al corte no drenado de los ensayos de durabilidad del laboratorio en sus distintos ciclos, con los valores de resistencia al corte no drenado de las probetas extraídas a distintas edades de la subrasante estabilizada afectadas por el tránsito y los factores climáticos.

2 – RESEÑA DE LA HISTORIA DEL ARTE

El agente químico primario de esta estabilización de suelos es el silicato de sodio; históricamente utilizado como adhesivo, cementante, detergente, defloculante, película protectora, inhibidor, base catalítica, blanqueador, entre otras aplicaciones. Johann Van Fuchs comercializó el silicato soluble a principios del siglo XIX para favorecer el endurecimiento de piedras artificiales. Alrededor de 1910 el silicato de sodio, el silicato de calcio o silicato de aluminio se emplearon para bacheos de caminos de tierra. En 1915, Albert Francois implementó el mejoramiento de suelos por medio de inyecciones de lechada cementicia con la adición de silicato de sodio para mejorar la durabilidad del estabilizado. Hugo Joosten, inyectó silicato de sodio y cloruro de calcio en perforaciones profundas promoviendo la combinación química y formación de un gel insoluble, garantizando cubrir oquedades, bajar la permeabilidad de infiltración y disminuir los asentamientos. Mainfort en 1951 estudió la vulnerabilidad de las mezclas de silicato de sodio frente a la variación del contenido de humedad. Iniciales ensayos de durabilidad en probetas de suelos arenosos

mezclados con 1% de silicato de sodio fueron ejecutados por Dogra y Uppal en 1958. Posteriormente las probetas eran sometidas a 12 ciclos de 5 horas de inmersión en agua y 42 horas de secado a 70 °C; resultando dichos ensayos en un 3,5% a 4,0% de pérdida de peso al final del último ciclo. En el M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) a fines de los '50 se estandarizó el ensayo de durabilidad en probetas de arcillas estabilizadas con silicatos junto a otros aditivos. Lambe, Michaels y Moh aplicaron sales de sodio e hidróxido de sodio (soda cáustica) en los suelos para estabilizarlos, y se comenzó a utilizar el silicato de sodio como un agregado secundario al cemento, cal y cenizas (entre otros). Ruff, Davidson y Ellis estabilizaron suelos arcillosos con silicato de sodio más cal y con cenizas; analizando la incidencia del pH durante los ensayos de durabilidad. Investigadores rusos contemporáneos trabajaron en la estabilización de suelos limosos con silicatos de sodio. Hurley y Thornburn (1971) proponen que el silicato de sodio con casi cualquier otro material inorgánico causa la formación de un gel de sílice, pero las propiedades del gel, como la resistencia, la durabilidad y la permeabilidad, pueden variar mucho dependiendo de la concentración de la solución de óxido de sodio y dióxido de silicio en la composición del silicato, la temperatura y el tipo de sales, ácidos y bases con los que reacciona. Moretto (2006) estudió la estabilización de suelos loésicos colapsables mediante inyecciones de silicato de sodio en zonas rurales cordobesas. Rico y del Castillo (2011) publicaron resultados de ensayos de compresión simple mezclando limo con silicatos de sodio más cal. En Colombia, Galindo Torres y Avellaneda Moreno (2016) estudiaron mejoras de la capacidad portante de los suelos limo-arenosos y materiales pétreos estabilizados con silicato de sodio a la humedad de compactación. Jalal et al. (2020) explican que los materiales estabilizadores a base de calcio exhiben propiedades puzolánicas que mejoran las propiedades de los suelos finos mediante hidratación, intercambio catiónico, floculación, reacción puzolánica y carbonatación. En Perú, Bonifaz Moreno y Gamarra Sosa (2022) estudiaron la comparación del silicato de sodio con cemento para la estabilización de una subrasante. Yang et al. (2024, 2025) presentan aspectos fundamentales de la solidificación, propiedades mecánicas y mecanismo de falla del loess cuando se le adiciona silicato de sodio y polvo descartado de carbón. Kamiloğlu et al. (2024) y Chen et al. (2024) trabajan con geopolímeros basados en cenizas volantes con hidróxido de sodio (NaOH) y/o silicato de sodio (Na_2SiO_3) como activadores alcalinos para estabilizar suelos limosos.

3 – MATERIALES

En esta sección se presentan las principales características de los materiales utilizados en forma individual y combinada de esta investigación según los ámbitos de laboratorio y campo.

3.1 – Suelo problemático

Los suelos por estabilizar son limos inorgánicos problemáticos (A-4) según A.A.S.H.T.O, con un 16,5% de fracción gruesa muy uniforme (arena fina puntualmente). Responde a una potencia de estudio del orden de 0,6 m de profundidad desde el nivel de terreno natural en el campo “La Toma”, próximo a la localidad Pedro Vivas, a 54 km al este de la ciudad de Córdoba, Argentina.

Se emplazan en la llanura pampeana dentro de la provincia geológica llamada llanura chaco-pampeana (Sayago, 1981), siendo parte de la denominada plataforma plana basculada (Sanabria et al., 2004). La intensidad de la pendiente general hacia el este es menor a 0,5% y desde el punto de vista climático el sector se encuentra en la zona de transición entre un clima templado pampeano a un clima árido típico de llanuras y sierras (Argüello et al., 2010). Los suelos del sector corresponden a la serie de Villa del Rosario, se clasifican como haplustol éntico, y se originan a partir de sedimentos loésicos de textura franco limosa, vinculados a lomas extendidas casi planas (INTA y MAGyRR, 1992). Los depósitos de loess que dieron origen a estos suelos se habrían depositado principalmente entre el Pleistoceno superior-Holoceno, involucrando depósitos de origen eólico, así como de loess re-transportado y re-depositados por procesos coluviales o fluviales (Argüello et al., 2010).

Las principales problemáticas geotécnicas son la colapsabilidad y erodabilidad. Son limos loéssicos metaestables cuya estructura interna puede rápidamente ser afectada por cambios en el contenido de humedad o tensionales. Se producen variaciones de volumen de gran magnitud que impactan en las estructuras incapaces de resistir distorsiones y asentamientos diferenciales significativos (Rocca et al., 2006).

Se planificaron dos etapas de prospección in situ: anteproyecto (caracterización del suelo natural existente para definir dosificaciones del geopolímero) y proyecto (control de durabilidad post-constructivo de los tramos). Se ejecutaron tres sondeos espaciados 5 m entre sí de acuerdo con el reglamento argentino de estudios de suelos Cirsoc 401 (2018), para caracterizar geotécnicamente a nivel de anteproyecto este tipo de obras lineales. En la Tabla 1 se detallan los principales parámetros resultantes de los ensayos físicos-químicos del suelo natural sin estabilizar y de la dosificación óptima estabilizada.

Tabla 1 – Parámetros geotécnicos del suelo natural y de la dosificación óptima.

Nombre del ensayo	Parámetros (unidad)	Suelo natural	Dosificación óptima (en volumen) 25L ¹ :1C ² :1S ³ (en masa) 1L ¹ :4C ² :4S ³
Identificación	A.A.S.H.T.O.	A-4	A-4
ASTM D 3282 (2015)	S.U.C.S.	ML	ML
Lavado tamiz 200 ASTM C 136 (2001)	ω_{T200} (%)	83,5	-
Análisis granulométrico ASTM D 422 (2007)	Grava y arena (%)	16,5	-
	Limo (%)	76,5	-
	Arcilla (%)	7,0	-
	D ₁₀ (mm)	0,001	-
Límites de Atterberg ASTM D 4318 (2017)	ω_{LL} (%)	23,2	35,9
	ω_{LP} (%)	22,7	33,3
	Índice de plasticidad (%)	0,70	2,5
Sales solubles totales ASTM D 1889 (2000)	Sales solubles (%)	<0,1	1
Pin Hole ASTM D 4647 (2020)	Dispersivo/Erodable	Moderado	No manifiesta
Carbonato de calcio ASTM C 25 (2011)	CaCO ₃ (%)	1,90	-
pH, ASTM D1067 (2016)	-	7,91	10,39
Compresión confinada ASTM D 2435 (2011)	Salto por colapso, ε_0 (%)	3,30	0,85
	Pf _{sat} (MPa)	0,022	0,085
	Porosidad final, n (%)	110	93
Proctor estándar ASTM D 698 (2012)	$\omega_{\text{óptima}}$ (%)	15,1	19,0
	$\gamma_{\text{ssmáx}}$ (gr/cm ³)	1,60	1,62
California Bearing Ratio ASTM D 1883 (2014)	CBR _{2,5mm} (%)	2,5	24,7
	Hinchamiento (%)	-0,44	+0,10
Durabilidad 9° ciclo de humedecimiento/secado adaptado USACE y NLA, ver sección 3.4	Pérdida de masa (%)	32,8	3,6
	Su _{rotura} (MPa)	0,11	0,55
	E _{inicial} (MPa)	19,4	24,7

¹: Suelo natural campo La Toma sobre ruta RN19, Pedro E. Vivas, Córdoba, Argentina.

²: Cal hidratada de origen argentino; ³: Silicato de sodio sólido de origen chino.

-: Contracción; +: Expansión.

La profundidad de investigación de estas tres prospecciones está delimitada según la potencia de cada tramo estabilizado en estudio; alcanzando un criterio común de dos veces la potencia del paquete estructural vial a estabilizar.

En la Tabla 2 se muestran las principales tareas de campo y ensayos de laboratorio de esta etapa de caracterización.

Tabla 2 – Resumen de tareas de campo y laboratorio en la etapa de anteproyecto.

Ámbito	Tipo de prospección	ID	Profundidad	Cantidad	Tipo muestras
Campo	Pala barreno	S-1	1,2 m	3	Alteradas
	Pala ancha	S-2	0,6 m	2	Inalteradas
	Pala barreno	S-3	0,6 m	2	Alteradas
	Relevamiento visual de la calidad de la calzada según el método de Comisión de Caminos Rurales (2018)				
Ámbito	Ensayo			Cantidad	
Laboratorio	Humedad. ASTM D 2216			7	
	Granulometría y Lavado T200. ASTM D 422 y ASTM C 136			7	
	Límites de Atterberg. ASTM D 4318			4	
	Proctor T99. ASTM D 698			4	
	CBR. ASTM D 1883			4	
	Durabilidad. USACE y NLA, ver sección 3.4			18	
	Pin hole. ASTM D 4647			3	
	Sales totales. ASTM D 1889			3	
	Compresión confinada. ASTM D 2435			1	
	Ensayos químicos. ASTM C 25 y ASTM D 1067			3	

En la Tabla 3 se muestran las principales fases identificadas por difracción de rayos X (DRX) y los resultados de la cuantificación de fases por el método Rietveld para el suelo natural.

Tabla 3 – Cuantificación de fases identificadas en suelo natural por DRX y refinamiento Rietveld.

Fases identificadas (fracción total)	Porcentaje (%)
Plagioclasa	32,8
Muscovita	25,1
Piroxeno	16,6
Cuarzo	11,5
Feldespatos potásico	9,0
Calcita	2,6
Caolinita	2,4
<i>Fases identificadas (fracción < 2 µm)</i>	
illita (+/- caolinita, esmectita) + cuarzo + plagioclasa	
<i>Parámetro de ajuste</i>	
Rexp: 1,54; Rp: 1,95; Rwp: 2,65; χ^2 : 2,96	

Se informan los parámetros de ajuste obtenidos luego del refinamiento. En la Figura 4a se observa patrón de difracción de la muestra, curva de ajuste por método Rietveld, y diferencia entre patrón medido y calculado. Como fases principales se reconoce plagioclasa, muscovita, piroxeno, cuarzo, feldespatos potásico, calcita y caolinita. Se muestran los patrones de difracción del extendido secado al aire, glicolado y calcinado, así como la asignación de fases identificadas (Figura 4b). Se reconoció illita como mineral de arcilla dominante menor a 2 µm, con trazas de caolinita. Se observa

un leve incremento en la intensidad del background a bajos ángulos luego del glicolado con relación al secado al aire, lo indicaría presencia de trazas de una fase expansible, probablemente un estratificado tipo R3 (Moore y Reynolds, 1997) con illita dominante y muy escasa esmectita.

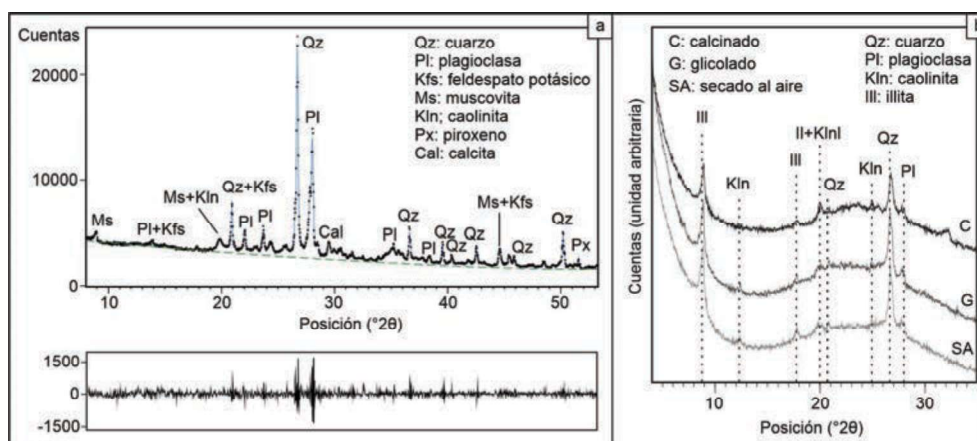


Fig. 4 – a) Arriba la curva de puntos muestra patrón de DRX del suelo natural y asignación de fases principales. La línea continua es la curva de ajuste según método Rietveld y la línea con trazos el fondo. Abajo se aprecia diferencia entre patrón natural y calculado; b) Patrón de DRX y asignación de fases de fracción < 2µm del suelo natural (muestra orientada), secada al aire (SA), glicolada (G) y calcinada (C).

La muestra presenta además proporciones menores de cuarzo y plagioclasa. Adicionalmente a las fases identificadas por DRX de la fracción total, los estudios petrográficos permitieron identificar cantidades minoritarias (< 1 %) de hornblenda, biotita, apatita, circón, minerales opacos, trizas de vidrio volcánico y óxidos/hidróxidos de hierro (Figura 5).

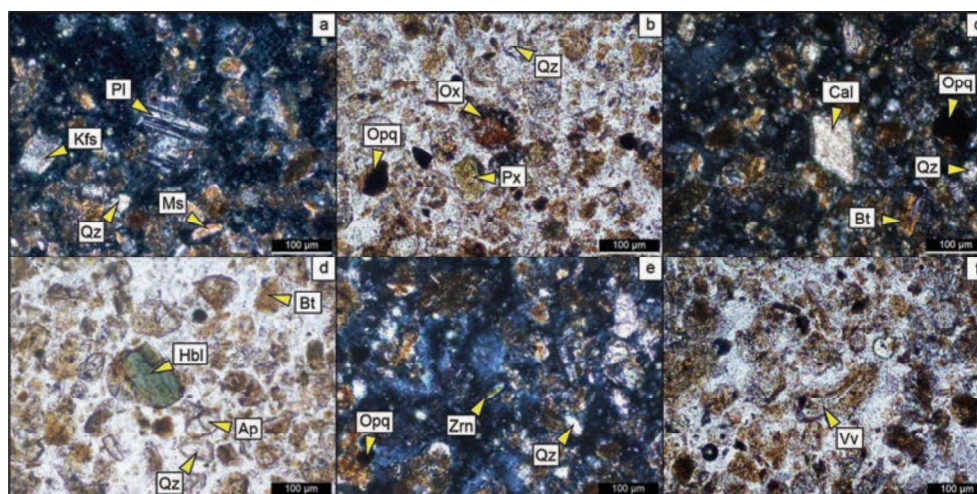


Fig. 5 – a-f) Fotomicrografías del suelo natural suelto (b,d,f: nicols paralelos; a,c,e: nicols cruzados). Pl: plagioclase. Kfs: feldespato potásico. Qz: cuarzo. Bt: biotita. Ms: muscovita. Px: piroxeno. Ap: apatita. Zrn: circón. Hbl: hornblenda. Vv: vidrio volcánico. Opq: mineral opaco. Ox: óxido/hidróxido de hierro. Cal: calcita.

3.2 – Silicato de sodio

Se empleó metasilicato de sodio en estado sólido y seco de origen chino. Este producto en estado diluido con agua potable, presenta una tonalidad blanquecina a amarillenta. Se determinó su densidad seca de 0,85 a 0,95 gr/cm³ y el pH registrado fue de 13,7. Más características técnicas se citan en la Tabla 4.

Tabla 4 – Composición química del silicato de sodio sólido empleado (Fuente: fabricante chino).

Elemento	Unidad	Silicato de sodio
Total de álcali (sodio)	%	28,7 a 30,0
Silicio	%	27,8 a 29,2
Hierro	ppm	<50
Tamaño de la partícula 1400 µm – mm 425 µm	%	90
Solubilidad en agua	%	0,020
Transparencia	%	96

3.3 – Cal hidratada

El aditivo químico que brinda el vínculo cálcico a lo largo del tiempo es la cal hidratada. Se produce en la localidad de San Agustín, departamento Calamuchita de la provincia de Córdoba (Argentina). Posee una baja densidad aparente de 0,3-0,6 gr/cm³ y un pH de 11,7. La incorporación de calcio brinda al silicato de sodio garantiza un aceptable proceso de gelificación y posterior estabilización intergranular con los suelos problemáticos erodables con el paso del tiempo. En la Tabla 5 se proporcionan más características técnicas de este producto.

Tabla 5 – Composición química de la cal hidratada empleada (Fuente: fabricante argentino).

Elemento	Unidad	Cal hidratada
Óxido de calcio activo, CaO	gr/100g	30,33
Hidróxido de calcio, Ca(OH) ₂	gr/100g	40,06
Carbonato de calcio, CaCO ₃	gr/100g	59,70
Granulometría	-	-
> #30 (>0,59 mm)	gr/100g	0,0
< #30 >#80 (<0,59 mm >0,177 mm)	gr/100g	11,1
< #80 >#100 (<0,177 mm >0,149 mm)	gr/100g	3,9
< #100 >#200 (<0,149 mm >0,074 mm)	gr/100g	17,4
< #200 >#325 (<0,074 mm >0,044 mm)	gr/100g	49,5
< #325 (<0,044 mm)	gr/100g	15,2

3.4 – Dosificación óptima

Se plantearon inicialmente tres combinaciones de dosajes en esta investigación (1L:2C:2S, 1L:4C:4S y 1L:6C:6L), siendo L=limo-loésico, C=cal hidratada, S=silicato de sodio, descartando en primera instancia la opción que obtuviera bajos resultados a 5mm de penetración en el ensayo California Bearing Ratio para las probetas remoldeadas a los parámetros del proctor estándar. Puntualmente, se efectuaron 5 puntos con distintos contenidos de humedad para comenzar a estudiar cada dosificación, y se evaluó finalmente la densidad seca máxima, la humedad óptima, la trabajabilidad de la mezcla, así como, la dispersión de cada curva obtenida. En la preselección final quedaron 1L:2C:2S y 1L:4C:4S, adoptándose el índice CBR (ver Tabla 6) como variable principal

para escoger la dosificación óptima. La dosificación seleccionada, cuyos resultados geotécnicos se comparan con el suelo natural (ver Tabla 1), se compone de 1 parte de suelo limoso problemático, 4% de cal hidratada y 4% de metasilicato de sodio en estado sólido y seco (1L:4C:4S); o si se expresa en volumen corresponde a 25L:1C:1S (Cruz et al., 2020). Estas dosificaciones cumplen sobradamente con los valores admisibles solicitados para una subrasante según la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina (DNV), ver Tabla 7.

La dosificación óptima compactada inmediatamente al mezclar los citados componentes, tiene un índice de plasticidad de 2,5%, con un límite líquido (ω_{LL}) de 35,9% y límite plástico (ω_{LP}) de 33,3%, concluyendo que corresponde según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) a un limo de baja plasticidad (ML), y al grupo A-4 según la A.A.S.H.T.O.

Tabla 6 – Resultados de CBR y proctor estándar en probetas de suelo natural compactado como en dosificaciones estudiadas en laboratorio.

Ensayo	Penetración (mm)	Suelo natural compactado		Dosificaciones estudiadas (en masa)			
		Presión (kPa)	Índice CBR (%)	1L ¹ :2C ² :2S ³		1L ¹ :4C ² :4S ³	
				Presión (kPa)	Índice CBR (%)	Presión (kPa)	Índice CBR (%)
California Bearing Ratio	2,5	166,71	2,5	1559,26	22,6	1696,55	24,7
	5,0	343,23	3,3	2432,05	23,6	3471,55	33,7
Proctor estándar	Parámetros	$\omega_{\text{óptima}}$ (%)	$\gamma_{\text{ssmáx}}$ (gr/cm ³)	$\omega_{\text{óptima}}$ (%)	$\gamma_{\text{ssmáx}}$ (gr/cm ³)	$\omega_{\text{óptima}}$ (%)	$\gamma_{\text{ssmáx}}$ (gr/cm ³)
		15,1	1,60	18,0	1,61	19,0	1,62

¹: Suelo natural campo La Toma, Pedro E. Vivas, Córdoba, Argentina.

²: Cal hidratada de origen argentino.

³: Silicato de sodio sólido de origen chino.

Tabla 7 – Valores exigidos para subrasante vial según Dirección Nacional de Vialidad.

Elemento del paquete vial	Parámetro	Valor reglamentario
Subrasante	CBR _{2,5mm} (%) $\geq$	3
	Hinchamiento (%) $\leq$	1
	Índice de plasticidad $\leq$	12

Para monitorear el efecto del geopolímero durante uso vial, se realizó el ensayo de durabilidad considerando aspectos metodológicos de dos organizaciones distintas: el método del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos de América (USACE) y el método de la Asociación Nacional de la Cal de Estados Unidos de América (NLA). Esta investigación adopta principalmente el método de la NLA, al tratarse de una estabilización con cal a la que se le adiciona silicato, pero tomando parte de la metodología del método de USACE para contemplar la solicitud de los ciclos de humedecimiento y secado característicos de la región en estudio.

A modo de simple reseña de ambos ensayos de durabilidad, se citan algunos aspectos particulares de cada uno de ellos:

- El método de la NLA (National Lime Association, 2006) tiene requerimientos mínimos para que la cal reaccione con el suelo. Pide un índice de plasticidad > 15 y un pasante por el tamiz N° 200 mayor a 25%. De no cumplirse la primera condición es indispensable agregarle sílice o alúmina al suelo tratado para que reaccione con la cal. Propone adicionar cal (ASTM D 6276, 2019), hasta que el pH no varíe. La densidad máxima con humedad

óptima se logra con el ensayo proctor estándar (ASTM D 698, 2012) y el humedecimiento de la muestra es de 7 días a 40 °C. Posteriormente se someten las probetas a ensayos de compresión simple para ciclos de congelamiento y descongelamiento.

- El método del USACE compacta probetas de suelo-cemento con el proctor modificado (ASTM D 1557, 2012), propone un humedecimiento de 48 hs a 49 °C y establece parámetros mínimos de durabilidad y resistencia para considerar estabilizada la muestra. De cumplirse sólo una de las condiciones, se trata de un mejoramiento y no de una estabilización. La durabilidad se cuantifica con el porcentaje de pérdida en peso de la probeta luego de 12 ciclos de humedecimiento, secado y raspado con un cepillo metálico (ASTM D 559, 2015), y la resistencia mínima a la compresión del suelo (ASTM D 1633, 2017) varía de acuerdo con la función dentro del paquete estructural de la vía.

4 – METODOLOGÍA

Se realizaron en primera instancia ensayos de caracterización de los diferentes materiales y de la dosificación óptima en laboratorio (ver sección 3), buscando luego validar los mismos y establecer correlaciones al estudiar el comportamiento del geopolímero propuesto en un tramo de camino sometido a desgaste por solicitaciones climáticas y tránsito.

4.1 – Ejecución de tramo piloto de camino para testeo

Se materializaron tres tramos contiguos de camino de 5m de longitud cada uno en media calzada, con tres paquetes estructurales para controlar la durabilidad con medición de la resistencia al corte no drenado, entre otros parámetros geotécnicos. El período de análisis fue de 493 días (casi un año y cinco meses) para así poder evaluar los ciclos climáticos o estaciones secas/húmedas y el impacto del tránsito pesado a lo largo de distintas visitas de control. El grado de deterioro y la pérdida en volumen del suelo erodado en los tres tramos experimentales, se estableció una analogía relativa entre la pérdida en peso de cada ciclo y el valor de resistencia al corte no drenado para una deformación vertical del 1% de las probetas remoldeadas en el laboratorio para el ensayo de durabilidad (Cruz et al., 2018, 2020).

Se clasificó vialmente la subrasante rural no pavimentada según su jurisdicción, su función principal y su importancia dentro de la red nacional. De acuerdo con las características del perfil transversal, el tráfico, conectividad y accesibilidad de la vía, se definió la clasificación funcional como una vía rural secundaria que presenta una circulación de tránsito pesado (maquinarias y camiones de carga). Se calcularon los espesores de los paquetes estructurales de cada tramo in situ; respetando el mismo número estructural equivalente. En la Figura 6 pueden observarse las tres opciones ejecutadas para evaluar comparativamente el desgaste y durabilidad de cada tramo.

El primer tramo se materializó con 3 capas de 0,20 m de espesor del suelo natural compactado, el segundo tramo con dos capas de 0,15 m de espesor de suelo estabilizado con cal hidratada y silicato de sodio sólido, cuya dosificación en volumen fue de 25:1:1 (Suelo:Cal:Silicato o L:C:S). El tercer tramo presentó tres capas; las primeras dos de L:C:S con 0,15 m y 0,10 m de espesor respectivamente, terminado con una capa de 0,05 m de espesor de agregado granular 0-6 mm compactado. Se realizó un modelo digital del terreno para mensurar la durabilidad in situ a partir de conocer la pérdida en volumen del suelo erodado en cada tramo experimental.

En la Figura 7a se visualiza la preparación del terreno con escarificación y limpieza de la traza rural (común a los tres tramos). En la Figura 7b se aprecia el mezclado mecánico del suelo con cal y silicato para los tramos 2° y 3°. El compactado de al menos el 90% de la densidad seca del proctor estándar (ASTM D 698, 2012) por capas del suelo natural o mejorado con la humedad óptima calculada, se observa en Figuras 7c y 7d. Finalmente, al tercer tramo se le adicionó una última capa compactada de 0,05 m de espesor de agregado granular 0-6 mm sobre el estabilizado de suelo-cal-

silicato para brindar más rugosidad superficial al rodar el neumático (Figura 7e). En la Figura 7f se observa una vista en perspectiva de los 3 tramos materializados.

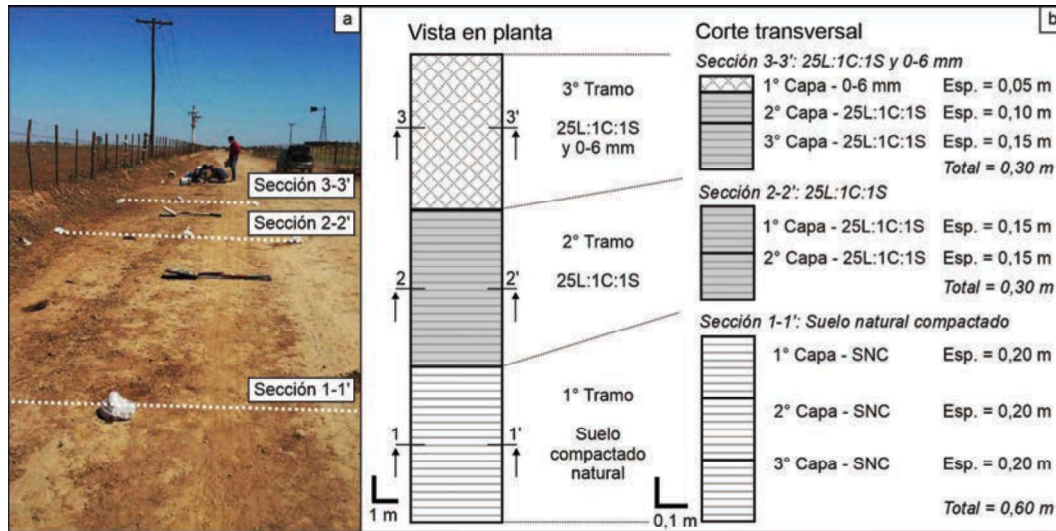


Fig. 6 – a) Vista de los tres tramos de subrasante materializados in situ; b) Detalle en planta y corte de los paquetes estructurales viales materializados in situ.



Fig. 7 – a) Escarificación y extracción de caja de suelo del tramo experimental; b) Mezcla del suelo natural con cal y silicato de sodio; c) y d) Relleno, vibrado y compactación por capas; e) Terminación del tramo 3° con agregado 0-6 mm; f) Vista de los tres tramos terminados.

La ejecución del tramo piloto se efectuó un día nublado, con temperatura media y sin viento, facilitando la conservación de la humedad de la mezcla. Se realizaron dos controles con el cono de arena por tramo de humedad y densidad in-situ. Se inspeccionó que los materiales estuvieran uniformemente mezclados. Se fueron midiendo con nivel óptico los espesores de las capas de

compactación en los distintos tramos y se empleó la misma energía de compactación ya que se usaron los mismos equipos e idéntico operario para dicha tarea.

4.2 – Monitoreo del tramo vial de estudio

El registro in situ de los distintos parámetros geotécnicos viales en cada visita, buscaba monitorear la performance de cada tramo ante la presencia de solicitaciones climáticas y de tránsito. Para esta tarea fue necesario planificar campañas geotécnicas:

- Campaña directa: Cateo de suelos en tramo piloto para obtener probetas de suelo estabilizado in situ y realizar ensayos de la macroestructura (compresión simple – ASTM D 2166, 2016, compresión confinada – ASTM D 2435, 2011, clasificación geotécnica- ASTM D 422, 2007) como de la microestructura (microscopía óptica de polarización sobre secciones delgadas impregnadas con/sin resina fluorescente) (Figura 8a).
- Campaña indirecta: Ensayo de penetración liviana (DCP ligera) hasta una profundidad del orden de 0,6 m a 1,2 m desde el nivel de subrasante en cada visita (Figura 8b). La profundidad de estudio fue condicionada en base a la máxima potencia estabilizada entre los tres tramos; siendo la inicial determinada en el 1° tramo de 0,6 m (Figura 6b). El nivel de subrasante fue erodándose a lo largo de los 493 días estudiados; el más afectado fue el suelo natural sin estabilizar (traza existente), le siguió el suelo natural compactado y en menor medida los tramos 2° y 3° estabilizados con geopolímero (suelo-cal-silicato).



Fig. 8 – a) Cateo de probeta del 2° tramo a la edad de 155 días para realizar corte delgado;
b) Ensayo de penetración liviana (DCP ligera).

Se ejecutó también un relevamiento planialtimétrico del tramo piloto de subrasante rural no pavimentada al finalizar su ejecución (edad 0 días) y en las sucesivas visitas de campo (edad 30, 70, 155, 258 y 493 días), (Cruz et al., 2018). En la Figura 9 se observan los modelos de planialtimetría resultantes a la edad de 30 días y 493 días de materializados los tramos de testeo in-situ; siendo destacado con sombreado gris oscuro el aumento de la zona erodada con el correr del tiempo luego de ser solicitados al tránsito como condiciones climáticas reales.

En cada visita a campo se relevó visualmente la zona de estudio y se calificó la traza teniendo en cuenta los siguientes estados posibles (Comisión de Caminos Rurales, 2018): severas erosiones (tanto hídricas como eólicas) y bajos niveles de conservación. Para analizar el nivel de deterioro del camino se consideraron: irregularidad superficial, ahuellamiento localizado, deformación longitudinal, corrugaciones u ondulaciones, pérdida del perfil transversal, polvo en suspensión, falta de drenaje, entre otras (Figura 1). En la Figura 10, se muestra la planilla de relevamiento vial usada que valora semi-cualitativamente el estado de cada tramo materializado en el tiempo. A partir de

varios relevamientos se puede ponderar en forma comparativa cómo se mantiene o deteriora la calzada de circulación en una línea temporal.

La síntesis de la campaña de ensayos y relevamientos in-situ a lo largo del tiempo de estudio para el monitoreo del comportamiento del tramo piloto estabilizado se aprecia en la Tabla 8.

Tabla 8 – Resumen de tareas de campo y laboratorio en la etapa de monitoreo.

Ámbito	Ensayo/Muestreo	Cantidad
Campo	DCP ligero. ASTM D 6951	17
	Cono de arena. ASTM D 1556	8
	Prospección con pala ancha	3
	Relevamiento planialtimétrico	6
	Relevamiento visual de estado del camino	9
Laboratorio	Compresión simple. ASTM D 2166	3
	Compresión confinada. ASTM D 2435	3
	Granulometría por sedimentación. ASTM D 422	12

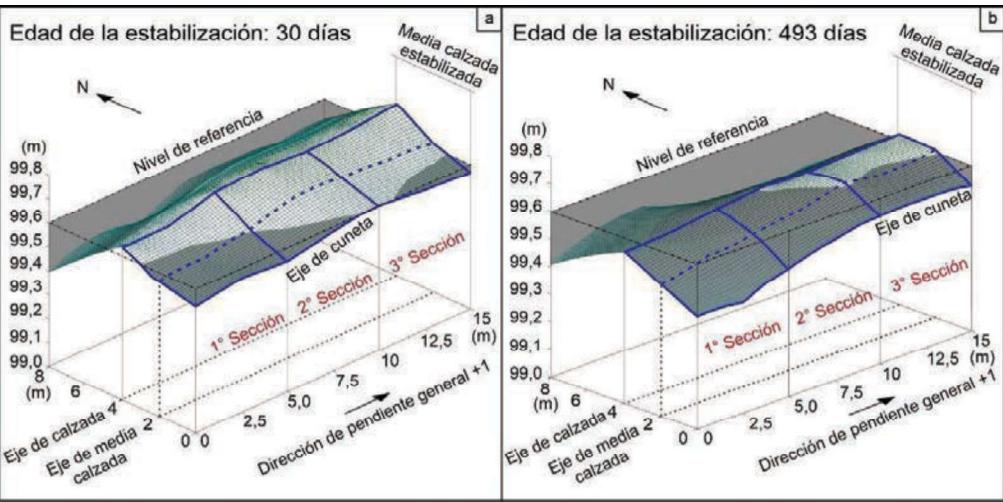


Fig. 9 – Modelos digitales de elevación de tramos a la edad de: a) 30 días; b) 493 días.

4.3 – Caracterización de la macroestructura

Se realizó una caracterización geotécnica-vial de los sedimentos a estabilizar, implicando la planificación de tres etapas de ensayos; siendo, la primera sobre muestras de suelo en estado natural, la segunda sobre probetas de suelo con silicatos de sodio seco más cal hidratada y la tercera etapa sobre probetas estabilizadas con la dosificación óptima extraídas de los tramos testeados in-situ. Cabe mencionar que las muestras de suelos estudiadas, corresponden a la subrasante no pavimentada de la traza en estudio dentro del establecimiento “La Toma”; cuyo rango de profundidades estudiadas varía entre 0,0 m y 0,6 m desde el actual nivel de terreno. Los ensayos realizados en la etapa primera y segunda, se resumen en la Tabla 1. Mientras que los ensayos de la tercera etapa se mencionan en la sección 4.2.

En la Figura 11, se observa un cateo para muestrear el suelo natural sin estabilizar y probetas dosificadas con silicato de sodio seco y cal hidratada prontas a ser ensayadas en el laboratorio.

Edad mejoramiento:	70 días	Estado	Clasificación		Natural	1º Tramo	2º Tramo	3º Tramo
Descripción del suelo			min	max	-	Suelo natural compactado	25L:1C:1S	25L:1C:1S y 0-6mm
Irregularidades superficiales: escasas o nulas		Muy bueno	9	10				
Deformaciones localizadas: no hay								
Ahuellamiento o deformación longitudinal: no hay								
Corrugaciones u ondulaciones: no hay								
Pérdida del perfil transversal: no hay								
Pérdida de materiales: no hay o mínima								
Drenaje: bueno								
Irregularidades superficiales: pocas		Bueno	7	8		7	7	
Deformaciones localizadas: bajas						7	7	
Ahuellamiento o deformación longitudinal: apreciables						7	7	
Corrugaciones u ondulaciones: mínimas						8	7	
Pérdida del perfil transversal: escasa						7	8	
Pérdida de materiales: escasa						7	8	
Drenaje: bueno						7	7	
Irregularidades superficiales: moderada		Regular	4	6	4			5
Deformaciones localizadas: media					4			5
Ahuellamiento o deformación longitudinal: importante					4			5
Corrugaciones u ondulaciones: algunas					4			4
Pérdida del perfil transversal: moderado					4			4
Pérdida de materiales: moderado					4			4
Drenaje: con deficiencias puntuales								
Irregularidades superficiales: elevadas		Malo	1	3				
Deformaciones localizadas: altas								
Ahuellamiento o deformación longitudinal: excesivo								
Corrugaciones u ondulaciones: altas								
Pérdida del perfil transversal: importante								
Pérdida de materiales: apreciable								
Drenaje: malo					3			3

Fig. 10 – Planilla de relevamiento cualitativo vial a 70 días de la intervención.

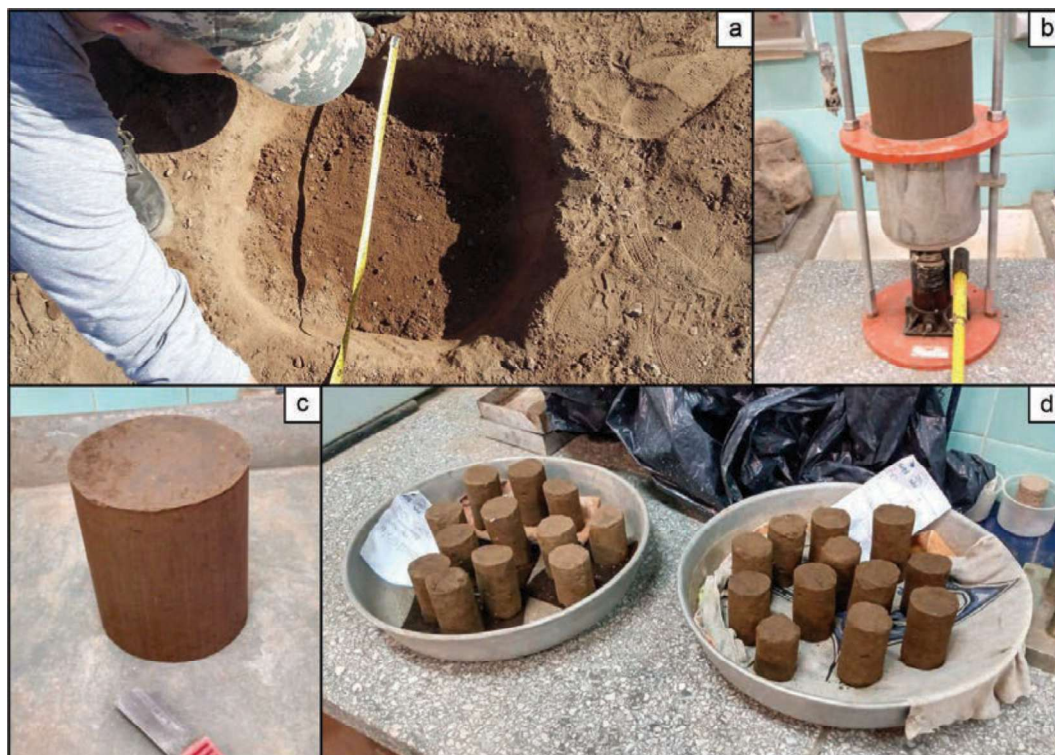


Fig. 11 – a) Cateo para caracterización del suelo natural en traza estudiada; b) Desmolde de probeta remoldeada con la dosificación óptima; c) Probeta pronta a ser tallada en probetas remoldeadas para ensayar durabilidad; d) Probetas esbeltas remoldeadas del ensayo de durabilidad.

4.4 – Caracterización de la microestructura

El objetivo principal fue identificar en la microestructura razones que justifiquen diferencias en valores de resistencia al corte no drenado (como otros parámetros) de las probetas con la dosificación óptima en el laboratorio sometidas a alternancia de ciclos de secado/humedecimiento (ensayo de durabilidad) respecto a probetas extraídas de la subrasante estabilizada solicitadas al tránsito rural como clima real.

Para tal fin se realizaron estudios por microscopía óptica de polarización (con epifluorescencia) sobre secciones delgadas impregnadas con/sin resina fluorescente, con un microscopio Leica DM EP. Se trabajó sobre muestras extraídas del 2º tramo experimental a 155 días de su materialización en campo, y sobre probetas solicitadas al 5º ciclo de humedecimiento-secado del ensayo de durabilidad (obtenidas en laboratorio) (Figura 12a). Se definieron dos direcciones de corte perpendiculares entre sí a fin de evaluar cambios según la dirección de conformación de las muestras. En primera instancia las muestras fueron impregnadas con resina epoxi de baja viscosidad adicionando fluoresceína sódica y posteriormente fueron cortadas con sierra diamantada en seco. Se realizó un nuevo impregnado sobre la superficie de corte y desbaste con abrasivos de carburo de silicio. Sobre la cara pulida de las muestras se pegó un vidrio ($46 \times 27 \times 1$ mm) y se efectuó un corte con máquina Petrothin (Figura 12b). Finalmente se llevaron a altura con abrasivos de diferente granulometría para conseguir secciones delgadas de aproximadamente $30 \mu\text{m}$ de espesor (Figura 12c). Desde la óptica de la microestructura se identificaron los tipos de partículas elementales, los tipos de agregados de partículas y los tipos de poros según las estructuras

mencionadas por Alonso et al. (1987). En Figura 12d-1 se aprecia la microestructura de tipo matricial constituida por una masa de partículas distribuida de forma homogénea; en la Figura 12d- 2 puede verse una microestructura de agregados, cuando se observan grupos o asociaciones de partículas elementales formando granos de mayor tamaño y poros entre ellos de mayor magnitud que en la microestructura matricial; y para concluir en la Figura 12d-3 se presenta una microestructura de granos de arenas y/o limos con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos entre partículas sin conectores de arcilla.

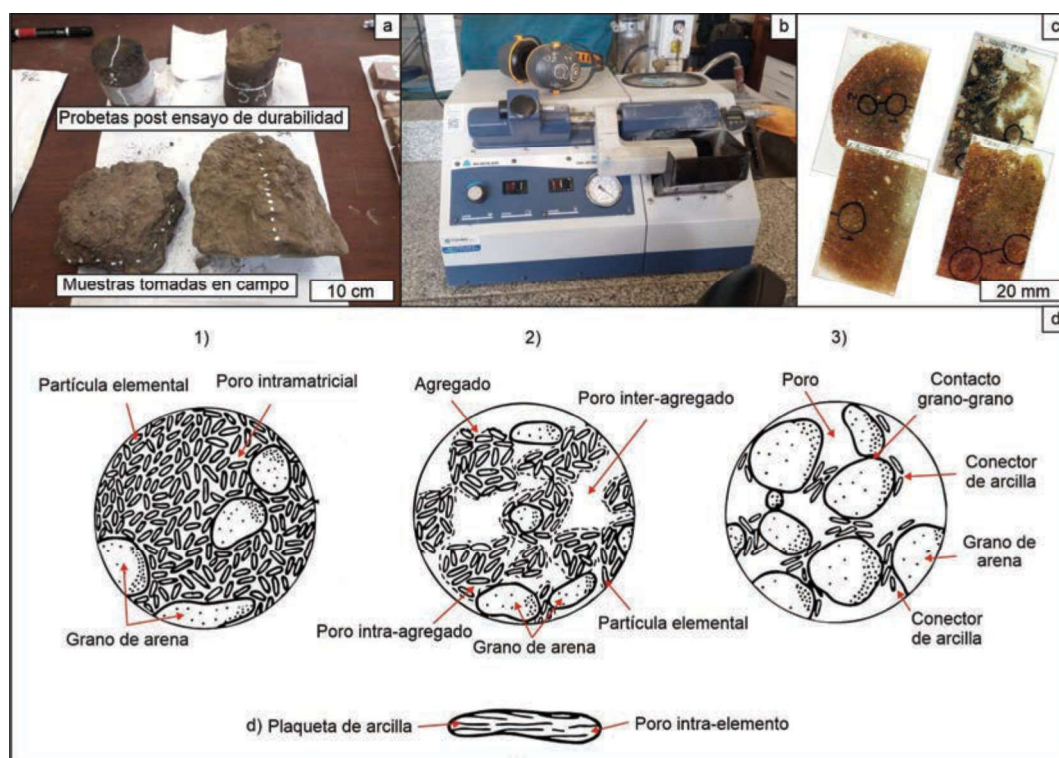


Fig. 12 – a) Preparación de muestras extraídas en campo post materialización del 2º tramo experimental a 155 días y probetas solicitadas al 5º ciclo de humedecimiento-secado del ensayo de durabilidad (obtenidas en laboratorio); b) Máquina Petrothin para corte de precisión; c) Secciones delgadas obtenidas; d) Microestructura de suelos según Alonso et al. (1987). 1- Microestructura tipo matricial homogénea. 2- Microestructura de agregados con grupos de partículas elementales. 3- Microestructura de granos de arenas y/o limos con o sin conectores de arcilla.

5 – RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 – Experiencias en laboratorio

Luego de identificar el suelo natural y determinar la dosificación óptima en laboratorio, se realizó el ensayo de durabilidad alternando períodos de secado y humedecimiento en probetas remoldeadas compactas al menos al 95% de la densidad seca máxima del proctor estándar, con suelo natural compactado y con la dosificación óptima Cruz et al. (2020). Finalizado cada ciclo (1, 3, 5, 9, 13 y 15) se determinó el porcentaje de pérdida en peso (ΔP) de las respectivas probetas según la Ecuación 4 y se realizaron los correspondientes ensayos de compresión simple. Así, se calcularon

los parámetros de resistencia al corte no drenado a la deformación vertical de rotura ($\varepsilon_{rot\%}$) y a la deformación vertical del 1% ($\varepsilon_{1\%}$), sus módulos de elasticidad a valor de deformación elástica inicial (E), pérdida de masa, presión de fluencia saturada y porcentaje de colapso.

$$\Delta P = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{final}} \quad (4)$$

donde $P_{inicial}$ es la masa inicial y P_{final} es la masa de la probeta al finalizar el ciclo del ensayo.

En la Figura 13a se observa la diferencia de pérdida de masa de suelo en probetas de laboratorio luego del ensayo de durabilidad; siendo la situada a la derecha la probeta remodelada con la dosificación óptima (geopolímero) y a la izquierda la remodelada sólo con suelo natural compactado. La probeta de suelo natural compactado manifestó mayor pérdida de masa. En la Figura 13b puede apreciarse que la probeta con suelo estabilizado tuvo una rotura franca, compatible con una falla general por corte al finalizar el ciclo 15. El compendio de resultados tenso-deformaciones para estos ensayos de compresión simple se muestra en la Figura 13c. Se ejecutaron tres probetas por ciclo; siendo el fin poder obtener una estadística de resultados mínimos. La Figura 13d manifiesta un decaimiento de la resistencia a compresión simple (para $\varepsilon_{1\%}$) a medida que avanzan los ciclos para las probetas sin aditivos, mientras que las probetas con geopolímeros tienen un leve incremento con el paso del tiempo. La Figura 13e expone los valores de las pérdidas de masa ciclo a ciclo para las probetas con la dosificación óptima, que permanecen relativamente estables, a diferencia de las probetas de suelo natural compactado que manifiestan deterioros incrementales continuos con el avance de los ciclos del ensayo de durabilidad. En la Tabla 9 se resumen los principales parámetros resultantes del ensayo de durabilidad con una acotada estadística de los mismos.

Tabla 9 – Resultados del ensayo de durabilidad en probetas de suelo natural compactado y con dosificación óptima.

Número de ciclo	Suelo natural compactado			Mejoramiento 1L ¹ :4C ² :4S ³		
	1°	3°	9°	1°	3°	9°
Pérdida de masa promedio (%)	1,2	13,2	32,8	0,6	1,6	3,6
Desviación estándar	0,15	4,9	5,4	0,19	0,15	0,42
Su _{rotura} promedio (MPa)	0,59	0,32	0,11	0,65	0,52	0,55
Desviación estándar	3,93	2,18	0,70	1,28	1,73	0,64
E _{inicial} (MPa)	33,9	33,9	19,4	39,1	37,1	24,7
Desviación estándar	0,50	0,49	0,24	0,84	0,53	0,20

¹: Suelo natural campo La Toma sobre ruta RN19, Pedro E. Vivas, Córdoba, Argentina.

²: Cal hidratada de origen argentino.

³: Silicato de sodio sólido de origen chino.

Desde el análisis de la microestructura en probetas extraídas del 2° tramo materializado con dos capas de 0,15 m de espesor de suelo ML con cal hidratada y silicato de sodio sólido con dosificación en volumen de 25L:1C:1S, se logró constatar que sus nódulos gelificados ante la reacción del silicato de sodio con la cal hidratada, son 12,5 veces mayores que los nódulos de las probetas solicitadas a los distintos ciclos del ensayo de durabilidad remodeladas en el laboratorio. En la Figura 14 se observan vistas parciales de un agregado nuevo o sea un nódulo cementado sin (caso a) y con epifluorescencia (caso b), hallado en la probeta de 155 días proveniente del estabilizado en el campo. Dicha fracción de nódulo cementado presenta un tipo de agregación en forma de bloque angular

separado nítidamente de su matriz basal. El nódulo completo tiene una dimensión menor a 10 mm y responde a un nódulo pequeño blando (Cruz, 2020). Se identifican agregados de caras aproximadamente planas que al cortarse forman aristas y estas a su vez originan vértices. Se identifican conformas parecidas a poliedros geométricos irregulares. Las caras de los agregados se conjugan perfectamente con las caras de los agregados vecinos por lo que se integra correctamente con la matriz basal (ambas no están separadas). Intrínsecamente en el nódulo, se observa un fuerte estado desarrollado de agregación como de acomodamiento de las fracciones finas entre las fracciones gruesas (en ese orden de prioridad) sin casi poros internos y/o vinculados con la matriz basal circundante. Por otra parte, el tipo de poro presenta un ancho de influencia de $\sim 0,5$ mm a $\sim 1,5$ mm que separa circunferencialmente el nódulo pequeño con la matriz basal; siendo identificado como un conjunto de microporos circundantes al nódulo visualizado eficazmente en la vista con epifluorescencia.

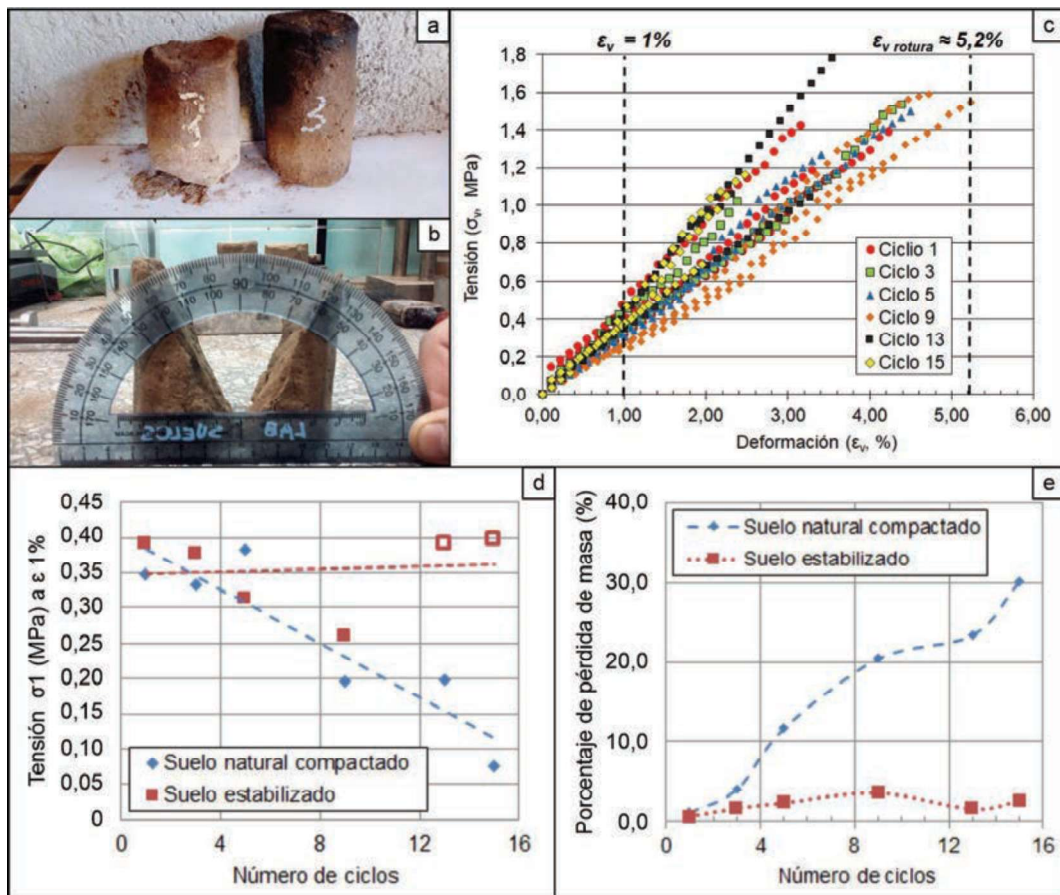


Fig. 13 – a) Estado de probeta con geopolímero vs. probeta de suelo natural compactado; b) Rotura en probeta con dosificación óptima, ciclo 15; c) Resultados tenso-deformacionales a compresión simple, ciclos 1, 3, 5, 9, 13 y 15; d) Resistencia a compresión para ciclos de humedecimiento y secado; e) Pérdida de material en ciclos de ensayo de durabilidad.

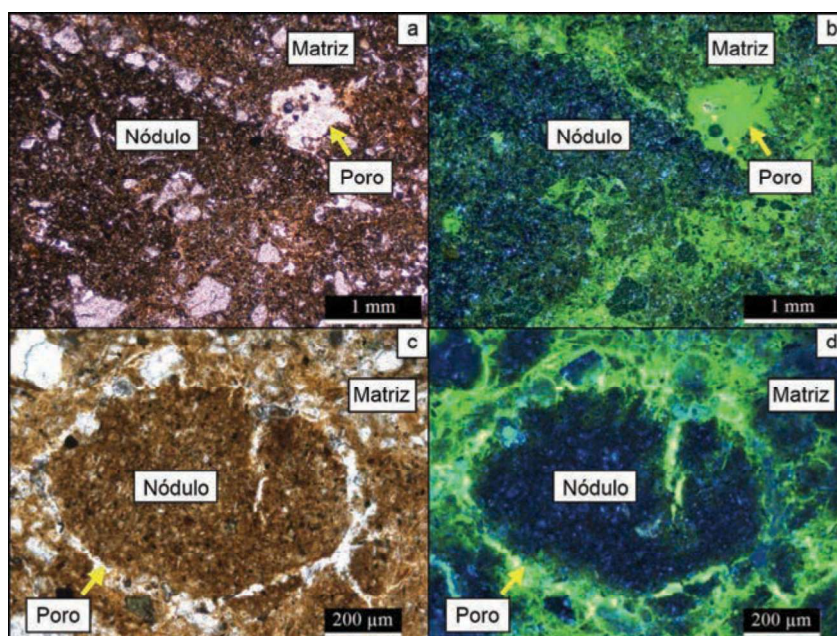


Fig. 14 – Fotomicrografías tomadas mediante microscopía óptica de polarización con nicols paralelos (a y c) y con epifluorescencia (b y d); a y b) Microestructura de probeta inalterada extraída de campo a la edad 155 días; c y d) Microestructura de probeta remoldeada en laboratorio del 3° ciclo de humedecimiento/secado en el ensayo de durabilidad.

Por su parte en las Figuras 14c y 14d, se observa un nódulo de la probeta remoldeada en el laboratorio y solicitada hasta el 3° ciclo de humedecimiento/secado en el ensayo de durabilidad. Dicho nódulo presenta una forma de esferoide; siendo la dimensión menor de $\sim 0,5$ mm y la mayor de $\sim 0,8$ mm. Al igual que la Figura 14a y Figura 14b, este es un nódulo pequeño blando identificado por microscopía óptica de polarización sin (caso c) y con epifluorescencia (caso d) (Cruz, 2020). Las caras de los agregados se integran correctamente con matriz basal. Intrínsecamente en el nódulo, se observa un fuerte estado desarrollado de agregación como de acomodamiento de las fracciones finas únicamente, sin poros internos y ligeramente infiltrado por la matriz basal circundante. Por otra parte, el tipo de poro presenta un ancho de influencia de ~ 25 μm y separa circunferencialmente el nódulo pequeño con la matriz basal en forma esferoide; siendo identificado por una cámara conectada con micro-canales que conforman una forma esférica de paredes irregulares infiltradas a micro-fisuradas, circundantes al nódulo. El origen de este tipo de poro, podría deberse a la desecación sufrida de forma acelerada en la estufa del laboratorio durante la etapa de secado en el ensayo de durabilidad; limitándose así el crecimiento volumétrico de las dimensiones del nódulo como además brinda respuesta a las bajas magnitudes de resistencia al corte no drenado en probetas ensayadas a durabilidad en el laboratorio. Puntualmente, los sucesivos y acelerados ciclos de humedecimiento/secado generan una fragilidad nodular (microfisuras internas) en las probetas esbeltas a nivel de microestructura que justificaría los bajos módulos de elasticidad inicial (hasta $\epsilon_{\text{vert}} 1\%$) de estas probetas respecto a los módulos de elasticidad inicial de probetas estabilizadas en el tramo 2° en campo; que fueron sometidas a un deterioro paulatino a lo largo tiempo (Tabla 10). Esta fragilidad en la microestructura de probetas esbeltas no se manifestaría en probetas confinadas como son las probetas del ensayo de compresión confinada. Estas últimas analogías, serán objeto de nuevos estudios con el fin de poder correlacionar más apropiadamente la evolución del crecimiento nodular desde la micro a la macroestructura.

Tabla 10 – Resultados del ensayo de durabilidad de las probetas de la dosificación óptima en el campo y en el laboratorio.

Edad (días/ciclos)	Suelo estabilizado en campo			Suelo estabilizado en laboratorio		
	Días			Ciclos		
	0	155	350	1°	3°	9°
γ_{ss} (gr/cm ³)	1,61	1,75	1,43	1,44	1,48	1,53
E _{inicial} (MPa)	272,9	204,6	136,4	39,1	37,1	24,7

5.2 – Resultados y discusión de campo

De los resultados del ensayo de penetración liviana (DCP ligera) realizado en cada tramo materializado in-situ (1°, 2° y 3°), como así también en un tramo de suelo natural contiguo sin compactar, se analizó el porcentaje de la pendiente de avance acumulado penetrado según cada visita realizada desde el inicio de la experimentación o edad de 0 días (Figura 15). Puede apreciarse que en los tramos con presencia del geopolímero (2° y 3°), disminuyó siempre el avance acumulado de penetración con el paso del tiempo. Esto resulta de una estabilización del suelo problemático dada por la formación del gel de sílice, logrando un grado de cementación que mejora con la edad (Figura 15c). En el suelo natural sin compactar siempre se observa el máximo del porcentaje de la pendiente de avance acumulado penetrado (línea sólida en las Figuras 15a, 15b y 15c).

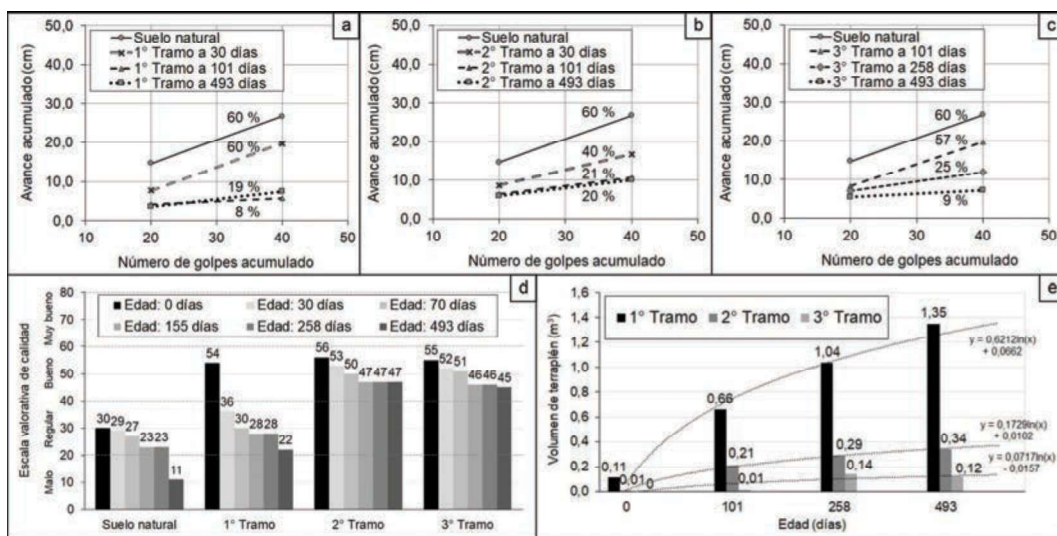


Fig. 15 – a-c) Avances acumulados según N° golpes de DCP del suelo natural sin compactar (SN) y compactado a diferentes edades en el tramo 1° (a), 2° (b) y 3° (c); d) Relevamiento vial del estado de los tramos estudiados vs. suelo natural sin compactar a diferentes edades; e) Cómputo del volumen de terraplén para cada tramo materializado a diferentes edades.

El relevamiento cualitativo vial iniciado en noviembre del 2019 (edad de 0 días) hasta marzo del 2021 (edad de 493 días) logró evaluar el deterioro de cada tramo materializado con respecto al suelo natural sin mejorar (Figura 15d). El inicio del monitoreo vial in situ se dio en primavera en Argentina; siendo el clima cálido y parcialmente húmedo. Mientras que la finalización de la medición dieciséis meses después abarcó dos estaciones de verano (época de lluvia) con una acumulación pluviométrica en la región próxima a 1000 mm y un rango de temperaturas entre 11°C

y 28°C. El eje vertical de la Figura 15d muestra una variación de 1 a 70; siendo 1, propio de un estado vial pésimo y 70, propio de un estado vial excelente. Resultando que los tramos 2° y 3°, se han mantenido en un estado vial bueno para todo el tiempo de estudio.

Se ejecutó un relevamiento planialtimétrico de los tres tramos estudiados en las edades de 0 día, 101 días, 258 días y 493 días, logrando computar el volumen (m^3) de terraplén requerido por tramo al ser solicitados al desgaste del tránsito pesado (maquinarias agropecuarias) como condiciones climáticas reales (Figura 15e). Se observa que los tramos estabilizados (2° y 3° en ese orden) generan la menor erodabilidad respecto al 1° tramo, garantizando una efectiva estabilización en el tiempo que impactará en reducciones económicas de tareas de rehabilitación y/o mantenimiento de subrasantes problemáticas no pavimentadas de esta región mediterránea argentina.

El geopolímero conformado por silicato de sodio-cal hidratada-limo loésico, presenta una performance similar o superior a geopolímeros con silicatos de calcio o sílice-alúmina presentados en la sección 1, especialmente en CBR (aumenta casi 1000%) y resistencia al corte no drenado (mejora 500%). Presentan similar rango de desempeño en reducción del colapso inicial y pérdida de masa en el ensayo de durabilidad (<4%), lo que potencia esta investigación.

6 – CONSIDERACIONES FINALES

El suelo problemático erodable y colapsable de la subrasante estabilizada en el campo “La Toma” de la Universidad Católica de Córdoba, responde a una región rural de la planicie limo-loésica cordobesa; pudiendo ser clasificado como A-4 según el sistema de clasificación de suelos viales de la A.A.S.H.T.O. Presenta illita (Ill) como mineral de arcilla dominante menor a 2 μm .

El nuevo geopolímero estudiado durante casi 10 años, está dosificado en masa con 1 parte de suelo limo-loésico problemático, 4% de cal hidratada y 4% de silicato de sodio sólido 1 L:4C:4S; o si se expresa en volumen sería 25L:1C1:S, siendo posible en este trabajo hacer una reseña de la trazabilidad investigativa desde el diseño experimental de la dosificación óptima en el laboratorio hasta el estudio del monitoreo estacional de dicho geopolímero en un camino no pavimentado de un campo agrícola ganadero.

Con la adición del geopolímero se logra una estabilización química-mecánica de las subrasantes limosas colapsables y erodables en base a la incorporación de hidróxido de calcio (cal hidratada, $Ca(OH)_2$) y metasilicato de sodio en estado sólido y seco (Na_2SiO_3). La cal suple la falencia de calcio natural en el suelo y el silicato de sodio conglera la reacción química.

Este suelo limo-loésico (A-4) analizado, luego de ser mejorado y estabilizado con el geopolímero propuesto, cumple con los requerimientos locales de aptitud para una sub-rasante vial, mejorando notablemente sus aspectos tenso-deformacionales. Las principales ventajas geotécnicas como viales al utilizar este geopolímero en la estabilización de subrasantes rurales de limo de Córdoba respecto al suelo natural existente son: aumenta casi 10 veces el valor $CBR_{2,5mm}$, aumenta un 500% la resistencia al corte no drenado en rotura, aumenta 3,5 veces el índice de plasticidad pero sostiene la clasificación de un suelo A-4 como ML en el tiempo, aumenta un 27% más el módulo de elasticidad secante seco en período elástico y aumenta 12,5 veces más el diámetro de los nódulos gelificados in situ respecto a los nódulos de las probetas solicitadas a los distintos ciclos provenientes del ensayo de durabilidad en el laboratorio. Además, disminuye 9 veces la pérdida de masa entre los períodos de secado-humedecimiento. Por ende, de forma análoga se disminuiría el volumen de m^3 a terraplenar ante la erodabilidad producida por el intemperismo climático y el tránsito pesado. De esta forma se puede inferir una disminución del impacto técnico-económico de la rehabilitación anual en este tipo de subrasantes rurales no pavimentadas cordobesas.

La estabilización geopolimérica con metasilicato de sodio y cal hidratada tiene un desempeño similar o superior a geopolímeros basados en escorias de alto horno, cenizas volantes o puzolanas, por lo que se presenta como una solución prometedora y sostenible para mejorar las propiedades geotécnicas y la durabilidad de las subrasantes problemáticas en Córdoba (Argentina), con impactos positivos en la funcionalidad vial y para el mantenimiento de caminos.

7 – AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba (U.C.C.) y al Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET-UNC) por el apoyo brindado. Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto 10220240200067CC01 otorgado por la Secretaría de Investigación y Vinculación Tecnológica de la Universidad Católica de Córdoba, convocatoria 2022.

8 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdila, S. R.; Abdullah, M. M. A. B.; Ahmad, R.; Burduhos Nergis, D. D.; Rahim, S. Z. A.; Omar, M. F.; Sandu, A. V.; Vizureanu, P.; Syafwandi. (2022). *Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A review*. Materials, 15 (1), 375. <https://doi.org/10.3390/ma15010375>
- Alonso, E. E.; Gens, A.; Hight, D. W. (1987). *Special problem soils. General report*. Proceedings of the 9th ECSMFE, 3, pp. 1087-1146.
- Argüello, G. L.; Dohrmann, R.; Sanabria, J. A.; Zahn, E. (2010). *Genetic implications of a retransported loess profile near Córdoba, Argentina*. Journal of South American Earth Sciences, 29(3), 642-649. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.12.003>
- ASTM C 136 (2001). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 422 (2007). Standard test method for particle-size analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 559 (2015). Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 698 (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1067 (2016). Standard test methods for acidity or alkalinity of water. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1557 (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1633 (2017). Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1883 (2014). Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1889 (2000). Standard test method for turbidity of water. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2166 (2016). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2435 (2011). Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 3282 (2015). Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM D 4318 (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4647 (2020). Standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D 6276 (2019). Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bonifaz Moreno, J. A.; Gamarra Sosa, R. E. (2022). *Comparación del silicato de sodio y cemento para la estabilización de la subrasante en la avenida los profesionales, ventanilla 2022* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/109205>
- Chen, M.; Wu, D.; Chen, K.; Cheng, P.; Tang, Y. (2024). *The influence of fly ash-based geopolymer on the mechanical properties of OPC-solidified soil*. Construction and Building Materials, 432, 136591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136591>
- Comisión de Caminos Rurales (2018). *Manual de caminos rurales*. Asociación Argentina de Carreteras. <https://www.aacarreteras.org.ar/pdfs/documentos-tecnicos/MANUAL-CAMINOS-RURALESe-book.pdf>
- Cruz, M. P. (2020). *Caracterización de nódulos en los loess de Córdoba: Algunas consideraciones geotécnicas*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21089.74087>
- Cruz, M. P.; Martin-Schmädke, I. F.; Arnaudo, C. E.; De Juan, M.; Rossi, A. I. (2018). *Durabilidad de subrasantes loésicas estabilizadas con silicato de sodio sólido y cal hidratada*. Memorias del XXIV CAMSIG-Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. XXIV CAMSIG, Salta.
- Cruz, M. P.; Martin-Schmädke, I. F.; Arnaudo, C. E.; Serrano, C.; Moretto, S.; Fernández Bowles, M. S.; Rossi Piccolo, A. I. (2020). *Estabilización de caminos rurales cordobeses. Del laboratorio al campo*. Memorias del XXV CAMSIG. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Posadas.
- Cruz, M. P.; Martin-Schmädke, I. F.; Arnaudo, C. E.; Vigilante, N. (2015). *Estabilización de subrasante loésica con silicato de sodio líquido*. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires. <http://ebooks.iospress.nl/publication/41500>
- Cruz, M. P.; Martin-Schmädke, I. F.; Locati, F. (2023). *Micro y macroestructura de un geopolímero para estabilización vial: Sílice más calcio*. Memorias del XXVI CAMSIG. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Comodoro Rivadavia.
- Disu, A. A.; Kolay, P. K. (2021). *A critical appraisal of soil stabilization using geopolymers: The past, present and future*. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 7 (2), 23. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00267-w>
- Gaitán, J. J.; Navarro, M. F.; Tenti Vuegen, L. M.; Pizarro, M. J.; Carfagno, P. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina* (1ra ed.). INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/1981>
- Galindo Torres, J.; Avellaneda Moreno, E. (2016). *Análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos*. Universidad Francisco José de Caldas.
- Hurley, C. H.; Thornburn, T. H. (1971). *Sodium silicate stabilization of soils. A review of the literature*. University of Illinois.

- INTA; MAGyRR (1992). *Carta de suelos de la República Argentina: Hoja 3163-27, Arroyito*. INTA. <http://suelos.cba.gov.ar/ARROYITO/index.html>
- Jalal, F. E.; Xu, Y.; Jamhiri, B.; Memon, S. A. (2020). *On the recent trends in expansive soil stabilization using calcium-based stabilizer materials (CSMs): A comprehensive review*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020 (1). <https://doi.org/10.1155/2020/1510969>
- Jiang, M.; Li, T.; Thornton, C.; Hu, H. (2017). *Wetting-induced collapse behavior of unsaturated and structural loess under biaxial tests using distinct element method*. *International Journal of Geomechanics*, 17 (1), 06016010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000693](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000693)
- Kamiloğlu, H. A.; Kurucu, K.; Akbaş, D. (2024). *Investigating the effect of polypropylene fiber on mechanical features of a geopolymer-stabilized silty soil*. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28 (2), pp. 628-643. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0488-z>
- Li, P.; Vanapalli, S.; Li, T. (2016). *Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (2), pp. 256-274. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.002>
- Liu, P.; Dai, F.; Huang, Z.; Wu, J. (2024). *The difference in shear behavior and strength between loess and paleosol and their prediction of unsaturated strength*. *Applied Sciences*, 14 (8), 3301. <https://doi.org/10.3390/app14083301>
- Moloisane, R. J.; Visser, A. T. (2014). *Evaluation of the strength behavior of unpaved road material treated with electrochemical-based non-traditional soil stabilization additives*. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 56 (1), pp. 28-39. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192014000100004&lng=en&tlng=en
- Moore, D. M.; Reynolds, R. C. (1997). *Diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. *Geological Magazine*, 135 (6), pp. 819-842. <https://doi.org/10.1017/s0016756898501501>
- Moretto, S. (2006). *Estabilización de suelos loésicos colapsibles mediante inyecciones a base de silicato de sodio*. Universidad Católica de Córdoba.
- National Lime Association (2006). *Technical brief: Mixture design and testing procedures for lime stabilized soil*. National Lime Association.
- Rahman, M. M.; Gassman, S. L.; Islam, K. M. (2023). *Effect of moisture content on subgrade soils Resilient modulus for predicting pavement rutting*. *Geosciences*, 13 (4), 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
- Raj, R.; Yadav, B.; Yadav, J. S.; Kumar, S. (2025). *Advancement in soil stabilisation process by utilising fly ash-red mud geopolymer: A comprehensive review*. *Discover Materials*, 5 (1), 216. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00392-7>
- Ramos-Scharrón, C. E. (2018). *Land disturbance effects of roads in runoff and sediment production on dry-tropical settings*. *Geoderma*, 310, pp. 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.035>
- Rico Rodríguez, A.; del Castillo, H (2011). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas* (1a ed.). Limusa.

- Riquetti, N. B.; Mello, C. R.; Leandro, D.; Guzman, J. A.; Beskow, S. (2022). *Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America*. Journal of Environmental Management, 321, 115933. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115933>
- Rocca, R. J.; Redolfi, E. R.; Terzariol, R. E. (2006). *Características geotécnicas de los loess de Argentina*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6 (2). https://www.scipedia.com/public/Rocca_et_al_2006a
- Sanabria, J. A.; Argüello, G. I.; Dasso, C. M. (2004). *Erosión hídrica en el centro de la provincia de Córdoba. Caracterización general*. Sinergia 2004. Primer Congreso de Geotecnia, Presas y Geología, Córdoba.
- Sayago, J. M. (1981). *Rasgos geomorfológicos del territorio argentino. Unidades morfoestructurales*. En Atlas Total de la República Argentina (pp. 284-285). Centro Editor de América Latina.
- Simón, C.; Pagés, F. (2017). *Aplicación en estacionamientos de la Facultad de Ciencias Químicas en el Campus de U.C.C.* Universidad Católica de Córdoba.
- Wang, J.; Liu, W.; Lin, G. (2025). *Saturation effects on the undrained shear behavior of loess: Application to static liquefaction*. Natural Hazards, 121 (10), pp. 11401-11422. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07236-w>
- Wu, D.; Zhang, Z.; Chen, K.; Xia, L. (2022). *Experimental investigation and mechanism of fly ash/slag-based geopolymers-stabilized soft soil*. Applied Sciences, 12 (15), 7438. <https://doi.org/10.3390/app12157438>
- Xie, W.; Li, P.; Zhang, M.; Cheng, T.; Wang, Y. (2018). *Collapse behavior and microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China*. Journal of Mountain Science, 15(8), pp. 1642-1657. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5006-2>
- Yang, Y.; Yu, S.; Hu, A.; Cao, Y.; Bai, Y. (2025). *Mechanical properties and damage model of alkali activated polymer solidified soil containing coal gangue powder*. Scientific Reports, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03525-3>
- Yang, Y.; Yu, S.; Ma, X.; Hu, A.; Li, P. (2024). *Investigation of engineering properties and solidification mechanism of loess by sodium silicate alkali-activated coal gangue powder*. Advances in Civil Engineering, 2024 (1). <https://doi.org/10.1155/2024/7718335>
- Zur, A.; Wiseman, G. (1973). *A study of collapse phenomena of an undisturbed loess*. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2.2, pp. 265-268.