

# Estudio del sulfato de magnesio como estabilizador superficial en caminos no pavimentados

**Marcelo Gastón Bustos, Pablo Girardi Mancini, Paula Florencia Cortez Barrera, Sol Agustina Bustos Barber, Leonardo Jaime Fullana**

Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Facultad de Ingeniería UNSJ, Argentina

Contacto: [mbustos@eicam.unsj.edu.ar](mailto:mbustos@eicam.unsj.edu.ar)



## RESUMEN

En zonas áridas, la conservación de las rutas sin pavimentar requiere un elevado consumo de maquinaria, recursos humanos, económicos y agua para el riego periódico de las mismas. Se han utilizado productos de estabilización superficial consistentes en sales de cloruros de magnesio, potasio, calcio, etc., para mantener transitable el camino, y reducir la emisión de polvo debida al tránsito vehicular. No obstante, la mayor parte de estos productos son importados y tienen altos costos de transporte.

Este trabajo presenta una serie de estudios llevados a cabo para evaluar la factibilidad de utilizar al sulfato de magnesio natural, extraído localmente en San Juan, como producto alternativo de estabilización superficial. Los estudios de laboratorio y pruebas de campo desarrolladas permitieron efectuar las siguientes recomendaciones para optimizar el uso del sulfato de magnesio con dicho propósito:

- Utilizar alrededor de un 3% de sulfato de magnesio disuelto.
- Emplear materiales granulares de buena calidad, con muy reducida cantidad de finos no plásticos.

- Considerar espesores entre 5 a 7 cm para el material granular tratado.

Bajo estas recomendaciones, el material tratado muestra un desempeño aceptable y resulta competitivo frente a otras sales y productos que se utilizan actualmente en el ámbito de la conservación vial.

## ABSTRACT

In arid regions, maintenance of unpaved roads requires a high consumption of machinery, human and economic resources, and water for the periodic irrigation of those roads. Surface stabilization products consisting of salts of magnesium chlorides, potassium, calcium, etc., have been used to keep the road passable, and reduce dust emission due to vehicular traffic. However, most of these products are imported and have high transport costs.

This paper presents a series of studies carried out to evaluate the feasibility of using natural magnesium sulfate, extracted locally in San Juan, as an alternative product of surface stabilization. Laboratory studies and field tests were performed, arriving to the following recommendations, to optimize the use of magnesium sulfate:

- Use about 3% dissolved magnesium sulfate.
- Use good quality granular materials, with very small amount of non-plastic fines.
- Consider thicknesses between 5 to 7 cm for the treated granular material.

Following these recommendations, the treated material shows an acceptable performance, and is competitive with other salts and products currently used in unpaved road preservation.

## INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos de caminos rurales de bajo tránsito, como son los accesos a zonas agrícolas, los que enlazan poblaciones o los usados por las explotaciones mineras, reviste una gran importancia en el desarrollo económico y social de un país.

El tránsito, el clima y la falta de mantenimiento periódico de estos caminos, generan numerosos problemas que no sólo afectan a los usuarios (incremento de los costos de operación de los vehículos), sino también al ambiente (contaminación debido a la emisión de polvo). Una solución a lo anterior expuesto es la estabilización química, con la cual se pueden implementar mejoras factibles, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El sulfato de magnesio natural es un producto mineral que se extrae de canteras y que en la actualidad se utiliza principalmente como fertilizante en la mayoría de las producciones agrícolas, por su importante aporte de los macro elementos azufre y magnesio. Sin embargo, existen fundadas expectativas de aprovecharlo también como una sal de estabilización en la superficie de caminos no pavimentados. El mismo presenta notables similitudes con otros productos de amplio uso en estas actividades, tales como el cloruro de magnesio hexahidratado (bischofita). El mayor problema es que no hay protocolos de utilización en terreno que se hayan desarrollado para el sulfato de magnesio, por lo tanto, se desconoce la forma en que se debería aplicar en la práctica. Existen protocolos para el uso de materiales similares, como la bischofita, pero es necesario elaborar un sistema de lineamientos propio y específico para el sulfato de magnesio, para que pueda ser utilizado de manera eficiente en el terreno.

### Uso de sales químicas para la estabilización de caminos sin pavimentar

Durante las últimas décadas surgieron opciones basadas en productos de estabilización superficial consistentes en sales de cloruros de magnesio, potasio, calcio, etc., que permiten mantener el camino en mejor estado y reducir la emisión de polvo debida al tránsito vehicular. En San Juan se

llevaron a cabo diversos estudios para determinar la conveniencia de uso del cloruro de magnesio hexahidratado (bischofita), también por parte de la EICAM [1]. El cloruro de magnesio se aplica sobre el material granular de dos maneras [3]:

- Como *riego o tratamiento supresor de polvo (TSP)*, que se aplica directamente regando el mineral disuelto en agua sobre el camino previamente reacondicionado;
- Como *estabilizador superficial*, donde el mineral disuelto se mezcla íntimamente con el material granular en un cierto espesor de la capa superficial y luego se lo compacta.

Bajo la primera forma de aplicación, se forma una película o “costra” superficial que aísla al material granular subyacente. Esta aplicación tiene una efectividad de duración limitada. A los pocos meses es necesario renovar los riegos de cloruro de magnesio disuelto, para prolongar su utilidad.

Al ser aplicado como estabilizador de un cierto espesor superficial, si bien se requiere una proporción superior de mineral, la posterior mezcla y compactación del conjunto permite lograr una superficie homogénea, dura y resistente, que tiene una vida útil claramente superior a la opción de TSP, con un mayor costo de inversión inicial. Estos resultados se deben principalmente al efecto del magnesio, que actúa como “aglutinante” de las partículas de material granular y absorbe humedad del medio ambiente, dándole a la superficie un aspecto de estar recientemente regada, en todo momento.

### Alternativas con productos locales: sulfato de magnesio

Una desventaja importante de sales como la bischofita, es que son importados y tienen altos costos de transporte. Frente a esto, se plantea la opción de usar productos similares, de obtención y elaboración local, como el sulfato de magnesio.

En el departamento Calingasta, provincia de San Juan, existen yacimientos minerales de sulfato de magnesio hepta-hidratado ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ). Actualmente, el sulfato de magnesio tiene múltiples usos en los campos agrícola, medicinal e industrial. Pero se pudo apreciar empíricamente que el sulfato de magnesio disuelto en agua, aplicado en forma puntual y accidental sobre caminos no pavimentados, durante la fase de transporte desde las canteras de producción hacia las zonas de consumo, generaba un notorio endurecimiento de la capa superior de dichos caminos. Ello motivó la necesidad de ampliar los estudios, para analizar la aplicabilidad del sulfato de magnesio en el ámbito vial, como estabilizador de caminos sin pavimentar.

## METODOLOGÍA DE ESTUDIO, ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Metodología

La metodología propuesta para el proyecto se estructura en las siguientes etapas:

- Análisis de antecedentes.
- Definición de parámetros a investigar.
- Diseño o adaptación de estudios en laboratorio de materiales tratados con sulfato de magnesio.
- Desarrollo de pruebas en tramos testigos.
- Elaboración de lineamientos y protocolos para la aplicación de sulfato de magnesio.

#### Definición de parámetros a investigar

En primer lugar, se llevó a cabo un estado del arte sobre los antecedentes del tema en estudio, incluyendo un resumen de técnicas y metodologías de mantenimiento de caminos rurales. De los diversos artículos consultados, principalmente asociados a estudios sobre bischofita, se destacan las siguientes conclusiones, que pueden servir de guía para este estudio.

- La dosis recomendada varía entre el 3% y el 5% del peso de suelo seco. Además, está en función de la plasticidad del suelo.
- A mayor IP (máx 15), disminuye la cantidad requerida de bischofita.
- A mayor porcentaje de finos, disminuye la cantidad requerida de bischofita.
- LL máx 35.
- Absorbe humedad cuando la humedad relativa HR > 32%.

A partir de estas recomendaciones, se llevó a cabo el diseño experimental para evaluar probetas cilíndricas de material tratado con solución del sulfato de magnesio al 30% diluido en agua (concentración eutéctica). Se analizaron como variables:

- Tipos de materiales, con diferentes granulometrías.
- Porcentajes diferentes de sulfato de magnesio en las probetas.
- Niveles diferentes de energía de compactación.

#### Primera etapa de ensayos de laboratorio

Primeramente, se decide estudiar distintos tipos de suelos, con distinta granulometría y propiedades. El primer suelo estudiado es un suelo de sub-base utilizado en el paquete estructural de la RN40 en el tramo comprendido entre la RP155 y RP179 (Muestra N°1). El segundo suelo es un suelo fino, obtenido de los alrededores de la zona del obrador, ubicado en calle 6 y RN40 (Muestra N°2). Por último, se decidió hacer un tramo testigo, por lo que el tercer suelo analizado se obtuvo del Boulevard de

ingreso al obrador (Muestra N°3). A cada uno de los suelos se le realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg y densidad Proctor, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de las muestras.

MUESTRA DE SUELO		Muestra N°1	Muestra N°2	Muestra N°3
GRANULOMETRÍA	1 ½"	97,9%	100%	99,6%
	1"	83,2%	97,2%	70,7%
	¾"	74,1%	96,6%	55,3%
	½"	55,0%	95,2%	40,7%
	3/8"	49,6%	94,9%	39,2%
	#4	36,8%	94,0%	35,0%
	#10	31,1%	93,6%	33,5%
	#40	23,7%	93,0%	31,4%
	#200	5,1%	68,9%	22,9%
LL	-	28,4	26,8	
LP	-	19,9	16,8	
IP	-	8,5	10	
Clasificación HRB	A-1-a	A-4	A-2-4	
Clasificación SUCS	GW	ML	GC	
yd máx.	2,253	1,739	2,122	
ω ópt	6,1%	15,5%	8,0%	

Para la Muestra N°1 se moldearon probetas con humedad óptima estimada teniendo en cuenta el aporte de la solución de sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ). Se analizaron distintos contenidos de  $MgSO_4$  y se observó el comportamiento del material resultante en cada caso, como así también la variación de la densidad seca del suelo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2 y el Gráfico 1.

Tabla 2: Determinación de densidad en Muestra N°1

% H <sub>2</sub> O	% MgSO <sub>4</sub>	ω (%)	γ <sub>s</sub>
6,1%	0,0%	6,12%	2,253
5,1%	1,0%	5,91%	2,199
4,1%	2,0%	5,68%	2,229
3,1%	3,0%	5,85%	2,229
2,1%	4,0%	5,73%	2,221
1,1%	5,0%	5,68%	2,233

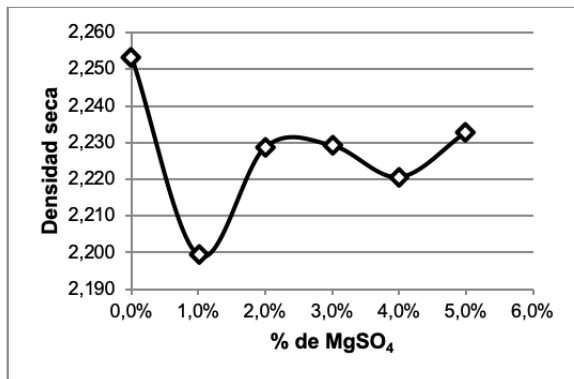


Gráfico 1: Variación de densidad en función del contenido de MgSO<sub>4</sub>.

- A menor contenido de MgSO<sub>4</sub>, las muestras secan más rápido.
- La muestra con 4% de MgSO<sub>4</sub> se secó en horno y se dejó enfriar a la intemperie hasta el día siguiente a primera hora. La misma había absorbido humedad.
- La muestra con 5% de MgSO<sub>4</sub> se secó en horno y se dejó enfriar en el horno hasta el día siguiente a primera hora. La misma seguía presentando humedad, había endurecido un poco, pero fue fácil desmenuzarla.
- A menor contenido de MgSO<sub>4</sub>, mayor dureza y "aglutinamiento" entre materiales. Por esta razón, se decidió seguir trabajando con bajos contenidos de MgSO<sub>4</sub>.

Como siguiente paso, se acordó realizar sobre las probetas moldeadas el ensayo de Estabilidad y Fluencia de Marshall. El mismo se aplica a mezclas asfálticas preparadas en caliente, pero al ser una investigación experimental y no existir ensayos estandarizados para enripiados tratados, se planteó como un ensayo factible para la determinación de la resistencia.

Se establecieron cuatro niveles de contenido de MgSO<sub>4</sub> con tres niveles de compactación, y se moldeó una probeta por cada combinación.

- Contenido de MgSO<sub>4</sub>: 0,5% - 1% - 1,5% - 2%.
- N° de golpes: 25 - 40 - 75.

Las probetas se moldearon un día viernes, y se dejaron a temperatura ambiente en el laboratorio durante el fin de semana, ensayándolas el lunes siguiente. Los resultados se muestran en el Gráfico 2. Los valores más altos de estabilidad se obtuvieron con un 2% de sulfato de magnesio para compactaciones entre 25 y 40 golpes. Para 75 golpes la variación de la

estabilidad en función del porcentaje de MgSO<sub>4</sub> es muy poca y los valores resultan sostenidamente altos.

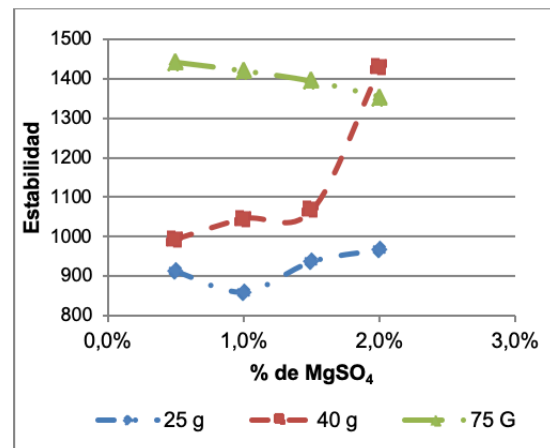


Gráfico 2: Estabilidad Marshall de material de Muestra N° 1.

Para la Muestra N°2 (material con alto contenido de finos) se moldearon probetas a humedad óptima con cuatro niveles de contenido de MgSO<sub>4</sub> y dos niveles de compactación.

- Contenido de MgSO<sub>4</sub>: 4% - 5% - 6% - 7%.
- N° de golpes: 25 - 40.

Los resultados obtenidos se observan en el Gráfico 3. Si bien los valores de estabilidad no fueron tan bajos, se decidió no recomendar el uso de este material por su gran contenido de finos, además de tener material orgánico por encima de los límites aceptables.

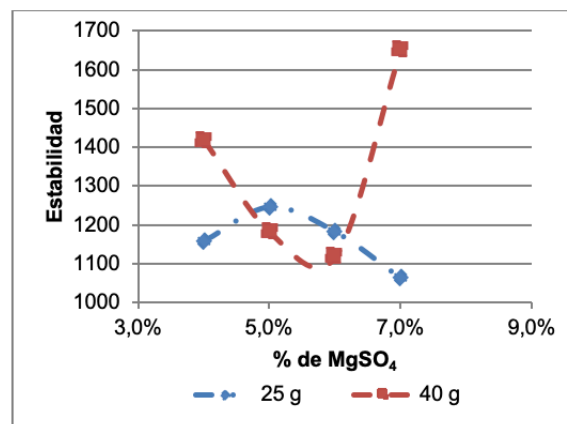


Gráfico 3: Estabilidad Marshall de material de Muestra N° 2.

Finalmente, con el material de la Muestra N° 3, también se moldearon probetas siguiendo lo establecido por la norma, con cuatro niveles de contenido de MgSO<sub>4</sub> y dos niveles de compactación, con tres probetas por cada combinación.

- Contenido de MgSO<sub>4</sub>: 1% - 2% - 3% - 4%.
- N° de golpes: 25 - 40.

Los principales resultados obtenidos se observan en el Gráfico 4. Se puede apreciar que incrementar el contenido de sulfato de magnesio por

encima del 2% no se traduce en un incremento de Estabilidad, independientemente de la energía de compactación aplicada.

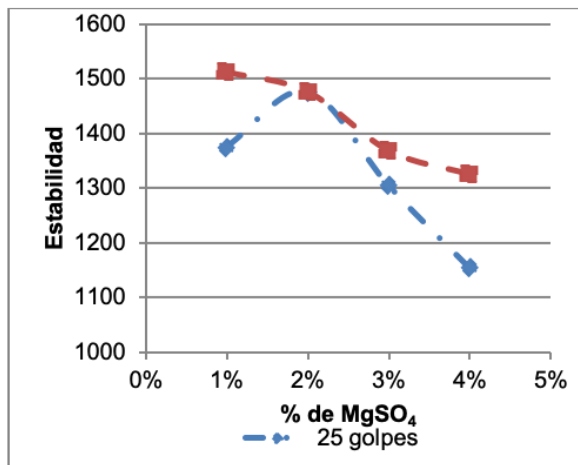


Gráfico 4: Estabilidad Marshall de material de Muestra N° 3.

También se observa que para valores de 1% o 4% de contenido de MgSO<sub>4</sub>, la estabilidad con 40 golpes es entre un 15% y un 20% mayor que la estabilidad con 25 golpes. Esta diferencia es menor para contenidos de MgSO<sub>4</sub> del 2% y 3%. Se concluye que estas últimas pueden ser dosis apropiadas ya que no dependen tanto de la energía de compactación y son proporciones similares a las dosis sugeridas para el uso de la bischofita [3].

A fines de determinar el grado de compactación que representan 25 y 40 golpes, y de esta manera, conocer si es factible o no lograr en campo el grado de compactación que se logra en laboratorio, se decide moldear nuevas probetas y determinar la densidad seca máxima de cada una para compararla con la densidad Proctor obtenida en primera instancia. Se respetaron las condiciones de contenidos de MgSO<sub>4</sub>. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Grado de compactación de material de Muestra N°3

Contenido de MgSO <sub>4</sub>	N° golpes	Grado de Compactación
1%	25	83,8%
	40	83,5%
2%	25	84,1%
	40	85,1%
3%	25	85,4%
	40	84,2%
4%	25	85,6%
	40	83,6%

Se observa en la Tabla 3 que el grado de compactación que se logra en laboratorio es posible reproducirlo en campo. Incluso en campo se logran mayores grados de compactación que puede traducirse en un aumento de la resistencia del material tratado. Se concluye que trabajar con 25 y 40 golpes es factible ya que los resultados de laboratorio pueden compararse con los de campo.

Además, se estudió la pérdida y/o ganancia de humedad que sufre una probeta con determinado contenido de MgSO<sub>4</sub> y número de golpes. Dicha evaluación se realizó para las muestras N°1 y N°3. Las mediciones se realizaron diariamente a primera hora de la mañana (8hs), al mediodía (12hs), en la siesta (16hs) y al anochecer (20hs), en el mes de febrero, registrando el peso de cada una de las probetas, en simultáneo con la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento.

Los resultados no mostraron variaciones significativas en el peso de las probetas, por lo cual no pudo comprobarse si el sulfato de magnesio es higroscópico como tampoco la humedad relativa a la cual éste comienza a absorber la humedad circundante.

En la Figura 1 se muestran fotos de las actividades desarrolladas en esta etapa de laboratorio.



Figura 1: Tareas llevadas a cabo durante la primera etapa de estudios de laboratorio.

### Tramos testigos

Se decidió realizar una prueba a escala real dentro del obrador de la RN40, debido que al tránsito que circula por el boulevard del mismo, es tránsito pesado comprendido por camiones y maquinaria.

Se construyeron tramos de prueba a escala real con capas de rodadura estabilizadas con MgSO<sub>4</sub>, con una extensión de 50m. Además, se construye-

ron tramos patrones (no estabilizados con  $MgSO_4$ ) para comparar el comportamiento funcional y estructural. El ancho de calzada de los tramos es de 4m y el espesor de la capa de rodadura varía entre 5 y 10cm, como se muestra en la Figura 2.

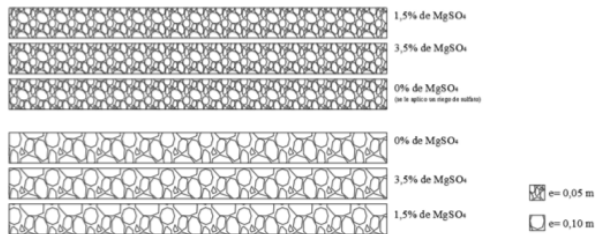


Figura 2: Croquis de los distintos tramos testigos.

Luego de la construcción, se realizaron mediciones de emisión de polvo con vehículos circulando a una velocidad de 50 km/h. Debido al alto porcentaje de materiales finos que contiene el material de la Muestra N°3, no se pudo registrar una diferencia importante entre el polvo emitido en tramos estabilizados respecto de los tramos sin tratar, ya que en todos los casos hubo una importante emisión de polvo.

La enseñanza de este experimento es que es necesario cuidar la calidad del material empleado, ya que, si tiene un porcentaje de finos elevado, el sulfato de magnesio pareciera perder gran parte de su eficacia como aglutinador de partículas del material granular tratado.

### Segunda etapa de ensayos de laboratorio

A partir de los resultados obtenidos en la primera etapa, se procedió a realizar una segunda fase de estudios de laboratorio. En este caso, se buscó optimizar la proporción de sulfato de magnesio, confeccionando probetas cilíndricas moldeadas en tubos de PVC de 110 mm de diámetro, con las siguientes variables del análisis:

- 2 tipos de material granular, provistos desde obras de la DNV:
  - Material con las características de una capa de base
  - Material con características de subbase granular (mayor cantidad de finos)
- 2 espesores de moldeo de las probetas: 7 cm y 10 cm respectivamente
- 4 niveles de porcentaje de solución de sulfato de magnesio (1% - 2% - 3% - 4%)

Se confeccionaron 3 probetas para cada combinación de variables. Cada probeta se moldeó con la humedad óptima del 5,1% obtenida previamente, compactada manualmente con pisón con 40 golpes, una vez dentro del molde. La humectación incluye a la parte acuosa de la solución de sulfato

de magnesio, tal como se había hecho en la primera etapa de estudios de laboratorio. Las probetas se dejaron secar al menos 48hs en el laboratorio, y luego se determinó la carga de rotura a compresión axial no confinada, para cada una de las probetas moldeadas (Figura 3).



Figura 3: Determinación de la resistencia a la compresión axial no confinada.

En los Gráfico 5 y Gráfico 6, se representan las resistencias promedio que se observaron en las probetas, para los dos tipos de materiales utilizados, en función del porcentaje de sulfato de magnesio y del espesor de la probeta.

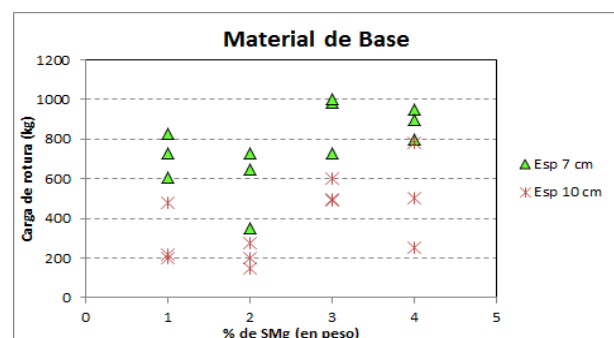


Gráfico 5: Resistencia a la compresión axial no confinada, material de base.

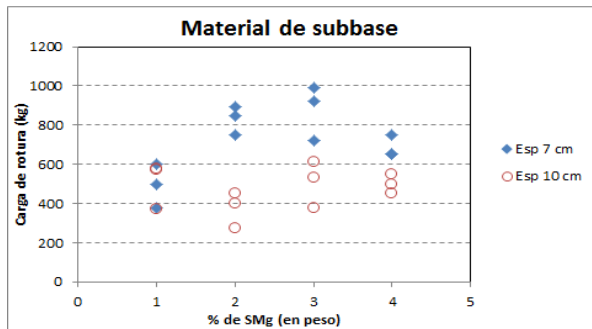


Gráfico 6: Resistencia a la compresión axial no confinada, material de subbase.

Analizando los resultados obtenidos, en primer lugar, puede apreciarse que las resistencias son sistemáticamente mayores en las probetas de 7 cm que en las de 10 cm de espesor, lo cual indica la conveniencia de trabajar con espesores menores a 10 cm. Los valores de resistencia más bajos para espesores de 10 cm podrían deberse al efecto negativo de la mayor esbeltez de la probeta para un espesor más alto, considerando que el diámetro era fijo para todas las probetas.

Asimismo, en ambos tipos de materiales, la adición del 3% de sulfato de magnesio es la que permite obtener las mayores resistencias. Las probetas con 2% de  $MgSO_4$  muestran un comportamiento poco claro, ya que sería esperable que presentasen mayores resistencias que las probetas con 1% de estabilizante, pero ello no ocurrió así, salvo para probetas con material de subbase y espesor 7 cm.

Los resultados obtenidos permitieron incluso proponer un modelo estadístico polinomial cúbico de la carga de rotura, predicha en función del porcentaje de  $MgSO_4$  y del espesor de la probeta en cm, con todos los parámetros estadísticamente significativos al 95% de confianza, y que se presenta a continuación:

$$Carga [kg] = 2103,9 - 105,56 \times Esp - 1208,13 \times MgSO_4 + 586,87 \times MgSO_4^2 - 80 \times MgSO_4^3 \quad (1)$$

$$N = 16; R^2 = 0,71; SEE = 113,7$$

En el Gráfico 7 se muestra el ajuste entre datos predichos y observados, pudiéndose observar que el tipo de material no establece una mejora significativa, y por eso no forma parte del modelo desarrollado.

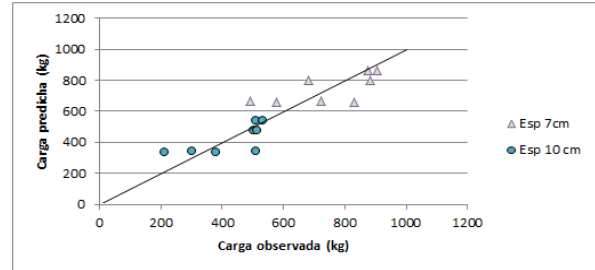
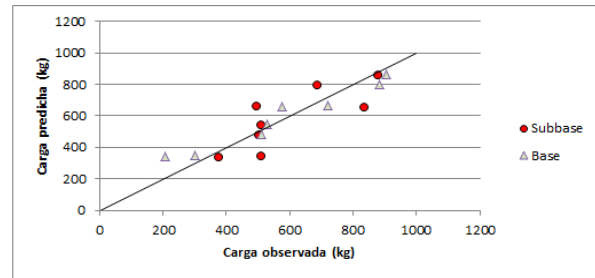


Gráfico 7: Ajuste de valores predichos vs observados, en el modelo elaborado para predecir la carga de rotura.

Este modelo es preliminar y debe ser validado con un mayor volumen de datos de laboratorio. Pero marca una clara tendencia en cuanto a la cantidad presuntamente óptima de sulfato de magnesio a adicionar, en el orden del 3% y la conveniencia de reducir los espesores tratados con este producto, o al menos de no aplicarlo con espesores superiores a 7 cm.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el proyecto, las recomendaciones de utilización serían las siguientes, como base para la futura elaboración de un protocolo de uso del sulfato de magnesio para estabilización superficial en caminos no pavimentados:

Aplicar en torno al 3% de sulfato de magnesio disuelto.

Uso de materiales de mejor calidad, con muy reducida cantidad de finos no plásticos.

Considerar espesores tratados más reducidos. Se sugiere utilizar espesores bajos, no superiores a 5 / 7 cm.

Un aspecto adicional a mencionar es que, sobre fines del año 2019, se confeccionaron algunas probetas con 3% de sulfato de magnesio, para ser ensayadas a 3, 7, y 14 días. Los resultados no permitieron afirmar que la resistencia se incrementase progresivamente a medida que transcurría el tiempo. No obstante, este aspecto se debiese investigar con mayor cantidad de probetas y en un tiempo más prolongado, ya que fueron ensayadas

muy pocas probetas y el plazo fue bastante corto en relación al tiempo total que estas estructuras están expuestas al tránsito.

Otro aspecto a analizar en próximas investigaciones, es la adición de material fino plástico, que no estuvo presente en los materiales evaluados dentro de este estudio, y que, de acuerdo a experiencias previas con otras sales de estabilización, resultaría conveniente para reducir la cantidad necesaria de estabilizante químico a agregar en el material.

## REFERENCIAS

- [1] Bustos, M., Girardi, P., Cordo, O. y Hidalgo, J. (2011). *Experiencias en la aplicación de Bischofita para la conservación de caminos enripiados en la provincia de San Juan*. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina.
- [2] Bustos, M., y Cordo, O. (2011). *Evaluación de la aplicabilidad de estabilizadores químicos en caminos no pavimentados*. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina.
- [3] Thenoux, G. y Vera S. (2001). *Evaluación de la efectividad del cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita) como estabilizador químico de capas de rodadura granulares*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.