

Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad

Evaluation of Technologies for Stabilization of Road Soils Using Accelerated Weathering. A Strategy for Analysis of Impacts on Biodiversity

Eliana Llano  ¹, Diana Ríos ²
Gloria Restrepo ³

Recibido: 13 de marzo de 2020

Aceptado: 24 de junio de 2020

Cómo citar / How to cite

E. Llano, D. Ríos, G. Restrepo, "Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad", *TecnoLógicas*, vol. 23, no. 49, pp. 185-199, 2020.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1624>



- ¹ Ingeniera Química, Grupo de Investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados PFA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, Eliana.llano@udea.edu.co
- ² Ingeniera Química, Grupo de Investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados PFA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, dpatricia.rios@udea.edu.co
- ³ PhD. en Ciencias Químicas, Grupo de Investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados PFA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, gloria.restrepo1@udea.edu.co

Resumen

La construcción de infraestructura vial genera impactos directos sobre la biodiversidad como la fragmentación del hábitat; muerte de animales por atropellamiento; deforestación, contaminación por ruido y material particulado; y deterioro y agotamiento de recursos naturales por la explotación de fuentes de materiales. La estabilización química se presenta como una solución técnica, económica y ambientalmente sostenible, que consiste en el uso de aditivos químicos para mejorar las propiedades ingenieriles del suelo. En esta investigación se evalúan distintas tecnologías de estabilización bajo condiciones de intemperismo acelerado, para establecer su efecto en el desempeño y durabilidad de suelos viales, así como posibles impactos sobre la biodiversidad en comparación con el uso de materiales tradicionales de construcción. Se estudiaron siete productos químicos que fueron aditivados sobre un suelo previamente caracterizado y clasificado. Se compactaron probetas teniendo en cuenta los parámetros obtenidos en el proctor estándar y estos especímenes se sometieron a ciclos continuos de luz ultravioleta (UVA) y de condensación en cámara de intemperismo acelerado QUV-SPRAY/240 a tiempos de exposición de 0, 108, 216, 324, 432 y 540 h. Para cada tiempo se midió pH, conductividad y resistencia a la compresión no confinada. Los resultados mostraron un buen desempeño de los sistemas aditivados al presentar mayores resistencias mecánicas respecto al suelo natural, destacándose los productos de naturaleza puzolánica. Por otra parte, se observa que, al aplicar estos productos, el suelo conserva características del suelo natural, menores emisiones de material particulado y menores tasas de absorción de calor respecto a una estructura de pavimento tradicional. La evaluación bajo condiciones de intemperismo acelerado permite estimar el desempeño a largo plazo y la vida útil de estos materiales; así como evidenciar ventajas desde el punto de vista ambiental y de conservación de la biodiversidad, por la mitigación de impactos como el efecto borde al disminuir condiciones de temperatura superficial en las carreteras.

Palabras clave

Materiales para estabilización química, suelos arcillosos, intemperismo sobre suelos viales, infraestructura vial sostenible, caracterización fisicoquímica y mecánica.

Abstract

Road infrastructure construction generates direct impacts on biodiversity such as habitat fragmentation; death of animals by run over; deforestation, noise pollution and particulate matter; deterioration and depletion of natural resources due to the exploitation of sources of materials. Chemical stabilization is presented as a technical, economically and environmentally sustainable solution, which consists in the use of chemical additives to improve the engineering properties of the soil. This investigation evaluates different stabilization technologies under conditions of accelerated weathering, to establish its effect on performance and durability of road soils, as well as possible impacts on biodiversity compared to the use of traditional building materials. Seven chemicals were studied that were added on a soil previously characterized and classified. Specimens were compacted with the parameters obtained in the standard proctor and these specimens were subjected to continuous cycles of ultraviolet light (UVA) and condensation in QUV-SPRAY / 240 Accelerated Weathering Chamber at exposure times: 0, 108, 216, 324, 432 and 540 h. For each time, pH, conductivity, unconfined compressive strength and direct shear test were measured. The results obtained showed a good performance of the additive systems by presenting greater mechanical resistance with respect to the natural soil, this effect is especially greater in pozzolanic products. On the other hand, it is observed that when applying these products, the soil retains characteristics of the natural soil, lower emissions of particulate material and lower rates of heat absorption compared to a traditional pavement structure. The evaluation under conditions of accelerated weathering allows to estimate the long-term performance and the useful life of these materials; show advantages from an environmental and biodiversity conservation point of view, by mitigating impacts such as the edge effect by decreasing surface temperature conditions on roads.

Keywords

Chemical stabilization materials, clay soils, weathering on road soils, sustainable road infrastructure, physicochemical and mechanical characterization.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización es una técnica para mejorar las propiedades ingenieriles de un suelo física o mecánicamente; sin embargo, el término "estabilización" se refiere principalmente a mejoras en las propiedades del suelo mediante la adición de productos químicos [1]. En este sentido, la estabilización química es un procedimiento que ha surgido como alternativa para mejorar propiedades de los suelos tales como plasticidad, permeabilidad, compresibilidad, resistencia mecánica (incluida resistencia al corte y resistencia a la compresión), deformación, inestabilidad volumétrica, asentamiento, cantidad de partículas de arcilla / limo, módulo elástico y durabilidad bajo condiciones ambientales desfavorables, erosión y desgaste [2].

Los productos químicos que han sido empleados como aditivos para el mejoramiento de suelos, incluyen una amplia gama de materiales que pueden clasificarse según su naturaleza química en: polímeros, aceites sulfonados, sales, silanos, puzolanas y enzimas [3].

Los aditivos poliméricos líquidos, incluidos varios precursores de polímeros, biopolímeros, resinas y emulsiones, se han utilizado como estabilizantes químicos del suelo para aumentar la resistencia mecánica, mitigar la licuefacción del suelo, reducir la permeabilidad, conductividad hidráulica y mejorar la resistencia a la acción de la intemperie [4], [5], [6]; además, se ha encontrado que estos productos son altamente efectivos para el control de la erosión en suelos arenosos [7].

A su vez, en el caso de suelos arcillosos, los polímeros operan como un agente catalítico de intercambio iónico sobre la fracción activa de las partículas de arcillas, reduciendo el potencial electrostático de las partículas y consecuentemente quitándoles la capacidad para absorber agua. Esta reacción logra que el suelo presente mayor

resistencia ante las cargas de los vehículos y tenga una estabilidad más durable [8].

Los aditivos enzimáticos son proteínas que generalmente se encuentran como catalizadores en sistemas biológicos; se sabe que aceleran la velocidad de reacción sin involucrarse en los productos [9]. En el caso de suelos finos tratados con aditivos enzimáticos, se ha encontrado que estos actúan reduciendo el espesor de la capa de agua que se adhiere a la superficie de las arcillas, y consecuentemente mejoran propiedades del suelo como las características de compactación, la resistencia mecánica y la permeabilidad [10], [11]. Adicionalmente, mediante pruebas de humedecimiento y secado, se han encontrado mejoras en la estabilidad y durabilidad de suelos expansivos tratados con productos enzimáticos [12].

Los aceites sulfonados son agentes catalizadores que producen intercambio de iones; químicamente son compuestos orgánicos derivados de sulfuros y ácidos combinados. La función más importante de estos aceites es la reducción del agua contenida entre las partículas del suelo, aumentando el número de vacíos que permiten el reacondamamiento de las partículas, bien sea por atracción entre ellas o bien por compactación [13]. El uso de aceites sulfonados es altamente efectivo en el tratamiento de suelos arcillosos, se ha encontrado que estos aditivos reducen espacios intersticiales, reducen la permeabilidad, reducen el hinchamiento, mejoran la respuesta a la compactación y aumentan la resistencia del suelo arcilloso [14].

Los organosilanos son productos versátiles usados en construcción en una amplia gama de aplicaciones, como promotores de adhesión, agentes de acoplamiento, agentes de reticulación, agentes dispersantes y modificadores de superficie. Entre las propiedades que se pueden mejorar con el uso de organosilanos se puede resaltar la alta repelencia al agua que presentan los materiales aditivados

con estos productos [15]. Así mismo, se ha encontrado que el uso de estos productos en suelos arcillosos mejora considerablemente la resistencia mecánica y disminuye el coeficiente de permeabilidad [16].

Los estabilizantes de naturaleza puzolánica aportan mejoras significativas en la resistencia mecánica del material.

Las reacciones puzolánicas consisten en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados, en un medio altamente alcalino, generándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento Portland [17].

La existencia de una amplia gama de productos y tecnologías de estabilización química de suelos, hace necesario que se realice una selección adecuada mediante la evaluación de su durabilidad, propiedad que está relacionada con la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tránsito de aquellos suelos cercanos presentes en la superficie de rodadura [18].

Los suelos, y en general todos los materiales expuestos a la intemperie, pueden sufrir deterioros por condiciones ambientales como la lluvia, la radiación UV, el rocío, la humedad; de allí la importancia de poder conocer la incidencia de estos factores, individuales y combinados, sobre sus propiedades [19].

Es así como resulta de gran interés el uso de metodologías como el intemperismo acelerado que permitan simular condiciones ambientales extremas que aceleren el deterioro que pueden sufrir los suelos al estar expuesto por períodos prolongados a condiciones de intemperismo natural [20], [21].

En este trabajo se evaluaron las propiedades fisicoquímicas y mecánicas bajo condiciones de intemperismo acelerado de un suelo arcilloso al ser tratado con productos comerciales de

diferentes naturalezas químicas: polímeros, enzimas, aceites sulfonados, organosilanos y puzolanas. A muestras sometidas a distintos tiempos de envejecimiento se le midió resistencia a la compresión no confinada, índice de plasticidad, pH y conductividad.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para el estudio se usaron los siguientes materiales:

-Suelo. Se empleó un suelo natural proveniente de una vía no pavimentada del municipio de Valencia, departamento de Córdoba (Colombia), el cual se describe como un suelo arcilloso de color pardo rojizo. Este tipo de suelo presenta características muy desfavorables respecto a sus propiedades ingenieriles, tal como se puede apreciar en los datos presentados en la Tabla 1.

Aditivos comerciales

Producto polimérico. Para este estudio se seleccionó un producto comercial de naturaleza polimérica, que consiste de una emulsión acuosa de polímeros de acetatos vinílicos y acrílicos. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 2.

Producto enzimático. Para este estudio se seleccionó un producto comercial de naturaleza enzimática, compuesto de una combinación de enzimas, electrolitos y agentes tensoactivos. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 3.

Aceite sulfonado. Para este estudio se seleccionó un producto iónico comercial, compuesto por un sulfonado de petróleo modificado. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 4.

Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado.
Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad

Tabla 1. Caracterización del suelo. Fuente: elaboración propia.

Ensayo	Resultado
Clasificación AASTHO	A-7-6 (13)
Clasificación SUCS	CL
% Pasante malla 4	99,16
% Pasante malla 40	8585
% Pasante malla 200	72,62
Limite líquido	43
Limite plástico	22
Índice de plasticidad	21
Densidad real (g/cm ³)	2,68
Materia orgánica por ignición (%)	3,9
Contenido de sulfatos (mg so4/g)	0,48

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del producto polimérico
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
Temperatura de ebullición	100°C
Presión vapor (a 20°C)	17 mm Hg
Densidad (g/cm ³)	1,04 a 1,15
Solubilidad en agua	Soluble
Apariencia general	Líquido blanco lechoso / Transparente una vez seco
Olor	Acrílico / Sin olor una vez seco
pH	4,0 a 9,5

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del producto enzimático
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
Apariencia	Líquido verde pálido ligeramente viscoso con olor a hierba
Gravedad Específica @ 20°C	1,0 a 1,1
pH(puro)	3 a 6
Punto de ebullición	>100°C
Miscibilidad con agua	Miscible en todas las proporciones
Punto de inflamación	No inflamable; no combustible
Biodegradabilidad	Reducción DOC >90% después de 28 días
Composición	Mezcla de carbohidratos fermentados, sales inorgánicas y surfactantes

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del aceite sulfonado
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
Densidad (g/cm ³)	1,10
Solubilidad en agua	Soluble
Apariencia general	Líquido verde oscuro
pH	1
Viscosidad (cps)	300/386

Organosilano. Aditivo químico formado por un organosilano cuaternario. De acuerdo con su ficha técnica, contiene cadenas hidrocarbonadas en su estructura.

Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 5.

Puzolanas. Aditivo en polvo formulado a base de zeolitas sintéticas, compuestos inorgánicos de carácter alcalino y activadores químicos de patente, que actúan en el proceso de hidratación del cemento. Sus principales características

físicas y químicas se muestran en la Tabla 6.

Cal. Para este estudio se seleccionó una cal viva comercial con un alto porcentaje de CaO, utilizada para mejoramiento de suelos. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 7.

Cemento. Cemento tradicional tipo Portland. Sus principales características físicas y químicas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del organosilano
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
Punto de inflamación	>90 °C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Densidad (g/cm ³)	1,04
Solubilidad en agua	Soluble
Apariencia general	Líquido rojizo pálido
pH	Disolución al 10 %: neutra o ligeramente ácida
Viscosidad (cps) a 25°C	100-500

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas del producto puzolánico
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
Densidad (g/cm ³)	2,2-2,5
Solubilidad en agua	Disolución muy lenta
Apariencia general	Sólido grisáceo
pH en solución acuosa	10-12

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de la cal
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
CaO + MgO Min.	90%
CO ₂ Max.	5%
Reactividad (ΔT 20min) Min.	30°C
Densidad aparente	+/- 1
Pasante 25 mm	100%
Residuo Max. (ASTM C110)	10%

Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas del cemento
Fuente: autores a partir de la ficha de seguridad del producto comercial.

Propiedad	Resultado
Punto de ebullición	> 1000°C
Gravedad específica	3,5
Solubilidad en agua	Ligero (0,1-1%)
Apariencia general	Polvo gris
pH en solución acuosa	12-13

2.2 Diseño experimental

Se empleó un diseño de experimentos tipo factorial, cuyo desarrollo se muestra en la Fig. 1, este diseño genera un total de 96 unidades experimentales, teniendo en cuenta que todos los experimentos se realizaron por duplicado; adicionalmente, los ensayos se realizaron de manera aleatoria.

Los resultados en cada una de las variables de respuesta se analizaron estadísticamente en el software R, con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis considerando un nivel de significancia $\alpha=0,05$, con el fin de determinar si en

general se presentan diferencias significativas entre los resultados del suelo natural y los sistemas aditivados.

2.3 Preparación de las muestras

El sistema suelo aditivado se preparó adicionando los estabilizantes al suelo natural con las dosificaciones establecidas mostradas en la Tabla 9. Posteriormente, se agregó el agua necesaria para llevar al suelo a su humedad óptima y finalmente se procedió con el mezclado para asegurar la homogeneidad en todo el sistema.

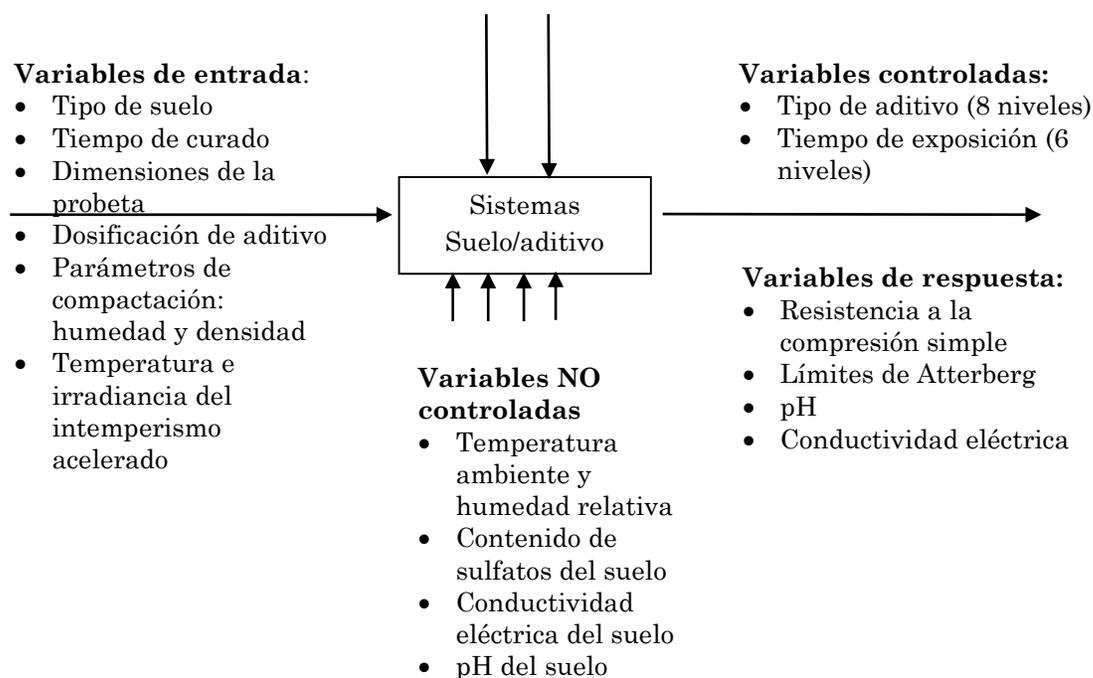


Fig. 1. Esquema del diseño experimental. Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Dosificaciones establecidas para evaluación de estabilizantes
Fuente: elaboración propia.

Estabilizante	Dosificación
Polímero	7330 ml/m ³ ssc
Silano	1882,5 ml/m ³ ssc
Enzima	33 ml/m ³ ssc
Aceite sulfonado	233 ml/m ³ ssc
Zeolita	1,8 Kg/m ³ ssc
Cal	6% peso seco
Cemento	180 Kg/m ³ ssc

Se compactaron probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura para ser sometidas al ensayo de resistencia a la compresión no confinada, corte directo y límites de Atterberg; y probetas rectangulares para tomar muestra para análisis de pH y conductividad. Estas probetas fueron compactadas hasta alcanzar su densidad máxima tomando como base la energía de compactación del Proctor estándar.

Todas las muestras compactadas en laboratorio se sometieron a un ciclo de curado por 7 días en bolsas herméticas para preservar su humedad; posteriormente, fueron sometidos a ciclos continuos de luz ultravioleta (UVA) y de condensación en cámara de intemperismo acelerado QUV-SPRAY/240, de acuerdo con la norma ASTM G 154 «Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials», a 6 tiempos de exposición: 0, 108, 216, 324, 432 y 540 h.

2.4 Caracterización

Tanto el suelo natural como los sistemas aditivados se sometieron a los siguientes análisis.

Determinación de las relaciones densidad – humedad en suelos, Proctor estándar. Basado en la Norma INV- E 141-13: Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación). *Resistencia a la compresión no confinada.* Basada en la norma INV- E

152-13. Compresión inconfiada en muestras de suelos.

Límites de Atterberg. Basado en la Norma ASTM D4318-00S: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity index of soils.

Potencial de Hidrógeno, pH. Basado en la norma NTC 5264. Calidad de suelo.

Determinación del pH.

Conductividad. Basada en la norma NTC 5596. Calidad de suelo. Determinación de la conductividad eléctrica. Resultados y análisis.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Determinación de las relaciones densidad – humedad en suelos, Proctor estándar. Los resultados obtenidos para el ensayo Proctor mostrados en la Tabla 10, evidencian que los productos estabilizantes generan una disminución de la humedad óptima, excepto para el polímero que se mantuvo igual a la del suelo natural. Esta disminución en la humedad óptima entre el 1 y 2 % respecto a la muestra sin aditivo químico, se traduce en un ahorro del recurso hídrico en el momento de un proceso constructivo. Estos resultados ponen de manifiesto que los aditivos químicos mejoran las características de compactación en suelos arcillosos.

Resistencia a la compresión no confinada, RCS. Los resultados obtenidos para resistencia a la compresión presentados en la Fig. 2 muestran que,

inicialmente la adición de los productos químicos genera un aumento en la resistencia del suelo natural.

De acuerdo con los estadísticos de Kruskal-Wallis mostrados en la Tabla 11, y considerando un nivel de significancia $\alpha=0,05$, el uso de aditivos presenta aumentos significativos de la resistencia mecánica en cuatro de los productos evaluados: el aceite, el polímero, el cemento y la zeolita. Este aumento de resistencia es una respuesta muy favorable del suelo ante la presencia de estos aditivos químicos y se traduce en un mejor desempeño mecánico del material, lo que evidencia la viabilidad técnica de usar aditivos químicos, como soluciones sostenibles, para el mejoramiento del suelo [22]. Adicionalmente, se observa que, en general, los sistemas aditivados presentan un máximo de esta resistencia entre las 216 y 324 h de exposición a

intemperismo, después de lo cual se presenta una disminución de esta propiedad lo que evidencia una pérdida de propiedades del material debido al tiempo de envejecimiento.

Índice de plasticidad, IP. En los resultados presentados en la Fig. 3, se observa que, en general, los aditivos químicos evaluados generan una disminución en el índice de plasticidad del suelo natural para los diferentes tiempos de envejecimiento. De acuerdo con los estadísticos obtenidos mostrados en la Tabla 12, esta reducción resulta ser significativa para todos los productos excepto para la enzima y el silano; productos para los cuales las variables asociadas a la estabilidad al agua pueden resultar de mayor impacto para este tipo de aplicaciones.

Tabla 10. Resultados parámetros Proctor estándar
Fuente: elaboración propia.

Material	% Humedad Óptima	Peso Unitario Seco (kN/m ³)
Suelo Natural	22	16,0
Suelo + Aceite	21	16,2
Suelo + Polímero	22	15,9
Suelo + Enzima	20	16,0
Suelo + Silano	20	15,8
Suelo + Cal	22	15,4
Suelo + Cemento	20	16,0

Tabla 11. Estadísticos de Kruskal-Wallis para los resultados de resistencia a la compresión no confinada. Fuente: elaboración propia.

Material	Estadístico de Kruskal-Wallis
Suelo + Aceite	0,009
Suelo + Polímero	0,021
Suelo + Enzima	0,687
Suelo + Silano	0,298
Suelo + Cal	0,676
Suelo + Cemento	7.E-05
Suelo + Zeolita	8.E-08

Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado.
Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad

Tabla 12. Estadísticos de Kruskal-Wallis para los resultados de índice de plasticidad
Fuente: elaboración propia.

Material	Estadístico de Kruskal-Wallis
Suelo + Aceite	0,014
Suelo + Polímero	0,041
Suelo + Enzima	0,202
Suelo + Silano	0,115
Suelo + Cal	2.E-08
Suelo + Cemento	1.E-08
Suelo + Zeolita	3.E-09

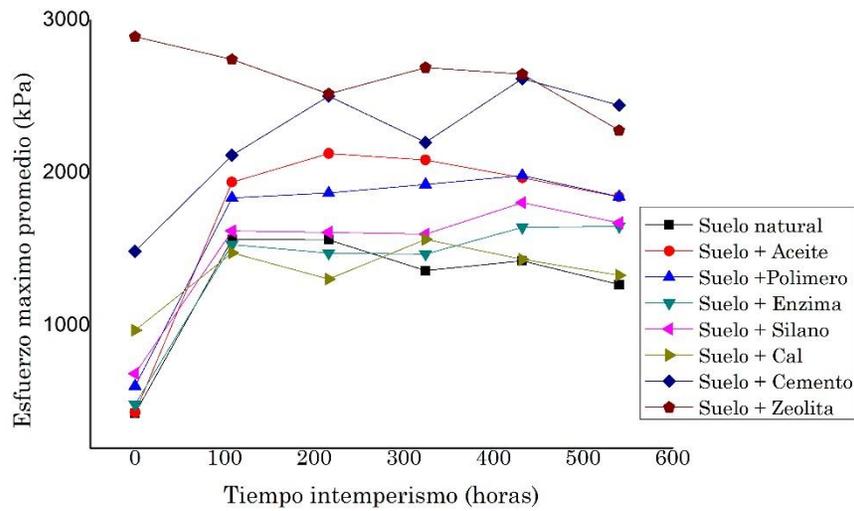


Fig. 2. Resultados de resistencia a la compresión no confinada. Fuente: elaboración propia.

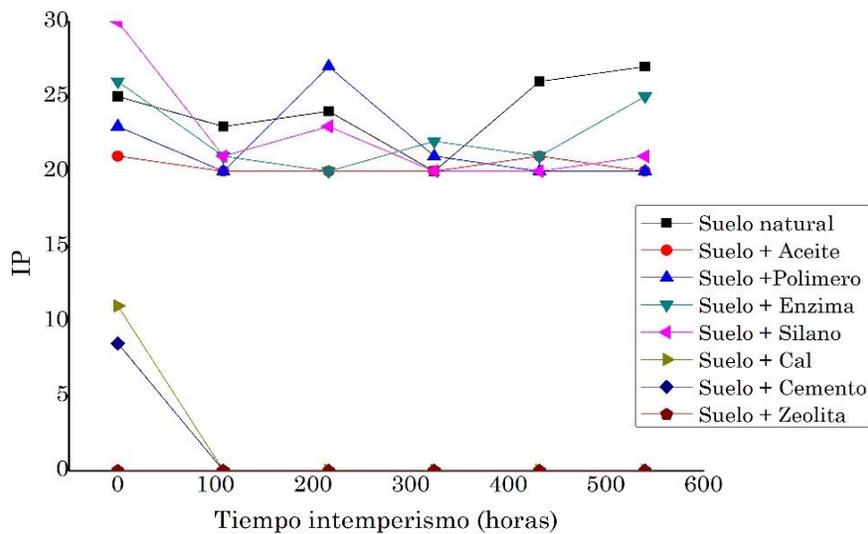


Fig. 3. Resultados del índice de plasticidad. Fuente: elaboración propia.

Para el caso de los sistemas aditivados con los productos cementantes (cal, cemento y zeolita) las diferencias muy significativas obtenidas en los resultados obedecen a que se presenta una anulación de este índice ya que los materiales aditivados con estos productos no presentan límite líquido, esto puede atribuirse a que los suelos arcillosos adquieren una naturaleza más granular al ser tratados con productos cementantes [23].

Potencial de Hidrógeno, pH.

En la Fig. 4, se presentan los resultados de las mediciones de pH del suelo en su estado natural y de los sistemas aditivados. Para el caso de los sistemas aditivados con cal, cemento y zeolita se presenta un pH básico que es significativamente mayor al del suelo natural. Según los resultados del estadístico de Kruskal-Wallis mostrados en la Tabla 13, este medio altamente alcalino generado favorece las reacciones puzolánicas [24], además de ser un comportamiento típico debido a la naturaleza fuertemente alcalina que tienen estos aditivos; sin embargo, estos sistemas tienden a la neutralidad a través del tiempo de envejecimiento [25]. Para el caso de los otros sistemas, las características ácidas del suelo natural se mantienen sin cambios significativos, más allá de una ligera tendencia a la generación de mayor

acidez, hecho atribuible al carácter ácido de los aditivos.

Conductividad. Los resultados obtenidos para la conductividad mostrados en la Fig. 5 y los estadísticos de Kruskal-Wallis, calculados para esta variable de respuesta de los sistemas aditivados respecto a los resultados del suelo natural, consignados en la Tabla 14, demuestran que para el caso de los productos cementantes (cal, cemento y zeolita) hay un aumento inicial significativo respecto al suelo natural. Sin embargo, estos valores tienden a disminuir y estabilizarse en el tiempo, comportamiento típico debido al desarrollo de reacciones puzolánicas [26].

Para los aditivos líquidos esta propiedad no presenta cambios apreciables o significativos de acuerdo con los estadísticos mostrados en la Tabla 14; sin embargo, en un análisis descriptivo se puede observar que los datos tienden a ser levemente menores que los del suelo natural para todos los tiempos de envejecimiento. Este comportamiento se debe a que estos aditivos generan una disminución de la actividad eléctrica de los iones que son característicos de las partículas que están presentes en suelos arcillosos, lo que se traduce en una disminución del potencial Z del sistema, lo cual conduce a una mayor estabilidad química del sistema [27].

Tabla 13. Estadísticos de Kruskal-Wallis para los resultados de pH
Fuente: elaboración propia.

Material	Estadístico de Kruskal-Wallis
Suelo + Aceite	0,496
Suelo + Polímero	0,809
Suelo + Enzima	0,209
Suelo + Silano	0,276
Suelo + Cal	4.E-05
Suelo + Cemento	2.E-04
Suelo + Zeolita	3.E-04

Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado.
Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad

Tabla 14. Estadísticos de Kruskal-Wallis para los resultados de conductividad
Fuente: elaboración propia.

Material	Estadístico de Kruskal-Wallis
Suelo + Aceite	0,548
Suelo + Polímero	0,330
Suelo + Enzima	0,526
Suelo + Silano	0,346
Suelo + Cal	2.E-04
Suelo + Cemento	2.E-04
Suelo + Zeolita	1.E-05

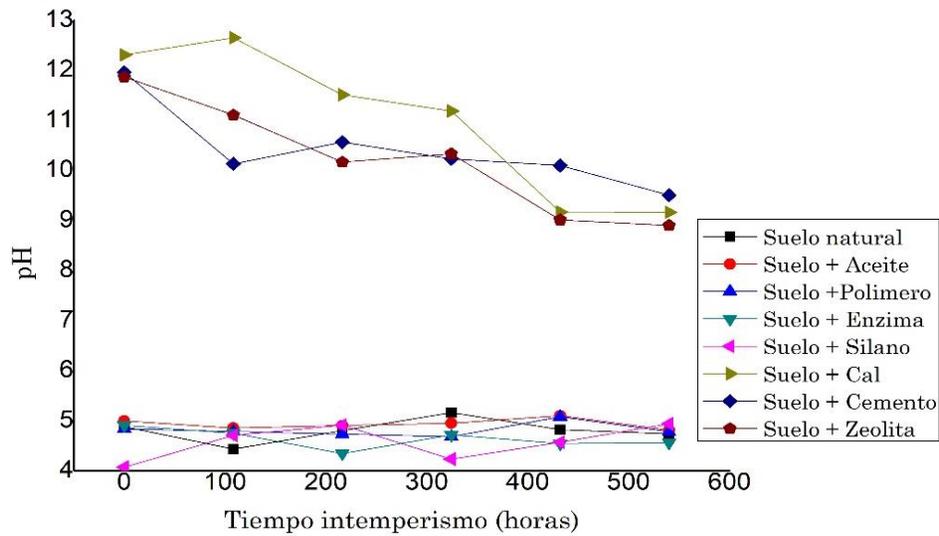


Fig. 4. Resultados de pH. Fuente: elaboración propia.

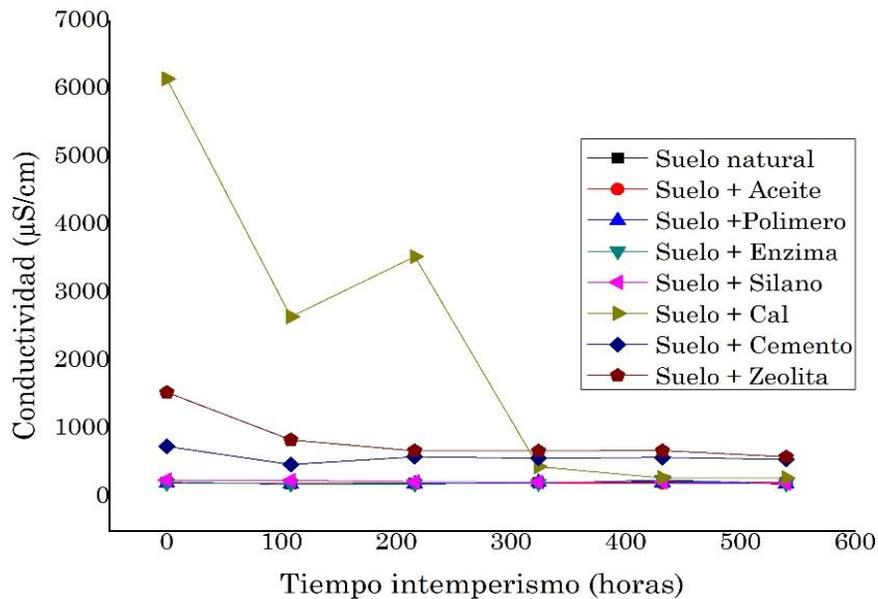


Fig. 5. Resultados de conductividad. Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación está asociada a la necesidad de profundizar en el conocimiento de los fenómenos tanto físicos como químicos presentes en los procesos de estabilización química; así como a la determinación de correlaciones existentes entre esta fenomenología, la durabilidad que pueden presentar tanto los productos estabilizantes como los sistemas aditivados y los impactos que su empleo genere sobre la biodiversidad.

Los materiales evaluados mostraron desempeños adecuados para objetivos de mejoramiento de propiedades ingenieriles del suelo, al presentar mayores resistencias mecánicas respecto al suelo natural, destacándose los productos de naturaleza puzolánica.

No es posible una comparación directa *per se* entre estabilizantes químicos, dado que los efectos sobre las propiedades de un suelo dependen tanto de la tipología del suelo como de la naturaleza química del estabilizante e, incluso, de las condiciones climáticas de la zona. En este sentido, en cualquier proyecto de ingeniería vial que incluya el mejoramiento de suelos por técnicas de estabilización química, es necesario identificar los parámetros que se requieren mejorar en el suelo, es decir, el objetivo de la estabilización para proceder a seleccionar el tipo de producto químico a usarse para un propósito particular.

Se observa que, al aplicar estos productos, el suelo conserva el aspecto del suelo natural, lo cual representa ventajas desde el punto de vista ambiental: menores impactos en la fauna y la flora aledañas a la vía, menores emisiones de material particulado y menores tasas de absorción de calor respecto a una estructura de pavimento tradicional.

La evaluación bajo condiciones de intemperismo acelerado permite estimar el desempeño a largo plazo y la vida útil de estos materiales; y evidenciar ventajas desde el punto de vista ambiental y de

conservación de la biodiversidad, por la mitigación de impactos como el efecto borde al disminuir condiciones de temperatura superficial en las carreteras.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia por el apoyo para el desarrollo de esta investigación.

6. CONFLICTOS DE INTERESES

Sin conflicto de intereses.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Behnood, "Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques," *Transp. Geotech.*, vol p 17, no. part A, pp. 14–32, Dec. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>
- [2] P. G. Nicholson, "Chapter 13 - Thermal Treatments," en *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, P. G. Nicholson, Ed. Estados Unidos: Elsevier, 2015, pp. 319–339.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408076-8.00013-3>
- [3] T. M. Petry; D. N. Little, "Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 6, pp. 447–460, Dec. 2002.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:6\(447\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(447))
- [4] A. Al-Khanbashi; M. El-Gamal, "Modification of sandy soil using water-borne polymer," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 88, no. 10, pp. 2484–2491, Jun. 2003.
<https://doi.org/10.1002/app.12066>
- [5] C. Zhou; S. Zhao; W. Huang; D. Li; Z. Liu, "Study on the Stabilization Mechanisms of Clayey Slope Surfaces Treated by Spraying with a New Soil Additive," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 6, p. 1245, Mar. 2019.
<https://doi.org/10.3390/app9061245>
- [6] S. Rezaeimalek; J. Huang; S. Bin-Shafique, "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand

- stabilization,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 210–220, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.093>
- [7] I. G. Panova; D. D. Khaydapova; L. O. Ilyasov; A. B. Umarova; A. A. Yaroslavov, “Polyelectrolyte complexes based on natural macromolecules for chemical sand/soil stabilization,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 590, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124504>
- [8] B. K. Cuipal Chávez, “Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas,” (Trabajo de grado), Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2018. [URL](#)
- [9] T. A. Khan; M. R. Taha, “Effect of Three Bioenzymes on Compaction, Consistency Limits, and Strength Characteristics of a Sedimentary Residual Soil,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–9, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/798965>
- [10] A. AbouKhadra; A. F. Zidan; Y. Gaber, “Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers,” *Cogent Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1517577>
- [11] S. S. Kushwaha; D. Kishan; M. S. Chauhan; S. Khetawath, “Stabilization of Red mud using eko soil enzyme for highway embankment,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, part. 3, pp. 20500–20512, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.427>
- [12] J. Pooni; F. Giustozzi; D. Robert; S. Setunge; B. O’donnell, “Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation,” *Transp. Geotech.*, vol. 21, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100255>
- [13] J. Camacho Tauta; Ó. J. Reyes Ortiz; C. Mayorga Antolínez, “Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado,” *Ing. y Desarro.*, no. 24, pp. 48–62, Jul. 2008. [URL](#)
- [14] A. Soltani; A. Deng; A. Taheri; M. Mirzababaei, “A sulphonated oil for stabilisation of expansive soils,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, no. 11, pp. 1285–1298, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1408270>
- [15] G. J. Colmenares Roldán, “Desarrollo de estabilizantes de suelos para la construcción de infraestructura vial a partir de subproductos de la explotación minera,” (Tesis de Maestría), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 2015. [URL](#)
- [16] L. D. Jerez; O. E. Gómez; C. A. Murillo, “Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane),” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 639–646, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.06.001>
- [17] C. C. Corzo Dardón, “Evaluación de las reacciones de hidratación y puzolánica del cemento portland con incorporación de puzolana natural y cal mediante termogravimetría y microscopía electrónica de barrido,” 2013. [URL](#)
- [18] O. J. Reyes Ortiz; J. F. Camacho Tauta, “Effect of ultraviolet radiation on an asphalt mixture’s mechanical and dynamic properties,” *Ing. e Investig.*, vol. 28, no. 3, pp. 22–27, Sep. 2008. [URL](#)
- [19] R. Paolini *et al.*, “Effects of soiling and weathering on the albedo of building envelope materials: Lessons learned from natural exposure in two European cities and tuning of a laboratory simulation practice,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 205, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110264>
- [20] S. G. Croll, “Reciprocity in weathering exposure and the kinetics of property degradation,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 127, pp. 140–150, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.10.003>
- [21] J. Andrade; V. Fernández-González; P. López-Mahía; S. Muniategui, “A low-cost system to simulate environmental microplastic weathering,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 149, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110663>
- [22] P. Jayanthi; D. N. Singh, “Utilization of Sustainable Materials for Soil Stabilization: State-of-the-Art,” *Advances in Civil Engineering Materials.*, vol. 5, no. 1, Feb. 2016, <https://doi.org/10.1520/ACEM20150013>
- [23] M. Al-Mukhtar; A. Lasledj; J.-F. Alcover, “Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 50, no. 2, pp. 191–198, Oct. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.023>
- [24] O. Amini; M. Ghasemi, “Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 223, pp. 409–420, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.011>
- [25] M. Taslimi Paein Afrakoti; A. Janalizadeh Choobbasti; M. Ghadakpour; S. Soleimani Kutanaei, “Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of

- the cement-treated sandy soil,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117848>
- [26] M. Salimi; A. Ghorbani, “Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 184, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105390>
- [27] H. Zhao; L. Ge; T. M. Petry; Y. Z. Sun, “Effects of chemical stabilizers on an expansive clay,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 18, pp. 109–1017, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>

8. CONTRIBUCION DE LOS AUTORES

-  ¹ Contribución en la conceptualización, diseño y desarrollo de la investigación y en la redacción del manuscrito
-  ² Contribución en la conceptualización, diseño y desarrollo de la investigación
-  ³ Contribución en la conceptualización y desarrollo de la investigación y en la revisión final del manuscrito.